各種構え姿勢分析に基づく下肢の運動設計手法

篠崎 裕毅（慶應義塾大学大学院理工学研究科）　森田 ゆい（NPO法人日本伝統芸能教育普及協会）
森田 寿郎（慶應義塾大学理工学部機械工学科）

Design Method of Lower Limb Exercise Properties Based on Basic Dynamic Position Analysis

Hiroki SHINOZAKI (Graduate School of Science and Engineering, Keio University)
Yui MORITA (NPO Association for Education of Japanese Traditional Performing Arts)
Toshio MORITA (Department of Mechanical Engineering, Keio University)

Abstract

It was commonly believed that a basic dynamic position, namely form, was the most suitable position to exert high kinematical performance for each purpose. In robotics, it was also thought that analyzing the basic dynamic positions contributed to the design procedure. However, little has been reported on the design procedure in basic dynamic positions.

Therefore, the first purpose of this study was to compare and analyze the basic dynamic position of the lower limbs in Japanese traditional dances, martial arts and athletics by using physical common indexes. The second purpose of this study was to visualize the design procedure in basic dynamic positions.

The devised indexes were the following: fall outbreak acceleration by disturbance, vibration period, degree of joint torque for supporting body position, manipulability, manipulability measure, and horizontal direction acceleration by the gravity of the synthetic center of gravity. These common indexes were non-dimensionalized by the maximum of each common index that the body of each subject could take, and these non-dimensionalized indexes were employed. We determined the basic dynamic positions, and then analyzed a value of the indexes by using cluster analysis.

As a result, motion strategies of basic dynamic positions described for references in each kind of exercise coincided with a feature of common indexes. Furthermore, the result of cluster analysis in a basic dynamic position coincided with the result of an ISM analysis in the aim for structuring the relations between the common indexes, which led to the validity verification of the indexes and the visualization of the structure.

Key Words：Body position, Structural modeling, Posture analysis, Evaluation index, Motion generation

1．序論

舞踊、武術、運動競技などの身体運動において、多くの場合で規範となる姿勢である「型」が定められている。そして、それぞれの「型」に則ることでその運動において、より高いパフォーマンスを得られると考えられている。この「型」について、舞踊では「無意識に行っている身体の動きとは全く異なる次元のも

の」（山本, 2002：27-30）、武術では「日常動作するものとは全く異質である術の世界における動き」（黒田, 1991：27-56）という記述がある。つまり、「型」とは各種目において従うべき基本姿勢や基本動作の様式と捉えることが可能であると考えられる。

現在、「型」の研究は、伝統芸能のデジタルアーカイビング（Hachimura, 2006：51-66）や熟練者の特徴の解析（百鬼ほか, 1991：69-76）を目的として舞踊、武術、運動競技の各分野において独自に深く研究されている。またロボット工学の領域においても、基本姿勢や基本動作を分析し、運動生成に用いる研究が行われている。そこでは身体の姿勢がもたらす機械効率や運動性能の高さを表現する尺度となる評価指標を明らかにすることが目標とされるが、複数の評価指標を満足する運動をどのような手法を用いれば生み出すことが出来るかという点においては、未だ確定した手法が見当たらない。

ヒトの様々な運動の「型」については種目別に条件を限定して深い議論を行う分析的な研究が多く行われている。しかし、これに対して種目にとらわれずに適用可能であり、異なる運動種目での運動特性の比較を行える共通指標が存在すれば、「型」の比較や分析を、種目の差異に関わらず分野横断的に行うことが可能となる。このように身体の姿勢を物理法則の範囲から考える設計的な立場からの研究が進めば、全く異なるように思われている運動間の共通点の発見や、さらに、例えば舞踊の「型」など、今までは美的な視点から議論されることの多い姿勢の意味を別の運動との比較によって物理的な視点からも見出すことが期待できる。

姿勢に関する研究は古くから行われている。形態学の分野では、Howorth（Howorth, 1946：1398-1404）が、非活動もしくは行動を予期せずに休息している姿勢である静止姿勢（static posture）と、運動中もしくは運動に備えて準備している姿勢である動的姿勢（dynamic posture）に分類している。動的姿勢は運動の準備中の身体の形である基本動的姿勢（basic dynamic position）と運動中の身体の形（posture in action）に細分化される。この姿勢の定義によれば先述した「型」は全て動的姿勢と言える。運動学の分野では、中村ら（中村ほか, 2003：339-340）が良い姿勢を判断する評価軸には５つの軸が存在すること、そして姿勢の良不良の評価は姿勢を見る者が重視する評価軸により異なることを述べている。中村らの５つの評価軸とは（1）力学的に安定していること、（2）生理的に疲労しにくいこと、（3）作業能率からみて効率がよいこと、（4）心理的に安定していること、（5）美的にみて美しいこととされる。

ここで筆者らは、基本動的姿勢の比較分析を、工学で用いられている定量的な指標を用いて行うことを考えた。前述した動的姿勢のうち基本動的姿勢に着目した理由は、多くの運動において「型」の中でも静止しているもの、すなわちHoworthの姿勢の定義における基本動的姿勢（いわゆる構え）の重要性が述べられているためである。また、能楽の構え（横道, 1987：261-279）や「一眼二足三胆四力」という武術の教えを始めとしてほとんどの運動種目で下肢の重要性について言及されているにも関わらず、その基本動的姿勢を下肢の関節角度や関節トルクから分析した研究例は少なく、対象としている運動の種類も剣道などに限られている（久保ほか, 2001：12-25）。それ故、下肢の基本動的姿勢に議論を限定して横断的に比較分析を行うことに意義があると考えられる。

そこで、本研究ではシステム工学やロボット工学などで用いられている定量的な指標を導入して物理モデルに沿った下肢の基本動的姿勢を定量化し、ヒトの身体を参考にした運動特性の設計を幅広い分野において扱えるように、その手順を可視化する手法の開発を目的とした。

