

特集 「身体知の発展」

身体知研究を支える理論・方法論

Theories and Methodologies Supporting Embodied Cognition Research

古川 康一
Koichi Furukawa

慶應義塾大学
Keio University.

諏訪 正樹
Masaki Suwa

慶應義塾大学環境情報学部
Faculty of Environment and Information Studies, Keio University.
suwa@sfc.keio.ac.jp, <http://metacog.jp/>

日高 昇平
Shohei Hidaka

北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology.
shhidaka@jaist.ac.jp, <http://www.jaist.ac.jp/~shhidaka/>

Keywords: abduction, analogy, research with first-person's view, embodied meta-cognition, constructive science, nonlinear dynamical systems, computational theory.

1. はじめに

身体知研究を支える理論・方法論として、我々は発想推論、一人称研究、非線形力学を取り上げる。発想推論は、ここの説明を与えるための仮説を生成する推論である。もちろん新しいここの発見のサポートもその成果に含まれるが、主眼とする、矛盾なく説得力のある説明を生成する機能は、ここの解明に十分役立つと思われる。一人称研究は、研究パラダイムの問題である。従来の科学的、客観的な真理を追求するという立場には見られない個人の感性や身体感覚などの、主観的な情報とことばとの関係を吟味し、その有効活用を図り、身体スキルの向上に資するという方法論である。非線形力学に基づくアプローチは、主として繰返し動作に潜む多次元時系列を位相空間に埋め込み、その力学系とみなし、さまざまなアトラクタのパターンを抽出し、スキルの習熟度を視覚的・定量的に表現する。

これらの3アプローチは一見脈絡がないように思われるが、その背後に共通する課題は、記号接地（シンボルグラウンディング）問題 [Harnad 92] への挑戦である。記号接地問題は人工知能研究が解決すべき最終問題といっても過言ではない。身体知研究はそのための格好なドメインになっているといえる。人間が幼少期に言語を獲得する際の記号接地を体験しながら、同時にそれをメタに分析することは困難であるが、身体知の獲得問題ではこれが可能である。発想推論のアプローチではそれは述語発見の形で現れ、一人称研究では身体とことばの関係性の問題として現れる。また、非線形力学では、身体運動に潜在する不変量の抽出として記号接地の問題が議

論される。

以下に、本特集号では、これら三つのアプローチについて、その概要を紹介する。

2. 発想推論

発想推論 (abduction) は、演繹推論 (deduction)、帰納推論 (induction) と並ぶ、述語論理での推論形式の一つである。発想推論は、パースによって導入された推論形式であり、既知の法則や事実からだけでは与えられた驚くべき事実 (結論) を説明 (証明) できないときに、それを可能にするような仮説を導き出す推論である。すなわち、導き出された仮説を加えることにより、驚くべき事実が論理的に説明できるわけである。発想推論は、述語論理において、与えられた定理が証明できないときに、証明を完結するように補われる論理式を求める過程として、定義される。すなわち、背景知識 (B) だけから観測 (G) が証明できないときに、仮定可能述語の集合 (T) によって定義される仮説空間の中から、証明を完結できる仮説を見つけ出すことになる。詳しくは、[Inoue 92] を参照されたい。また、実行可能な発想推論システムとしては SOLAR [Nabeshima 03] がよく知られている。

2.1 ルール発想推論

技芸におけるスキル獲得では、ここの重要性が指摘されている。ここの多くの場合、指導者によって与えられ、「課題 A をこなすためには行為 B を行えばよい」という形で提示される。すなわち、ここの課題依存であり、その効用は非常に大きい。ここのこつたる所以は、“行為 B ”

が容易には思いつかない点である。もし容易に思いつくのであれば、指導者は不要であろう。さらに、こつがなぜ有効なのかの説得力のある説明が容易には得られないという問題もある。

一方、発想推論は、「驚くべき事実」が観測されたときに、その事実を説明するために必要な仮説を生成する。もしその事実がありきたりのものであれば、おそらく我々が知っている事柄からその事実が容易に導き出されるはずであるが、それが驚くべき事実であれば、なにか見過ごしている前提があり、その前提を知らなければ、その事実が成り立つことが容易には説明できないことになる。

