

生態学的／力学系アプローチによる身体－環境システムの障害物回避行動モデル

Ecological/Dynamical Approach To Modeling Of Obstacle Avoidance In Body-Environment System

○児玉謙太郎（神奈川大学） 安田和弘（早稲田大学） 園田耕平（立命館大学）

Kentaro KODAMA, Kanagawa University
Kazuhiro YASUDA, Waseda University
Kohei SONODA, Ritsumeikan University

Abstract: We propose an obstacle avoidance model in body-environment system. According to the affordance theory based on the ecological psychology that describes biological behavior, it is necessary for biological systems to perceive the relation between body and environmental properties adequately, in order to behave safely and appropriately in their environment. The theory also describes that biological behavior changes qualitatively when the relation between body and environmental properties become a specific relation. On the other hand, within the framework of Dynamical systems approach (DSA) based on the self-organization theory, biological behavior is described as a self-organized phenomenon that emerges from interaction among the micro-level components. Here, we attempt to integrate these two approaches, the affordance theory and the DSA. To do so, we suggest and discuss an experimental framework, stepping-over an obstacle task, and its possibility to apply to the application studies such as robotics and rehabilitation in terms of Ecological/Dynamical approach.

Key Words: Affordance, Pi number, Self-organization, Dynamical systems approach, Stepping-over

1. 生態学的／力学系アプローチ

1.1 障害物回避行動と環境適応

障害物の回避とは、環境内の障害物を知覚して、それと接触しないよう行為を調整し、安全に移動することである。障害物との接触は、高齢者の転倒などを考えると、規模によっては生物にとって極めて深刻な問題と言えよう。高齢者の転倒要因に関する先行研究では、これまで運動、感覚、神経、筋といった身体システムの要素レベルの要因に着目した研究が多かった⁽¹⁾。しかし、近年、環境特性などの外在的要因や、身体特性などの内在的要因を含む様々な要因の関与が示唆されるようになってきた⁽¹⁾。そして、環境と自己の関係を正しく知覚できないこと（知覚と行為の乖離）と転倒のリスクに関連があることも示されている⁽²⁾。これらの知見を踏まえると、障害物の回避は、環境へ適応ができていくかどうかという観点から捉えることができ、環境適応がうまくいっていない場合、回避行動に影響が生じると考えられる。

1.2 生態学的アプローチ

生物の行動を記述する理論的枠組みのひとつに生態心理学がある⁽³⁾⁽⁴⁾。生態心理学では、生物をその環境と分けずにひとつのシステムとして捉える。そして、生物の行動を、環境との相互作用の過程で創発する現象とみなすのである。このことを強調するために、環境が生物に対して提供する行為の可能性や機会、生物個体にとっての環境の意味や価値を表す“アフォーダンス”（Affordance）という概念が提案されている⁽⁴⁾。この概念には、環境の知覚には自己の知覚が含まれる、という環境と生物の相補性が含意されている。

アフォーダンスに関する研究では、生物と環境の適合を表す指標として環境側の特性（E）と生物（行為者）側の特性（A）の比からなる π 数（ $\pi=E/A$ ）が提案されている⁽⁵⁾。すなわち、生物が知覚する環境の特性は、その個体の特性に基づきスケール化され、環境と個体との関係に基づき知覚されるというわけである。例えば、階段を上る行為では、段の高さという環境特性は、それを上る行為者の脚の長さとの関係に基づき知覚され、 π 数が特定の値になる

とき、環境はその個体の行動に対し特定の意味をもち、行動に質的な変化が起こると考える⁽⁵⁾。段を上る行為の他、間隙の通過⁽⁶⁾⁽⁷⁾や着座⁽⁸⁾などの様々な行為課題で同様の枠組みによる実験的研究が行われてきた。

