Nagoya J. Health, Physical Fitness, Sports Vol.26, No.1 (March 2003)

動きの「滑らかさ」の評価に向けて

Quantification of "fluency" of human movement

山　本　裕　二*

Yuji YAMAMOTO *

Dexterity has an important role in human movement, and can be considered the efficiency, economy, or effectiveness of movement. Some indices of dexterity have been proposed from the perspective of the kinematics of movement. This study proposed four indices to quantify the fluency of the trajectories in the state space of striking movements from the dynamical perspective. The four indices were mean jerk, mean deviation from a circle, mean change in radius, and standard deviation of the curvature. Striking movements in tennis were analyzed from the perspective of dynamical systems, and the four indices were applied to these trajectories in state space. The striking movements consisted of repeated forehand or backhand strokes by two intermediate players, repeated forehand or backhand strokes before and after training by one beginner, random forehand and backhand strokes by the intermediate players, and repeated forhand and backhand strokes by the beginner. The results suggest that the mean changes in the radius and standard deviation of curvature are better indices for quantifying fluency.

1　はじめに

身体運動における「巧みさ」を考える場合に、その定義が難しい。「たくみ」は広辞苑第五版によると、「1. たくむこと、かんがえ、てだて、くわだて、たくらみ、計略。2.（「匠」とも書く）手先または器械で物を造る仕事、また、それを業とする人、細工師、特に、木工、こだくみ。3. しごと、しわざ、また、「芸術」「技術」の雅語的表現。4.（ふつう「巧み」と書く）てぎわのよいこと、できのよいこと、上手、技巧。」と書かれている。大築（1988）は、こうした語源も含めて「たくみさ」について考察し、人間の発揮する力、あるいはエネルギーの大きさを表す「つよさ」という尺度とは異なる、力やエネルギーのコントロールの仕方を表す尺度が「たくみさ」であるとしている。

古典的運動制御理論を自由度問題と文脈多義性から批判し、身体運動における協応構造あるいは協働（シナジー：synergy）の重要性を強調したBernstein（1996）は、巧みさ（dexterity）を「いかなる外的状況に対しても解決できる運動を見出す能力、つまり直面した運動問題を以下の条件を満たしてすべて解決する能力である」とした。そしてその条件とは、「第一に適切で正確であること、第二に意思決定においても結果の達成においても素早いこと、第三に融通がきいて、効率的、合理的であること、そして最後に機転が利いていて、予見的に資源を有効に活用していること（p.226）」と定義している。

大築（1988）のいうエネルギーのコントロールの仕方や、Bernstein（1996）の第三、あるいは第四の定義は運動の効率（efficiency of movement）という考え方に近いものと思われる。効率とは、一般に機械によってなされた仕事の量と機械に供給された全エネルギーとの比のことである。運動時の酸素摂取量を効率として、新奇な運動の獲得における協応構造と酸素摂取量の関係を見たものがある。Almåsbakk, Whiting, and Helgerud（2001）は、スキースラロームの模擬課題を学習していくと、運動の協応構造を獲得し、動きの振幅が大きくなり、結果として仕事量が増大するため、その仕事量のために必要とされるエネルギー消費量が相対的に減少することを示した。すなわちエネルギー

＊　名古屋大学総合保健体育科学センター
＊　Research Center of Health, Physical Fitness, and Sports, Nagoya University

消費を最小にするように、知覚−運動結合が学習により獲得される。こうしたエネルギー効率と協応構造に関して、Hoyt and Taylor（1981）は、馬の走る速度は酸素摂取量と相関があり、走る速度が一定の割合で増加すると、馬の歩容が常足（なみあし）（walk）から速足（はやあし）（trot）へ、そして駈足（かけあし）（gallop）へと相転移することを示した。そしてこの相転移現象が、酸素摂取量の効率と関係しているというものである。

しかしながら、この酸素摂取量のような生理的エネルギーと運動との間には生理的エネルギーを力学的エネルギーに変換する過程があり、生理的エネルギーを運動に用いるのは経済性（economy）であり、生理的エネルギーを力学的エネルギーに変換するのが効率（efficiency）で、力学的エネルギーを運動に用いるのが有効性（effectiveness）であるという指摘もある。こうした点に基づき、運動における力学的エネルギー利用の有効性も検討されている（阿江・藤井，1996）。

