

3つの運動パターン切替の遷移状態と 切替時間長との規則的關係

Regular relationship between switching-time lengths and transition states
for switching three movement patterns

平川武仁・山本裕二

Takehito HIRAKAWA and Yuji YAMAMOTO

Abstract

This study investigated the regularity that characterizes the behavior of dissipative dynamical systems excited by external inputs with seven switching-time lengths T s (1.95, 1.50, 1.20, 1.05, 0.90, 0.75, and 0.60s.), for tracking movements. A right-handed healthy male participant was asked to continuously track a moving target. The target moved in three directions: leftward, upward, and rightward. These movements were performed under two conditions: one in which the direction was repeated and one in which the directions were switched on a stochastic basis. Data from the conditions under which the same input pattern was repeated revealed three different trajectories in hyper-cylindrical state space \mathcal{M} , whereas the conditions under which the inputs were switched induced transitions among the three excited attractors. The transitions among the three excited attractors were calculated using correlation dimension D_c , and were revealed to be characterized by fractal-like or a self-similar structure. Moreover, D_c increased as T shortened. These results imply an inverse proportional relationship between D_c and T ($D_c \propto 1/T$), and suggest that the continuous tracking movements, which corresponding to three external inputs, were self-organized rather than random.

Keyword: time-series data, switching dynamics, self-similarity, motor control, complex system

1 はじめに

これまで、人間による律動的な運動制御を検証した先行研究は、約1970年以降に発展した運動プログラム理論 (Motor program theory) (Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank, & Quinn, 1979; Schmidt, 1991), 約1980年以降に発展した生態学的視覚論 (Ecological approach to visual perception) (Gibson, 1979), 力学系理論 (Dynamical system theory) (Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Kelso, 1984) の枠組

みに依拠してきている。本論文では、これらの理論のうち、力学系理論、特に Gohara & Okuyama (1999a, 1999b) による非自励力学系 (nonautonomous system: 以下、非自励系) 理論に依拠して、人間の運動制御について検討する。これまでも、さまざまな物理現象 (Arecchi, Gadomski, & Meucci, 1986; Constantin, Procaccia, & Sreenivasan, 1991; Maas, Benielli, Sommeria, & Lam, 1997; Matias, Muñuzuri, Lorenzo, Mariño, & Villar, 1997; Mestl, Bagley, & Glass, 1997; Schmiegel & Eckhardt, 1997; Tanii, Tachikawa, Tohei, Hong, & Shimizu, 1991; Tanii, Tohei, Sugawara, Tachikawa, & Shimizu, 1999) において、非自励系に基づいた現象が確認されてきた。本小節では、人間の身体運動における非自励系の黎明から現在までの経過を総括し、本研究の目的を導出していく。人間の身体運動の自励力学系 (autonomous system: 以下、自励系) 理論や人間の身体運動以外の先行研究の概観は、Hirakawa et al. (2016, 2017) などで総括しているので、本論文では概説を割愛する。

非自励系に基づいて、人間の身体運動について、初めて検証した先行研究は、Yamamoto & Gohara (2000) であり、この研究がこの理論を身体運動に援用した黎明の研究である。この研究では、人間の身体運動において、ある外部入力 (external input) によって産出された特定の運動パターンを励起アトラクタ (excited attractor) と仮定する。彼らが検証した課題は、テニスのフォアハンドとバックハンドの2種類のストロークの運動パターンであり、人間の身体運動として産出されたこれらも2つの励起アトラクタである。彼らは2つの励起アトラクタを切り替える際に産出された運動パターンの変化の動態 (dynamics) を検証した。この動態は切替ダイナミクス (switching dynamics) と呼ばれる。

彼らは、これら2つのストロークの時系列データを状態空間に埋め込み、その時空間構造を幾何学的に研究した。その結果、テニスの2種類のストロークの切替ダイナミクスは、現時点で打撃しているストロークでの運動パターンが、2打前と1打前のストロークの種類(フォアあるいはバック)によって影響を受けていることを明らかにした。すなわち、このことは、現在の運動パターンの産出は、現在の外部入力だけに影響を受けているのではなく、2打前からの3次の系列の影響を受けた構造となり、3次の系列効果になっていることを意味する。さらに彼らは、その構造がカントール集合 (Cantor set) であることを確認した。この結果は、フラクタル様 (fractal-like) あるいは自己相似 (self-similarity) の構造が、複数の運動パターンを切り替えながら反復するときの切替ダイナミクスに存在することを示していた。

さらに、Suzuki & Yamamoto (2015) は、卓球のフォアハンドとバックハンドの切替ダイナミクスを検討課題として、Yamamoto & Gohara (2000) の成果を発展させ、運動パターンを切り替える時間間隔 T (以下、切替時間長: switching-time length) と卓球の技能水準の関係を検証した。この技能水準は、次の小節で説明する内部パラメータ (internal parameter) に該当する。彼らはまず、外部入力によって励起される卓球のフォアハンドとバックハンドの運動パターンも励起アトラクタであることを確認し、その励起アトラクタ間の切替ダイナミクスの動態を定量化した。その定量化として、フラクタル次元の1つである相関次元値 (correlation dimension) を算出した。その結果、彼らは、以下のことを明らかにした。まず、そのダイナミクスはフラクタル様の構造を有することだけでなく、その構造の指標となる相関次元値が切替時間長の短縮に伴って上昇すること、である。次に、相関次元値の最大値と最小値は技能水準による差異はあまりないこと、しかしながら未熟練者が長い切替時間長で相関次元値が上昇し始めることに対して、熟練者は短い切替時間長で上昇し始めたこと、である。つまり、技能水準の違いによって相関次元値の上昇の過程が異なり、より短い切替時間長における熟練者の相関次元値と、より長い切替時間長における未熟練者の相関次元値

が同程度であり、技能水準の違いを相関次元値が反映している可能性を確認した。

さらに、Hirakawa et al. (2016, 2017) は Suzuki & Yamamoto (2015) の成果を発展させ、2方向へのポインティング運動、2ヶ所でのトラッキング運動のそれぞれの課題を対象にして、2方向あるいは2ヶ所での運動パターンを切り替えたときの、切替ダイナミクスの動態と切替時間長 T との関係を検討した。彼らは、Yamamoto & Gohara (2000) と Suzuki & Yamamoto (2015) と同様に、外部入力によって励起されるポインティング運動とトラッキング運動の運動パターンの出力も励起アトラクタであることを確認した後、複数の切替時間長における切替ダイナミクスの動態である遷移状態としてのフラクタル次元を相関次元値で推定した。その結果、人間のポインティング運動とトラッキング運動においても、Yamamoto & Gohara (2000) や Suzuki & Yamamoto (2015) のように、3次の系列効果があること、その構造はフラクタル様の構造あるいは自己相似構造であること、を確認した。さらに、切替時間長 T と相関次元値 D_c には逆比例の規則的関係があり、その関係は $D_c \propto 1/T$ であることが認められた。この切替時間長 T は、次の小節で説明する外部パラメータ (external parameter) に該当する。

これら一連の研究の結果から言えることは、以下である。まず、運動プログラム理論においては、連続的な行動は低い柔軟性の運動プログラムによって反復された実行の結果として考えられていたため (Yamamoto & Gohara, 2000)、連続的な行動で生じた変動性は、確率論的なガウス分布 (Gaussian distribution) あるいは乱順な変動性 (random distribution)、例えば一様分布 (uniform distribution) や白色誤差 (white noise) で構成されると考えられていた。しかしながら、実際には、その変動性はフラクタル様あるいは自己相似の構造であったことである。また、この変動性は全ての生物学的システム内で固有であり、空間と時間の両方における変動を反映する。つまり、彼らよりも過去の生物学的な先行研究においては、生体の空間的な幾何学構造 (Goldberger, Rigney, & West, 1990) を明らかにしてきたが、人間の身体運動において産出された運動パターンの時空間構造に、このフラクタル様あるいは自己相似の構造が認められたことが新しい成果といえる。

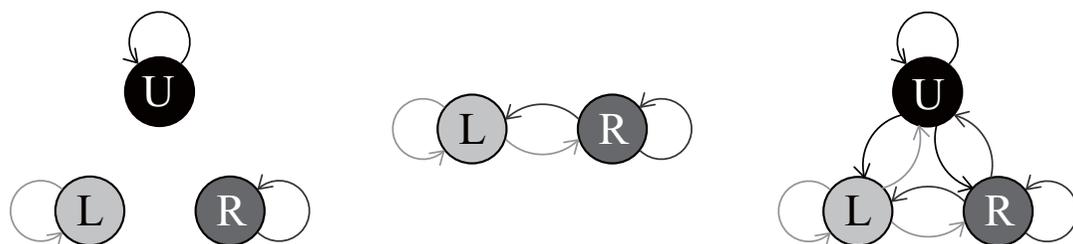


図1：複数のシステム間の相互作用。左側のパネルは、上、左、右方向のみに往復するターゲットを連続的に追従するシステム（自励系）を示している。中央のパネルは、左、右の2つのいずれかの方向に連続的にランダムに切り替わりながら往復するターゲットを追従するシステム（Hirakawa et al., 2016 より引用）を示している。右側のパネルは、3つのシステムを示している。

図1は、本研究の現象を表した概念図である。後述のように、本研究では3方向のいずれかに往復移動するターゲットを追従する課題を検討する。図1左は、1つのアトラクタが励起され、連続的に同じ運動パターンが産出される周期的トラッキング運動を示している。これは、一つの方向のみのトラッキングの繰り返しであり、外部入力として、左下 (Leftward: 以下, L)、上 (Upward: 以下, U)、右下 (Rightward: 以下, R) のいずれかの場所のみでターゲットが往復するように移