アフォーダンスの概念、理論的枠組みは、心理学・認知科学分野における基礎研究分野のみならず、ロボティクスや人工知能分野⁽⁹⁾、リハビリテーション分野⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾といった応用分野にも影響を与えている。その背景には、生態心理学が、知覚と行為を分けずに、「我々は、動くために知覚しなければならないと同時にまた、知覚するために動くこともしなければならない」⁽⁴⁾という記述に現れているような知覚と行為の不可分性がある。このことから、知覚・認知に関する研究のみならず、身体運動研究分野においても、そのアイデアは大きな影響を与えている⁽¹²⁾。従来の運動の制御モデルは、身体システム内部の機構（中枢）によって、運動の生成・制御が説明されてきた。ところが、生態学的アプローチによると、運動は個体とそれを取り巻く環境、文脈、課題からの制約といった要素との関係、相互作用によって生成される⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。次節で詳説するよう、膨大な自由度を持つ身体システムは、環境、文脈、課題からの制約を受けることで、自由度を縮減し、柔軟な運動の生成が可能となると考えられている。つまり、身体運動は中枢からの制御という一方向的プロセスによってのみ実現するのではなく、環境・文脈・課題との双方向的な相互作用プロセスの中で生成されるというのである。

1.3 力学系アプローチ

身体運動の生成を説明するにあたり、伝統的な運動制御理論によると、中枢からの指令が、神経系を介し、末梢の効果器の筋群を活性化することで運動が実現する。しかし、この方法では身体という対象を制御するために決定すべき変数の数（自由度）は膨大になる。身体運動の自由度は、例えば、人間の場合、関節のレベルで約 10^2 個のオーダー、筋のレベルで約 10^3 個のオーダー、細胞のレベルでは約 10^{14} 個のオーダーの自由度が存在するとされている⁽¹⁵⁾。運動生理学者 Bernstein は、伝統的な運動制御モデルでは、身体を

動かす前に中枢が膨大な量の変数（自由度）を決定しなくてはならないため、そのようなモデルは現実的ではないことを指摘した（自由度問題⁽¹⁶⁾）。この問題は、制御工学の観点からすると、制御すべき変数が状態を記述するために必要な変数より多く解が一意に決定できないため不良設定問題とみなされる⁽¹⁷⁾。Bernstein 自身は、自由度問題を解決するための概念として、身体システムの要素同士が連携・協調することで自由度を減らすような機能的な協調構造（シナジー）を考案した⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾。また、シナジーは直面している運動課題に対し特定の文脈依存的に組織化されるという。

その後、Kelso らは、Bernstein の指摘した自由度問題とシナジーの概念を物理学における自己組織化理論の枠組みで解釈し、運動のマイクロ・レベルでの要素間の相互作用によって、自律的にマクロ・レベルでシステム全体としての秩序が創発することを実験的に示した⁽¹⁹⁾。その後、Haken らはこれらの結果に対し、シナジェティクスの観点から、マクロ・レベルで記述される秩序変数と、その変化をもたらす制御変数によって、多自由度系の身体運動の質的変化を、少数の変数で記述する数理モデルを提案した（HKB モデル⁽²⁰⁾）。彼らのモデルから予測される現象の例として、臨界ゆらぎ、相転移、臨界減速がある⁽²¹⁾。臨界ゆらぎとは、制御変数の変化により秩序変数が不安定化しばらつきが増大する現象である。さらに、制御変数が変化し、臨界値に達すると、運動パターンが質的に変化し、新しい運動パターンが創発することがある。このマクロ・レベルでの運動パターンの変化を相転移と呼ぶ。また、相転移前後でシステムに外乱などを与えたとき、それによって起こる動揺から回復するまでにかかる時間が増大することを臨界減速という。Kelso らは、一連の実験から、ヒトの身体運動でこれらの現象が観察されたことから、自然界で起こる自己組織化と同様の原理が、ヒトの行動の原理として働いていることを示した⁽²¹⁾。

彼らの試みをはじめ、自己組織化理論の枠組みや、分析手法を応用したヒトの運動・知覚・認知の研究は、力学系アプローチ(Dynamical Systems Approach: DSA)と称される。ここでいう力学系とは時間変化するシステムのことであり、自己組織化現象の中でも比較的その振る舞いが理解されているものについてはモデル化が可能となる。DSA、とくにシナジェティクスの枠組みの応用は、その後、行動レベルの現象の記述のみならず、脳レベルの現象との関係づけも射程に含まれ、展開をみせている⁽²¹⁾。ところが、シナジェティクスの枠組みでは、メトロノームの音などの単純な知覚情報と運動のカップリングについては実験的・理論的に検討されているが、アフォーダンスのような行為の可能性といったレベルでの身体システムと環境の特性の関係については十分に検討されていない。