一方、van Emmerik, den Brinker, Vereijken, and Whiting（1989）は、前述したスキースラロームの動きの分析から、実際の移動速度の変化と理想的な移動速度との相互相関から、滑らかさ（fluency）と言う指標を算出し、その学習過程の分析に用いている。これはいわゆるキネマティクスにおける滑らかさであり、「巧みさ」を身につけることは、キネマティクスにおいて滑らかになるという前提である。

またこうしたキネマティクスの分析として、Shapiro, Zernicke, Gregor, and Diestel（1981）は、股関節と膝関節の分析から、歩行時の動きを評価することも試みた。これは、股関節角度をX軸に、膝関節角度をY軸に描く角度−角度図（angle-angle diagram）と呼ばれ、位相幾何学的な分析方法である。この角度−角度図によって、歩行速度が変化しても、その形は相同になり変わらない、すなわちSchmidt（1975）のスキーマ理論における般化運動プログラムから導かれる、相対的タイミングが不変であることを明らかにしている。この方法は、動きの位相を特徴づけることから、Bernstein（1967）の強調した協応構造を学習によって獲得することを示すために用いられている（Anderson & Sidaway, 1994; Newell, 1985）。そして、こうして評価された滑らかさが、動作遂行結果としての正確性だけではなく、動作遂行過程の動き自体を見て、人間は上手・下手とか、巧み・ぎこちないといった感じを受けているとも考えられている（Hoenkamp, 1978）。これも運動における「巧みさ」の獲得を示そうとするものである。

このような運動軌道の滑らかさの最適化という観点からは、腕の軌道生成に関しては、さまざまな計算モデルが提出され、実際に測定した軌道と計算モデルから予想される軌道との一致から議論がおこなわれている。そこでは、実際に観測できる軌道の滑らかさをいかに計算モデルとして実現できるか、どこまで近似できるかという点と、そこでの計算モデルが脳を含めた身体システムの構造といかに整合性を持っているかという点が焦点となっている。これらはいずれも以下に示す評価関数を最小化することを、運動の基準とするというものである。

- 躍度最小モデル（Flash & Hogan, 1985）

$$C_J = \frac{1}{2}\int_0^{t_f} \left\{ \left(\frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3y}{dt^3} \right)^2 \right\} dt$$

ここで、$(x,\ y)$ は、水平面に固定された直交座標系を表す。

- トルク変化最小モデル（Uno, Kawato, & Suzuki, 1989）

$$C_\tau = \frac{1}{2}\int_0^{t_f} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{d\tau_i}{dt} \right)^2 dt$$

ここで、τ_i は、n 個ある関節のうちの第i番目の関節で発生しているトルクを表す。

- 筋張力最小モデル（宇野ら（1989）を川人（1996）より）

$$C_F = \frac{1}{2}\int_0^{t_f} \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{dF_i}{dt} \right)^2 dt$$

ここで、F_i は、m 個ある筋肉のうちの第i番目の筋張力を表す。

- 運動指令変化最小モデル（Kawato, 1993）

$$C_M = \frac{1}{2}\int_0^{t_f} \sum_{i=1}^{l} \left(\frac{dM_i}{dt} \right)^2 dt$$

ここで、M_i は、第 i 番目の運動指令を表す。

これらの4つの腕の軌道生成の最適化モデルは、軌道の計画がどの座標空間で行われているかによって異なり、躍度最小モデルは手の直交座標系、トルク変化最小モデルは関節、筋張力変化最小モデルは筋、運動指令変化最小モデルは皮質や脊髄レベルが仮定されている（川人，1996）。

これらの計算モデルは、軌道生成のアルゴリズムとして神経回路モデルとしても記述されているが、スポーツ技能のような全身を用いる多関節運動の場合には、必ずしもこうした計算モデルが適用できないことも指摘されている（Young & Marteniuk, 1997）。

今回は、こうした運動軌道自体の滑らかさではなく、システムの振る舞いとしての滑らかさを評価する方法を探ることにより、全身を用いる多関節運動におけるシステムの変化（学習）の指標にも適用しようという試みである。したがって、滑らかさを求める軌道は、実際の運動軌道ではなく状態空間上の軌道である。この状態空間上の軌道、基本的には角度をX軸に、その角速度をY軸に描いた状態空間上の軌道をいくつかの指標を用いて、その軌道の滑らかさを評価し、システムの評価が可能な指標を探ることが目的となる。

