

# 身体運動の階層構造の推定に向けて

## Toward The Estimation of The Hierarchical Structure in The Body Movement

田澤 龍之介<sup>†</sup>, 鳥居 拓馬<sup>†</sup>, 日高 昇平<sup>†</sup>  
 Ryunosuke Tazawa, Takuma Torii, Shohei Hidaka

<sup>†</sup>北陸先端科学技術大学院  
 Japan Advanced Institute of Science and Technology  
 s2120023@jaist.ac.jp

### 概要

身体運動には意図・計画などの認知的な性質を持つ情報が内在している。脳活動の効率的な推定による研究や皮膚表面の筋電信号から運動の意図を読み取るといった研究が行われている。しかし、脳波や筋電といった、我々が日常的には得てはいない指標によらずとも、意図・計画は身体運動軌道の視認からも推定可能である。本研究では、力学的不変量の1つであるフラクタル次元を推定することで、次元の変化の検出により身体運動の分節化を行う。

キーワード: フラクタル次元、分節化、順序依存性、階層型構造

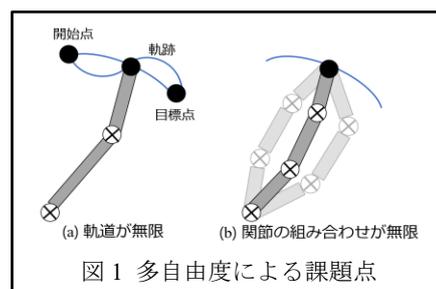
### 1. 研究背景

意図・計画を伴う運動を「行為」と呼ぶ。我々は他者の「行為」の観察により、その意図・計画を推定する。他者の「行為」に内在する意図・計画の推定により、他者が目標を達成するために実行できなかった「行為」を補完し、援助できる[1]。つまり、意図・計画の効率的かつ高精度な推定は、より円滑な人助けを実現する。

本研究において、「意図」とは、特定の目標を達成するための運動計画または運動制御のいずれかを意味し、一連の運動の選択または特定の目標の運動を導く。また、「行為」とは、特定の目標の達成を意図した運動を意味する。身体運動を力学系と見なす時、各状態に対する制御を与える制御器の目標に向けた運動を逐次決定する計画であり、その意味で「意図」と呼べる。認知的性質を持つ意図・計画は特定の運動と関連し、身体運動に反映される。しかし、身体は多自由度を有し、各自由度間が複雑に相互作用するため、身体運動の意図・計画の推定の機序には未解明な点が多く存在する。

### 2. 多自由度系による身体運動の複雑さ

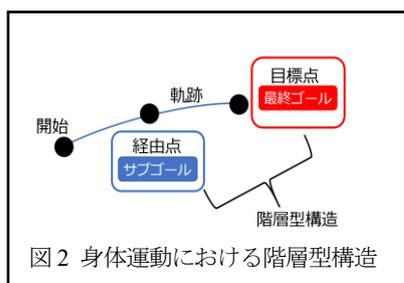
身体運動において、身体は多自由度を有するため、発生する運動の開始点から目標までの軌道の数は同一の端点軌道に対しても関節の組み合わせは無数にある



(図1). 到達運動において、手先端の軌道は各時点で3次元であるのに対し、身体には肩・肘・手首などの少なくとも7自由度あるため、動力学的な変数は一意に定まらない。つまり、不良設定問題である。不良設定性を有する身体が生成する運動のデータ構造からの意図・計画の推定は一般に困難である。

### 3.1 身体運動における階層型構造

多自由度系の身体運動において、開始点と目標間で生成され得る軌道数は無数にある。しかし、時間制約や身体部位の可動域などの、ある制約において、目標点に向かって腕を伸ばす到達運動時に観測される軌道は、手先軌道が粗い直線で手先の速度の波形がベル型になるという共通の特徴が存在する[2]。これは、動作生成における何らかの規準があり、それが最も満たされる運動軌道が選択されていると考えられている。身体運動において、手先が通る経由点(サブゴール)が存在し、それらを通過することで、目標の運動(最終ゴール)が達成される(図2)。このように、身体運動には、最終ゴール達成のためのサブゴールが存在する階層型構造を持つ。つまり、1つの複雑な運動課題はより局所的な課題へと分割可能である。運動開始時は、獲得する運動の要所や経由点を定める等の運動計画の大枠が定められ、サブゴール達成時には、低自由度の制御指令が行われる。しかし、この課題の階層型構造の制御に加え、先に述べた不良設定問題が存在するため、特定の課題に用いる身体部位の自由度の制御も同時に必要になる。



