測量手法を用いた空間位置計測装置の信頼性と妥当性

Validity and Reliability of a Spatial Position Measuring System Utilizing Surveying Techniques

郭 丹¹⁾ 丸山 仁司²⁾

DAN GUO¹⁾, HITOSHI MARUYAMA, RPT, PhD²⁾

¹⁾ Department of Physical Therapy, Nihon Rehabilitation College, 3-6 Takada, Toshima-ku, Tokyo 171-0033, Japan. TEL +81 3-5954-6511

²⁾ Physical Therapy Section, Health Sciences Program, Health and Welfare Sciences Course, Graduate School of International University of Health and Welfare

Rigakuryoho Kagaku 23(1): 121-124, 2008. Submitted Aug. 13, 2007. Accepted Sep. 15, 2007.

ABSTRACT: Utilizing the triangulation principle of general surveying methods we developed a system for measuring the spatial position of solid objects with 3D co-ordinates and investigated its reliability and validity. For the reliability, we assessed measurement of a plastic triangle by 10 examiners. The validity was assessed by comparison with a 3D motion analysis system. The examiners' intraclass correlation coefficient was 0.97, and their intraclass correlation coefficient for three repeated measurements was 0.93. The measurement error in comparison with the 3D motion analysis system was within 1 mm. By these results, we consider the validity and reliability of the spatial position measuring system was demonstrated, and we think it can be used effectively, especially as a local motion analyzer.

Key words: three-dimensional coordinates, geometric calculation, anthropometric measurement

要旨: 一般的測量手法の中の三角測量の原理を用いて、物体の空間位置（3次元座標）を測定する装置を開発し、その信頼性および妥当性を検討した。信頼性は、三角定規を空間に設置し、それを10名の検者で計測し評価した。妥当性は、3次元動作解析装置の計測値と比較することで評価した。結果、検者間級内相関係数は0.97、3回の繰り返し計測の検者内級内相関係数は0.93であった。また、3次元動作解析装置との比較では、その誤差は1 mm以内であった。これらより、開発した空間位置計測装置の信頼性と妥当性が示され、特に局所的な動作分析装置として有効に使用できるものと考えた。

キーワード: 3次元座標, 幾何学計算, 身体計測

¹⁾ 日本リハビリテーション専門学校 理学療法学科: 東京都豊島区高田3-6 (〒171-0033) TEL 03-5954-6511

²⁾ 国際医療福祉大学大学院

I. はじめに

理学療法士が臨床で行う動作分析にはいくつかの手法が存在する。観察や触診による記録を基にする手法はモトスコーピー (motoscopy) とよばれる¹⁾。この手法は、運動の過程をいくつかの相に区分し、相ごとに主要な身体の大関節の運動を文章や画線によって表現する方法である。その利点には、効果的で場所を限定しない、観察のみでコストがかからないことなどである。反面、観察者間の誤差が大きい、主観的な解釈に依存するなどの欠点もあげられる。一方、映像やビデオテープレコーダ等を利用した計測はモトグラフィー (motography) とよばれる¹⁾。この手法では、移動動作を連続撮影し観察測定することにより、全体像を失わずに、身体各部位の変化の客観的なデジタル表現が可能である。ただし、操作が煩雑で、機器が高価であること等が欠点となる。3次元動作解析装置による動作分析は、身体運動中の各関節の動きや発揮された力を分析するのに優れている。複数のカメラから捉えたマーカの2次元座標を3次元的に合成し、その3次元座標値から関節中心の位置や体節の動きなどを計算により求めることができる。この手法の欠点は、機器が非常に高価であること、測定場所が限定されること等である²⁾。柊ら³⁾は、角速度センサを身体のポイントに貼り、身体運動の時間あたりの移動角速度を計測した。その計測値を微積分処理することにより、角加速度、移動角度を算出し動作分析を試みた。この手法では、3次元動作解析装置を用いるよりも計測場所の制限が少なく臨床的であるが、測定センサが皮膚の上に貼り付けられているため、骨指標との間に誤差が生じることがしばしば見られる。