2　指　標

今回用いた指標は以下の４つである。

躍度（jerk） 位置の３階微分であり、次式によって求めた。

$$M_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\{\left(\frac{d^3x_i}{dt^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3y_i}{dt^3}\right)^2\right\}$$

偏差（deviation） 半径１の真円からの偏差を、次式によって求めた。

$$M_d = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(1-(x_i^2+y_i^2))$$

径変化（radius） 半径の径変化（１階微分）を次式によって求めた。

$$M_r = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{d}{dt}\sqrt{x_i^2+y_i^2}$$

曲率の標準偏差（curvature） 曲率の絶対値の標準偏差について次式で求めた。

$$M_c = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|\left(\frac{dx_i}{dt}\right)\left(\frac{d^2y_i}{dt^2}\right)-\left(\frac{d^2x_i}{dt^2}\right)\left(\frac{dy_i}{dt}\right)\right|}{\left(\left(\frac{dx_i}{dt}\right)^2+\left(\frac{dy_i}{dt}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$SD_{M_c} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(C_i - M_c)^2}$$

ここで、C_iはi番目の曲率を表す。

3　標　本

今回指標の計算に用いた標本となる運動は、テニスのグランドストローク動作である。肩の回旋角度と角速度の時系列変化の例を図１に示した。以下に示した軌道はすべて、この両肩を結ぶ角度と角速度の２変数を用いて表してある。さらに、全ての標本はz変換して規準化したあと計算された。また、比較基準として、図２に示すような円と正方形を描き、実際の運動による軌道と比較した。

図３は、Yamamoto and Gohara（2000）で分析した中級者２名のグランドストローク動作で、フォアハンド、あるいはバックハンドの周期的繰り返し動作である。Subj#1と表してある方が、Subj#2と表してあるものよりも技術レベルは高い。図４は、Yamamoto（in preparation）で分析した初心者１名（Subj#3）のフォアハンド、あるいはバックハンドの周期的繰り返し動作で、学習前後を比較して表してある。

図５には、中級者（Subj#1）のフォアハンドとバックハンドの乱順な切り替え動作、初心者（Subj#3）の学習後のフォアハンドとバックハンドの交互周期動作を示してある。

4　各指標の比較

それぞれの状態空間上の軌道について、２節でのべた式によって各指標の値を求めたものが表１と図６である。

これらの値はいずれも小さくなると滑らかであるように求められている。つまり円であれば限りなく０に近づくようにしてある（ただし円は半径1.412のためM_dが０にならない）。したがって、テニスのストローク動作からいえば、中級者２よりも中級者１の方（図３の下段よりも上段の方）が、技術レベルは高く、また、学習後の方（図４の下段の方）が技術レベルは向上していると考えられるので、図中、Subj#1 ＜ Subj#2、さらに学習後＜学習前という順で値が大きくなっていれば、予想と一致することになる。そうした観点からするとM_dあるいはM_rという偏差あるいは径変化が滑らかさを表す指標としては良さそうである。

しかしながら、フォアハンドストロークの繰り返しのような単一運動の周期的繰り返し動作と比べて、フォアハンドとバックハンドの交互繰り返しやランダムな繰り返しなどの２つ以上の運動の場合（図５）では、SD_{Mc}という曲率の標準偏差の方がより滑らかさの基準として適合しそうである。特にM_dは真円からの偏差であるため、異なる運動を連続した場合の評価には適さない。