動する。図1中央は、LとRの2つの場所を、連続的に乱順に切り替わるターゲットを追従しながら、連続的に産出されるトラッキング運動の切り替り動態を示している。もし我々が、運動プログラム理論によって連続的な人間の運動パターンの切り替わりを理解するならば、前述のように、人間が出力した連続的な運動は乱順なパターンで構成される。

しかしながら、前述の一連の研究では、乱順に呈示される外部入力でありながらも、その呈示の系列は8つの系列パターンのみ (RRR, LRR, RLR, LLR, LRL, RRL, RLL, そしてLLL) に分割できる系列で構成されており、それは3次の系列であった。仮に、外部入力が乱順に呈示されたことに影響を受けて、人間が産出した運動パターンが乱順な状態になるならば、この3次の系列によって産出された運動パターンは影響を受けない。すなわち、産出されたパターンの平均をこれらの系列ごとに求めても、1つの運動パターンに収束すると考えられる。反対に、人間が産出した運動パターンが8つの系列の影響を受けるならば、8つの系列ごとに産出された運動パターンの平均を求めると、8つのパターンが認められるだろう。前述の一連の研究結果 (Yamamoto & Gohara, 2000; Suzuki & Yamamoto, 2015; Hirakawa et al., 2016, 2017) は、この後者を支持した。それゆえ、人間が連続的に急速に複数の運動パターンを切り替える運動では外部入力の系列の影響を受けること、その構造はフラクタル様あるいは自己相似の構造となる、と考えられる。

本研究では、次の小節で概説する、Gohara & Okuyama (1999a, 1999b) による理論モデルを人間の運動制御に援用し、前述の課題 (Yamamoto & Gohara, 2000; Suzuki & Yamamoto, 2015; Hirakawa et al., 2016, 2017) をさらに発展させる。本実験の目的は、まずこれまでの一連の先行研究で検証されてきた2つの外部入力から3つの外部入力に入力数を増やすこと (図1右)、その外部入力が高率論的に急速に切り替えられたときに産出される運動パターンについて、パターンの切替時の遷移状態が外部入力の系列に影響を受け自己相似構造となるかどうかを、連続力学系のデータから質的に、離散力学系のデータから量的に確認すること、そして自己相似構造であった場合には切替時間長 T とその構造の推定値である相関次元値との関係を確認すること、を目的とした。

2 非自励力学系理論

複雑系において、アトラクタ間の相互関係に関する力学系理論を用いた研究は、自励系 [例えば、Kelso (1995)] と非自励系 [例えば、Gohara & Okuyama (1999a, 1999b)] の2つの異なる系のいずれかに依拠して検討されてきた。前者は閉じた系 (closed system)、後者は開いた系 (open system) と考えられている。常微分方程式によって系を定義すると、自励系は $\dot{x}=f(x)$ として表現される。非自励系は周期的な入力時間 $I(t)$ に依存し、一般的には次式によって定義される。

$$\dot{x}=f[x, I(t)], x, I \in R^N \quad (1)$$

x と f は系の状態とベクトル場である。式(1)は、状態 x の時間発展が他の系からの入力 $I(t)$ によって影響されることを意味している。前述したように、外部入力 $I(t)$ によって励起されるアトラクタは励起アトラクタである。この理論では、時間経過によって入力 $I(t)$ がベクトル場をどのように変化させるか、に関心がある。

周期入力 $I(t)=I(t+T)$ を伴う散逸力学系 (dissipative dynamical system) では、角度変数

$\theta \equiv \frac{2\pi}{T}t \pmod{2\pi}$ と新たな状態変数 $y \equiv (x, \theta)$ を導入することで、非自励系 $y \equiv (x, \theta)$ を連続力学系に変化させる。

$$\dot{y} = f(y), \quad y \in R^N \times S^1 : \mathcal{M} \quad (2)$$

連続力学系として、超円筒状態空間（以下、状態空間） \mathcal{M} を用いると、 $t=0$ ($\theta=0$) での初期状態 x_0 から始まる解 ϕ は $t \rightarrow \infty$ でアトラクタに収束すると表現できる。

さらに、状態空間 \mathcal{M} を用いると、ポアンカレ断面 $\Sigma = \{(x, \theta) \in R^N \times S^1 \mid \theta = 2\pi\}$ を定義でき、 $\theta=0$ での初期状態から開始した、あるアトラクタの軌道は $\theta=2\pi$ で同一点に戻っていく。状態空間 \mathcal{M} の中にポアンカレ断面 Σ を導入することで、我々は次の離散力学系を定義できる。断面 Σ では、状態 x_τ は、間隔 T 後に写像 g_τ によって他の状態 $x_{\tau+1}$ に変換される。それゆえ、連続力学系（式 2）と離散力学系（式 3）で、変化の動態を研究できる。

$$x_{\tau+1} = g_\tau(x_\tau), \quad x_\tau \in R^N : \Sigma \quad (3)$$

さらに、他の部分系と相互作用する部分系であれば、非自励系での外部環境であると仮定される（Gohara & Okuyama, 1999a, 1999b; Nishikawa & Gohara, 2002; Sato & Gohara, 2001; Wada & Gohara, 2001a, 2001b）。ここで、いくつか異なる入力パターンが確率論的に連続的に系に投入されたときの変化の動態を考えてみる。そこでは、時間関数 I_t の集合 $\{I_t\}_{t=1}^L$ として入力を仮定する。下付きの文字とそれぞれの集合は単純化のために $\{\cdot\}$ のように省略して表現する。

もし入力 $\{I_t\}$ が連続的に確率論的に系に投入されたとき、ベクトル場 $\{f_t\}$ と反復関数 $\{g_t\}$ は確率論的に切り替えられることになる。つまり、力学系の 2 つの集合があり（それは集合 $\{I_t\}$ に対応する連続力学系と離散力学系）、これらの系は集合 $\{f_t\}$ と集合 $\{g_t\}$ によって、それぞれ定義される。反復関数の集合 $\{g_t\}$ は反復関数系（Iterated Function System : IFS）と呼ばれる（Barnsley, 1993）。ポアンカレ断面 Σ 上の離散的な動的な変化が確率を伴う IFS を用いた乱順な反復アルゴリズムであるとき、写像 g_t は縮小写像となる（Gohara & Okuyama, 1999b）。同様に、集合 $\{f_t\}$ はベクトル場であり、ベクトル場系（Vector Fields System : VFS）と呼ばれる（Gohara & Okuyama, 1999a; Nishikawa & Gohara, 2002）。これらの集合の関係は次のように表現できる。

$$\{I_t\} \rightarrow \{f_t\} \rightarrow \{g_t\} \quad (4)$$

入力 $I(t)$ の系列が急速に等確率で切り替えられ、十分な切替時間長が系に投入されるとき、ポアンカレ断面上の集合 C は次式を満たす。これは不変集合 C への収束を引き起こすことを意味する（Barnsley, 1993）。

$$C = \bigcup_{t=1}^L g_t(C) \quad (5)$$

そして、集合 C は状態空間 \mathcal{M} 中での軌道 $\Gamma(C)$ に強く影響を及ぼすことになる。それぞれの入力 $I(t)$ に影響を受ける軌道の集合 $\Gamma(C)$ は、状態空間 \mathcal{M} 中の初期集合 C から開始し、軌道の集合の束 $\gamma_t(C)$ となる。これは次の不変軌道の集合となる。

$$\Gamma(C) = \bigcup_{l=1}^L \gamma_l(C) \quad (6)$$

全ての反復関数 $g_l (l=1, 2, \dots, L)$ が縮小である場合、式(5)と式(6)は解析的に証明できる。さらに切替時間長を変える場合には、相関次元値を用いて集合 C あるいは軌道の集合 $\Gamma(C)$ の構造を推定できる。これは、Gohara & Okuyama (1999a, 1999b) による力学系の詳細な理論的説明に基づく。もしこの理論による励起アトラクタが、人間の運動でも仮定できるならば、連続的な外部入力によって、人間の運動パターンが産出されるだろう。このことは、非自励系の見地から、いくつかの運動パターンが確率論的に励起される状況として、人間の運動制御を検証可能とすることを意味する。

さらに、ポアンカレ断面上の遷移状態は、相関積分を用いた GP 法 (Grassberger & Procaccia, 1983) によって算出される相関次元値 D_c で数量化できる。それゆえ、理論的には、Gohara & Okuyama (1999b) によって提案された切替時間長 T と相関次元値 D_c の関係は、下記ようになる。

$$D = \frac{-\ln N}{\lambda T} \quad (7)$$

ここで、 N 、 λ 、そして T は、外部入力の数 (本研究では $N=3$)、人間の内部パラメータ、外部パラメータであり、特に T は切替時間長である。本研究では、内部パラメータは定数であると仮定し、相関次元値 D_c は切替時間長 T と逆比例の関係 ($D_c \propto \alpha/T$) になると推測される。ここで α は定数項である。これらの理論的根拠に基づいて、本研究を実施する。

3 方法

3.1 測定参加者

健常な男性 1 名 (42 歳, 身長 1.76m, 体重 63.0kg) であり、視覚に問題無く、Edinburgh handedness inventory (Oldfield, 1971) ラテラルリティ指数で右利きと評価された。神経学的・骨格筋的障害あるいは傷害など既往歴の申告は無かった。