2．理論

2.1　身体モデル

本研究で用いる身体モデルを図１に示し、用いられている記号の定義を表１に示す。身体を矢状面内で運

動するシリアルリンク機構と模擬し、前足部、中足部および後足部、下腿部、大腿部、上体部の５つの剛体リンクを持つものとした。上体部は、直立姿勢時の位置関係で固定された頭部、胴部、上肢で構成されるものとした。各剛体リンクは中足趾節（MTP）関節、足（Ankle）関節、膝（Knee）関節、股（Hip）関節によって接続するものとした。各関節点の定義（坂倉, 2002：38-41）と関節の可動域（Kapandjiほか, 1986：2-243）を表２に示す。前足部を床面に固定し、中足趾節関節を基準座標系の原点に定めた。また、取り得る姿勢は、身体の合成重心が支持基底面内に位置する姿勢とした。

身体各部位の質量、慣性モーメント、重心位置などの身体慣性特性の報告には、阿江らによる日本人アスリートについての報告（阿江ほか, 1992：23-33)、岡田らによる日本人高齢者についての報告（岡田ほか, 1996,：125-139）がなされている。前者の報告については横井（横井, 1993：241-249)、阿江（阿江, 1997：51-62）によって一般の日本人若年成人男女の力学的解析に利用可能であることが述べられている。

2.2　物理的指標の検討

中村ら（中村ほか, 2003：339-340）による良い姿勢を判断する５つの評価軸を参考にし、システム工学、ロボット工学の視点から共通指標の検討を行った。その関係を表３に示す。本研究では先述した中村らによる良い姿勢の評価軸の中で、物理的な数値に置き換えることが容易な評価軸について検討した。また、各共通指標をそれぞれの運動種目における基本動的姿勢の比較分析に用いるために表３の代表値を用いて無次元化した。以下に本稿において下肢の基本動的姿勢の比較と分析に用いる物理的指標を詳述する。なお、基本動的姿勢の中足指節関節角度によって支持基底面（＝足部接地面）は異なるため、図２に示す共通指標説明モデルでの回転軸関節は中足指節関節または足関節としている。

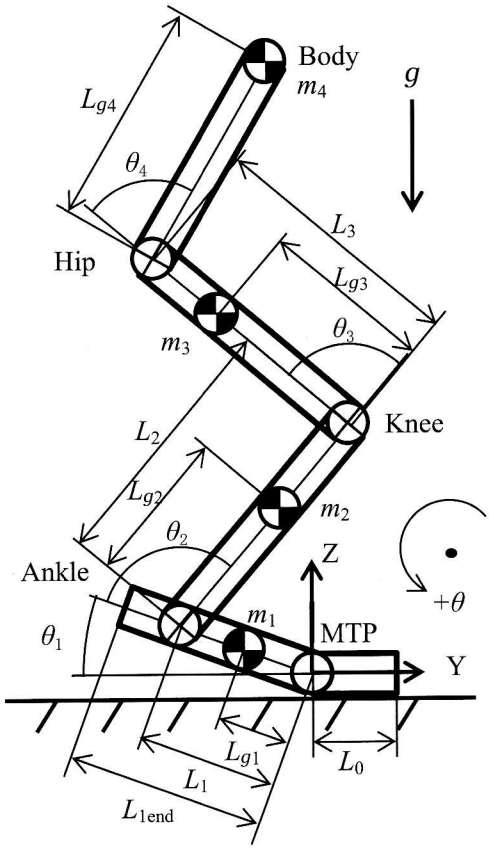


図１　矢状面下肢モデル

表１　身体パラメータの定義

記号	定義（$i=1, 2, 3, 4$）
m_i	リンクiの質量[kg]
L_i	リンクiの長さ
L_{gi}	関節軸iとリンクiの重心との距離[m]
θ_i	関節軸iでの回転角度[rad]

表２　関節点の定義と関節可動域

関節可動域[deg]	定義
$-90 \leqq \theta_1 \leqq 0$	足甲側の足指基節骨 近位端点
$-120 \leqq \theta_2 \leqq -60$	外果最突出点
$0 \leqq \theta_3 \leqq 140$	上下：脛骨外側顆上縁 前後：膝蓋骨除去部中央
$-140 \leqq \theta_4 \leqq 20$	転子点

表３　良い姿勢を判断する評価軸の従来定義と検討した定量的指標の関係

良い姿勢を判断する評価軸 （中村ほか，2003：339-340）	検討した定量化指標	指標無次元化の代表値
力学的に安定していること	前後への外乱による 転倒発生加速度	その身体における最大値
	振動周期長	その身体における最大値
生理的に疲労しにくいこと	姿勢保持関節トルク	その身体における最大値
作業能率からみて 効率がよいこと	水平鉛直方向可操作性 水平鉛直方向操作力 可操作度	その身体における最大値
	重力による 重心の水平方向加速度	その身体における最大値