この枠組みは、スキル獲得にちょうど当てはまる。こつは驚くべき事実であり、その理由は自明ではなく、欠落した前提の発見が必要である。その発見のために、発想推論を行うことになる。より正確に言えば、行為 B を事実として与えて、課題 A を成り立たせるための仮説の生成問題として、発想推論を考えることができる。そのとき、 A がゴールで、 A の証明中に B が証明の末端に出現し、その間に欠落している仮説を発見しなければならない。そのため、こつの説明問題は、ルール仮説の生成問題として形式化される。我々は、このことをルール発想推論と呼ぶ。ルール発想推論は、通常の論理プログラムに基づく発想論理プログラミングなどの発想推論システムでは扱えない。我々は、メタレベル発想推論のフレームワークにより、ルール発想推論を実現した [古川 09] [Inoue 09]。

ルール発想推論の基本的アイデアは、因果関係を表すルール自身をメタ述語 $\text{caused}(X, Y)$, $\text{connected}(U, V)$ の二つを用いて表現することである。ここで $\text{caused}(X, Y)$ は因果関係グラフにおいてノード X がノード Y から因果関係をたどってたどり着くことを表している。また、 $\text{connected}(U, V)$ はノード U がノード V によって直接引き起こされることを表している。例えば、「親指を曲げる」と「高速移弦」ができる、といった因果関係は、一つのアトム “ caused (高速移弦, 親指を曲げる)” で表現される。「親指を曲げる」と「指全体が柔軟になる」という事実はよく知られており、これは、直接的な因果関係の例であり、 connected (指全体が柔軟になる, 親指を曲げる) が成り立つ。

SOLAR に代表される通常の発想推論エンジンでは、ルールを仮説として生成するルール発想推論を直接実現できない。我々は、SOLAR に対して、「親指を曲げる」や「高速移弦」などのオブジェクトレベルの述語を入力とせず、 connected , caused を用いたメタレベル述語を与えることでこの問題を解決した。SOLAR には、このほかに、述語 caused の以下の定義も与えた。

$$\begin{aligned} \text{caused}(X, Y) &\leftarrow \text{connected}(X, Y). \\ \text{caused}(X, Y) &\leftarrow \text{connected}(X, Z) \wedge \text{caused}(Z, Y). \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 類推機能の追加

しかしながら、ルール発想推論は、それだけでは不十分である。例として、「高速移弦をこなすためには親指を曲げればよい」というこつを考えてみよう。その場合、必要となる欠落ルールは、そのこつ自身である。すなわち、ルール:「親指を曲げれば高速移弦ができる」が発想推論で発見されるべきルールとなる。しかし、容易にわかるように、このようなルールは、ルールとしての意味がない。それは、なぜそのルールが有効なのかを説明してくれないからである。

ここでは、そのようなルールの有効性を類推によって説明する方法を与える。ルールの有効性を示すためには、隠された本当の理由を探さなければならない。そのために必要となるのが、そのような未知の理由を説明するための述語発見とその述語の意味を把握するための類推である。

類推は、発想推論と同様、論理的に正しい推論ではないが、対象世界と類似の系で成り立つ関係を元の世界に持ち込んで推論を続ける方法である。類推を演繹推論に持ち込む方法としては、原口による類比、およびメタプログラミングによる手法 [Haraguchi 85, 原口 86]、および Goebel による等式系による形式化 [Goebel 89] がよく知られているが、ここではその手法をメタレベル発想推論のためのメタルールを拡張することによって実現する [Furukawa 14, 金城 14]。

考察対象の世界をターゲット世界と名付け、類推を取る世界をベース世界と名付ける。ターゲット世界およびベース世界での因果関係を別個に扱うために、それぞれ固有の因果関係述語 $t_caused(X, Y)$, $t_connected(X, Z)$, $b_caused(X, Y)$, $b_connected(X, Y)$ を導入する。さらに、ターゲット世界とベース世界の類似アトム対 (類比) を表す述語 $\text{similar}(X, XX)$ を導入する。ここで、 X はターゲット世界での命題を表し、 XX は X に類似したベース世界での命題を表す。類推を発想推論に組み込むのに中心的な役割を果たす公理は、以下の類推公理である。

§ 1 類推公理

$$\begin{aligned} &\text{connected_by_analogy}(X, Y) \\ &\leftarrow b_connected(XX, YY) \wedge \text{similar}(X, XX) \\ &\wedge \text{similar}(Y, YY). \end{aligned} \quad (2)$$

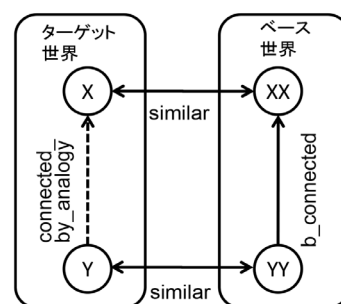


図 1 類推公理

この公理 (2) は、図 1 に示すように、ノード X と Y が、それぞれ類似なベース世界でのノード XX と YY の直接連結関係 $b_connected(XX, YY)$ を模して、類推によって直接連結関係が導かれる ($connected_by_analogy(X, Y)$) ことを示している。