3.2 測定機器

ターゲットおよびターゲットを追従するカーソルは、コンピュータ (Lenovo ThinkPad Edge140, Windows 7pro, 32bit, Intel(R) Celeron(R) CPU887@1.50GHz, RAM6.00GB, SSD: PLEXTOR PX-256M5Pro) に接続されたモニター (20 インチ, 1024 × 768 pixel) 上に呈示された。ペン・タブレット装置 (Wacom, Intuos 5 large, PTH-850/K0, ペン入力読取可能範囲: 325.1 × 203.2mm, 読み取り分解能: 最高 0.005mm, 読み取り精度: ± 0.25mm, 読み取り速度: 最高 200 ポイント / 秒) を用いて、ペン・タブレットに接触しているペン先の位置がモニター上のカーソルとして表示され、その位置データがサンプリング周波数 250Hz で測定された。ターゲット、カーソルの表示およびペンの位置データの収集は、PC 内の LabVIEW プログラムを用いて制御されていた (図 2)。

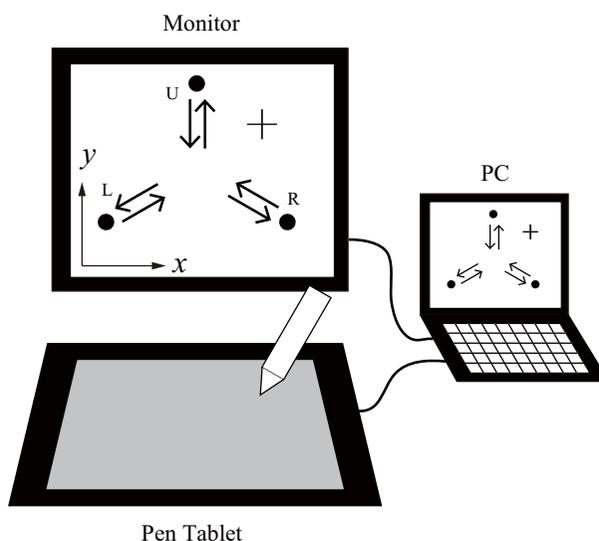


図2：実験装置。実際の測定では、モニター中の背景は灰色、ターゲットは赤色の円形、カーソルは白色の十字で表示される。ターゲットUは上からモニター中央に向かって往復する。ターゲットLは左下からモニターの中央に向かって往復する。ターゲットRは右下からモニター中央に向かって往復する。

3.3 課題と手続き

参加者は、測定が始まる前に、モニターに正対し、ペン・タブレット上にペンを接触させて、静止した。参加者は、モニター上で、L、U、Rの3つのいずれかからモニターの中心に向かって往復運動するターゲットを、カーソルで追従するように教示されていた。参加者が握っていたペンは、モニター上で、白色十字のカーソルとして表示されるように設定されていた。ターゲットが一往復する時間（切替時間長 T ）は計7条件（1.95, 1.50, 1.20, 1.05, 0.90, 0.75, 0.60s.）であった。

参加者は、Uのみ、Lのみ、Rのみ、でターゲットが往復を繰り返す周期入力条件と、U、L、Rのいずれかの位置でターゲットが乱順に切り替わって往復する切替入力条件を試行した。まず各切替時間長 T において、U、L、Rのいずれかの方向のみを往復するターゲットを追従する周期入力条件を各1試行実施した。周期入力条件では、ターゲットが往復する回数は1試行で32回であった。切替入力条件では、ターゲットが往復する回数は1試行で83回であり、各切替時間長 T で10試行を実施した。切替入力条件で、各試行のターゲットの最後2回の往復は、1つ後の試行の最初2回と同じ方向に設定していた。それゆえ、各切替時間長での切替入力条件のターゲットの往復回数は810回（ $= (83 - 2) \text{回} \times 10 \text{試行}$ ）であった。切替入力条件では、U、L、Rを乱順に呈示したが、その呈示順はU、L、Rの3方向の3次の系列で構成されており、計27パターンの系列（UUU, LUU, RUU, ULU, LLU, RLU, URU, LRU, RRU, UUL, LUL, RUL, ULL, LLL, RLL, URL, LRL, RRL, UUR, LUR, RUR, ULR, LLR, RLR, URR, LRR, RRR）であった。そのため、各系列のデータ数は、それぞれ30データとした（810回 $=$ 27パターンの系列 \times 30データ）。試行間には自由に休憩を取ることができ、休憩の時間は参加者の要望によって決めることができた。

3.4 データ処理

モニター（図1の xy 平面）上における位置座標が x, y 軸上のpixel単位によるデータとして収集された。状態空間 \mathcal{M} 中のポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=0, 2\pi)$ は、L, U, Rでターゲットがモニター中心方向へ移動を開始した時点と終了した時点を基準として、時系列データが基準化された。相関積分を用いたGP法（Grassberger & Procaccia, 1983）によって、各切替時間長 T におけるポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=2\pi)$ 上の集合 $g(C)$ をデータとして、相関次元値 D_c を計算した。切替時間長と相関次元値の關係は、先行研究（Gohara & Okuyama, 1999b）理論を援用し、反比例の適合曲線 $(D_c \propto a/T)$ で推定した。ただし、本研究では定数項を含めた適合曲線 $(D_c \propto a/T+b)$ を適用した（Hirakawa et al., 2016, 2017）。その際、係数 a と定数項 b の値の選択は、相関次元値の結果に対して、係数 a を0.001から1.000まで0.001毎に、定数項 b を0.001から2.000まで0.001毎に変化させながら、平均残差平方和が最小となった値とした。適合曲線の妥当性の判断は、赤池情報量規準（Akaike's Information Criterion：以下、AIC）を用いた。その際、まず全ての切替時間長 T における相関次元値 D_c を用いて適合曲線を推定し、そのAICを算出した。次に、切替時間長 $T=0.60s$ の相関次元値を除いて、適合曲線を推定し、そのAICを算出した。順次、この手続きを繰り返し、切替時間長 $T=1.20s$ までの相関次元値を除いて適合曲線を推定し、そのAICを算出し、比較した。

4 結果

4.1 周期入力条件

図3は、典型例として、周期入力条件下（0.60s.）での結果を示している。図3上段から2段目までの左側のパネルは、周期入力条件下でLを追従したときの時系列データの一部である。1段目が x 軸、2段目が y 軸のそれぞれの方向におけるカーソルの移動の変化を示している。同様に、中列はU、右列はRを追従したときの結果の一部である。それぞれのパネル中の三角形はターゲットの移動が開始した時点を示している。Lは下向きの黒色三角（▼）、Uは上向きの黒色三角（▲）、Rは下向きの白色三角（▽）である。

3段目のパネルは、時系列データの軌道を状態空間 \mathcal{M} にそれぞれ埋め込んだときの結果である。つまり、外部入力で励起された、それぞれの励起アトラクタを示している。3段目は、1段目、2段目とそれぞれ対応している。例えば、左側の状態空間は、1段目と2段目の左側のパネルと対応している。これらのパネルの状態空間 \mathcal{M} 中のポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=0, \theta=2\pi)$ は、それぞれのターゲットの移動が開始した時点と終了した時点（前述の三角形の時点）である。断面 Σ 上の横断面を視認しやすくするため、断面の前後の軌道を省略している。これらのパネルに示した結果を同一空間に統合した結果が、下段左側のパネルである。また図4は、切替時間長0.60s.以外の状態空間 \mathcal{M} である。これらのパネルから、連続力学系として、状態空間 \mathcal{M} 中の励起アトラクタの軌道の集合 (A_L, A_U, A_R) が質的に異なっていることを容易に確認できる。

次に、ポアンカレ断面 Σ 上の集合を確認するため、下段左側の状態空間 \mathcal{M} を $\theta-(x, y)$ 空間に時間展開した結果が図3下段右側のパネルである。断面 Σ 上の横断面を視認しやすくするため、断面の前後の軌道を省略している。これらの結果は、ポアンカレ断面上の $\theta=0$ （すなわち、ターゲット開始時点）での初期集合 C からスタートする全ての軌道の集合が $\theta=2\pi$ で再び初期集合 C に帰着することを示している。Lを追従しているとき、周期条件下での軌道の集合 A_L が $\theta=0$ で連続