5　まとめ

システムとしての振る舞いの滑らかさを評価するた

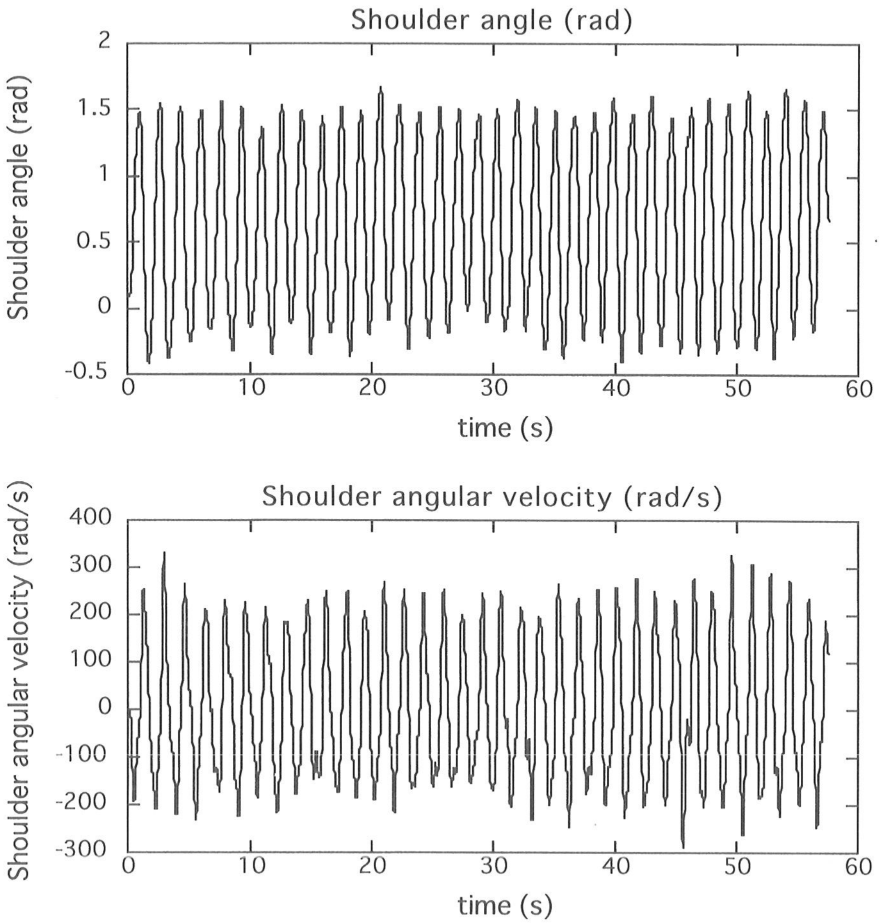

図1　フォアハンドストローク時の肩の角度とその角速度の時系列変化の例

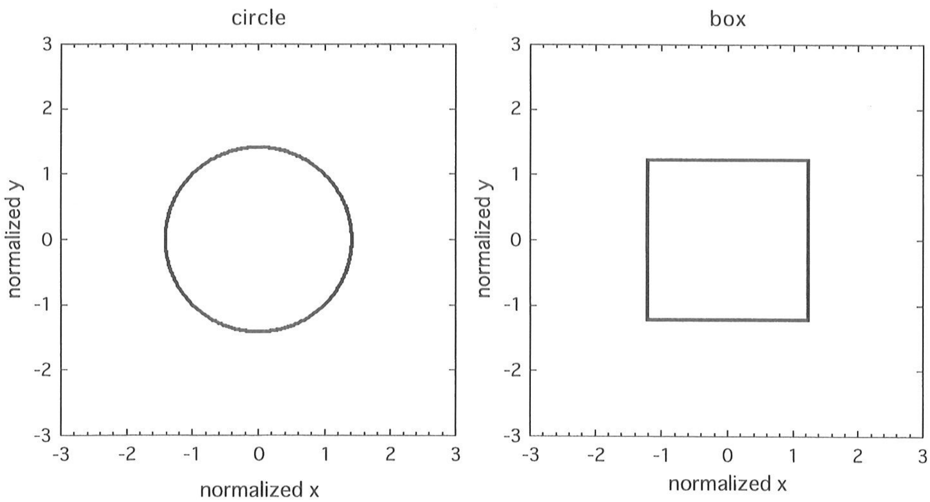

図2　比較基準とした円（左）と正方形（右）

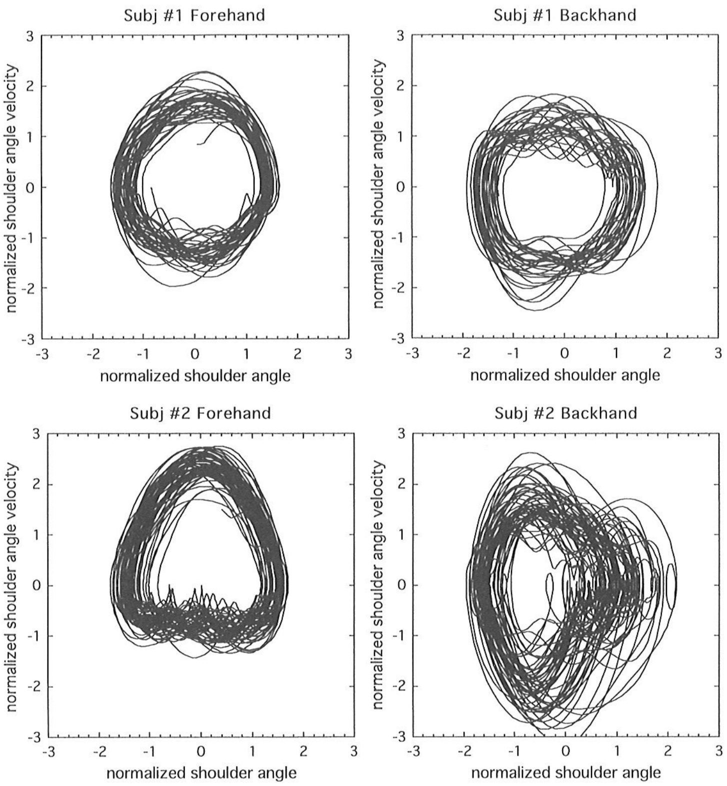

図3　中級者のグランドストローク。左がフォアハンド、右がバックハンドで、それぞれの周期動作

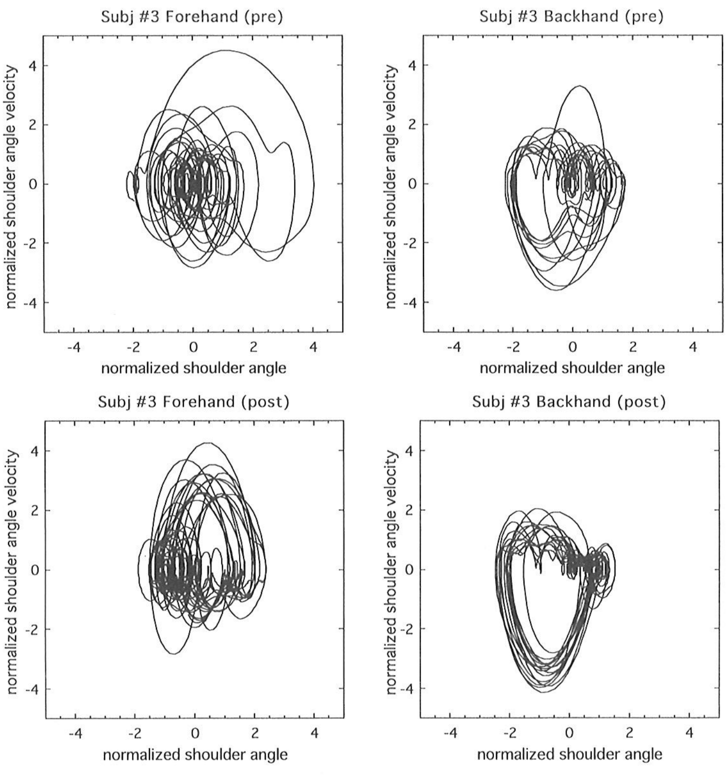

図4　初級者のストローク動作。左がフォアハンド、右がバックハンドで、上段が学習前、下段が学習後

