

平成11年度第3回11月10日

演題：正確性から安定性、そして可能性へ —非線形制御理論から見た運動制御—

演者：山本裕二（体育科学部）

人間の打球動作は、その入出力の連続性と多様性の観点からして、かなり複雑な動作に分類される。すなわち、単純な刺激—反応動作、把持動作、追従動作、姿勢制御と移動動作、腕の軌道生成や手先操作を必要とする捕球動作や投球動作にも増して、特にテニスのグランドストロークなどは打具を利用した移動を伴う動作で、かつ外部入力に対応しなければならないのが連続した打球動作である。

従来の運動制御理論は、線形制御理論やそれを非線形制御に拡張した計算論的アプローチによって、腕の軌道生成や姿勢制御、そして捕球や投球動作を説明してきた。一方連続した動作に関してはダイナミカルシステムアプローチといわれる、非平衡力学系の理論を適用することによって動作の自己組織化を説明してきた。しかしながら、外部入力の変化が大きく、その外部入力の変化に連続的に対応した運動出力を説明するためには、これまでの理論にさらに外部入力の時間構造を拡張しなければ説明できない。つまり、連続した打球動作は課題として新たに拡張された理論によって初めて説明できる課題であるといえる。そこで、今回は非線形制御理論に基づく連続打球動作の分析を通して明らかになったことを紹介する。

まず、実験課題はテニスのフォアハンドとバックハンドのグランドストロークで、1分間に36球のペースでテニスマシンから打ち出されるボールを打ち返すことである。ボールの速度は14m/sで、周期入力条件ではどちらか一方のサイドに連続してボールは送られる。また切り換え入力条件ではフォアハンドもしくはバックハンドサイドに3次の系列効果、すなわち前の前の入力と前の入力と今の入力の過去三回分の順序が等しくなるように入力を操作し、連続して打球する。この打球動作を2台のビデオカメラで撮影し、3次元座標に変換した後、肩と腰の向きを求めた。そしてこの2変数を用いて、外部入力の時間構造を考慮した連続力学系の超円筒状態空間にその軌道を条件ごとに描いた。その結果、周期入力条件では、入力に応じたアトラクタが認められ、切り換え入力条件ではそのアトラクタ間を入力に応じて遷移する様子が認められた。さらにこれを離散力学系であるポアンカレ断面についてみると、そのポアンカレ写像点はガウス関数で表されるものではなく、現在の入力だけでなく前の前の入力（3次の系列効果）にも依存して分布していること

が明らかになった。しかもその分布位置は回転のあるコントロール集合の時間発展と一致することが分かり、アトラクタ間の遷移がフラクタル性を有することが明らかになった。

以上の結果から、フォアハンドとバックハンド側への入力の確率的な切り替えによる連続打球動作は、それぞれの基本運動パターンと入力との相互作用によってより複雑な運動が創発されることを示すもので、しかもその複雑にみえる運動の構造は単純なコントロール集合としての規則性で理解できることを示した。

従来の線形制御においては、「揺らぎのない正確性」が前提であったのに対し、非線形制御・非線形ダイナミクスでは「揺らぎの中での安定性」を理解してきたといえる。さらに今回の実験結果は、時間的に変化する外部入力を拡張した非線形ダイナミクス理論を適用することによって、「揺らぎに基づく可能性」が示唆されたといえる。すなわち複雑に見える運動は、単純な規則を持って環境との相互作用によっていくらかでも新しい複雑に見える動きを生成する可能性を有しているといえ、運動生成の基本原理を示唆しているのである。