1 1 4 人体部分別の質量同定

Mass identification of part of the human body

○ 学 陰山卓宏 (高知工大院)
学 大畑彰吾 (高知工大)

正 井上喜雄 (高知工大)
正 芝田京子 (高知工大)

Takahiro KAGEYAMA, Kochi Univ. of Tech., Tosayamada-cho, Kochi, 782-8502 Japan
Yoshiho INOUE, Kochi Univ. of Tech.
Kyoko SHIBATA, Kochi Univ. of Tech.
Syogo OHATA, Kochi Univ. of Tech.

Key Word: Joint moment, Inverse dynamics, Three-dimensional motion analysis camera, Force plate, Multiple regression analysis

1. まえがき

人間の歩行や運動時に、各関節に働くモーメントすなわち関節モーメントを計測することは、リハビリテーションやスポーツの分野では非常に有用な手段となっている。さらに、関節モーメントから、筋骨格モデルを用いて筋張力を推定する方法も広がりつつある。このような方法を使用する場合には、体の各部に働く床反力、重力、慣性力を用いて力のつりあいから関節モーメントを計算する逆動力学が用いられる。そのような計算では、各部の質量、慣性モーメントおよび加速度、角加速度が必要である。加速度、角加速度は計測することができるが、人間の各部の質量は、個人ごとに計測できないので、一般的に統計的なデータで代用されている。本来は個人ごとに異なる質量を用いるべきであるので、統計的なものを用いれば誤差の原因となると考えられる。

そこで、本研究では、個人ごとの各部の質量、重心、慣性モーメントを計測する方法を考える。ここでは、その第一歩として、床反力計と3次元動作解析装置を用いて各部の質量と重心を推定する方法をとりあげる。まず、方法の概略や理論について示した後、数値シミュレーションにより提案する方法の妥当性について検討する。さらに、重回帰分析の問題点である多重共線性が、推定精度にどのように影響するかについて検討する。

2. 同定手法の概略

被験者の姿勢が変化すれば、それに応じて床反力の荷重位置が変化することを利用する。具体的には、被験者が図1のように床反力計の上に乗る、加速度が重力加速度に比べて十分小さくなるように体をゆっくり動かし、その時の体の各部分の運動を3次元動作解析装置などで計測し、同時に床反力計により計測する。

床反力計では、上下方向の力と荷重点の位置(2次元)が計測できればよい。姿勢が変化すれば、トータルの重心位置(あるいはモーメント反力)が変化する。静的とみなせる運動であれば、荷重点と重心の2次元での位置は一致するので、床反力計から重心位置がわかることになる。

一方、3次元動作解析装置によって得られる姿勢と個々の部材の質量、重心が与えられれば、全体重心は計算により得られる。

いろいろな姿勢でのデータをとった場合、2つの方法による重心

は、個々の部材の質量と重心位置が正しければ一致するはずである。そこで、いろいろな姿勢でのデータを取り、2つの方法による重心位置が一致するように、すなわち誤差が最小になるように各部の質量を同定するという考えた方である。

具体的には、床反力計から得られる圧力中心あるいはそれと等価なモーメント反力と3次元動作解析装置から得られる各部の3次元座標を用いて式(1)が成り立つ。

$$M/g = b + \sum_{i=1}^4 m_i x_i \quad (1)$$

この式に重回帰分析を行い、各部の質量および重心を同定する。

Fig.1 Motion analysis and reaction force

3. 数値シミュレーションによる提案法の妥当性検討

式(1)を用いて、重回帰分析を適用してもよいが、 M , $x_1 \sim x_4$ の初期状態からの変化分を、それぞれ、 ΔM , $\Delta x_1 \sim \Delta x_4$ とすれば、式(1)は

$$\Delta M/g = \sum_{i=1}^4 m_i \Delta x_i \quad (2)$$

となるので、数値シミュレーションでは上式で実施する。

Fig.2 Simulation model

図2のような系のモデルがある場合について、その質量 m_{12} 、 m_{34} および左端から重心までの距離 l_{1G} 、 l_{2G} を直接推定するかわりに、いったんマーカ位置に存在する静的には等価な質量 $m_1 \sim m_4$ を推定し、その結果から、質量 m_{12} 、 m_{34} および左端から重心までの距離 l_{1G} 、 l_{2G} を推定することを考えているので、数値シミュレーションでは、まず、 θ_1 、 θ_2 を動かし、各姿勢における ΔM 、 $\Delta x_1 \sim \Delta x_4$ を計算より求める。