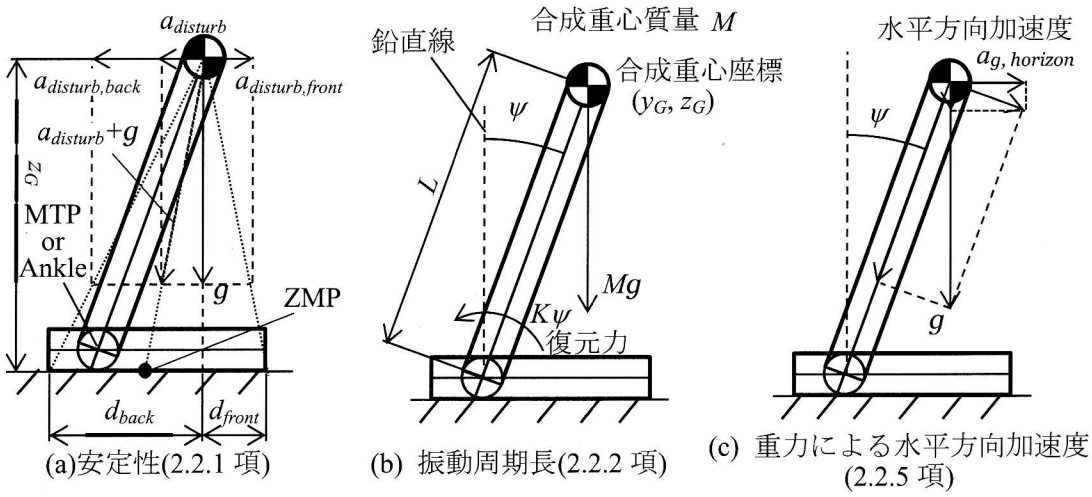


図２　指標説明モデル

2.2.1　前後方向への外乱による転倒発生加速度（前後方向への姿勢保持の良さ）

姿勢の安定性の３条件に（1）基底面が広い、(2) 重心が低い、(3) 重いという条件がある（金子，1994：40)。この条件に対応するロボット工学に応用するための指標に安定余裕という考えがある（広瀬ほか, 1998：1076-1082)。安定余裕とは物体の重心に働く加速度ベクトルと床面との交点（ZMP: Zero Moment Point）を定めたときの、ZMPと物体を支持する支持基底面の縁までの距離のことである。安定余裕が大きいほどその方向へは転倒し難いと言え、安定余裕が負になると身体は転倒する。本稿では安定余裕が０になる時のことを転倒発生と定義して、外乱による転倒発生加速度を物理的共通指標の一つとして用いた。重心の加速度ベクトルが一定であればZMPの位置は重心の高さのみによって決定し、重心高さが低いほど安定余裕は大きくなる。図２（a）に示すように、ある姿勢において合成重心に対して外力による水平方向加速度が前後各向きに加えられた場合、前後各向きでの身体の転倒発生加速度 $a_{disturb,\ front}$, $a_{disturb,\ back}$は、合成重心高z_Gおよび合成重心と支持基底面前端との水平距離 d_{front}、支持基底面後端との水平距離d_{back}を用いて

$$a_{disturb,front} = \frac{d_{front}}{z_G} \cdot g,\ a_{disturb,back} = \frac{d_{back}}{z_G} \cdot g \qquad (2\text{-}1)$$

と表せる。したがって、基本動的姿勢の安定性の指標として合成重心位置（y_G, z_G）を用いる事が可能であり。重心位置が低いほど安定性が大きくなることがわかる。

2.2.2 振動周期長（倒れるまでの時間）

倒立振子を倒れないように制御する場合、振子長が長いほど倒れにくくなる。これは振子長が長いほど振動周期長が大きくなり、フィードバック制御に必要な時間猶予が大きくなるからである。図２（b）に示した接地関節にトルクばね（ばね定数：K [N/rad]）が用いられている１リンク倒立振子の運動方程式は

$$ML^2\ddot{\psi} - MgL\sin\psi = -K\psi \tag{2-2}$$

で表される。その振動周期長は倒立振子長L によって決定し、その値は

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{ML^2}{K - MgL}} \tag{2-3}$$

である。ここで$K = \lambda MgL$（$\lambda > 1$：定数）とすると振動周期は

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{(\lambda - 1)g}} \tag{2-4}$$

で表される。この周期長は重心の高さの増加にともなう単調増加である。

2.2.3 姿勢保持関節トルク（疲れやすさ）

ある姿勢を選択した時、その姿勢を保持するために各関節にはトルクが発生する。発生した関節トルクは関節まわりの筋張力によるものであり、関節トルクが大きいほど筋への静的負荷が大きくなり疲れやすい姿勢であると考えられる。したがって、姿勢保持に必要な関節トルクの大きさを疲れやすさの指標に用いることが可能だと考える。中足指節、足、膝、股関節で発生する関節トルクをそれぞれ τ_{MTP}, τ_{Ankle}, τ_{Knee}, τ_{Hip} とすると、基本動的姿勢を保つために必要な関節トルクの合計値 τ_{total} は

$$\tau_{total} = \tau_{MTP} + \tau_{Ankle} + \tau_{Knee} + \tau_{Hip} \tag{2-5}$$

である。

2.2.4 可操作性、操作力（筋力を使った動きやすさ）

リンク機構の性能定量化手法の一つに可操作性および可操作力の解析がある（吉川, 1988：109-131）。可操作性とは機構の位置や姿勢をどの程度自由に動かせるかという操作能力を表し、操作力とは機構が対象物にどの程度自由な方向へ力を加えられるかという能力を表したものである。以下、理論を詳述する。

機構の自由度をm、空間の自由度をnとする。関節変数ベクトル$\boldsymbol{q}$、マニピュレータ先端の手先位置ベクトル$\boldsymbol{r}$、それに対応する速度ベクトル$\boldsymbol{v}$、関節速度ベクトル$\dot{\boldsymbol{q}}$、ヤコビ行列$\boldsymbol{J}$（$\boldsymbol{q}$）とした時、

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} \tag{2-6}$$

で与えられる。このとき$\boldsymbol{J}$（$\boldsymbol{q}$）の特異値分解を

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^T \tag{2-7}$$

とする。ただし、$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$は各々$m \times m$、$n \times n$の直交行列、$\boldsymbol{\Sigma}$は$m \times n$行列であり次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\Sigma} = \left[\begin{array}{ccc:c} \sigma_1 & & \boldsymbol{0} & \\ & \ddots & & \boldsymbol{0}_{m\times(n-m)} \\ \boldsymbol{0} & & \sigma_m & \end{array}\right] \tag{2-8}$$