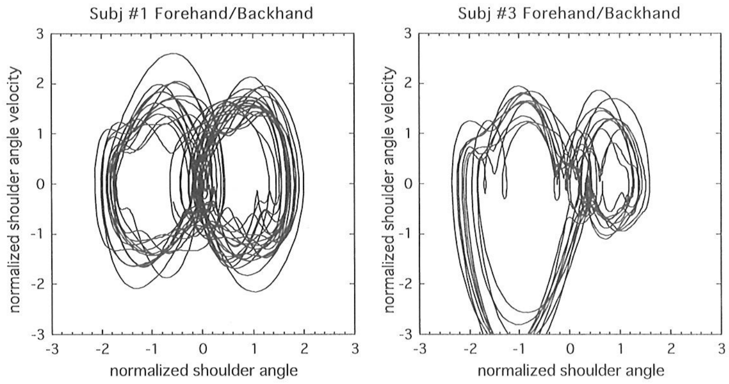

図5　左が中級者の乱順打球動作で、右が初心者の学習後の交互打球動作

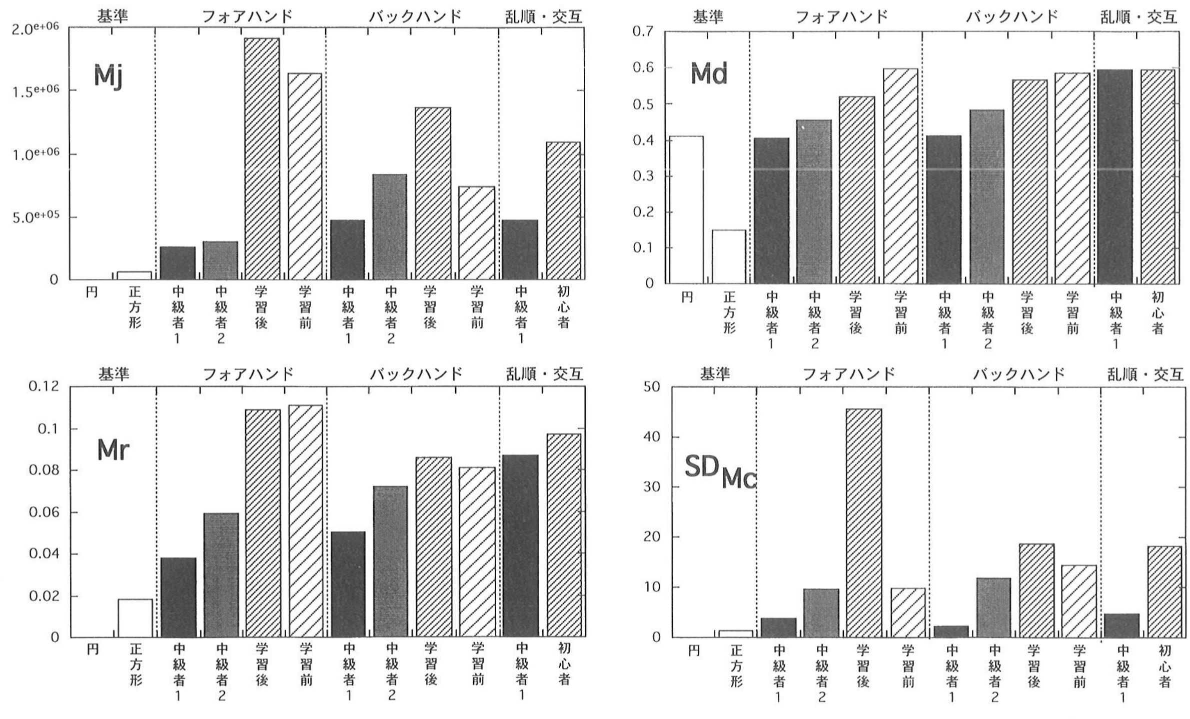

図6　各指標の比較

表1　各標本に基づいて計算された指標の値

標本	M_j	M_d	M_r	SD_{M_c}
円	2.63^{e+00}	0.412	0.000	0.002
正方形	6.12^{e+04}	0.149	0.018	1.454
中級者#1 フォア	2.62^{e+05}	0.405	0.038	3.752
中級者#2 フォア	3.04^{e+05}	0.453	0.059	9.520
初心者#3 フォア学習後	1.91^{e+06}	0.519	0.109	45.570
初心者#3 フォア学習前	1.64^{e+06}	0.598	0.111	9.774
中級者#1 バック	4.68^{e+05}	0.412	0.050	2.187
中級者#2 バック	8.36^{e+05}	0.483	0.072	11.779
初心者#3 バック学習後	1.37^{e+06}	0.568	0.086	18.790
初心者#3 バック学習前	7.42^{e+05}	0.584	0.081	14.517
中級者#1 乱順打球動作	4.71^{e+05}	0.595	0.087	4.673
初心者#3 交互打球動作	1.09^{e+06}	0.595	0.097	18.154

