口伝 — 人体寸法・形状・運動計測

第3回 人体運動計測 — その1 —

持 丸 正 明 *

1. 運動計測とは

運動計測とは、人間のからだの動きを時間軸上の座標データとして定量的に記録することです。しかし、からだの動きというのが、具体的に何を指しているのかはつきりしません。からだの動きが、空間での骨の6自由度の挙動を完全に記録することであるとすると、そのような計測が実現できていないのは明らかです。現在の技術で可能であるのは、人間のからだを、変形しない固まり(剛体節)が関節で繋がれているロボットのように見立てたとき、その剛体節の動きを記録することに相当します。このように、人間のからだをロボットのように見立てることを、剛体リンクモデル化と言います(図1)。

人体を剛体リンクモデルに見立てるには、(a) 体節の分割と、(b) 関節機構と自由度、を決めなければなりません。体節の分割とは、どこが固くて変形しない箇所、どこが関節であるかを決

定し、からだを剛体節に分けると言うことです。関節機構とは、関節の部分の構造モデルで、ピンジョイント(関節中心が並進移動しないで回転だけするような関節機構=股関節など)か、関節のすべりや並進を考慮する必要があるのかということです。このとき、関節の自由度も決めます。屈曲伸展の1自由度なのか、内外転も考慮するのか、回旋まで考えるのか、さらに、並進まで考えるのかというようなことです。いずれにしても、自分の問題を解決するのに十分な、できるだけ単純なモデルにするべきであり、むやみと体節を細かく刻んだり、関節の自由度を大きくするのは得策ではありません。

そして、これらの剛体リンクモデルに見立てられた、関節の時間軸上の座標データや剛体節の6自由度の挙動を記録するのが、運動計測と言うことになります。

2. 運動計測法

運動計測にはさまざまな技術・方法が使われています。まず、その方法を大別して説明します。

(1) 光学式標点計測法

もっとも一般的で、バイオメカニクス分野で広く利用されている方法です。人体の関節位置などにマーカを貼り、そのマーカの3次元位置をカメラで計測する方法です。複数台のカメラで、同時に、同一のマーカを、異なる方向から撮影することで、マーカの3次元位置を計算できます。いわゆる三角測量の原理です。計測精度は、理論的にはカメラの画素分解能と、カメラの光軸間角度で決まるのですが、実際には、その理論精度よりも優れた性能(3[m]の空間で数[mm]の精度)のシステムが多いです。これは、輝度情報やマーカの形状情報を使うことで、精度を向上しているからです。計測周波数も高く、最近では、リアルタイムでマーカの3次元座標を計算し、それぞれのマーカがどの関節に取り付けられたものであるかを認識して、コンピュータの画面に表示できるシステムもあります。システムが高額であること、計測対象空間よりも、さらに大きな実験空間を必要とすること、カメラから隠れる部位の計測ができないことの3点を除けば、総合的にもっとも優れた運動計測方法でしょう。マーカの貼り方を工夫すれば、体節の6自由度を計測することもできます。

市販システムの多くは、反射式のマーカを使用します。マーカを自動的に追跡して3次元位置を計算するソフトウェア、個々のマーカがどの関節に付けられたものかを自動認識するソ

図1 人体の剛体リンクモデル化

2002年8月27日受付

* 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究ラボ

〒135-0064 東京都江東区青海 2-41-6

Tel : 03-3599-8194 Fax : 03-5530-2066

E-mail : m-mochimaru@aist.go.jp

ソフトウェアを具備するシステムが多いようです。最近では、有線式の時分割発光マークを用いるシステムが出てきました。これは、反射マーク方式が主流になる前に使われていた方式なのですが、当時よりも撮像素子や画像処理技術が進んだため、より優れたシステムになっています。マークが時分割発光するため、マークの認識が確実です。多くのマークを狭い範囲に貼り付けるような対象(手の動作計測など)には便利です。

参考までに、反射マーク式の光学式運動計測システムには、Vicon Motion Systems, Motion Analysis Corp., BTS, Peak Performance Technologies Inc., (株)ディケイエイチ, Qualisys Medical AB などの製品があります。時分割発光式のものには、Phoenix Technologies Inc., PhaseSpace Inc. などの製品があります。