今回、空間内のポイントを計測するための機器を自作した。ポイントの変位距離を測定し、三角測量の原理、三角関数を用いた計算により、ポイントの3次元空間座標値を算出した。今研究では、これらの計測手法を提示するとともに、その計測の信頼性と妥当性を検証することを目的とした。

II. 方法と測定原理

1. 空間位置計測装置と計測方法

空間位置測定装置は基準棒 (500 mm) と1本の測定棒 (1,500 mm, mm単位の日盛り付き) および垂直棒 (1,500 mm, mm単位の日盛り付き) で構成される。

基準棒を対象物の手前に水平固定し (水準器を用いて正確に)、その高さ(z)を計測する。被測定点より基準

図1 空間位置計測の概念図 (x, y座標)

棒の1端を通るように測定棒を伸ばし、その末端に接するように垂直棒を垂直に立てる。被測定点から基準棒の一端までの距離(b)および垂直棒に接した高さ(h)を計測する。この計測を基準棒のもう1端でも同様に計測行う (図1, 2)。

2. 座標計算方法

空間位置の座標は水平面上の2次元座標(X, Y)と矢状面上での高さ(Z)の合成として3次元で表現される。基準棒の中央点を空間座標系の基準点(0, 0, 0)とする。被測定点の座標値の計測方法について以下に説明する。

図1において、辺aは基準線の長さであり、b₁, b₂は測定した長さである。三角形の余弦定理により、

$$\cos \alpha = \frac{b_1^2 + a^2 - b_2^2}{2 \cdot b_1 \cdot a}$$

であり、 $x_1 = b_1 \cdot \cos \alpha$ より、 x_1 の値を得ることができる。

被測定点のx座標値Xは、

$$X = -\frac{a}{2} + x_1 \quad \text{となる。}$$

また、被測定点を頂点とする三角形において、基準線に下ろした垂線の長さy₁は、

$$y_1 = b_1 \sin \alpha \quad \text{である。}$$

図2において、垂直棒で測定した測定棒末端の高さはh₁, h₂であり、これらから基準線の高さh₀を減じてd₁およびd₂を得る。測定棒の全長をlとすると、 $c_1 = l - b_1$, c_2

図2 空間位置測定の計算図 (zの計算)

図3 空間位置測定の計算図 (y座標値Yの計算)

$= l - b_2$ である。また、基準点高さと被測定点高さとの垂直距離を z_1, z_2 とすると

$d_1 = c_1 \sin \beta, z_1 = b_1 \sin \beta$ より,

$$z_1 = \frac{b_1 \times d_1}{c_1}$$

$$z_2 = \frac{b_2 \times d_2}{c_2}$$

となる。被測定点のz座標値Zは z_1, z_2 の平均値をとる。このとき、符号は d_1, d_2 の符号の逆とする。

図3において、 y_1 とzは既に求められているので、 $\sin \gamma = z / y_1$ より γ を求め、 $y = y_1 \cos \gamma$ により、水平面 (x-y 平面) 上のy座標値Yが得られる (三平方の定理によりYを計算してもよい)。以上の手順で測定点の空間座標値 (X, Y, Z) が算出できる。

3. 信頼性の検討

文具として市販されている45度タイプの三角定規 (底辺300 mm, 底角45度) を空間にセットし、底辺が完璧な水平となるように水準器を用いて計測空間の前額面上に固定した。三角定規の頂点より垂直線を下ろし、底辺との交点および各々3つの角の空間座標を測定した。計測値をもとに、3つの辺長、高さ、底角角度、矢状面から見た傾きを算出した。計測者は10人とした。

4. 妥当性の検討

比較対象機器としてVicon (Vicon社製, MX40) を使用した。3.と同様に三角定規をセットし、その位置を基準 (0度) とした。三角定規を前額面上で60, 45, 30度の3種類に変位させ、それぞれの状態で計測を行った。

表1 Viconとの比較結果(度)

設定度数	矢状面				前額面			水平面	
	0	30	45	60	30	45	60	30	45
空間位置測定装置	0.3	29.2	44.4	59.9	32.2	46.6	64.3	30.1	48.0
Vicon	0.0	30.2	44.5	59.8	30.9	45.4	61.2	31.8	48.6
誤差	0.3	1.0	0.1	0.1	1.3	1.2	3.1	1.7	0.6