σ_i(i =1, 2, ⋯, m) は$\boldsymbol{J}$の特異値と呼ばれ、$\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{J}$の固有値の平方根の大きい物から順に$m$個とったものである。さらに、$\boldsymbol{U}$の$i$列目の列ベクトルを$\boldsymbol{u}_i$で表せば、手先位置の可操作性楕円体は$\sigma_i\boldsymbol{u}_i$を主軸に持つ$m$次元ユークリッド空間内の楕円体として与えられる。この楕円体の主軸半径の大きな方向は大きな手先速度を出しやすい方向である。一方、$\boldsymbol{u}_i/\sigma_i$を主軸に持つ楕円体は可操作力楕円体と呼ばれ、その主軸半径の大きな方向には大きな操作力を発揮できる。楕円体の主軸ベクトルの係数を比較すればわかるように、可操作性と可操作力は反比例の関係になっている。また、可操作性楕円体から導出される代表的な操作能力の指標として、楕円体の体積に比例する可操作度がある。可操作度wは

$$w=\sigma_1\sigma_2\cdots\sigma_m \tag{2-9}$$

で表される。可操作度は手先位置の動かしやすさをスカラで表現したものであり、大きい値であるほど手先位置の操作能力が高いことを示す。また、操作力楕円体の主軸は$\boldsymbol{u}_i/\sigma_i$で与えられるので、可操作性楕円体の主軸との比較により、可操作性と操作力は反比例の関係であることがわかる。

本稿では指標として前後方向、上下方向の可操作性、および可操作度を用いる。

2.2.5 合成重心の水平方向加速度（予備動作無しでの前後方向への動きやすさ）

武術などにおける特徴の一つとして床を蹴らない移動が挙げられている（甲野ほか, 2007：58-84)。この移動方法は重力による移動であると考え、重力によって発生する水平方向の力の大きさを指標の一つとして用いた。重力によって身体が倒れ始める瞬間に姿勢の変化がないものとすると、身体モデルは床面と中足趾節関節または足関節において回転対偶を持ち、もう一方の端点に身体の合成重心が位置する１リンク倒立振子モデルと同じものと考えられる。図２（c）に示すように床面固定点である足関節または中足指節関節と合成重心を結んだ線と、鉛直線がなす角をψとすると、このモデルの合成重心に働く水平方向の加速度$a_{g,\ horizon}$は、

$$a_{g,horizon}=\frac{g\,sin(2\psi)}{2} \tag{2-10}$$

で表される。

３．実験方法

被験者に実験内容、データ使用方法を説明し同意を得た。実験開始前に被験者が現在取り組んでいる身体運動についてのアンケートを行い、その運動における基本動的姿勢、およびその姿勢から行われる際に先に地面から離れる足についての回答を得た。実験用の服装として被験者には上半身は身体に密着した衣服の着用もしくは未着用を選択させた。また、下半身は身体に密着した衣服の着用、足部は裸足とした。図３に示す被験者の身体特徴点への標点の貼付、および身体寸法と体重の測定を行った。上肢、下肢については身体右側での測定を行った。次に、関節動作速度への重力の影響を小さくするために被験者に床面での側臥位の姿勢をとらせ、各被験者が発揮可能な最大速さでの水平面内関節動作を行った。関節動作は無負荷にて実施した。その動作をハイスピードカメラ（300 fps）を用いて鉛直上方から映像撮影した。動作させる関節は１回の試行につき１つの関節とし、中足指節、足、膝、股関節の伸展、屈曲動作の動画撮影をした。動作させない関節はテーピングなどを用いて固定した。

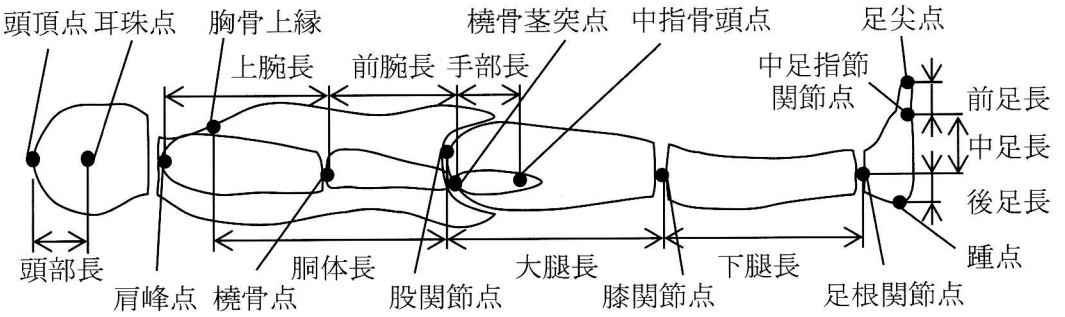


図３　身体特徴点および身体測定部

関節動作は各関節の伸展、屈曲のそれぞれにおいて５回ずつ撮影した。最後に、被験者に立位姿勢の状態から基本動的姿勢をとらせ、カメラを用いてその矢状面の静止画を撮影した。基本動的姿勢の崩れによる結果への影響を小さくするために、１分の間隔をおいて５回の撮影を行った。実験終了後、関節動作映像の解析を行い各関節の最大関節速度を得た。また、得られた身体寸法および身体慣性特性を用いて、身体モデルの各関節角度を５degずつ変化させて計算を行い、各共通指標の代表値を求めた。

被験者の選択基準として両足部の接地位置、すなわちスタンスに着目した。基本動的姿勢でのスタンスのパラメータとしては、左右方向への開閉、前後方向への開閉、上体に対する爪先の向きが考えられる。本研究では両足部の前後左右方向の開閉にのみ着目する。これより、スタンスは４種類に分類される。具体的には、(1) 両足部を前後左右ともに閉じたスタンス、(2) 両足部を左右にのみ開いたスタンス、(3) 両足部を前後にのみ開いたスタンス、(4) 両足部を前後左右ともに開いたスタンスの４種類である。

本研究では、以上で述べた４種類のスタンスの中で両足部を左右にのみ開いたスタンス (2) と両足部を前後にのみ開いたスタンス (3) に着目して実験を行った。

被験者の身体特性および運動種目を表４に示す。各種目における具体的な基本動的姿勢は、アメリカンフットボールにおいては相手の動作が始まる直前の姿勢、バレーボールにおいては相手のスパイクが行われる直前の姿勢、サッカーにおいては相手のシュートが行われる直前の姿勢、剣道と日本舞踊においてはそれぞれでの基本の構えとされる中段の構えと男の構えとした。ここで上肢の質量は胴体部の質量と比較して小さいこと、および上肢の位置する範囲が限られていることから、上肢は常に胴体部に沿って位置すると近似して上体部重心位置の計算を行った。