(2) 磁気センサ

バーチャルリアリティなどの分野では、光学式標点計測法よりも、磁気センサを用いる運動計測法が使われているようです。この方式は、計測空間に傾斜した静磁場を発生させ、その静磁場中に置かれたセンサユニットの位置と姿勢の6自由度を計測するものです。1つのセンサで6自由度の計測ができる点が特徴で、演算処理をほとんど必要としないため、リアルタイムの運動計測が可能です。光学式の計測システムに比べると、装置も低価格で、カメラの隠れの問題もありません。問題は、同時に計測できるセンサの数が少ないことと(16～32個)、計測対象空間の磁性体や誘電体の影響を受けやすいことです。特に、後者の問題は重要で、建物床下の鉄筋によって精度が大きく劣化することもあります。筆者らが使用したときには、実験空間を、木製の台座で、床から500[mm]以上持ち上げました。可能であれば、購入前に、一度借り出して、実際の実験室で精度検証してみる方がよいでしょう。そもそも、実験の目的から計測空間内に金属が多い場合(自動車のモックアップ内での動作計測など)には、あまり適切な計測方法とは言えません。製品としては、Polhemus Inc., Ascension Technology Corp. などのものがあります。

(3) 超音波センサ・ジャイロセンサ・加速度計

超音波でも位置を計測することができます。音の伝搬速度が分かっているので、超音波発信器が音を出してから、受信機が受信するまでの時間を計測することで、距離を知ることができます。受信器を3箇所に設定し、同一発信器からの距離を同時計測すれば、発信器の3次元位置が特定できることになります。この発信器を、1つの剛体に3つ取り付ければ、剛体の姿勢も計測できます。ただ、実際には、ジャイロセンサや加速度計と併用して姿勢を検出するものが多いようです。ジャイロセンサは、カメラの手ぶれ防止などに使われているものです。四角柱状の振動子に、圧電素子を取り付け、1方向に振動させたとき、この振動子に角速度が加わると、それが別の方向の振動として現れます。それを圧電素子で検出する仕組みです(図2)。角速度を検出しますから、これを積分して角度変化を得ることができます。ただし、急に大きな角度変化が起きると、角速度が

図2 振動式ジャイロセンサ

計測範囲外になり、計測しきれなくなります。それが積分誤差になって、角度がずれます。これをドリフトと呼びます。人間の動きは全般にはゆっくりしたものですが、時として非常に速く動くときがあります。通常のゆっくりした動きに対して感度を上げようとすると、速い動きに追従できないことになります。そこで、この角度ずれ(ドリフト)を保障するために加速度計を取り付けています。実際には、加速度を積分しているのではなく、重力方向の絶対的な方向を検出して、角度を補正しているようです。そのため、水平面内の角度だけは、ドリフトが解決できないことがあります。超音波を使っているため、カメラよりは遮蔽物に強いですが、ただし、遮蔽物が、発信器(人体に付ける方)の直上にあるときはだめです。製品としては、InterSense社などのものがあります。

3. 計測上の留意点

(1) 計測精度の確認

計測装置やシステムの仕様書に書いてある数字を鵜呑みにしてはいけません。そもそも、理論解像度や分解能を記載しているところもあれば、いわゆる誤差を記載している仕様書もあります。本来であれば、3次元座標の計測精度の国際標準にのっとって記載すべきなのですが、残念ながら、光学式位置計測装置の精度検定方法に関する国際標準はありません。そもそも、長さや位置の精度は、もっとも基本的なメートル標準(現在は、真空中の光の速さに基づく定義)まで辿ることができるか、で規定されています。トレーサビリティと言います。たとえば、人体寸法計測に用いたアントロポメータであれば、それは、より高精度の標準尺によって校正されていて、その標準尺は、さらに高精度の市販レーザ距離計によって校正され、市販レーザ距離計は、自国の計量標準研究所の高精度レーザ距離計で校正され... というものです。3次元位置計測装置としては、アーチ型

の CMM (Coordinate Measuring Machine: 人体形状計測 その 1, 図 5) のトレーサビリティが, ようやく国際標準となった段階であり, 光学式の位置計測システムについては, まだ, 検討も始まっていません。したがって, システムの性能を検定し表記する手段が確立していないのです。