我々は、類推発想推論エンジンを使い、前節で述べた、「親指を曲げる」弓の持ち方の理由を探る実験を行った。そこで与えた観測事実、仮定可能述語、背景知識は以下のとおりである。

観測 (G) : $t_caused(cross_strings_quick, bend_thumb)$.
 仮定可能述語 (T) : $[connected_directly/2, similar/2, print_connected_by_analogy/2]$

背景知識 (B) :
 ベース世界 : $b_connected(knuckle, thumb)$.
 ターゲット世界 : $\leftarrow connected_directly(cross_strings_quick, bend_thumb)$.
 類比 : $similar(bend_thumb, thumb)$

ここで、観測 $t_caused(cross_strings_quick, bend_thumb)$ は「親指を曲げる」ことによって「高速移弦」が可能になった、という驚くべき事実を示している。背景知識 (B) は、そのことを証明するのに必要とされるターゲット世界 (チェロを演奏する世界) での関係性 (ここでは、「親指を曲げる」ことから「高速移弦」が直ちに成り立たないことを示す論理式)、類推に用いられるベース世界での因果関係 (親指が筋骨格系で他の指に連結しているという事実)、および「親指を曲げること」と「親指」の類似関係からなる。仮定可能述語 (T) は、仮説の構成部品である述語の集合を与えている。本プログラムの実行により六つの解が得られた。そのうちの 하나가以下のとおりである。

```
connected_directly(cross_strings_quick, _0)
  ^similar(_0, knuckle)
  ^print_connected_by_analogy(_0, bend_thumb)
```

この解は、図 2 のような推論図式で表される。この図を解釈することにより、親指を曲げることが筋骨格系で親指に連結している他の指を曲げることになることが明らかになった。それがこの図中の「？」の意味である。一方、この「？」自身は、ルール発想推論で導入された新述語である。ここで注目すべきは、発想推論の実行時

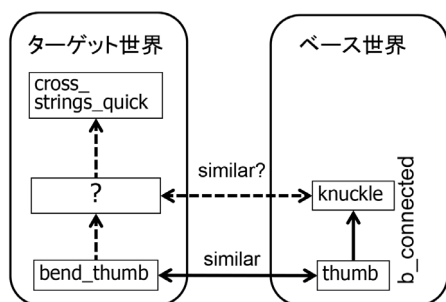


図 2 述語発見を含む類推発想推論

に与える仮定可能述語である。発想推論の批判の一つに、解に現れる述語名をあらかじめ与えなければならない、という事実がある。そのために、答を与えているようなものと思われがちである。ところが、ここでの類推ルール発想推論では、そこで与えるのは $connected$, $similar$ などのメタな述語のみで、オブジェクトレベルの述語は指定していない。さらに強力な点として、新述語の導入機能が付いている点である。この機能は、本当の意味で新しい発見をサポートしている。新述語の解釈のみが我々人間に委ねられている。このことは、スキル獲得での着眼点の発見などをサポートするシステムとして、類推発想推論が十分に役立つことを示している。

2.3 認知アーキテクチャとしての類推発想推論

ここで述べた「類推発想推論システム」は、我々の脳における思考のモデル化につながる [Furukawa 16]。思考は、脳の知能にとって大切な側面の一つである。それは、人工知能が追い求めてきた能力の一面を構成する。近年、AlphaGo の画期的な成果のおかげでディープラーニングの卓越性が強調され、現在の人工知能フィーバーの大きな要因になっていることは事実である。また、それが記号論理的アプローチとは全く異なるニューラルネットワークでの最近のブレイクスルーであることも周知の事実である。そのため、現在の人工知能研究において、類推や発想推論などの記号論理的な背景をベースとするアプローチの重要性を見逃すような傾向が見られるのではないかと危惧される。しかしながら、これらのアプローチは、言語を操る機能とも密接に関係しており、その重要性は計り知れない。そこでのポイントは、説明機能であり、言語操作や類推による新たな発想への展開である。ディープラーニング研究が今後目指さなければならないのは、まさにこの点ではなからうか。それは、身体性への接近の切り口ともなると考えられる。