めに、状態空間上の軌道の滑らかさを、躍度、偏差、径変化、曲率の標準偏差の4つの指標から適切な指標を探ろうとした。状態空間上の軌道は、そのシステムの動的な振る舞いを示し、2次元の場合にはポイントアトラクタ、リミットサイクルアトラクタがある。減衰のない自由振動系では固有振動数によって、一定の振幅で振動が持続する。こうした系を状態空間上で表すと、閉曲線（リミットサイクル）を示すことからリミットサイクルアトラクタと呼ばれている。ここで問題とした周期的なテニスのグランドストローク動作は、このリミットサイクルアトラクタに相当し、もし一定の振幅で、ただ一つの三角関数で表されるように、ストローク動作が反復されているならば、規準化した状態空間上の軌道は真円を描く。肘や手首といった身体遠位では、体幹部の回旋が関節を挟んで伝わるため、三角関数の和となる（Bernstein, 1967)。したがって、状態空間上の軌道も真円とはならない。

今回用いた指標の中では、径変化あるいは曲率の標準偏差が、技術レベルを反映する指標であると考えられた。すなわち、システムとして、より効率の良い滑らかな動きをしていると考えられる技術レベルを、状態空間上の軌道の径変化あるいは曲率の標準偏差によって表すことできるということである。

このことは、状態空間上の軌道が真円とならない複数の動きの連続や身体遠位の動きについても、適用することができると思われる。ただし、今回分析した体幹部よりもさらに身体遠位部位の観測データにおいては、フィルタ処理がこれらの指標に影響を与える。特に、径変化や曲率のように時間微分の方法を用いた指標に関しては、微分回数が増えることによって観測データのフィルタの影響を大きく受ける。したがって、このことは身体遠位部位や異なる動きを比較検討する場合への注意を促す。

参考文献

阿江通良・藤井範久（1996）．身体運動における力学的エネルギー利用の有効性とその評価指数．筑波大学体育科学系紀要，**19**，127－137.

Almåsbakk, B., Whiting, H. T. A., & Helgerud, J. (2001). The efficient learner. *Biological Cybernetics*, **84**, 75-83.

Anderson, D. I., & Sidaway, B. (1994). Coordination changes associated with practice of a soccer kick. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **65** (2), 93-99.

Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. London: Pergamon Press.

Bernstein, N. A. (1996). On dexterity and its development. In M. L. Latash, & M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development*, 3-244. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Flash, T., & Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience*, **5** (7), 1688-1703.

Hoenkamp, E. (1978). Perceptual cues that determine the labeling of human gait. *Journal of Human Movement Studies*, **4**, 59-69.

Hoyt, D. F., & Taylor, C. R. (1981). Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature*, **292**, 239-240.

川人光男（1996）．脳の計算理論．東京：産業図書．

Kawato, M. (1993). Optimization and learning in neural networks for formation and control of coordinated movement. In D. E. Meyer, & S. Kornblum (Eds.), *Attention and Performance XIV*, 821-849. Masschusetts, MA: MIT Press.

Newell, K. M. (1985). Coordination, control and skill. In D. Goodman, R. B. Wilberg, & I. M. Franks (Eds.), *Differing perspectives in motor learning, memory, and control*, 295-317. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.

大築立志（1988）．「たくみ」の科学．東京：朝倉書店．

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, **82** (4), 225-260.

Shapiro, D. C., Zernicke, R. F., Gregor, R. J., & Diestel, J. D. (1981). Evidence for generalized motor programs using gait pattern analysis. *Journal of Motor Behavior*, **13**, 33-47.

Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement: Minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, **61**, 89-101.

van Emmerik, R. E. A., den Brinker, B. P. L. M., Vereijken, B., & Whiting, H. T. A. (1989). Preferred tempo in the learning of a

gross cyclical action. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **41A** (2), 251-262.
Yamamoto, Y. (in preparation). Contrasting approaches to the acquisition of coordinative structures in a striking action.
Yamamoto, Y., & Gohara, K. (2000). Continuous hitting movement modeled from the perspective of dynamical systems with temporal input. *Human Movement Science*, **19** (3), 341-371.
Young, R. P., & Marteniuk, R. G. (1997). Acquisition of a multi-articular kicking task: Jerk analysis demonstrates movements do not become smoother with learning. *Human Movement Science*, **16**, 677-701.

（2003年 1 月18日受付）