次に、それらを計測値とみなし、それらを用いているような姿勢における ΔM 、 $\Delta x_1 \sim \Delta x_4$ に重回帰分析適用して $m_1 \sim m_4$ を推定する。得られた推定値 $\tilde{m}_1 \sim \tilde{m}_4$ から各部材の質量および重心位置を求める。具体的には $\tilde{m}_{12}$ 、 $\tilde{l}_{1G}$ は

$$\tilde{m}_{12} = \tilde{m}_1 + \tilde{m}_2 \quad (3)$$

$$\tilde{l}_{1G} = \frac{\tilde{m}_1 l_{11} + \tilde{m}_2 l_{12}}{\tilde{m}_{12}} \quad (4)$$

により計算し、 $\tilde{m}_{34}$ 、 $\tilde{l}_{2G}$ についても同様の方法で計算する。それらの結果、および、あらかじめ与えたデータとを比較した結果を表1に示す。両者はよく一致しており、提案する手法の考え方が妥当であることが確認できた。

Table 1 Results of identification

	Estimate value	real value	error
m_{12} [kg]	1.1	1.1	6.64E-10
m_{34} [kg]	1.5	1.5	2.62E-10
l_{1G} [m]	0.269	0.269	6.07E-11
l_{2G} [m]	0.264	0.264	3.89E-11

4. 計測誤差の精度への影響と多重共線性

計測値である ΔM 、 Δx_i に誤差が存在する場合に、その結果が重回帰分析による推定精度にどのように影響するかについて数値シミュレーションにより検討する。

まず、図2のような系のモデルがある場合について θ_1 、 θ_2 を動かし、各姿勢における ΔM 、 Δx_i を計算より求める。

計測誤差に相当する入力誤差は、乱数表を用いてランダムな誤差として ΔM 、 $\Delta x_1 \sim \Delta x_4$ に、それぞれ最大 $\pm 10\%$ 与えた。重回帰分析を適用して得られた m_{12} 、 m_{34} の推定結果を誤差がない場合の推定結果と比較してその差をパーセンテージで示している。

図3は θ_1 を $-1^\circ/s$ 、 θ_2 を $2^\circ/s$ 動かししたもの（動作1）と、 θ_1 を $-1^\circ/s$ 、 θ_2 を $7^\circ/s$ 動かししたもの（動作2）結果であり、横軸に計測値の誤差、縦軸に m_{12} 、 m_{34} の推定結果の誤差を示したものである。動作2では入力誤差 $\pm 10\%$ に対して結果誤差が $\pm 10\%$ 程度に収まっているのが分かる。一方、動作1では入力誤差に対して結果誤差が非常に大きくなっている。この図から、モデルの動かし方によって推定結果の誤差が大きく異なってくる事が分かる。この理由としては、動作1の場合、多重共線性が起こっている可能性があると言える。

多重共線性とは重回帰式の独立変数(式(2)で言う Δx_i 間)に強い

相関が生じている場合に起こるもので、このとき重回帰分析の解析が不可能となってしまう。たとえ結果が求めたととしても、その信頼性は低い。

多重共線性の検出には分散拡大要因(VIF)を用いる方法がある。VIFは式(5)から求められ、相関係数Rは独立変数から計算できる。

$$VIF_{x1x2} = 1/(1 - R_{x1x2}^2) \quad (5)$$

一般的にこのVIFの値が10以上の場合、多重共線性が発生している可能性があり、一つの目安になると考えられる。

以上のことから動作2の場合、 Δx_i 間のVIF値は10以下であり、このときの推定値は計測誤差があつたとしても、ある程度の精度を確保できる。動作1の場合の Δx_i 間のVIF値が10以上の値が発生していたため、計測誤差が大きくなるほど推定結果の精度が、大きく低下していくことが分かった。

Fig.3 error examination graph

5. まとめ

逆動力学を用いて被験者の関節モーメントを推定する場合に用いる被験者自身の各部の質量および重心を推定する方法として、床反力計と3次元動作解析装置による計測結果に重回帰分析を適用する方法を提案し、提案する手法の妥当性について簡単なモデルを用いた数値シミュレーションにより検討した結果以下の結論を得た。

- (1) 簡単な2リンク系について、それぞれのリンクの質量および重心位置を2つの質量で表現できる場合について、数値シミュレーションにより得られた計測結果に相当するデータに重回帰分析を適用した結果、計測誤差がなければ、各部の質量、および重心位置は、高精度で同定できることを示した。
- (2) 推定結果の精度を左右する要因として多重共線性について考察した結果、多重共線性を起こさなければ、ある程度の計測誤差が発生しても、推定結果の精度は大きく下がることはない。多重共線性を起こさない方法としては、独立変数である各マーカの位置を独立した動きを行う必要があるが、人体の構造上、マーカの位置を動かすには制限が掛かってしまい独立した動きを行うのは難しい。そのため測定する場所の動かし方を考察する必要がある。