3. 意識内容を調査する方法論

3.1 一人称研究

本特集内の「身体知という研究領域」(pp. 215-217) でも論じているように、身体知が身体、心、社会の文脈に根ざした知であるのだとすると、物理的な身体を客観的に外部観測するだけでは事足りない。身体は外部から観察できる存在でもあり、当の本人が内側から感じる存在でもある。内側から感じるのは、体性感覚を覚する自己受容器官のなせる業である。例えば、身体が感じている「痛み」を外から観測することは医学 (技術) 的には難しい。お腹が痛いのだとしても、その痛さは必ずしも特定の臓器の不具合だけから生じているとも限らない。体性感覚とは、どこか特定の身体部位が発するシグナルではなく、身体全体にわたるシステム論的な現象である。身体全体の肩こりや背中周りの筋肉の緊張、血の

めぐりの悪さ、身体全体のバランスが取れていないことなどから腹が痛むこともある。また精神的なものごとが痛みを発症させることもある。

つまり、身体知が成立しているメカニズムやその獲得の様態を研究するためには、物理的な身体を客観的に外部観測したデータだけではなく、本人が考えていること、感じていること（以後「意識」と称する）についてのデータも必要である。後者のデータは本人が語る以外に観測方法はない。

本人の語りは、必然的に一人称視点から自と他（以後はより一般的に「環境」と称する）の関係を語る行為である。哲学的には客観的外部観測に相対する概念であり、「内部観測」と称する[松野 16]。科学的研究といえはすなわち客観的観測を是とするという科学観が優位な世の中にあって、「内から身体を感じる」とか「一人称視点で観察する」という文言は非科学的であるとの批判を受ける向きもある。しかし、著者らは、一人称視点でしか語り得ぬものごとが確実に存在すること、今までの科学は方法論を絶対視するがゆえにそういうものごとを取り逃がしてきたのであると考えている。人工知能学会や認知科学の分野では昨今「一人称研究」という動向が注目を集めている。著者の一人、諏訪が堀 浩一氏と共同で編著に携わった「一人称研究のすすめ 知能研究の新しい潮流」[諏訪 15a]では、一人称研究を「人が現場で遭遇したものごとを、その時の個別具体的状況を捨ておらずに、一人称視点で観察・記述し、そのデータをもとに知の姿についての新しい仮説を見いだそうとする研究」と説明している。

3・2 メタ認知と構成的方法論

一人称視点で自と他の間に生起するものごとを観察・記述する手法としてメタ認知が有用である。心理学領域で昔から論じられてきた「メタ認知」（ときにリフレクションとも称する）は、身体性概念が登場する以前に提唱されたこともあって、自己の身体を内側から感じる対象として捉えていない。具体的にいうならば、体性感覚の類のものごとをメタ認知の俎上にあげる研究は心理学にはあまりなかった。そこで著者らは、身体動作やそれに伴う体性感覚、そして外部環境への知覚もことばで表現しようと努力する行為を「からだメタ認知」と称し、メタ認知の拡張型として提唱してきた。その学問的、生活実践面での意義は[諏訪 15b, 諏訪 16a]を参照されたい。本特集内の「生活と身体知」(pp. 247-254)では、日本酒の味わいの体感をメタ認知的にことばで表現した例を示している。

その例で論じているように、一般に、メタ認知的に自己の意識を振り返ってことばにすると、体感や身体動作が変容する。観測行為が観測対象に影響を与えるのである。メタ認知は一種の内部観測なのでなおさらその影響は大きい。身体知の一側面である身体動作や意識（どん

な問いを抱いているか）の現状を捉えようとしてことばで表現することによって、それ自体が変容してしまっただけで元も子もないと考える読者も多いであろう。しかし、意識内容をデータとして取得しようとするならば身体知研究はそうならざるを得ないし、また、そうなるのが良いと著者らは主張したい。身体動作や意識が変容するということは、すなわち、学びのプロセスを現在進行形で進めていることを意味する。

身体知の研究は、出来上がった（獲得済みの）身体知の状態だけではなく、身体知をまさに今獲得しようとしている現在進行形の様態を探究することが必須であると思うのである。前者は「何ができているか」の探究、後者は「何がいつどのようにできつつあるか」の探究である。ことばでデータを残すことが意識内容を変容させてしまうのであれば、それを逆手にとって、対象者に学ばせながらその変容の様を捉えることができると建設的に考えればよい。メタ認知はそれを可能にする研究方法論である。この思想の詳細は[諏訪 16a, 諏訪 16b]を参照いただきたい。