2. 問題設定・本研究の仮説

アフォーダンスに関する実験的研究では、様々な行為で自己身体の知覚に基づく環境の知覚の側面が明らかにされ、行動の記述における生物と環境の相補的な関係の重要性が示されてきた。他方、DSA の枠組みは、主に身体システムの構成要素間（体肢間など）の協調、及び、メトロノーム音など単純な環境情報と運動のカップリングを自己組織化理論の観点からモデル化してきた。しかし、これら2つの枠組み同士の接続は未だ充分には達成されていない。今後、双方の理論的枠組みが統合されれば、生物を記述する理論の発展が期待される。また、理論や基礎研究だけではなく、

それらに基づく工学やリハビリテーション分野への応用に対しても、双方の理論的統合が果たす貢献は大きいと予想される。

そこで、本研究では、この2つのアプローチを統合するための実験枠組みを提案する。まず、具体的な実験の課題としては、生物一般で観察される日常的な行動のひとつとして、障害物回避行動に着目する。障害物の回避は、字義通り、環境内の障害物を知覚し、それと接触しないように行方を調整し、安全に移動することである。冒頭で述べたように、障害物との接触は、高齢者の転倒などを考えると、その規模によっては生物にとって深刻な問題と言えよう。本研究では、この障害物回避行動のうち、アフォーダンスに関する多く先行研究で検討されているヒトの“障害物の跨ぎ越え”行為について、DSA の観点からの記述を試みる。

まず、DSA の枠組みで想定される秩序変数を跨ぎ行為における下肢の関節角度の差を意味する相対位相とみなす⁽²²⁾。そして、この秩序変数の質的変化をもたらす制御変数については、アフォーダンス理論で定式化がされている π 数を想定する⁽⁵⁾。すなわち、跨ぎ越え行為においては行為者の下肢の長さに対する環境（バー）の垂直方向の長さの比である。本仮説に従うと、障害物の高さが高くなり π 数が大きくなるにつれて、跨ぎ越え動作のパターンが変化し、臨界値を超えるとパターンが質的に変化すると予測される（Fig. 1）。さらに、障害物の高さが高くなり π 数が大きくなると、“跨ぎ越える”という行動は選択できなくなるため、障害物を横に“避けて移動する”か、障害物の下方に空間がある場合には、その下を“くぐる”⁽²³⁾といった新しい行動に切り替わるであろう（Fig. 2）。先述したシナジェティクスの観点から記述すると、これら行動レベルでのパターンの変化は相転移とみなされ、相転移前では秩序変数の臨界ゆらぎが観察されると予測される。Fig. 2 は、DSA の枠組みにより記述される制御変数（横軸）と行動の安定性（縦軸）の関係を表したポテンシャル図（ランドスケープ）である。本仮説に従うと、横軸には π 数が、縦軸には、例えば、下肢関節角度間の相対位相の標準偏差などの行動の安定性を指標する値が入る。行動が安定する谷の地点を緑で、行動が不安定化する山の地点を赤で示している（Fig. 2）。

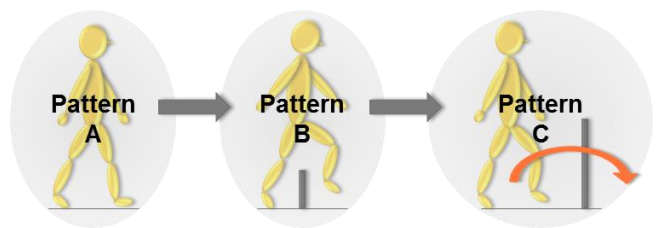


Fig. 1 Change of obstacle avoidance pattern

DSA の枠組みによるヒトの運動研究の知見は、リハビリテーション分野にも応用されてきた⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。それらの研究では、DSA の概念や分析の指標が、運動機能の回復や再学習のためのリハビリテーションの評価や介入に応用されている。ここで重要なポイントは、制御変数の変化に伴って起こる秩序変数のゆらぎ、すなわち、行動の不安定化は、新しい行動のパターンが創発するために必要な条件であり、リハビリテーションの文脈では、運動や行動の再学習の契機として着目すべき現象であるということである⁽²⁵⁾。高齢者や運動障害者の運動や行動のひとつの特徴として、柔軟性や適応性が乏しい点が挙げられる⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。つまり、可能な