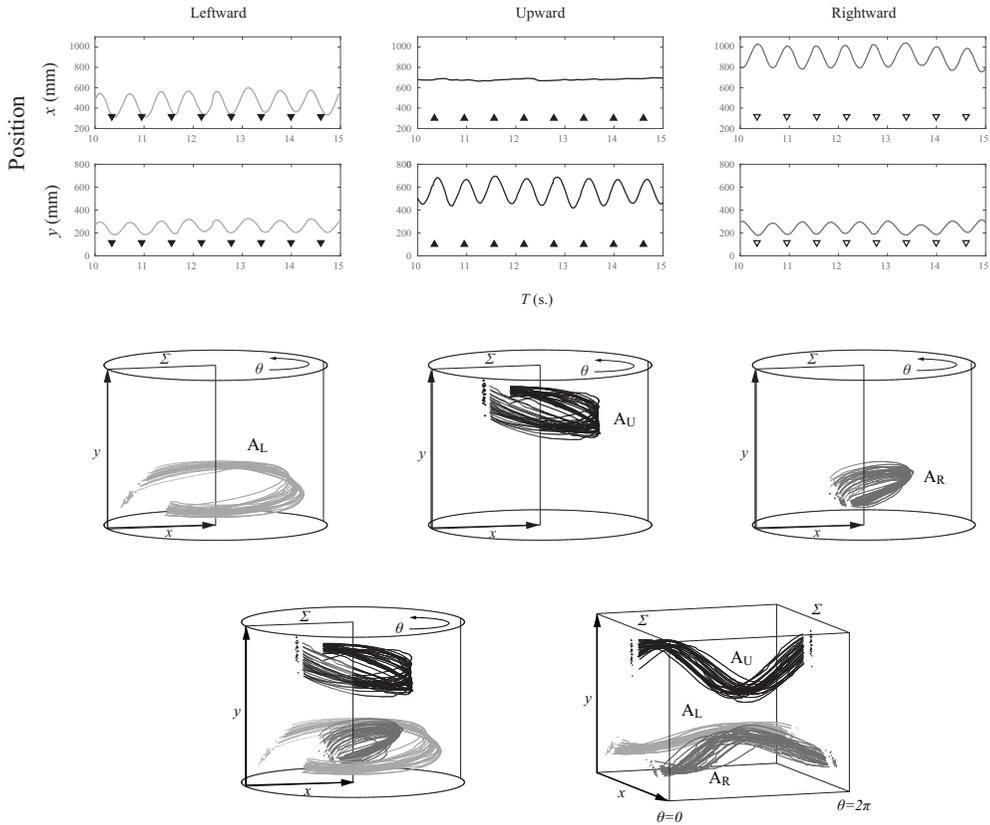


図3：周期入力条件での結果。切替時間長 $T=0.60s$ の結果を典型例として選択した。上段から2段目までは、 x, y 方向でのカーソルの移動の結果を示している。下向きの黒色三角(▼)はL, 上向きの黒色三角(▲)はU, 下向き白色三角(▽)はRが往復運動を開始した時点あるいは終了した時点を示している(L, U, Rのアルファベットの意味は本文参照)。3段目のパネルは上段のパネルと対応させた状態空間 \mathcal{M} 中に埋め込んだ励起アトラクタ (A_L, A_U, A_R) を示している。下段の左側パネルは3段目のパネルにおけるそれぞれの励起アトラクタを1つの状態空間 \mathcal{M} に埋め込んだ結果を示しており、右側のパネルは4段目左側のパネルの状態空間 \mathcal{M} を $\theta-(x, y)$ 空間に時間展開した結果を示している。

的に初期集合 C_L からスタートし、 $\theta=2\pi$ で集合 C_L で終わる。同様に、Uを追従しているとき、周期条件下での軌道の集合 A_U が $\theta=0$ で連続的に初期集合 C_U からスタートし、 $\theta=2\pi$ で集合 C_U で終わる。Rを追従しているときも同様である (A_R が初期集合 C_R からスタートし、 $\theta=2\pi$ で集合 C_R で終わる)。

さらに、離散力学系における励起アトラクタの集合が数量的に異なるかどうかを検証するため、各参加者と各切替時間長での多変量分散分析 (MANOVA) (Wilks' λ) した結果が表1である。この結果は、全ての切替時間長において、ポアンカレ断面 ($\theta=2\pi$) 上の集合 (C_L, C_U, C_R)、つまり各励起アトラクタが有意に異なっていることを示している。

すなわち、図1の概略図のように、上左右方向へのトラッキング運動に固有な運動パターンのアトラクタ(図3下段の A_L, A_U, A_R)があり、これらのアトラクタは外部入力によって励起され、リミッ

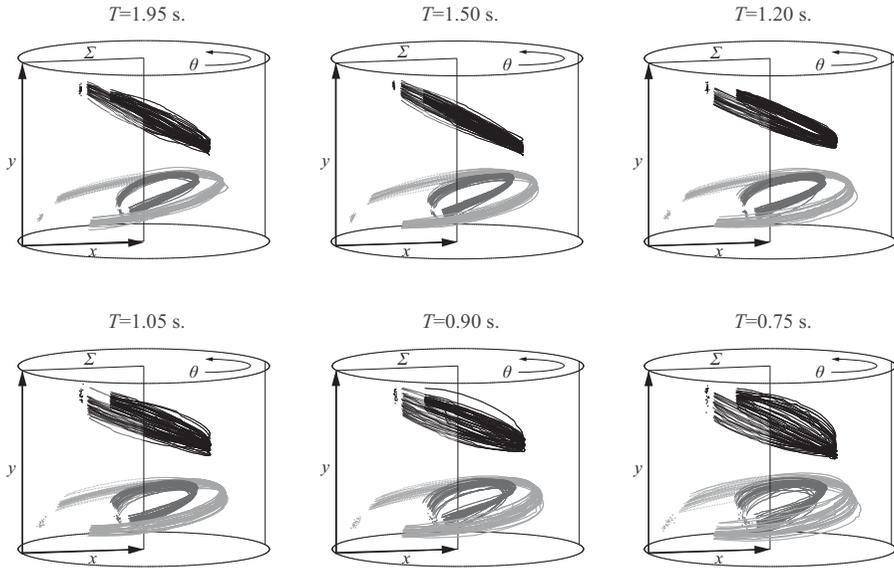


図4：周期入力条件における切替時間長 $T = 0.60\text{s}$. 以外の状態空間 \mathcal{M} に埋め込んだ励起アトラクタの結果。

表1：周期入力条件における各入力 (L, U, R) でのポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=2\pi)$ 上の x , y 軸上の平均値と標準偏差, および多変量分散分析 (Wilks' λ , F 値) の結果 (***: $p < .001$)。

T(s.)	L		U		R		λ	$F(4,172)$	p	
	M	SD	M	SD	M	SD				
1.95	x	349.4	10.1	679.3	4.9	1010.0	9.6	0.00	37867.0	***
	y	397.2	6.2	845.8	8.9	403.4	7.3			
1.50	x	339.6	10.0	679.4	4.3	1010.0	12.3	0.00	37388.0	***
	y	399.1	7.6	863.7	7.7	399.4	6.7			
1.20	x	356.1	12.7	683.2	5.2	999.7	11.1	0.00	28078.0	***
	y	407.9	7.1	853.2	10.5	401.9	7.0			
1.05	x	358.9	14.5	684.3	7.5	992.1	13.1	0.00	17158.0	***
	y	406.6	9.5	854.5	14.9	408.7	8.6			
0.90	x	358.9	20.6	686.1	6.2	1006.1	20.4	0.00	12579.0	***
	y	406.5	10.6	855.0	12.8	399.3	10.2			
0.75	x	359.1	27.3	681.6	7.9	996.0	22.2	0.00	8413.1	***
	y	406.4	13.0	858.9	16.3	403.3	11.4			
0.60	x	398.1	38.2	679.6	6.2	993.6	23.8	0.00	4946.8	***
	y	425.7	19.3	844.9	28.1	400.9	11.8			

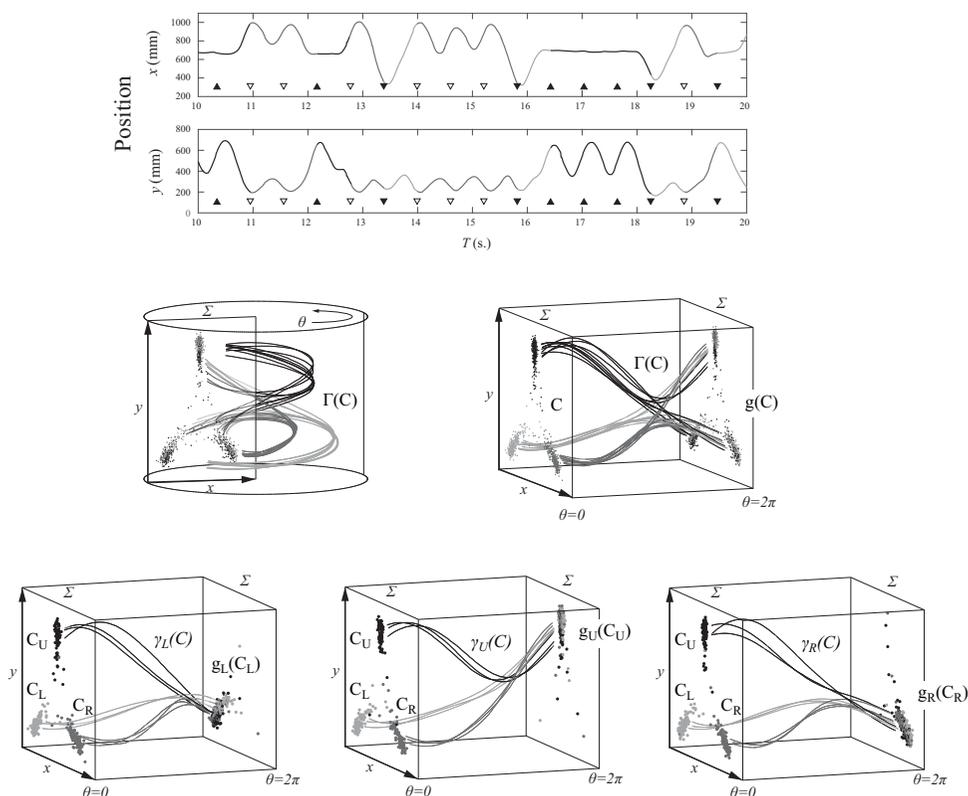


図5：切替入力条件での結果。切替時間長 $T=0.60\text{s}$ の結果を典型例として選択した。上段から2段目までは、 x 、 y 軸方向でのカーソルの移動の結果を示している。下向きの黒色三角 (\blacktriangledown) はL, 上向きの黒色三角 (\blacktriangle) はU, 下向き白色三角 (\triangledown) はRで、ターゲットが3ヶ所のいずれかの場所で往復運動を開始した時点あるいは終了した時点を示している。3段目の左側のパネルは状態空間 \mathcal{M} に埋め込んだ結果を、右側のパネルは左側のパネルを $\theta - (x, y)$ 空間へ時間展開した結果を、それぞれ示している。下段のそれぞれのパネルは中段の右側の結果を、現時点でL(左側のパネル), U(中央のパネル), R(右側のパネル)のターゲットを追従していたときの結果にそれぞれ分割して示した。