４．結果

実験によって得られた基本動的姿勢のスティックピクチャを図４に示す。アメリカンフットボール（以降アメフト)、バレーボール、サッカー、および日本舞踊の男の構えは左右に脚を開いた立位姿勢であり、剣道の構えは脚を前後に開いた立位姿勢だった。この姿勢の各運動種目の基本動的姿勢での各関節速度を表５、各関節角度を表６、計算で得られる共通指標の値を図５に示す。図５における軸ａ～ｈ、指標名、および各軸での値との対応を表７に示す。表７の各指標での代表値とは、表３に示したようにその身体における各指標の最大値である。基本動的姿勢における各関節角度は５回の測定値の平均を、関節速度は５回の測定値から最大値と最小値を除いた残り３回の測定値の平均を使用した。

剣道においては基本動的姿勢での足部位置が前後に離れていたため、各脚による指標値を計算して各指標の最大値を選択して図５に示した。

表４　被験者の身体特性

被験者	A	B-1※※	B-2※※	C	D
性別	男性	男性	男性	男性	女性
年齢	24	23	23	24	45
運動種目	アメフト※ (LB※)	バレーボール	サッカー (GK※)	剣道	日本舞踊
スタンス	(2)	(2)	(2)	(3)	(2)
経験期間	4年7ヶ月	7年6ヶ月	6年0ヶ月	18年1ヶ月	10年6ヶ月
身体部位長[mm]					
身長	1684	1806		1805	1684
上体部(L_{g4})	262	293		282	247
大腿部(L_3)	410	465		405	411
下腿部(L_2)	380	399		425	376
中後足部(L_{1end})	167	190		184	164
中足部(L_1)	119	135		125	113
前足部(L_0)	75.9	83.5		84.5	83.3
質量[kg]					
全身	65.1	73.2		59.5	52.1
上体部(m_4)	42.7	48.0		39.0	32.6
大腿部(m_3)	7.16	8.05		6.55	6.41
下腿部(m_2)	3.32	3.73		3.03	2.76
足部(m_1)	0.716	0.805		0.655	0.573

※アメフト：アメリカンフットボール，LB：ラインバッカー，GK：ゴールキーパー
※※被験者 B-1，B-2 は同一被験者

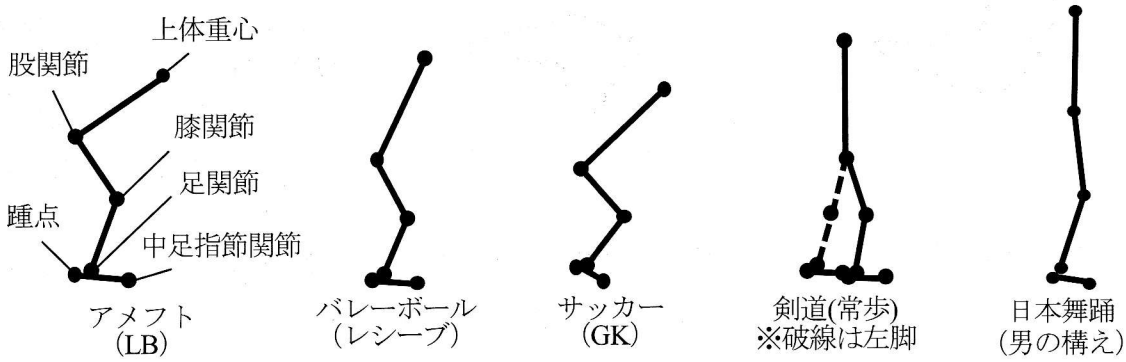


図４　各種目での基本動的姿勢

表５　各被験者の最大関節速度

被験者	A	B	C	D
(平均)±(S.D.)[deg/s]				
中足指節関節	491±128	606±18	574±67	619±30
足関節	296±25	265±15	358±43	307±19
膝関節	467±4	309±10	517±22	303±6
股関節	187±11	249±8	215±28	277±19

表６　基本動的姿勢での関節角度

被験者	A	B-1	B-2	C		D
運動種目	アメフト	バレーボール	サッカー	剣道		日本舞踊
	(LB)	(レシーブ)	(GK)	前脚	後脚	男の構え
(平均)±(S.D.)[deg]						
中足指節関節	-5.5±0.6	-5.4±0.9	-28.4±0.89	-0.4±0.3	-6.2±2.6	-5.6±1.5
足関節	-105.1±0.9	-116.5±4.1	-100.0±1.0	-94.7±5.3	-99.8±2.0	-102.9±2.1
膝関節	55.2±1.0	67.9±9.5	80.9±1.0	27.8±2.0	2.1±0.3	28.8±2.9
股関節	-93.3±3.0	-67.6±10.4	-92.5±3.7	-22.3±3.2	12.8±1.8	-10.2±2.3