より一般的には、これは構成的な科学方法論[けいはんな 04, 中島 06]である。ものごとを構成して初めて顕在化するものごとを探究するというパラダイムであり、身体知のように生身の人の知を社会や生活の文脈の中で探究する分野では必須であろう。

3・3 意識内容の分析手法

ことばで語られた自然言語文のデータをどう分析するかについては、さまざまな研究が模索を続けている。ここでは著者らが試みたいいくつかの代表的な手法を紹介する。

§1 プロトコル分析

意識内容の分析手法の代表はプロトコル分析であろう。ことばの分類をつくり、自然言語文に含まれる単語やフレーズがどの分類に属するかをコーディングすれば、各分類に属するデータの個数を算出できる。長期間（著者らの経験的には半年以上がよい）にわたる意識内容のデータが揃っていれば、対象者が感じたこと、考えたことの変遷（つまり学ぶ過程でどういう意識に変遷があったか）を定量的に分析・提示することができる。横軸に時間（典型的な手法では日付、もしくは大局的な傾向を見るためには月）をとり、縦軸には注目する分類に属することばの頻度をとり、2～3種類の分類を同じグラフで表せば、頻度の増減の相関を観察でき、そのグラフをもとに身体知の学びについての仮説を立てたり、別の分析法を着想する糸口になったりする。

例えば、ボウリングのスキルの熟達プロセスの研究[諏訪 06, 諏訪 15b]では、細かな身体部位に意識を当てることが優位な場合と、大雑把に身体全体に意識を当てることが優位な場合では、学びのフェーズが質的に異なるのではないかと仮説を事前に抱いていた。そこで、

約9か月にわたる膨大な意識内容のデータから、身体部位を表す単語をすべて拾い上げ、細かな身体部位*1と大雑把な身体部位*2という二つの分類にコーディングした。その結果、時間の経過につれて前者の分類が増えるフェーズと、後者の分類が増えるフェーズが繰り返されるサイクルが複数回存在し、それがボウリングのスコアのデータと興味深い相関を示すという現象が判明したのである。

次に、散歩中に気になった風景や道端のものごとを写真に撮り、何を感じたり考えたりしたかをことばで表現する文章を長期間書き綴ったという研究[諏訪 16a, 浦 06]を紹介する。五感のどのモダリティーで感じたことなのかを区別する分類をつくり、文章中のフレーズをコーディングした結果、以下のような現象が判明した。その生活習慣を始めた頃は視覚的なフレーズ（視覚というモダリティーで着目したものごと）の頻度が圧倒的に優位であったが、研究期間の後半には、すべてのモダリティーがほぼ等しい頻度で出現するようになったのである。単一モダリティーではなく、多様なモダリティーを併用してものごとを感じるという感性（すなわち身体知）が育まれたことを示唆していると解釈している。

プロトコル分析において最も重要なことは、分類をどうつくるかである。ボウリングの研究のように、研究者が有望な事前仮説を有していれば、有益な分類が作成できて面白い結果が得られることもある。しかし、一般的には、分類のつくり方に特別なヒューリスティクスがあるわけではなく、そこが研究者の腕の見せどころである。さらに、つくられた分類の各クラスは排他的であること、そのクラス全体で網羅性があること（漏れが少ないこと）、各クラスの抽象度は揃っていることも求められる。分類をつくること自体が研究者のスキル（身体知）であるのかもしれない[諏訪 16a]。

§2 テキストマイニング

共起分析や対応分析（*corresponding analysis* [Greenacre 07]）も意識内容の変遷を分析する有用な手法である。著者（諏訪）と大塚氏は日本酒の味わいをことばで表現する生活習慣を1年以上継続し、その期間に味わいの感じ方がどう変遷したかについて、共起分析[大塚 15]や対応分析[大塚 16]を用いて分析した。どういふ単語同士がともに生じやすいかを観察すれば、味わいを表現する言葉群が大まかにクラスタリングできたり、クラスタ同士をつなぐハブ的な単語が顕在化したりする。ハブ的な単語は対象者にとっての重要語であることが多い。

対応分析は、頻出語の変遷や、複数の対象者の意識の差異や距離を明らかにしてくれる。諏訪と大塚の研究では、上記の生活習慣を続けると、当初には出現しなかつ

た、口腔空間での動きを表す動詞、舌・上顎・鼻腔への接触を表す動詞がしだいに増えてくることが判明した[大塚 16]。また、互いの味わい表現を日頃から共有する環境が作用したのだと解釈できるが、諏訪と大塚の使う単語が1年の時を経て互いに距離が近くなっていくという現象も見られた。