そこで, 現実的には, ユーザ自身がチェックするしかありません。本当の意味での空間位置精度を検証するには, より高精度の信頼性の高い方法で, 空間においたマーカの値付けをする必要があります。一般ユーザにはとても無理です。そこで, 棒の両端にマーカをつけ, その相対的な長さ (2 点間距離) が, どの程度変化してしまうか, で評価するのが簡便です。これには, 臨床歩行分析研究会が, 数年おきに開催している「運動分析システム比較検討会」の方法¹⁾が参考になるでしょう (<http://www.ne.jp/asahi/gait/analysis/>)。なお, 運動分析システム比較検討会では, 実際に, 市販されている最新のシステムを一堂に集め, 共通のプロトコルで精度検証しています。検証結果は, 上記 WEB ページから見るができます。

(2) 床反力計との時空間同期

運動計測システムは, 力計測の機器と併せて利用することが多いです。運動学 (Kinematics) だけでなく, 運動力学 (Kinetics) を扱おうとすると, 力計測が必要になります。力計測装置には, いろいろなものがありますが, 人体運動の場合, 重力方向に体を支えている床面での反力を計測するケースが最も多くなります。それが床反力計です。床反力計の詳細については, 参考文献を参照ください^{2,4)}。ここでは, 床反力計を運動計測装置と併せて使う場合のノウハウについて述べることにします。

床反力計で計測できるのは, 人体と床反力計との間に働く力の 3 分力と, モーメント, そしてモーメントの釣り合い点 (床反力作用点位置 COP) です。大事なことは, これらのデータが, 運動データと同じ座標系で, 同じタイミングに計測されなければいけないということです。これを床反力計と運動計測システムの時空間同期と言います。運動計測システムが納品され, セットアップされたからと言って安心してはいけません。そもそも, 床反力計を扱っている会社と運動計測システムを扱っている会社が異なるわけで, 接続や設定に関するトラブルやミスは枚挙にいとまがありません。とにかく, 使用者自身で確認することが大事です。

まず, 簡単にできることは, 床反力計の上に立って, 静荷重を計測することです。計測された荷重が自分の体重と大きく異なっているようであれば, 荷重係数などの設定が間違っている可能性があります。床反力計が複数枚ある場合は, それぞれの上に乘って計測してみます。自分が乗っていない床反力計に荷重が現れている場合は, 複数の床反力計の隙間にゴミや小石などが挟まって, 床反力計が独立して働かなくなっていることも考えられます。隙間に薄い板を突き通してみてください。

次に, 棒の先端に運動計測用のマーカを取り付け, 床反力計の外に立って, 床反力計を棒で押します。このとき, 棒で押された点が, 床反力作用点になります。計測された作用点位置座標と, 運動計測システムで検出したマーカ座標が, 30mm 以上

ずれているようなら, これも異常です。1 箇所だけでなく, 数カ所を押してみてください。もちろん, 床反力計が複数枚ある場合は, それぞれについて押してみることが必要です。ずれが認められた場合には, 床反力計側の設定・接続の確認, 運動計測システムの座標系設定の確認をしてください。

(3) 着衣

被験者にどのような服装をさせればよいか。運動計測の実験者が悩む点です。一般的には, マーカを貼り付ける部位の皮膚が露出し, 皮膚に直接マーカを貼り付けられるような軽装がよいということになります。とは言っても, そうなると, 股関節にマーカを貼り付けるには, そうとうに股ぐりの深い競泳水着のようなものを着用させることになり, 被験者に嫌がられます。そこで, もう少し肌が見えるような着衣が現実的です。肌を隠すとしても, 体に密着するものでないと, 着衣に貼り付けたマーカが人体運動と無関係にフラフラと揺れてしまいます。伸縮性が高く, それほど体を締めつけずに, 体に密着する着衣でなければいけません。たとえば, フィットネス用のハーフタイツとか, 最近では水着でも体にフィットして丈の長いもの (膝上とかくるぶしまであるもの) などが良いようです。

でも, これらの着衣に着替えて貰うのも困難な場合があります。その場合は, 被験者にできるだけ伸縮性のある着衣で参加して貰うこと (Gパンは不適), だぶだぶとした部分はゴムバンドなどで押さえること。