トサイクルアトラクタであることを示している。しかしながら、周期入力条件と異なる切替入力条件、すなわち3方向のターゲットのうち、いずれかのターゲットを追従するように、その順序、いわゆる系列、が乱順に切り替えられた場合、いずれのアトラクタに収束するかどうか、あるいは乱順の系列であるがゆえに、状態空間 \mathcal{M} 内に散在してしまうかどうか、は不明である。そこで、次の小節では、ターゲットを乱順に呈示したときに産出される運動パターンの動態を検討する。

4.2 切替入力条件

図5は、典型例として、切替入力条件下 (0.60s) での結果を示している。図5上段のパネルは、切替入力条件下での時系列データの一部である。1段目が x 軸、2段目が y 軸のそれぞれの方向におけるカーソルの移動の変化を示している。それぞれのパネル中の三角形はターゲットの移動が開始した時点を示している。Lは下向きの黒色三角 (\blacktriangledown)、Uは上向きの黒色三角 (\blacktriangle)、Rは下向き

の白色三角 (∇) である。

3段目の左のパネルは、時系列データの軌道を状態空間 \mathcal{M} に埋め込んだときの結果である。ポアンカレ断面 Σ 上の集合には、全てのデータをプロットしている。状態空間 \mathcal{M} 中の軌道は、3次の系列ごとの平均軌道である。断面 Σ 上の横断面を視認しやすくするため、断面の前後の軌道を省略している。図3と図4と同様に、状態空間 \mathcal{M} 中のポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=0, 2\pi)$ は、それぞれのターゲットが開始した時点と終了した時点（前述の三角形の時点）である。ポアンカレ断面 Σ 上の集合と連続力学系としての各軌道の変化を明確に確認するため、状態空間 \mathcal{M} を $\theta-(x, y)$ 空間に時間展開した結果が3段目の右側のパネルである。これらの結果は、ポアンカレ断面 ($\theta=0$) 上の（すなわち、ターゲット開始時点での）初期集合 C からスタートする軌道の集合 $\Gamma(C)$ が $\theta=2\pi$ で集合 $g(C)$ に帰着することを示している。

さらにターゲットの呈示順序（系列）によって産出された軌道の集合を詳細に確認するため、 $\theta-(x, y)$ 空間の結果を、一つ前の入力と現在の入力によって分割したのが、最下段の3つのパネルである。左側のパネルは現在の入力がL、中央のパネルはU、右側のパネルはRである。これらのパネルに共通して、一つ前の入力がLの場合は最も薄い灰色、Uの場合は黒色、Rはその中間の色で、軌道の集合 $\gamma(C)$ と断面 Σ 上の集合 $g(C)$ を表示している。断面 Σ 上の横断面を視認しやすくするため、断面の前後の軌道を省略した。左側のパネルでは、現在の入力としてLを追従したとき、一つ前の入力Lとして軌道の集合 $\gamma_L(C_L)$ 、一つ前の入力Uとして軌道の集合 $\gamma_U(C_U)$ 、一つ前の入力Rとして軌道の集合 $\gamma_R(C_R)$ が、それぞれ $\theta=0$ での初期集合 C_L, C_U, C_R からスタートし、 $\theta=2\pi$ で集合 $g_L(C_L)$ で終わったことを示している。同様に中央のパネルでは、 $\theta=2\pi$ で集合 $g_U(C_U)$ で終わったこと、右側のパネルでは、 $\theta=2\pi$ で集合 $g_R(C_R)$ で終わったことを示している。

これらの結果は、ポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=0)$ 上の軌道の集合 C が異なる3つのクラスターからスタートしていることを確認できたことを示している。さらに、これらの結果は、現在の出力パターンが現在の入力だけでなく、一つ前の入力から影響を受けていることを表している。例えば、現在の入力の影響を受けた軌道 $\gamma_L(C)$ は、一つ前の入力の影響を受けながら断面 $\Sigma(\theta=0)$ 上での3つのクラスター (C_L, C_U, C_R) からスタートし、断面 $\Sigma(\theta=2\pi)$ で $g_L(C_L)$ に帰着するのである。それゆえ、これらのクラスターは外部入力の系列 LL, RL, UL で構成されていたことになる。図5の最下段の中央と右側のパネルの結果は、外部入力の系列 LU, RU, UU や、LR, UR, RR も同じ様に、1つ前の外部入力の影響を受けた結果となっていた。これらの結果は、状態空間 \mathcal{M} と $\theta-(x, y)$ 空間において、3方向にそれぞれ移動するターゲットを連続的にトラッキングする運動が、9つのクラスターで構成されていることを示している。

図6は、切替入力条件における切替時間長 0.60s. 以外の出力パターンを確認するために、状態空間 \mathcal{M} への埋め込みから $\theta-(x, y)$ 空間へ時間展開したそれぞれの結果を示している。各パネルの配色は、図5と同様であり、軌道 $\Gamma(C)$ は各系列ごとの平均軌道である。ポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=0, 2\pi)$ 上は、全ての結果をプロットした。断面 Σ 上の横断面を視認しやすくするため、断面の前後の軌道 $\Gamma(C)$ を省略した。各パネルの上段から切替時間長 1.95, 1.50, 1.20, 1.05, 0.90, 0.75s. の順に配置し、最左列が全ての系列の平均軌道である。この空間をそれぞれ2次の系列ごとに分割し、左側から2列目の空間に現在の入力がL、その右側の列の空間にU、最右列の空間にR、の結果を示した。これらの結果は、切替入力条件下において、いずれの切替時間長 T においても、現在の出力パターンが一つ前の外部入力の影響を受けていること、すなわち連続力学系の軌道 $\Gamma(C)$ において、2次の系列効果を確認できたことを示している。

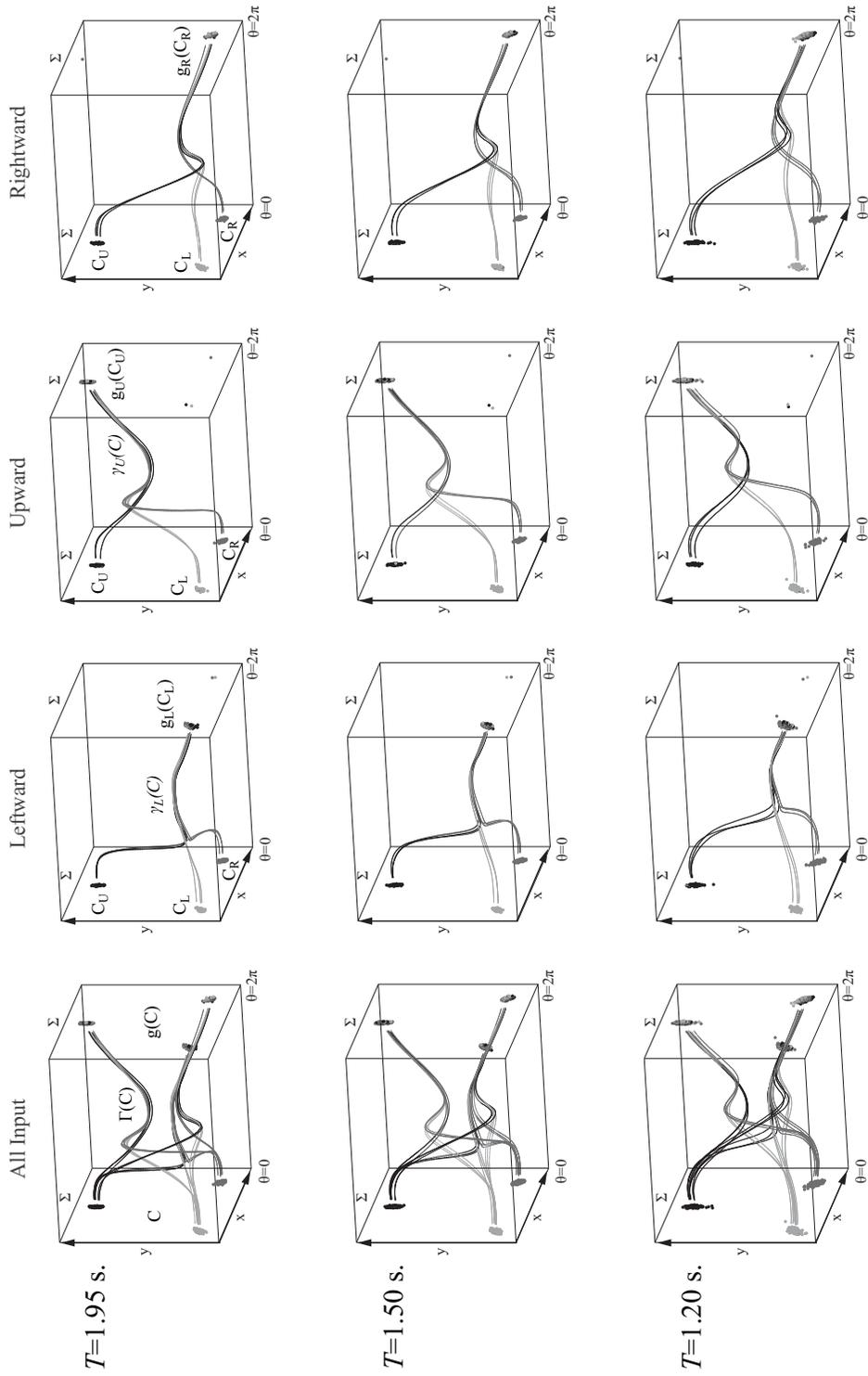


図6：切替入力条件での $\theta - (x, y)$ 空間への時間展開図。上段から、切替時間長 T が 1.95s., 1.50s., 1.20s. の結果である。各パネルの各軌道は 27 系列毎の平均軌道であり、ポアンカレ断面 $\Sigma (\theta=0, 2\pi)$ 上には全ての結果をプロットしている。各パネルは、行側にも各切替時間長 T を配置し、列側の最左列は全ての結果、左から 2 列目には現時点の入力が L, 3 列目には U, 最右列には R のときの結果をそれぞれ分割して示した。