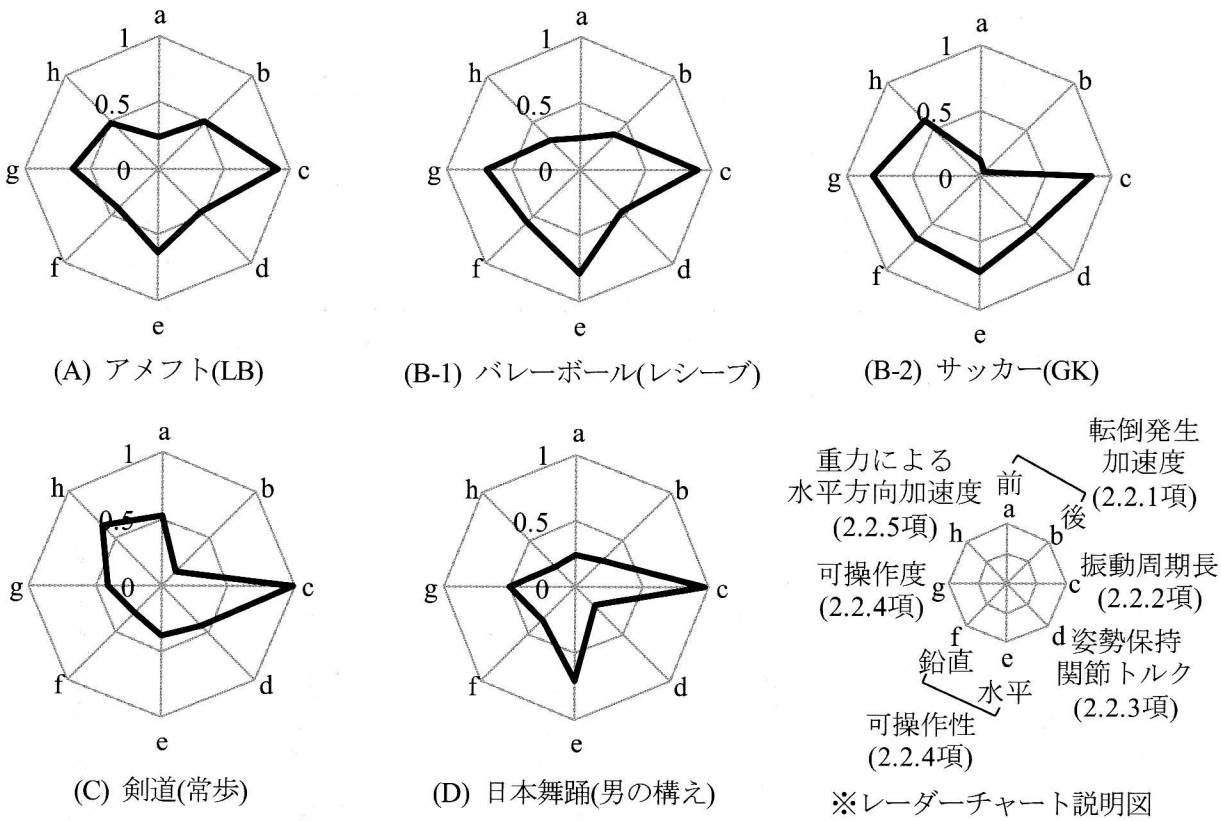


図５　各基本動的姿勢での物理的共通指標の値

表７　指標対応表

項目	指標名	指標値=0	指標値=1
a	前方への外乱による転倒発生加速度	0	代表値
b	後方への外乱による転倒発生加速度	0	代表値
c	振動周期長	0	代表値
d	姿勢保持関節トルク	0	代表値
e	前後方向可操作性	0	代表値
f	鉛直方向可操作性	0	代表値
g	可操作度	0	代表値
h	重力による重心の前後方向加速度	0	代表値

5．考察

5.1　共通指標の妥当性の検証

共通指標の最大値もしくは最小値が特徴的な運動種目を抽出して、各運動種目での戦略と整合するかを確認する。共通指標の大小は、階層型クラスター分析手法の一つである最短距離法を用いて２つのクラスターに分けることで判断した。クラスター分析による基本動的姿勢の分類結果を図６に示す。

矢状面内の全方向へ動きやすくする戦略に関係があると考えられるｇの項目が大きく現れた種目はサッカー、バレーボール、アメフトとなり、明確な相手や物に反応を行うというスポーツ的な特徴が一致している。また、筋力を使って大きく前後方向へ動く戦略があると考えられるeの項目もバレーボール、サッカー、アメフトにおいて大きく現れた。さらにその中で上下方向への動きやすさであるｆの項目で運動種目の違いを説明できる。特に上下方向へ動く戦略があると考えられる種目のサッカー、バレーボールではｆが大きく現れた。以上の考察は、サッカーの「どの方向にも即座に反応できる体勢」（藤川, 2004：26-27)、バレーボールの「構えの姿勢から反射的にボールに腕を突き出し」（日本バレーボール協会, 1988：49-50.)、アメフトの「最初の数歩で、横、前、後ろと素早く動かなければならない」（Allenほか, 1976：169-172）という文献での記述と一致する。

予備動作無しで動くという戦略（相手をだます要素、反応時間が短い）があると考えられる種目の剣道、サッカー、アメフトでは指標ｈが大きく現れた。これは剣道の「隙を生ぜしめて、その隙に乗じて適切なる技をほどこす」（佐藤, 1979：129)、サッカーの「手と足をいかに早く出せるか」（松永, 2010：62-64)、アメフトの「第１歩が早くなくてはならない」（Allenほか, 1976：169-172）という文献での記述と一致する。また、実験前アンケートにてバレーボールのスパイクレシーブにおいては「腕のみを動かすことがほとんどである」という結果を得た。これはバレーボールでの指標ｈが高くないことと一致する。

後方へ下がらない戦略があると考えられる種目のサッカー、剣道ではｂが小さく現れた。その中で前方への姿勢保持の良さを表す項目ａで運動種目の特徴の違いを説明できる。サッカーのゴールキーパーでａが小さいのは爪先立ちで脚を左右に開いた立位姿勢（いわゆるパワーポジション）のためであり、剣道でａが大きいのは足を前後に開いた立位姿勢（いわゆる常歩）のためである。