4. 非線形力学による身体運動記述

Marr [Marr 82] の初期視覚系に関する計算理論の提案以来、視覚のみならずさまざまな分野において、認知処理をある種の最適化による不良設定問題の解消とみなすパラダイムが確立してきた。身体運動の制御もその例外ではなく、ある種の拘束条件を満たす最適化問題により運動制御および目標軌道生成が議論されてきた。この立場では、ある種の最適性によって身体運動が意味付けられるとする。

本稿では、まず Marr の情報処理の水準を簡潔に振り返り、その運動制御の分野での応用について述べる。次に、Marr 以来およそ 30 年にわたって支配的なパラダイムである「計算理論＝最適化」に代わる仮説として、身体運動を非線形力学とみなす立場について述べる。非線形力学の立場では、滑らかな変換に対する不変量により身体運動が特徴付けられると考える。

4.1 身体運動を最適化とみなす立場

Marr [Marr 82] は初期視覚をある種の計算処理とみなし、その計算機構を計算理論、アルゴリズムと表現、ハードウェア実装の3水準に分けることを提唱している。計算理論の水準は、計算の目的を記述する最上位の水準であり、計算処理の入力と出力を数理的に表現する。アルゴリズムと表現の水準では、計算理論で記述される入力から出力を与える具体的な計算手続き（アルゴリズム）を同定する。ハードウェア実装の水準では、脳（神経生理的機構）や電子計算機などの物理的な機構において、どのようにアルゴリズムが実現されるか議論する。この三つの水準において、一般に、一つの計算理論に対して複数のアルゴリズムと表現が、また一つのアルゴリズムと表現に対して複数のハードウェアでの実行が可能である。また、一方で、人の認知を対象とする研究では、脳によるハードウェア実装により、可能なアルゴリズムと表現は制限され、また実時間での実行可能性などの点から、アルゴリズムは計算理論水準の仮説を制限する。このような3水準間の双方向の包含関係、実効的な要請により、計算処理としての認知過程の理解を深めていく必要がある[川人 96]。

Marr によれば、初期視覚の計算理論は、二次元的な情報（網膜像）から三次元の形態を推定することである。三次元の構造はある二次元像に一意に投影できる（順問題）。しかし、二次元上のパターンから元の三次元像へ（逆

*1 例えば、指先腕足頭など局部。例えば、指先腕足頭など局部。

*2 例えば、身体全上半下幹など。例えば、身体全上半下幹など。

問題)は一意に定まらない。これは、逆問題の解が複数(あるいは無数)に存在する不良設定問題の一種である。このような不良設定問題を解く一つの方法として、ある種の制約を仮定した上で、その制約を満たす解を求める事が提案されている [川人 96, Marr 82, Poggio 85].

初期視覚の計算処理に関する最適化理論の成功は、当然ながら、他の認知処理の説明についても大きな影響を与えてきた。身体運動の計算処理過程もこの例外ではなく、川人 [川人 96] は、身体運動の計算理論として、筋骨格系の動力学的な滑らかさを制約とする最適制御理論を提案している。川人によれば、身体運動の主要な計算理論は、筋骨格系の動力学的空間(関節角、筋肉の出力・収縮など)と、運動の目標が与えられる作業空間(実三次元空間)上の対応付けの問題である。作業空間上の端点の軌跡が三次元上の点列であるのに対し、それを実現する身体の自由度がそれよりも大きいために、視覚系と本質的に同種の不良設定問題になる。例えば、到達運動時の手の先端のある軌道は各時点で三次元であるが、肩・肘・手首など少なくとも身体には7自由度があり、冗長であるため動力学的な変数は一意に定まらない。したがって、川人らは目標軌道の生成および、その実現のための運動制御をある種の最適化による不良設定性の解消が必要であるとした。具体的には、関節回りのトルクを最小化を制約とするトルク最小原理、筋緊張最小原理や運動指令最小原理などを提案し、動力学的に滑らかな軌道の生成を身体運動の計算理論として提案している [Uno 89].