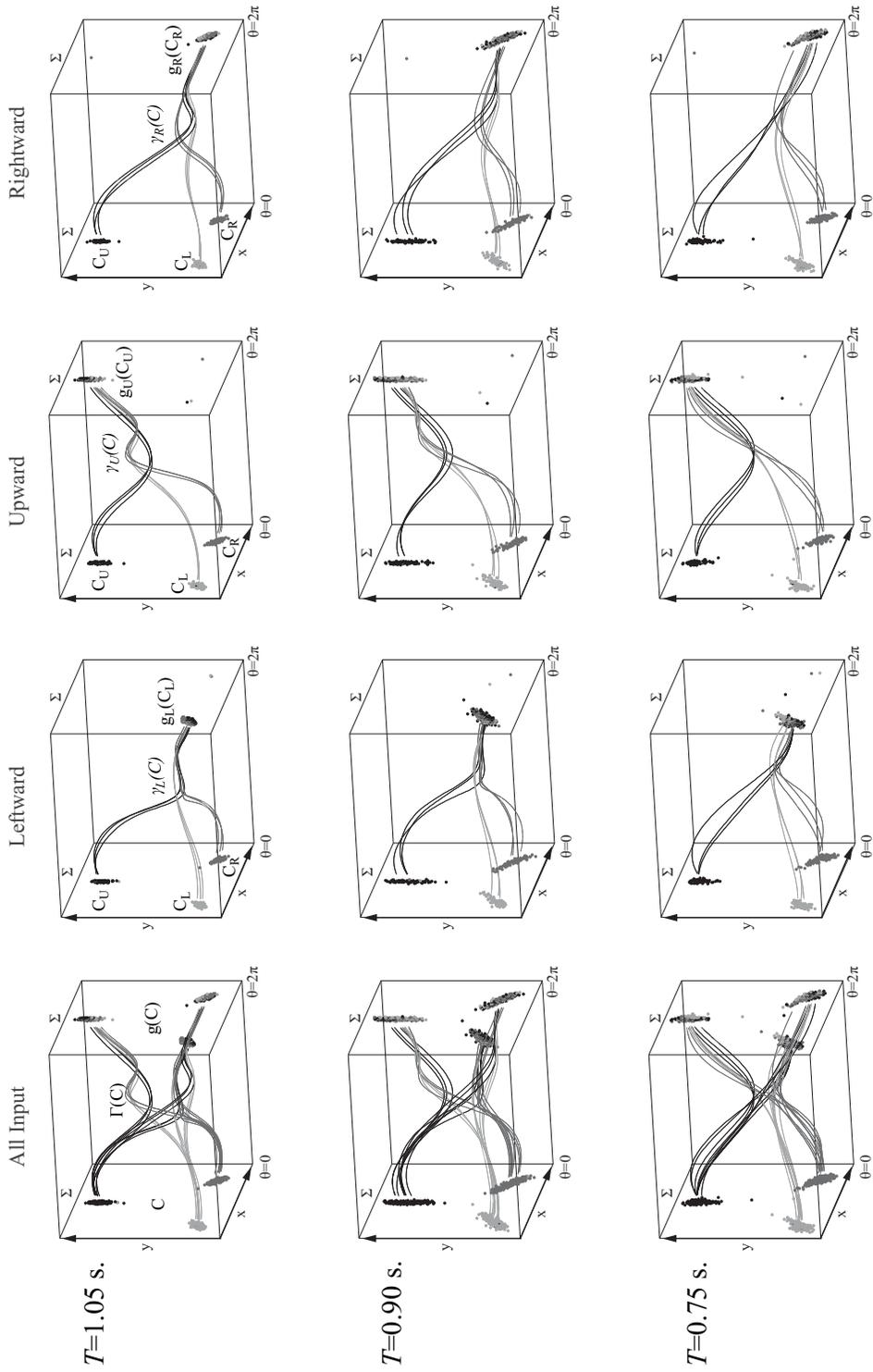


図6：続き。上段から 1.05s, 0.90s, 0.75s. の結果。

表2：切替入力条件におけるポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=2\pi)$ 上の1つ前の入力の違いによる平均値の差異に関する多変量分散分析 (Wilks' λ , F 値) の結果 (** : $p < .01$, *** : $p < .001$)。

Trial N		L						λ	$F(4,532)$	p
Trial $n-1$		L		U		R				
T (s.)		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD			
1.95	x	355.4	70.6	348.4	12.1	357.6	70.1	0.85	10.93	***
	y	401.8	7.3	394.5	8.2	400.7	7.9			
1.50	x	357.4	70.0	346.5	13.4	358.0	70.0	0.90	7.35	***
	y	401.0	9.5	396.7	8.9	404.2	9.6			
1.20	x	356.0	71.2	354.8	19.5	362.6	69.9	0.93	10.93	***
	y	401.2	12.3	399.1	11.8	407.2	14.2			
1.05	x	366.6	67.7	370.0	19.4	376.9	67.4	0.82	14.08	***
	y	408.9	12.0	402.0	10.8	416.0	13.8			
0.90	x	389.0	57.0	418.5	55.1	435.9	78.5	0.86	10.17	***
	y	418.2	17.7	429.8	29.5	443.1	30.3			
0.75	x	394.3	73.9	356.7	48.3	356.6	77.3	0.81	15.15	***
	y	419.5	21.2	394.3	21.1	399.9	26.0			
0.60	x	452.7	74.6	400.0	53.6	383.7	72.6	0.75	20.49	***
	y	453.5	42.2	412.3	38.5	411.4	23.1			

Trial N		U						λ	$F(4,532)$	p
Trial $n-1$		L		U		R				
T (s.)		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD			
1.95	x	677.8	34.1	677.6	32.6	685.1	34.8	0.99	0.72	
	y	859.0	50.4	857.9	47.8	860.7	49.9			
1.50	x	677.8	39.2	679.8	35.6	684.5	35.9	0.99	0.39	
	y	856.7	52.7	857.2	51.0	859.5	50.9			
1.20	x	681.7	35.4	677.3	37.8	684.2	35.7	0.99	0.48	
	y	852.0	51.2	853.5	51.7	856.5	53.6			
1.05	x	679.2	31.6	680.3	33.6	683.4	30.2	0.98	1.31	
	y	844.5	51.6	855.9	49.6	843.7	47.9			
0.90	x	682.8	22.1	679.4	34.9	683.5	36.0	0.88	8.83	***
	y	803.0	57.5	847.7	54.8	805.7	62.3			
0.75	x	688.8	40.8	684.9	28.9	682.7	35.9	0.99	0.45	
	y	854.7	62.8	851.6	53.7	856.4	51.4			
0.60	x	687.0	39.0	684.8	28.1	679.5	37.3	0.91	6.21	***
	y	823.7	63.7	789.5	65.5	833.2	60.1			

Trial N		R						λ	$F(4,532)$	p
Trial $n-1$		L		U		R				
T (s.)		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD			
1.95	x	1010.9	11.8	1010.3	11.2	1003.1	35.3	0.94	3.99	**
	y	400.0	7.6	395.5	7.5	405.1	51.3			
1.50	x	1009.3	12.8	1006.1	12.6	1006.8	36.8	0.85	11.61	***
	y	403.3	7.6	395.2	9.4	403.7	48.6			
1.20	x	987.3	19.4	981.0	18.5	995.3	35.8	0.77	18.58	***
	y	413.1	11.3	404.6	12.6	408.8	50.7			
1.05	x	970.3	19.7	961.2	21.6	985.5	35.3	0.68	27.93	***
	y	420.2	13.1	416.2	15.7	414.4	47.2			
0.90	x	924.0	51.2	928.0	52.5	970.0	43.1	0.79	16.88	***
	y	439.5	27.8	436.0	32.6	421.3	42.4			
0.75	x	1001.8	31.3	1002.5	32.7	968.5	45.9	0.82	13.59	***
	y	405.5	23.9	395.0	22.2	423.0	50.3			
0.60	x	966.5	47.0	927.7	80.0	906.1	58.6	0.84	11.73	***
	y	425.6	25.7	435.0	67.0	451.4	55.5			

さらに、切替入力条件の各切替時間長 T でのポアンカレ断面上 ($\theta=2\pi$) の2次の系列効果を数量的に検証するため、1つ前の入力と現在の入力による系列で構成される、それぞれの集合のクラスターについて、等質性の検定として、多変量分散分析 (MANOVA) をした (Wilks' λ)。表2は、その結果である。分析の結果、21 ケース (=3 方向×切替時間長7 条件) 中、16 個の系列 ($\approx 76.2\%$) で有意に異なっていた。この結果は、1つ前の系列によって、現在の入力に影響を受けた結果になっていたことを示している。さらに、これらの結果は、現在の入力がLであればLL, UL, RLのそれぞれ3つのクラスター、UであればLU, UU, RUのそれぞれ3つのクラスター、RであればLR, UR, RRのそれぞれ3つのクラスター、すなわち9つのクラスターで構成されていることに加え、図5と図6の $\theta-(x, y)$ 空間で視認できるように、それぞれのクラスターがさらにもう一つ前の3つのクラスターから構成されていることを意味している。つまり、これらの結果は、ポアンカレ断面上の初期集合 C が9つのクラスターで構成されていることに加え、軌道 $\Gamma(C)$ の集合は、全部で27個のクラスターで構成されていることを示している。それゆえ、これらの結果は、外部入力によって運動パターンを急速に切り替えるとき、その出力の状態を示している状態空間 \mathcal{M} 中の27本の軌道は、フラクタル様の構造あるいは自己相似構造となっていることを意味している。