動きのバリエーションが少なく、動的な環境の変化に対し柔軟に適応できず、問題のあるパターンに必要以上に固執してしまうといった特徴が考えられる⁽²⁹⁾。その際、制御変数を変化させ、秩序変数が不安定化する点を見つけることができるかもしれない⁽²⁹⁾。DSAの枠組みでは、臨界ゆらぎにおける行動の不安定化は、加齢や運動障害により運動機能が低下した高齢者や患者にとって、行動パターンの切替点を探るひとつの指標となりうる。そして、その切替点を特定できれば、そのポイントが、固着した運動からそれを新しいより適切な運動に再構成していくためのポイントとなる可能性がある⁽²⁹⁾。そして、その周辺で集中的に訓練や介入を実施することは、新しい行動・運動パターンの学習にあたって効果的である可能性がある。

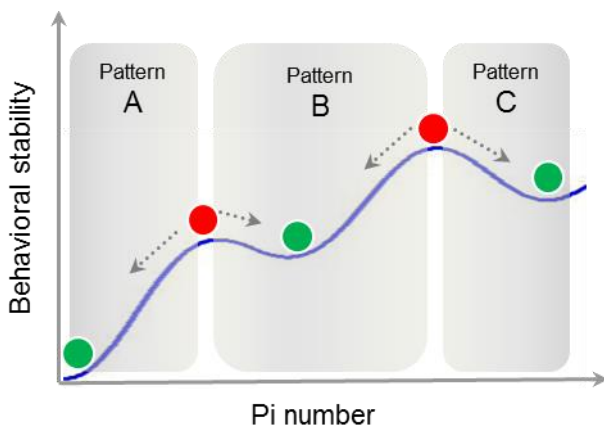


Fig. 2 Prediction from the DSA

3. 今後の課題

本研究では、生物と環境の関係に着目する生態心理学のアフォーダンス理論と、自己組織化理論に基づきシステム要素同士の相互作用によって身体運動・行動が創発するとみなす力学系アプローチ（DSA）を統合するための実験的な枠組みを提案した。著者らは、現在、モデルを検証するための実験を実施し、データを分析している状況である。今後、モデルで用いられる変数（秩序変数）の特定、制御変数による行動の不安定化の観察といったステップを踏み、仮説を検証したい。とくに、秩序変数の候補として挙げた相対位相についても、先行研究の知見からは複数の候補が考えられる⁽²²⁾⁽²⁶⁾。また、相対位相以外の変数として、下肢間の協調性（シナジー）の程度を指標する値⁽³⁰⁾なども候補となるかもしれない。あるいは、様々な状況での行動を考慮すると、制御変数として想定している π 数についても、環境と身体の単純な幾何学的なスケール（長さ）だけでなく、筋力など身体能力に関わる高次の変数も視野に入れた検討が必要になるかもしれない。

また、これらのモデルが示唆する臨床的知見についても、引き続き検討する必要がある。現在は基礎データとして、若年健常者を対象とした実験を行っているが、将来的には、高齢者や運動障害者を対象とした実験においてもモデルを検証し、その応用可能性を検討したい。さらに、障害物の乗り越え課題だけでなく、他の行為課題においても同様のモデルがあてはまるのかについても検討が必要である。本モデルの一般化が実現すれば、本研究の知見は、心理学・認知科学における基礎研究だけではなく、それらに基づく工学やリハビリテーション分野における応用研究に対して、生物行動の理解という意味で示唆を与えうる。