### 3.2 順序依存性

身体運動は身体部位ごとの制御自由度を変化させることで実現される。運動の実現において、選択した身体部位の制御自由度は逐次的に変化し、それらの自由度の変化順序は状況や目的に応じて選択される（順序依存性）。運動の実現は最適な制御の順序に依存し、身体部位ごとの制御自由度の変化順序は身体運動の意図・計画を反映していると考えられている。身体運動が階層型構造を持つことから、低自由度となる点（次元の変化点）が与えられた課題のサブゴールであると言える。サブゴールは課題に応じて変化することから、制御自由度の変化順序を解析することで達成した課題の特性を捉えることができる。

### 4.1 非線形力学系による身体計算理論

自由度の多さから軌道の生成における不良設定問題を解消しなければならない。Uno et al. [3]の最適制御理論では、筋骨格系の動力学的な滑らかさを制約とし、筋骨格系の動力学的空間（関節角、筋肉の出力・収縮など）と運動目標が与えられる3次元の作業空間上を対応つける。しかし、複数部位が強調する場合、動作間の空間座標系の変換の組み合わせ数が多く、逆モデルの計算コストが膨大となる。そこで、本研究では、身体運動の時間発展を記述する体系として、日高ら[4]の非線形力学系の理論を採用した。末梢・中枢神経・筋骨格系と作業空間との間の相互作用をそれらの系の状態とその状態遷移の系列とすることで、身体運動を力学系と捉える。ある運動（力学系）の多くの軌道は、相空間上の特定の部分空間のみを通過し、この部分空間その力学系のアトラクタに対応する。アトラクタ（身体運動の状態集合）の不変量の1つであるフラクタル次元は滑らかな座標変換に対する不変性を持つため、表層的な運動ではなく、それに潜在する運動制御すなわち意図の性質を抽出できる。

### 4.2 力学的不変量を用いた運動の分節化

実際に観測される身体の状態は限られ、外乱の影響も受けるため、観測データから相空間を再構成する必要がある。本研究では、相空間再構成法として、縮退した軌道のある次元の空間へ写像することで、特異点（軌道の交差）の無い滑らかな軌道に変換する時間遅れ座標への埋め込みを行う。この埋め込み操作によって、再構成されたアトラクタは距離などの幾何学的性質を持たず、アトラクタの位相的構造のみによって、特徴づけられる。アトラクタの位相的構造解析から、アトラクタ次元などの不変量を特定できる。このアトラクタの不変的構造により、異なる2つのアトラクタの対応つけ可能性を判定できる。本研究では、力学的不変量の1つであるフラクタル次元（点次元）を用いる。アトラクタ軌道の各点の自由度（制御可能性）は点次元によって特徴づけられる。日高ら[4]によって提案されている点次元推定法を用いて、力学系とみなした運動データの特徴次元の抽出を行う。以下で行う実験の一連の運動に内在する運動固有の点次元を推定することで、類似の次元を有する運動区間を同一の制御器により生成された運動、次元の変化点を制御の変化点とそれぞれ考える。

### 5.1 単振り子の振り上げ運動

本実験では、まず、単振り子の振り上げ課題を行った。単振り子などの単純な系での到達運動を行う場合、制御器の次元・自由度の変化に乏しく、課題の分節化を要しないと考えられる。単振り子は強化学習を用いて、鉛直上向きに制止させるように実装した。トルク $u$ の加わった単振り子の運動方程式は次式となる。

$$ml\omega^2 = -\gamma\omega + mgl \sin \theta + u \quad (1)$$

$$\omega = \dot{\theta} \quad (2)$$

$m$ は単振り子の質量、 $l$ は長さ、 $g$ は重力加速度、 $\theta$ は角度、 $\omega$ は角加速度を表す。この時、単振り子の状態 $(\theta, \omega)$ を観測し、その状態に応じたトルク $u$ を出力する制御を行うのが課題となる。まず、系の状態に応じた報酬 $r$ は単振り子の振り上げ時に最大となるように次のように定義される。

$$r(\theta) = \cos \theta \quad (3)$$

この時、方策 $u$ に従った時に期待される報酬 $V(\theta, \omega)$ は次式で定義される。

$$V(\theta, \omega) = \int_t^{\infty} e^{-\frac{s-t}{\gamma}} r(\theta(s), \omega(s), u(s)) ds \quad (4)$$