4.3 ポアンカレ断面 Σ 上の相関次元

フラクタル様の構造あるいは自己相似構造である空間を数量的に検討するための有力な手法として、GP法 (Grassberger & Procaccia, 1983) による相関次元値の算出がある。図7は、切替入力条件下でのポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=2\pi)$ 上の集合 $g(C)$ の結果である。配色は図5のポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=2\pi)$ と同様である。図8は、各切替時間長 T ごとに相関積分 $O(r)$ によってプロットした図である。相関積分は、少ないデータのフラクタル次元を推定するために幅広く用いられている計算方法であり、相関次元値は図8の両対数プロットの傾斜の程度である。図8に直線を重ね書きしたのが、その傾斜の程度であり、相関次元値となる勾配である。

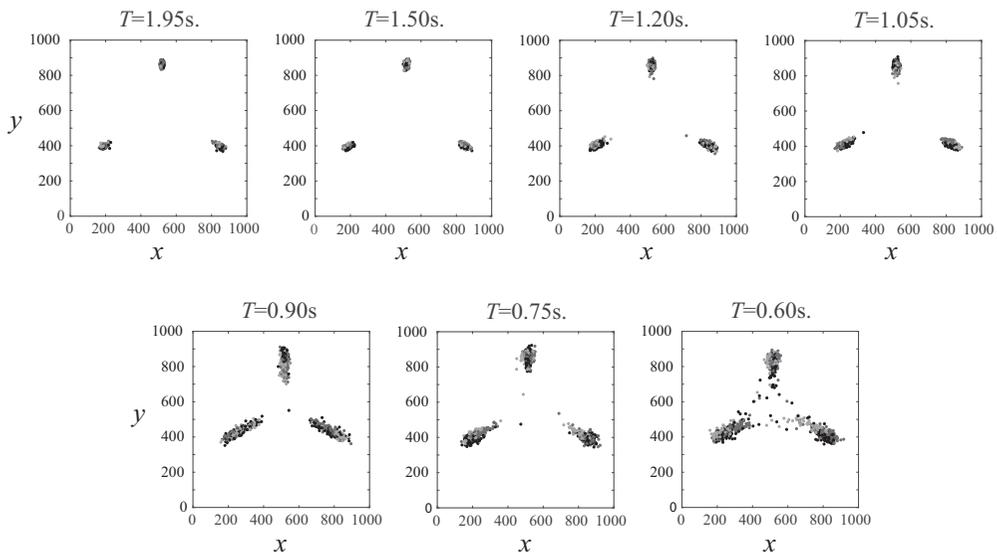


図7：全ての切替時間長 T でのポアンカレ断面 $\Sigma(\theta=2\pi)$ 上の結果。

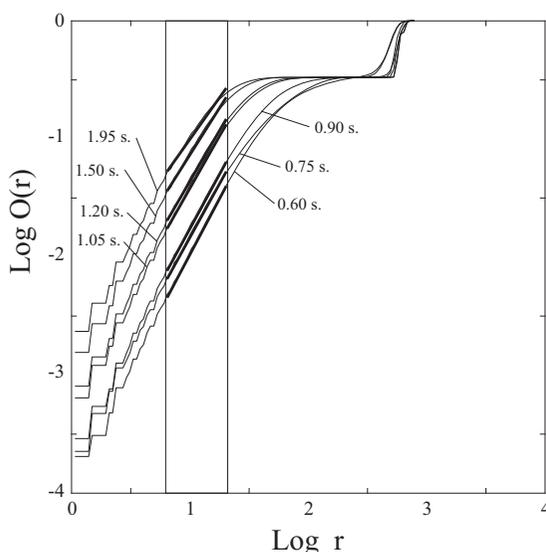


図8：相関積分（G-P法）による相関次元値を算出していく過程での適合直線の結果。

図9の上段は、全7条件のうち、同図において相関次元値と相互参照できるように、選択した4つの切替時間長 T (0.60, 0.90, 1.20, 1.95s.) でのポアンカレ断面 ($\theta=2\pi$) 上の集合 $g(C)$ を示している。図7と図9において、短い切替時間長 T の集合 $g(C)$ と、長い切替時間長 T の集合 $g(C)$ を比較すると、長い切替時間長 T (例えば 1.95s.) では集合が各励起アトラクタ周辺の局所領域に収束していた。一方、短い切替時間長 T (0.60s.) では断面全体に広がっていた。

図9下段のパネルは、それぞれの切替時間長 T での相関次元値と、その相関次元値による適合曲線と、適合曲線を推定した際に用いた相関次元値によるAICの結果である。ポアンカレ断面 Σ 上の軌道の通過状態と相関次元値の結果から、切替時間長 T が増大するにつれて次元値は1に近づき、切替時間長の短縮に伴って次元値は2に近づくように変化したことが確認できた。すなわち、このことは、切替時間長 T の短縮に伴って軌道 $\Gamma(C)$ と集合 $g(C)$ が徐々に空間全体に広がることを意味している。これらの結果は、軌道が同じ構造を持っているにも関わらず点に収束するように見えるので、相関次元値は極限 $T \rightarrow \infty$ で低下していくこと、切替時間長の短縮に伴って軌道は3つの励起アトラクタ間を急速に遷移することによって3つのアトラクタ周辺に広がるため、極限 $T \rightarrow 0$ で相関次元値は2に向かって上昇することを示している。

次に、適合曲線を推定する際に、全ての相関次元値を用いて、理論的背景 (Gohara & Okuyama, 1999b) と人間の運動制御における先行研究 (Hirakawa et al., 2016, 2017) に倣い、定数項ありの逆比例の曲線を推定した。図9下段のパネル中の下部の黒色と白色の丸印の折れ線グラフがAICの結果である。まず全ての相関次元値を用いて、逆比例の適合曲線とそのAICを推定した。次に、最も短い切替時間長から1つずつ相関次元値を除きながら、適合曲線とそのAICの推定を繰り返した。その結果、全ての相関次元値を用いて適合曲線を推定したときのAICが最も低値であった。3つの方向のいずれかに往復運動するターゲットをトラッキングする運動では、集合 $g(C)$ の相関次元値 D_c は、切替時間長の短縮に伴って上昇していくことが認められた ($D_c = 0.377/T + 1.343$)。

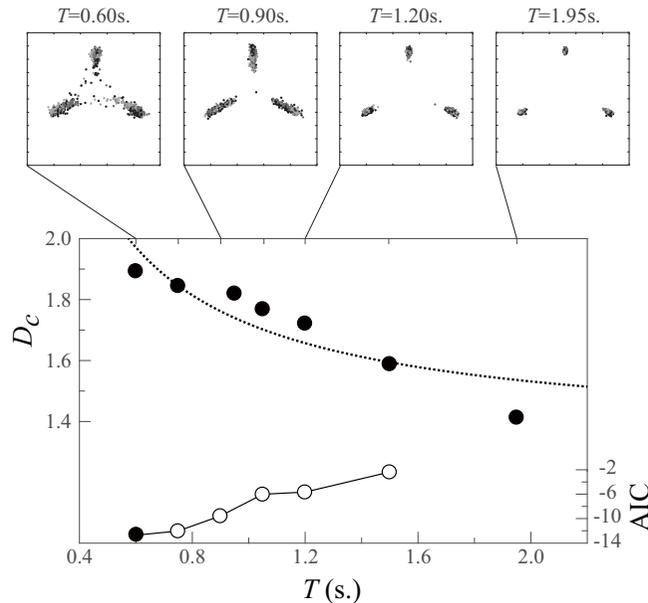


図9：切替時間長 T における相関次元値 D_c と AIC の結果。上段のパネルは7つの切替時間長のうち4つのポアンカレ断面 Σ の結果を例として選択した。下段のパネル中の上部は相関次元値の結果を、下部は AIC の結果を示している。AIC の結果のうち、黒色円は、 T と D_c における適合曲線を求めた際に、7つの全ての切替時間長 T での相関次元値を用いたときに最も AIC の値が低かった結果を示している。

5 考察

非自励系に依拠して検討した先行研究には、さまざまな物理現象 (Arecchi et al., 1986; Constantin et al., 1991; Maas et al., 1997; Schmiegel & Eckhardt, 1997; Tanii et al., 1999) に加え、人間の運動制御においても、特定の切替時間長 T (Yamamoto & Gohara, 2000) あるいは複数の切替時間長 T (Suzuki & Yamamoto, 2015) による連続運動で、フラクタル様の構造あるいは自己相似な構造の存在を明らかにしてきたものがある。本研究の目的は、人間の運動制御、特に2つから3つの外部入力に入力数を増やし、その外部入力確率論的に急速に切り替えられたときに産出される運動パターンについて、パターンの切替時の遷移状態が入力系列に影響を受け、自己相似構造となるかどうかを、連続力学系のデータから質的に、離散力学系のデータから量的に確認すること、そして自己相似構造であった場合には切替時間長 T とその構造の推定値である相関次元値との関係を確認すること、を目的としていた。

外部入力を伴う力学系理論 (Gohara & Okuyama, 1999a) によれば、周期入力条件下での運動パターンは外部入力に励起されるアトラクタ、つまり励起アトラクタ、を形成する。本研究では、外部入力として3ヶ所のいずれかで移動するターゲットを呈示し、そのターゲットを追従した際に産出された運動パターンが離散力学系として量的(表1)に、そして連続力学系の軌道として質的(図3、

図4)に、リミットサイクルとなる励起アトラクタを形成することを確認した。また、切替入力条件下の結果において、その励起アトラクタ間を急速に乱順に切り替えた場合、いずれかのアトラクタに収束することはなく、1つ前の外部入力の影響を受けながら、現在の外部入力に対するアトラクタに引きつけられていたことを、離散力学系として量的(表2)に、連続力学系の軌道として質的(図5, 図6)に確認した。