4.2 身体運動を力学系とみなす立場

すでに紹介したように、Marr [Marr 82] 以来、初期視覚系のみならずさまざまな分野において、認知処理過程をある種の最適化による不良設定問題の解消とみなすパラダイムが確立してきた。しかし、この運動制御の最適化理論の一つの問題点は、フィードバックのある大自

由度の身体に適用する際に、運動の逆モデルの計算コストが膨大になり得る点である。特に複数の身体部位を協調して行う複雑な動作の場合、その数に応じて無数の組み合わせの変換が必要になる。さらに、運動の観察学習を行うには、自己と他者の身体間で変換を行う必要があるが、制御理論に基づく従来のロボット工学的手法では、模倣的な行動の学習は困難であると考えられている [Breazeal 01]. これに対し、非線形力学系を基礎とし、神経・筋・骨格からなる大自由度系の適切な制御により構成された、低次元のアトラクタを身体運動とみなす立場がある [Hidaka 12, Hidaka 13b, Kelso 95, Turvey 90]. この枠組みでは、身体運動の学習は、特定のアトラクタを安定的に制御するために、軌道が通るべき特定の相空間の領域(「こつ」)を探索・発見し、それを実現することに当たる。また、身体技能の理解は身体運動の知覚から、そのアトラクタを再構成し、その不変的性質(アトラクタの位相構造)を認識することに当たる。

運動制御を最適化とみなす研究と比較して、この立場の特徴は、運動の表現として再構成された相空間そのものではなく、それと同相な位相的構造(座標変換に不変な性質)を扱う点にある(図3)。相空間を直接計算しないため、無数に存在し得る座標の取り方によらず、複数の身体部位や、運動の実行系と知覚系などの違いを超えた表現が可能になる。具体的には、記号力学系 [Lind 95] と呼ばれる理論体系を用いて、身体運動を力学的な位相構造を分析・記述する。近年、力学方程式が陽に与えられていない経験的な時系列に対して、記号力学系を推定する方法 [Buhl 05, Hidaka 10] や、各時点のフラクタル次元の系列を推定する方法 [Hidaka 13a, Hidaka 14] が提案されている。これらの技術を用いることで、力学系間の位相的類似性を計算することが可能である。一方、身体運動を力学系とみなす立場では、未知の非線形力学系を同定する標準的な手順が確立されておらず、実際の運動データを扱う際の観測誤差を取り扱う統計的

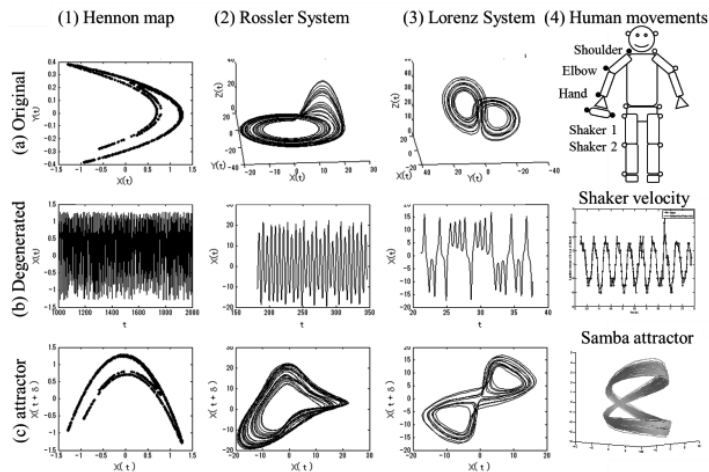


図3 遅延座標系 [Tarkens 81] によるアトラクタの再構成の例。
 (1) Henon 写像, (2) Rossler 系, (3) Lorenz 系, (4) 人の楽器演奏運動 [Hidaka 13b],
 (b) : (a) の一次元 (X 軸) 時系列, (c) : (b) を時系列に再構成したアトラクタ