同様に矢状面上で60, 45, 30度の3種類に変位させた位置, および, 水平面に対して45, 30度の2種類に変位させた状態で計測した。併せて, 各面から見た0度の状態も計測した。計測ポイントは, 頂点より底辺に下ろした垂線と底辺の交点, および, 3つの角の位置とした。

III. 結 果

三角定規の本来の各辺は, 斜辺長はそれぞれ212.1 mm, 底辺長は300.0 mm, 高さは150.0 mm, 底角角度は45度であった(二等辺三角形)。開発した装置での計測結果は, 斜辺長210.0 mm, 底辺長300.2 mm, 高さ150.3 mmであった。したがって, 斜辺長の誤差は2.1 mm, 底辺長の誤差は0.2 mm, 高さの誤差は0.3 mmとなった。底角角度は左右45.1度と45.5度の計測値であり, その誤差は0.1度と0.5度であった。前額面に垂直(0度)に立てた三角定規を矢状面から見た傾きの計測値は0.6度であり, 誤差は0.6度であった。

10人の計測者による計測信頼性は, 検者間級内相関係数(ICC)は0.97となった。1人の計測者が日を変えて3回計測した検者内級内相関係数(ICC)は0.93であった。

Vicon200回計測の平均値との比較による妥当性の検証結果は表1に示す。両者の計測値の相関は $r^2=0.95$ であった。

IV. 考 察

測量学的手法を用いて, 物体の3次元空間座標を求めることができた。2つのポイントの座標値より, 物体の前額面, 水平面, 矢状面上での状態(傾き)を算出することもできた, 簡単な装置と測量手法により, 手動計測であるが, 計算も汎用的なEXCELソフトで可能となる。この性質を応用として, 身体の局所に2つの測定点を設定すれば, 前額面, 矢状面上の動きを, 3つの測定点を

設定すれば前額面, 水平面, 矢状面上の動きを分析することが出来ると判断する。臨床では可動域測定を行なう際, ゴニオメータ, デジタル傾斜計, ポテンションメータによる電子角度計がよく使われているが, しかし, これらの測定結果は平面上の動きを測定でき, 立体的な動きの測定が不可能である, 人体では多軸的な動きを平面上での分析が対応しがたいのが現状である。

今回は1 mm単位のスケールを用いて手動で測定を行ったが, その読み値の実長を基準とする誤差率は0.01%以下であり, 作成した装置の計測精度は高いものと判断した。角度の計測では, 誤差は1度以内であり, 理学療法臨床で用いられている角度計(ゴニオメータ)を使用した計測よりも精度が高いものと判断した。水準器で水平設定した三角定規の計測誤差も1度以内であった。また, Viconとの計測値の比較でも遜色のない結果が得られ, 本装置の妥当性は高いものと考えた。さらに, 繰り返し計測による検者内級内相関係数, 検者間級内相関係数よりその信頼性も高いものと判断し, 臨床での応用が期待できると判断する。

使用した計測装置は既述の通り安価な部品で構成されているため, 臨床でも十分に応用できると考える。また, 測定点に直接装置をに当て測定するより, 骨指標を確認しながら計測が可能である。張付したマーカ等の位置測定で問題となる軟部組織による測定点のズレを回避することができ, 局所的な計測分析にも本方法が応用できるものと期待できる。

引用文献

- 1) 中村隆一, 斉藤 宏, 長崎 浩: 臨床運動学 第3版, 医歯薬出版, 東京, 2002, pp32-35.
- 2) 臨床歩行分析研究会(編): 関節モーメントによる歩行分析 第1版, 医歯薬出版, 東京, 2004, pp199-201.
- 3) 終 幸伸, 加藤宗規, 佐藤 仁: 3軸角速度センサを用いた動作分析の試み. 理学療法科学, 2005, 20(2): 93-98.
- 4) 佐藤敏明: 図解雑学 三角関数. ナツメ社, 東京, 2005, pp44-95.