(4) マーカの貼付け

運動データを個人間で比較するためには, マーカを解剖学的に正しい位置に貼り付ける必要があります。このためには, 解剖学的特徴点を触察が必要になります。光学式運動計測システムの計測精度は, 非常によいものになりましたが, 肝心のマーカの貼付けが正しい加減では, 意味がありません。計測システム自体が, 3 m の計測空間で 1 mm 程度の位置精度を実現しているわけですから, 計測者もそれに劣らぬ程度の再現性で, 解剖学的特徴点位置を同定するよう努力すべきです。詳細については, 「口伝一人体寸法・形状・運動計測」の人体寸法計測編 その 1, その 2 を参照ください。主として下肢運動の計測に必要な解剖学的特徴点位置の見つけ方のコツが記載されています。通常は, 転子点にマーカを貼って股関節とし, 外側上顆最突点を膝関節, 外果最突点を足関節, 腓側中足点を MP 関節とします。

(5) 関節中心位置の推定

これらの解剖学的特徴点位置は, あくまでも体表面上の点であり, 関節中心ではありません。体表面上のマーカ位置から, どのようにして関節中心を計算するかについては, いくつかの方法が提案されています。その多くは, 関節部の解剖学的・幾何学的モデルを構築し, 統計情報に基づいてモデルの形状や寸法を個人に対応させるものです。Davis⁵⁾, Vaughan⁶⁾の方法が有名です。また, Helen Hayes Hospital で開発された Helen Hayes Markerset と呼ばれる関節中心推定方法 (図 3)⁷⁾も, いくつかの

図3 Helen Hayes マーカセット

図4 DIFF マーカセット

光学式運動計測システムで採用されています。臨床歩行分析研究会が提唱する運動データファイルの互換フォーマット DIFF においても、関節中心位置の推定方法が提案されています(図4)⁸⁾。これらの方法によって推定された関節中心位置が、どの程度確からしいかについて、倉林らが検証した研究⁹⁾があります。MR 画像を使って股関節中心の真値を求め、上記の関節中心推定方法の推定精度を検証したものです。結果的には、もっとも単純な幾何モデルに基づく DIFF の方式が、良いパフォーマンスを示すとされています。複雑な幾何モデルを用いる場合、そのモデルの形状パラメータを統計的に推定する部分で誤差が重畳してしまい、最終的な精度が悪くなる傾向があるようです。統計的な推定式が、欧米人体型に最適化されていることも原因のひとつでしょう。

実際に運動計測システムで得られるデータは、マーカの3次元座標位置です。このデータから、上記のような推定式で関節中心を推定することになります。コンピュータプログラムを組めるエンジニアにとっては、さしたる問題ではありません。プログラミングの敷居が高いという人には、たとえば、Vicon Motion Systems の Body Builder というソフトウェアなどが便利です。このソフトウェアは、簡易プログラム機能を持っていて(C/C++でプログラムを組むよりずっと簡単です)、相対的に動かない3つのマーカでマーカセットを構成し、そのマーカセット座標系の6自由度(位置と姿勢)を計算したり、さらに、マーカセット座標系と相対的に位置関係が変化しない仮想点を計算できます。

参考文献

- 1) Ehara, Y., Fujimoto, H., Miyazaki, S., Mochimaru, M., Tanaka, S. et. al: Comparison of the performance of 3D camera systems II, *Gait and Posture*, 5, 251-255 (1997).
- 2) 窪田俊夫, 山崎信寿: 歩行分析データ活用マニュアルー床反力編ー, てらぺいあ(1994).
- 3) 臨床歩行分析研究会: 関節モーメントによる歩行分析, 医歯薬出版株式会社(1997).
- 4) 高橋正明, 山本澄子: 理学療法 MOOK6 運動分析, 三輪書店(2000).
- 5) Davis, R. B., Ounpuu, S., Tybruski, D., Gage, J. R.: A gait analysis data collection and reduction technique, *Human Movement Science*, 10, 575-587 (1991).
- 6) Vaughan, C. L., Davis, R. B., O'Conners, J. C.: Dynamics of human gait, 15-43, Human Kinetics Publisher(1992).
- 7) Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E.: Measurement of Lower Extremity Kinematics During Level Walking, *Journal of Orthopaedic Research*, 8, 383-392 (1990).
- 8) 臨床歩行分析研究会: DIFF 解説書 歩行データ・インターフェイス・ファイル活用マニュアル 歩行データフォーマット標準化改訂版, 41-43 (1992).
- 9) 倉林準, 持丸正明, 河内まき子: 股関節中心推定方法の比較・検討, バイオメカニズム学会誌, 印刷中 (2002).