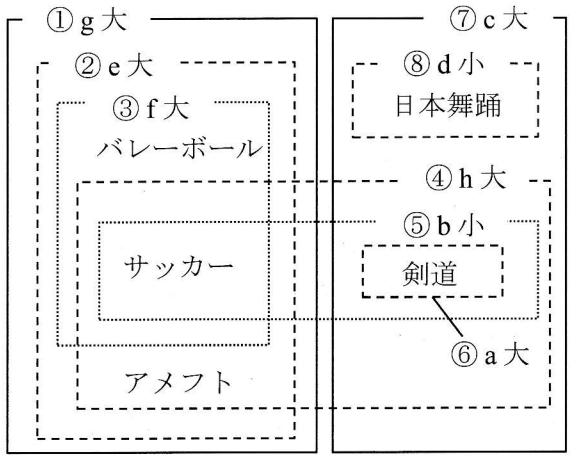
体幹を直立させる戦略があると考えられる種目の剣道と日本舞踊ではｃが大きく現れ、スポーツとは異なる特徴が一致している。その中で日本舞踊はｄが小さく現れた。これは、日本舞踊の構えは足底面全体を床面と接しているので、中足指節関節にほとんどトルクが発生せず姿勢安定性は高いという特徴の現れであり、実験前アンケートで得た「下半身を安定させる」という結果と一致する。また、文献において「歩き動作で腰が上下動しない」という記述がある（花柳, 1981：100)。この記述は指標ｆが小さいこと、すなわち上体が鉛直方向に動きにくいことと一致する。

以上により、考案した共通指標によって各運動種目での下肢の基本動的姿勢を分類できる可能性を示せた。

さらに、後方への姿勢保持の良さを表す指標ｂと重力による水平方向加速度の大きさを表す指標ｈに着目すると、ｂにおいては剣道とサッカーで小さい。また、前述したとおりｈにおいてはアメフト、サッカー、剣道で大きい。すなわち、運動競技と武術という異なる分野をまたぐ特徴が共通指標ｂとｈによって見つかったと言える。このことから、共通指標によって幅広い種目をまたいで隠れている共通点を抽出できると考えられる。

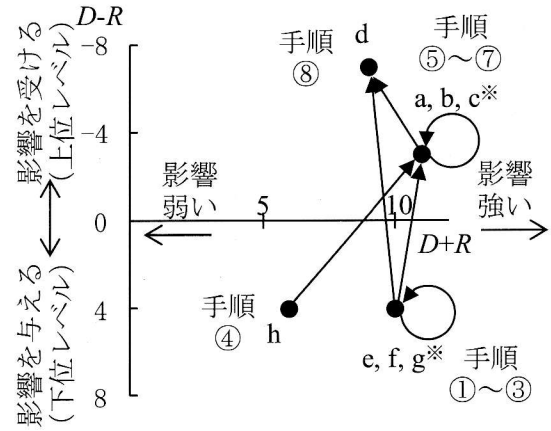
5.2　共通指標の階層構造化

5.1節では共通指標のクラスター分析を用いて、分野をまたいだ基本動的姿勢を分類した。本節ではシス



※共通指標名は図５に準拠

図６　運動種目の共通指標による分類



※a,b,c と e,f,g はそれぞれにおいて
相互に影響を授受する関係

図７　ISM分析結果

表８　基本動的姿勢での共通指標相互間の関係

影響を受ける共通指標

影響を与える共通指標	a	b	c	d	e	f	g	h
a			1					
b			1					
c	1	1		1				
d								
e	1	1		1			1	
f				1			1	
g				1	1	1		
h	1	1	1					

表９　可達行列T

影響を受ける共通指標

影響を与える共通指標	a	b	c	d	e	f	g	h	D	D+R	D-R
a	1	1	1	1					4	11	-3
b	1	1	1	1					4	11	-3
c	1	1	1	1					4	11	-3
d				1					1	9	-7
e	1	1	1	1	1	1	1		7	10	4
f	1	1	1	1	1	1	1		7	10	4
g	1	1	1	1	1	1	1		7	10	4
h	1	1	1	1				1	5	6	4
R	7	7	7	8	3	3	3	1			

テム工学の手法の一つであるISM分析を行い、クラスター分析との整合性を検証することで共通指標の妥当性を確認するとともに、各種目における基本動的姿勢の分類の手順を明らかにする。

システムにおいて機能は一般に階層構造によって表現することが可能である。つまり、システムに要求される目的を基本機能（レベル０）として、基本機能に影響を与える２次機能（レベル１）、２次機能に影響を与える３次機能（レベル２）というように複雑なシステムを展開して表現することが可能である。考案した共通指標ａ～ｈに対して、それぞれの関係性をシステム工学的に説明するISM（Interpretive Structural Modeling）分析（赤木, 1992：143-149）を行い、基本動的姿勢での各共通指標が相互に与える影響を可視化した。分析にあたって自作した表８の１行目は項目ａが項目ｃに影響を与えていることを示している。 ISM分析手法の理論を以下に述べる。

表８において項目間の影響がある箇所を１、その他を０とした行列を直接影響行列$\boldsymbol{A}$、直接影響行列$\boldsymbol{A}$に単位行列 $\boldsymbol{I}$ を足した行列を隣接行列$\boldsymbol{B}$とする。この隣接行列$\boldsymbol{B}$に対して$\boldsymbol{B}^2$、$\boldsymbol{B}^3$、…と次々にブール演算

(1+1=1, 1+0=1, 0+1=1, 0+0=0, 1·1=1, 1·0=0, 0·1=0, 0·0=0) を繰り返すとあるところで行列の値が変化しなくなる。すなわち

$$\boldsymbol{B} \neq \boldsymbol{B}^2 \neq \cdots \neq \boldsymbol{B}^{m-1} = \boldsymbol{B}^m \equiv \boldsymbol{T} \quad (m\text{: 自然数}) \qquad (5\text{-}1)$$

となる可達行列$\boldsymbol{T}$を求められる。表8から求めた可達行列を表9に示す。可達行列$\boldsymbol{T}$の行方向に着目したとき、1になっている列の項目に影響を与えていることがわかる。ここで可達行列$\boldsymbol{T}$の行和がDであり、ある項目が他の項目に与える影響の和を表し、可達行列$\boldsymbol{T}$の列和がRであり他の項目から受ける影響の和を表す。可達行列$\boldsymbol{T}$の項目aにおける行和D_aと列和R_aを用いると、$(D_a + R_a)$ は項目aと他の項目での影響の授受の強さを示し、$(D_a - R_a)$ は項目aと他の項目での影響の授受の方向を示している。表9をISM分析した結果を図7に示す。矢印の先の階層は矢印の根本の階層の影響を受けて定まることを表している。