参考文献

- (1) A. Shumway - Cook, and M. H. Woollacott, *Motor Control: Translating Research Into Clinical Practice*, Lippincott Williams & Wilkins, 2013.
- (2) R. Sakurai, Y. Fujiwara, M. Ishihara, T. Higuchi, H. Uchida, and K. Imanaka, Age-Related Self-Overestimation of Step-over Ability in Healthy Older Adults and Its Relationship to Fall Risk, *BMC geriatrics*, 13:44, 2013.
- (3) J. J. Gibson, *The Senses Considered as Perceptual Systems*, Praeger, 1966.
- (4) J. J. Gibson, *The Ecological Approach to Visual Perception*, Psychology Press, 1979.
- (5) W. H. Warren, Perceiving Affordances: Visual Guidance of Stair Climbing, *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 10(5), pp. 683–703, 1984.
- (6) T. Higuchi, H. Takada, Y. Matsuura, and K. Imanaka. Visual Estimation of Spatial Requirements for Locomotion in Novice Wheelchair Users, *Journal of experimental psychology. Applied*, 10(1), pp. 55–66, 2004.
- (7) W. H. Warren, and S. Whang. Visual Guidance of Walking through Apertures: Body-Scaled Information for Affordances, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(3), pp. 371–383, 1987.
- (8) L. S. Mark, Eye Height-Scaled Information about Affordances: A Study of Sitting and Stair Climbing, *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 13(3), pp. 361–370, 1987.
- (9) T. E. Horton, A. Chakraborty, and R. St Amant. Affordances for Robots: A Brief Survey, *Avant: Journal of the Philosophical-Interdisciplinary Vanguard*, 3(2), pp. 70–84, 2012.
- (10) 大橋ゆかり，セラピストのための運動学習ABC, 文光堂, 2004.
- (11) 宮本省三, 沖田一彦, セラピストのための基礎研究論文集 第1集 運動制御と運動学習, 協同医書出版, 1997.
- (12) 佐々木正人, 三嶋博之, 運動制御への生態学的アプローチ, pp. 2–28 in 岩波講座認知科学 4, 1994.
- (13) K. Davids, G. Paul, A. Duarte, and B. Roger, Movement Systems as Dynamical Systems: The Functional Role of Variability and Its Implications for Sports Medicine, *Sports Medicine*, 33(4), pp. 245–60, 2003.
- (14) M. T. Turvey, and S. T. Fonseca, Nature of Motor Control: Perspectives and Issues, *Advances in experimental medicine and biology*, 629, pp. 93–123, 2009.
- (15) M. T. Turvey, Coordination, *American Psychologist*, 45(8), pp. 938–53, 1990.
- (16) N. A. Bernstein, *The Co-Ordination and Regulation of Movements*, Pergamon Press Ltd., 1967.
- (17) M. L. Latash, The Bernstein Problem: How Does the Central Nervous System Make Its Choices, in *Dexterity and Its Development*, edited by M. L. Latash and M. T. Turvey. Psychology Press, 1996.
- (18) N. A. Bernstein, *Dexterity and Its Development*, Psychology Press, 1996.
- (19) J. A. S. Kelso, Phase Transitions and Critical Behavior in Human Bimanual Coordination, *American Journal of*

- Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 246(6), R1000–1004, 1984.
- (20) H. Haken, J. A. S. Kelso, and H. Bunz. A Theoretical Model of Phase Transitions in Human Hand Movements, *Biological Cybernetics*, 51(5), pp. 347–56, 1985.
- (21) J. A. S. Kelso, *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*, MIT Press, 1995.
- (22) N. Stergiou, J. L. Jensen, B. T. Bates, S. D. Scholten, and G. Tzetzis, A Dynamical Systems Investigation of Lower Extremity Coordination during Running over Obstacles, *Clinical Biomechanics*, 16(3), pp. 213–221, 2001.
- (23) 三嶋博之. ‘またぎ’ と ‘くぐり’ のアフオーダンス知覚, *心理学研究*, 64(6), pp. 469–475, 1994.
- (24) J. P. Scholz, Dynamic Pattern Theory -Some Implications for Therapeutics, *Physical therapy*, 70(12), pp. 827–43, 1990.
- (25) R. C. Wagenaar, and R. E. A. van Emmerik, Dynamics of Pathological Gait, *Human Movement Science*, 13(3-4), pp. 441–471, 1994.
- (26) R. C. Wagenaar, and R. E. A. van Emmerik. Dynamics of Movement Disorders, *Human Movement Science* 15(2), pp. 161–175, 1996.
- (27) L. A. Lipsitz, and A. L. Goldberger. Loss of ‘Complexity’ and Aging, *Jama*, 267(13), pp. 1806–1809, 1992.
- (28) B. Manor, and L. A. Lipsitz, Physiologic Complexity and Aging: Implications for Physical Function and Rehabilitation, *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 45(617), pp. 287–93, 2013.
- (29) 三嶋博之, *エコロジカル・マインド: 知性と環境をつなぐ心理学*, 日本放送出版協会, 2000.
- (30) J. P. Scholz, and G. Schöner, The Uncontrolled Manifold Concept: Identifying Control Variables for a Functional Task, *Experimental Brain Research*, 126(3), pp. 289–306, 1999.