(4)の $V(\theta, \omega)$ が大きくなるように制御を行う。しかし、 $V(\theta, \omega)$ は未知の関数であるため、関数近似を行う。この時、以下のTD誤差が小さくなるようにパラメータの変更を行い、 $V(\theta, \omega)$ を推定した。つまり、 $V(\theta, \omega)$ を推定するユニット (Critic) は次式となる。

$$\delta(t) = r(t) - \frac{1}{\gamma} V(t) + \dot{V}(t) \quad (5)$$

一方で、 $(\theta, \omega)$ の値に応じて、制御入力 $u$ を決めるユニット (Actor) は以下の式に従う。(vは速度, nはノイズ)

$$v = \mu(\theta, \omega) + \sigma n \quad (6)$$

$$u = v_{max} g(v) \quad (7)$$

## 5.2 単振り子の投射運動

次に、単振り子に投射課題を与える (図3)。この実験も単純な系による到達運動であるため、次元・自由度の変化に乏しく、課題の分節化は要さない。単振り子の条件 (質量や長さなど) は変えずに行う。球を離す条件は角速度が最大に離すこととした。

## 5.3 多関節制御器における投射運動

3つめの実験として、不良設定性を持つ最小の運動課題として、多関節制御器を実装し、投射運動課題を与える。各リンクは上腕、前腕、関節は肩、肘に対応し、課題実行時の手先軌道を計測する。また、この実験において、高難易度と低難易度の2つの課題を与える。

高難易度 (長い到達距離を要する) の課題において、大部位では粗い制御 (高自由度)、一方で、小部位では繊細な制御 (低自由度) が必要となる。大部位では、十分な自由度の使用が求められ、失敗するケースとして自由度の未使用が考えられる。反対に、低難易度 (短い到達距離を要する) の課題において、自由度の過剰な使用及び運動順序の不整合による失敗が考えられる。低自由度による繊細な制御が必要となるため、高難易度の課題を比べ、サブゴール数が多くなることが予想される。

以上より、この3つめの実験では、運動の分節化及び制御順序に関する解析を行い、意図・計画の推定を行う。

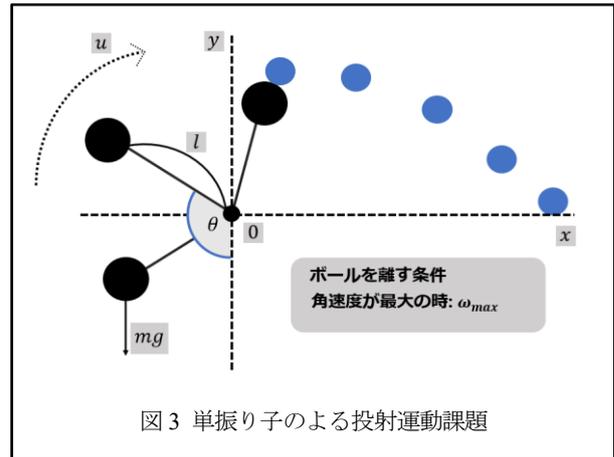


図3 単振り子による投射運動課題

## 最後に

本研究における3つの実験結果及び考察は、本学会で報告する。

## 文献

- [1] WARNEKEN, Felix; TOMASELLO, Michael. Altruistic helping in human infants and young chimpanzees. *science*, 2006, 311.5765: 1301-1303.
- [2] Flash, T., & Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model *Journal of neuroscience*, 5(7), 1688-1703.
- [3] Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multi joint arm movement minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, 61, 89-101.
- [4] 日高昇平. "力学的不変量仮説: 運動制御の最適化理論の上位原理として." 第15回身体知研究会予稿集(2013).