得られた階層構造は5.1節におけるクラスター分析による分類の結果と整合したことから、共通指標の妥当性を確認できたと考えられる。さらに、ISM分析によって基本動的姿勢の分類手順（図6の①～⑧）を有向グラフで表現できており、共通指標を用いた運動特性設計手順の可視化に成功したと言える。

5.3 今後の展望

今回の実験では運動種目数、および同一種目での実験対象者数が少ないという課題が残った。そのため今後は実験回数を増やし、考案した共通指標の信頼性を高める必要があると考える。

本稿で考案した共通指標は身体矢状面内での運動のみを対象としているものであり、他の運動面内での運動を対象としたものは扱わなかった。矢状面内運動での共通指標のみでも基本動的姿勢の分類を行うことは可能であったが、分類の精度をより向上させるためには他の運動面内での共通指標の検討も行う必要があると考える。

また、本稿で用いた身体モデルは骨格モデルであるので、dの指標において内力である筋張力を考えられていない。よって、より精度の高い比較を行うためには筋骨格モデルを用いる必要があると考える。

6．結論

本稿では以下の結論を得た。

(1) 中村らの述べる「良い姿勢」に基づく物理的共通指標（外乱による転倒発生加速度、振動周期長、姿勢保持関節トルク、可操作性、可操作度、重力による水平方向加速度）を選択し、各運動種目で取られる戦略を共通指標によって説明できた。

(2) 共通指標b：外乱による後方転倒加速度と共通指標h：重力による水平方向加速度においてHoworthの述べる基本動的姿勢の分野横断的な比較分析が可能であり、それらの運動種目に共通する戦略を抽出できた。

(3) クラスター分析による各運動種目の分類とISM分析による共通指標の階層構造の整合性から基本動的姿勢における共通指標の妥当性を確認し、さらに共通指標における相互関係の可視化に成功した。

参考文献

阿江通良・湯海鵬・横井孝志, 1992,「日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定（1部 形態と運動の計測）」,『バイ

オメカニズム』，11：23-33.
阿江通良，1997，「KinematicsとKineticsをつなぐ身体部分慣性係数--その測定法と係数の比較（特集：身体重心）」，『バイオメカニクス研究』，1（1）：51-62.
赤木新介，1992，『システム工学：エンジニアリングシステムの解析と計画』，共立出版：東京，262．143-149.
Allen G.・Weiskopf D.・ベースボールマガジン社・ハンプティーダンプティー訳，1976，『アメリカン・フットボール百科』，ベースボール・マガジン社：東京，169-172.
Hachimura K.，2006，"Digital archiving of dancing"，Review of the National Center for Digitization，8：51-66.
花柳千代，1981，『実技日本舞踊の基礎』，東京書籍：東京，100.
広瀬茂男・塚越秀行・米田完，1998，「不整地における歩行機械の静的安定性評価基準」，『日本ロボット学会誌』，16（8）：1076-1082.
Howorth B.，1946，"Dynamic posture"，Journal of the American Medical Association，131（17）：1398-1404
藤川孝幸，2004，『完全GK（ゴールキーパー）マニュアル』，出版芸術社：東京，26-27.
石田水里・佐川貢一，2009，「倒立振り子モデルを利用した身体前後傾斜運動時の立位安定性の定量評価に関する検討」，『日本機械学會論文集C編』，75（752）：1047-1055.
金子公宥，1994，『スポーツ・バイオメカニクス入門：絵で見る講義ノート』，杏林書院：東京，40.
Kapandji I. A.・荻島秀男・嶋田智明，1986，『カパンディ 関節の生理学 Ⅱ．下肢 原著第5版』，医歯薬出版：東京，2-243.
甲野善紀・田中聡，2007，『身体から革命を起こす』，新潮社：東京，58-84.
久保哲也・木塚朝博・斎藤実・武藤健一郎・香田郡秀・佐藤成明，2001，「剣道における足構えに関する研究」，『武道学研究』，33（3）：12-25.
黒田鉄山，1991，『居合術精義』，壮神社：埼玉，266.
松永成立，2010，『ゴールキーパー専門講座』，東邦出版：東京，62-64.
中村隆一・斎藤宏・長崎浩，2003，『基礎運動学（第6版）』，医歯薬出版：東京，339-340.
百鬼史訓・藤田紀盛・小森園正雄・伊藤金得・横山直也，1991，「剣道の中段の構えにおける体重配分に関する研究」，『武道学研究』，23（3）：69-76.
日本バレーボール協会，1988，『新訂バレーボール指導教本』，大修館書店：東京，49-50.
岡田英孝・阿江通良・藤井範久・森丘保典，1996，「日本人高齢者の身体部分慣性特性（2部 調節）」，『バイオメカニズム』，13：125-139.
坂倉省吾，2002，『JIS Z 8500 人間工学—設計のための基本人体測定項目』，日本規格協会：東京，38-41.
佐藤忠三，1979，『剣道の学び方』，体育とスポーツ出版社：東京，129.
清水史郎・藤木広嗣，1983，「基本動的姿勢における重心動揺と身体動揺の３次元分析」，『姿勢研究』，3（2）：59-64.
山本東次郎，2002，『狂言のことだま』，玉川大学出版部：東京，27-30.
横井孝志，1993，「剛体リンクモデルのための身体部分剛体特性定数（〈特集〉力学的生体定数）」，『バイオメカニズム学会誌』，17（4）：241-249.
横道萬里雄，1987，『能の構造と技法』，岩波書店：東京，261-279.
吉川恒夫，1988，『ロボット制御基礎論』，コロナ社：東京，109-131.