さらに、切替入力条件下で産出された運動のパターンは、2つ前から現時点の外部入力までの系列の順序で構成される27系列の影響を受けた軌道であること(図5, 図6)が認められた。それゆえ、図5と図6で確認された27個の平均軌道が、3次の系列の影響を受けて生成されていたこと、それは2つ前から現在の入力までの系列と対応していることを意味していたと考えられる。つまり、人間の運動は外部入力の系列による履歴の影響を受けているのである。そして、この結果は、現在の外部入力によって産出された運動パターンが、過去の系列の影響を受けていること、そしてその構造がフラクタル様あるいは自己相似であることを示唆している。このことは、切替条件下での量的結果となるポアンカレ断面上の集合 $g(C)$ の相関次元値が非整数値であった(図9)ことから窺い知ることができるだろう。

もし相関次元値が非整数値であるならば、幾何学的構造はフラクタル様の構造として知られている(Grassberger & Procaccia, 1983; Suzuki & Yamamoto, 2015)ことから、これらの結果は、本研究の課題である3ヶ所のいずれかで往復運動するターゲットをトラッキングする運動制御における変動性はフラクタル様あるいは自己相似構造を有していたことを意味する。そして、人間の運動制御の最中に産出される運動パターンにおける誤差が、確率論的な誤差というよりも、フラクタル様な構造として特徴づけられる構造的な揺らぎであることも示している。このことは、力学系理論による解析が、運動制御の構造、特に本研究では複数の外部入力によって連続的に産出される運動パターンの構造を解明する際に、複数の外部入力で形成された系列による履歴のような特徴を明らかにできることを示唆している。

また、本研究において切替時間長 T によって、これらの非整数値が異なっていたことを用いて、先行研究(Gohara & Okuyama, 1999b; Hirakawa et al., 2016, 2017; Nishikawa & Gohara, 2002)に基づき、切替時間長 T と相関次元値 D_c の関係に逆比例曲線を適合した。これは、曲線の両極値である切替時間長 $T \rightarrow 0$ と $T \rightarrow 2$ における人間の運動制御の動態、つまり切替時間長が長い $T \rightarrow 2$ ときには励起アトラクタの周辺に収束し、短い $T \rightarrow 0$ ときにはこのアトラクタ周辺に広がっていく動態を、直観的に理解できることを示している。つまり、 $T \rightarrow \infty$ のとき、そのアトラクタの領域近くに収束し(図6, 図7, 図9の1.95s.), 相関次元値は1に近づくのである。

一方、 $T \rightarrow 0$ で急速にアトラクタ間の遷移を伴いながら、2つのアトラクタ周辺に無秩序に広がり、相関次元は2に近づく(図6, 図7, 図9の0.60s.)。この関係は、先行研究と同様に、おおよそ $D_c \propto 1/T$ といえるだろう。この規則的關係は、切替時間長が出力された運動パターンの複雑性に影響していることを示している。しかしながら、AICの値の結果は、この関係に逆比例曲線を適合するとき、全ての切替時間長での相関次元値を用いたときに最も低かったことが、Hirakawa et al. (2016, 2017)と異なっている点である。つまり、相関次元値が切替時間長 T に依存していること(Hirakawa et al., 2016, 2017; Nishikawa & Gohara, 2002)を示す一方で、図9の結果において切替時間長 $T = 0.90$ よりも短い条件の相関次元値が上昇限度になっているように視認できながらも、Hirakawa et al. (2016, 2017)の結果のように、AICの結果に基づいて、相関次元値の上昇限度(Hirakawa et al., 2016, 2017では1.4前後)を確認できなかったことを示している。ただし、本研究

は1名の測定結果であるため、これらの先行研究と異なっていた、と結論することは早急であり、今後、検証を重ねることが必要であろう。

6 まとめ

自己相似構造は、様々な先行研究における課題（強制減衰振動子：Gohara et al., 2000；電気回路：Nishikawa & Gohara, 2002；人口ニューラルネットワーク：Sato & Gohara, 2001）などで検証が積み重ねられただけでなく、スポーツの運動（テニス：Yamamoto & Gohara, 2000；卓球：Suzuki & Yamamoto, 2015）でも確認されてきた。本研究は、2つから3つに外部入力を増やし、乱順にその外部入力呈示されたとき、産出された運動パターンがどのような振る舞いを示すか、そして外部入力を規定する切替時間長 T がその振る舞いにどのように影響しているか、そして切替時間長 T とその振る舞いの数量化である相関次元値 D_c の関係を検討した。この呈示順序は乱順としたが、2つ前から現在までの呈示順序により、2つの外部入力の3次の系列、つまり27種の系列で構成されていた。仮に、人間が産出した運動パターンが外部入力の影響を受けていないならば、27種の系列効果は現れず、1つのパターンに収束することになる。本研究の結果は、人間が産出した運動パターンには外部入力の呈示によって影響を受け、系列による運動パターンの産出があったこと、しかもそれは自己相似構造になっていたことを示していた。そして、切替時間長 T と相関次元 D_c の関係は、おおよそ逆比例 $D_c \propto 1/T$ となるという結果であった。

謝 辞

本研究は、南山大学2017年度パツヘI-A-2の助成を受けた。

文 献

- Arecchi, F. T., Gadomski, W., & Meucci, R. (1986). Generation of chaotic dynamics by feedback on a laser. *Phys. Rev. A*, **34**, 1617–1620.
- Barnsley, M. (1993). *Fractals Everywhere*. Boston: Academic Press.
- Constantin, P., Procaccia, I., & Sreenivasan, K. R. (1991). Fractal geometry of isoscalar surfaces in turbulence: Theory and experiments. *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 1739–1742.
- Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston, MA: Houghton Mifflin Company.
- Gohara, K. & Okuyama, A. (1999a). Dynamical systems excited by temporal inputs: Fractal transition between excited attractors. *Fractals*, **7**, 205–220.
- Gohara, K. & Okuyama, A. (1999b). Fractal transition: Hierarchical structure and noise effect. *Fractals*, **7**, 313–326.
- Gohara, K., Sakurai, H., & Sato, S. (2000). Experimental verification for fractal transition using a forced damped oscillator. *Fractals*, **8** (1), 67–72.
- Goldberger, A. L., Rigney, D. R., & West, B. J. (1990). Chaos and fractals in human physiology. *Sci. Am.*, **262**, 42–49.
- Grassberger, P. & Procaccia, I. (1983). Characterization of strange attractors. *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 346–349.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biol.*

- Cybern.*, **51**, 347–356.
- Hirakawa, T., Suzuki, H., Gohara, K., & Yamamoto, Y. (2017). Inverse proportional relationship between switching-time length and fractal-like structure for continuous tracking movement. *Int. J. Bifurcat. Chaos*, **27**(12), 1730040–1–18.
- Hirakawa, T., Suzuki, H., Okumura, M., Gohara, K., & Yamamoto, Y. (2016). Switching dynamics between two movement patterns varies according to time interval. *Int. J. Bifurcat. Chaos*, **26**(10), 1630026–1–18.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *Am. J. Physiol.*, **246**, R1000–R1004.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic Pattern: The Self-Organization of Brain and Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Maas, L. R. M., Benielli, D., Sommeria, J., & Lam, F. P. A. (1997). Observation of an internal wave attractor in a confined, stably stratified fluid. *Nat.*, **388**, 557–561.
- Matias, M. A., Muñozuri, V. P., Lorenzo, M. N., Mariño, I. P., & Villar, P. (1997). Observation of a fast rotating wave in rings of coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 219–222.
- Mestl, T., Bagley, R. J., & Glass, L. (1997). Common chaos in arbitrarily complex feedback networks. *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 653–656.
- Nishikawa, J. & Gohara, K. (2002). Fractals in an electronic circuit driven by switching inputs. *Int. J. Bifurcat. Chaos*, **12**, 827–834.
- Sato, S. & Gohara, K. (2001). Fractal transition in continuous recurrent neural networks. *Int. J. Bifurcat. Chaos*, **11**, 421–434.
- Schmidt, R. A. (1991). *Motor Learning and Performance: From Principles to Practice*. Champaign: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J., & Quinn, J. T. J. (1979). Motor output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychol. Rev.*, **86**, 415–451.
- Schmiegel, A. & Eckhardt, B. (1997). Fractal stability border in plane Couette flow. *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 5250–5253.
- Suzuki, H. & Yamamoto, Y. (2015). Robustness to temporal constraint explains expertise in ball-over-net sports. *Hum. Mov. Sci.*, **41**, 193–206.
- Tanii, K., Tachikawa, M., Tohei, T., Hong, F. L., & Shimizu, T. (1991). Instability and chaos in two-mode oscillation of a CO₂ laser modulated by a saturable absorber. *Phys. Rev. A*, **43**, 1498–1501.
- Tanii, K., Tohei, T., Sugawara, T., Tachikawa, M., & Shimizu, T. (1999). Two different routes to chaos in a two-mode CO₂ laser with a saturable absorber. *Phys. Rev. E*, **59**, 1600–1604.
- Wada, R. & Gohara, K. (2001a). Closures of fractal sets in nonlinear dynamical systems with switched inputs. *Int. J. Bifurcat. Chaos*, **11**, 2205–2215.
- Wada, R. & Gohara, K. (2001b). Fractal and closures of linear dynamical systems excited stochastically by temporal inputs. *Int. J. Bifurcat. Chaos*, **11**, 755–779.
- Yamamoto, Y. & Gohara, K. (2000). Continuous hitting movements modeled from the perspective of dynamical systems with temporal input. *Hum. Mov. Sci.*, **19**, 341–371.