手法との融合が技術的課題としてあげられる。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Breazeal 02] Breazeal, C. and Scassellati, B.: Robots that imitate humans, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 6, No. 11, pp. 481-487 (2002)
- [Buhl 05] Buhl, M. and Kennel, M. B.: Statistically relaxing to generating partitions for observed time-series data, *Phys. Rev.*, Vol. E 71, 046213 (2005)
- [古川 09] 古川康一, 井上克巳, 小林郁夫, 諏訪正樹: 発想推論に基づく着眼点の発見, 第23回人工知能学会全国大会, 1K1-OS8-5 (2009)
- [Furukawa 14] Furukawa, K., Kinjo, K., Ozaki, T. and Haraguchi, M.: On skill acquisition support by analogical rule abduction, *Information Search, Integration, and Personalization*, pp. 71-83, Springer International Publishing (2014)
- [Furukawa 16] Furukawa, K., Kinjo, K., Ozaki, T. and Haraguchi, M.: *The Cognitive Role of Analogical Abduction in Skill Acquisition*, Springer International Publishing (2016)
- [Goebel 89] Goebel, R.: A sketch of analogy as reasoning with equality hypotheses, *Analogical and Inductive Inference*, LNCS, Vol. 397, pp.243-253, Springer (1989)
- [Greenacre 07] Greenacre, M. J.: *Correspondence Analysis in Practice*, 2nd edition, Chapman and Hall/CRC (2007)
- [Haraguchi 85] Haraguchi, M.: Towards a mathematical theory of analogy, *Bull., Informatics and Cybernetics*, Vol.21, No. 3/4, pp.29-56 (1985)
- [原口 86] 原口 誠, 有川節夫: 類推の定式化とその実現, 人工知能学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 132-139 (1986)
- [Harnad 90] Harnad, S.: The symbol grounding problem, *Physica, D*, Vol. 42, pp. 335-346 (1990)
- [Hidaka 10] Hidaka, S. and Yu, C.: Spatio-temporal symbolization of multidimensional time series, *ICDM Workshops*, pp. 249-256 (2010)
- [Hidaka 12] Hidaka, S.: Identifying kinematic cues for action style recognition, *Proc. 25th Annual Meeting of Cognitive Science Society*, pp. 1679-1684 (2012)
- [Hidaka 13a] Hidaka, S. and Kashyap, N.: *On the Estimation of Pointwise Dimension*, eprint arXiv:1312.2298 (2013)
- [Hidaka 13b] Hidaka, S. and Fujinami, T.: Topological similarity of motor coordination in rhythmic movements, *Proc. 35th Annual Meeting of Cognitive Science Society*, pp. 2548-2553 (2013)
- [Hidaka 14] Hidaka, S. and Kashyap, S.: The generalist approach to frame problems, *Proc. 3rd Asian Conf. on Information Systems*, pp. 318-325 (2014)
- [Inoue 92] Inoue, K.: Linear resolution for consequence finding, *Artificial Intelligence*, Vol. 56, No. 2, pp. 301-353, Elsevier (1992)
- [Inoue 09] Inoue, K., Furukawa, K., Kobayashi, I., Nabeshima, H.: Discovering rules by meta-level abduction, *Proc. 19th Int. Conf. on Inductive Logic Programming (ILP 2009)*, Leuven, Belgium (2009)
- [川人 96] 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書 (1996)
- [けいはんな 04] けいはんな社会的知能発生学研究会 編, 瀬名秀明, 浅田 稔, 銅谷賢治, 谷 淳, 茂木健一郎, 開 一夫, 中島秀之, 石黒浩, 國吉康夫, 柴田智広 著: 知能の謎 認知発達ロボティクスの挑戦, 講談社 (2004)
- [Kelso 95] Kelso, S.: *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*, The MIT Press, Cambridge, MA, USA (1995)
- [Lind 95] Lind, D. and Marcus, B.: *An Introduction to Symbolic Dynamics and Coding*, Cambridge University Press (1995)
- [Marr 82] Marr, D.: *Vision*, W. H. Freeman & Co. Ltd. (1982)
- [松野 16] 松野孝一郎: 来たるべき内部観測—人称の時間から生命の歴史へ—, 講談社 (2016)
- [Nabeshima 03] Nabeshima, H., Iwanuma, K., Inoue, K.: SOLAR: A consequence finding system for advanced reasoning, *Proc. TABLEAUX 2003*, LNCS, Vol. 2796, pp. 257-263, Springer (2003)
- [中島 06] 中島秀之: 構成的情報学と AI, 人工知能学会論文誌, Vol. 21, No. 6, pp. 502-513 (2006)
- [大塚 15] 大塚裕子, 諏訪正樹, 山口健吾: 創作オノマトベによる日本酒を味わう表現の研究, 第29回人工知能学会全国大会論文集, 2N4-OS-16a-5 (2015)
- [大塚 16] 大塚裕子, 諏訪正樹: 味わい言語化に現れる身体知の学び, 第30回人工知能学会全国大会論文集, 3M3-OS-20a-3 (2016)
- [Poggio 85] Poggio, T., Torre, V. and Koch, C.: Computational vision and regularization theory, *Nature*, Vol. 317, pp. 314-319 (1985)
- [諏訪 06] 諏訪正樹, 伊東大輔: 身体スキル獲得プロセスにおける身体部位への意識の変遷, 第20回人工知能学会全国大会, CD-ROM (2006)
- [諏訪 15a] 諏訪正樹, 堀 浩一 編著, 伊藤毅志, 松原 仁, 阿部明典, 大武美保子, 松尾 豊, 藤井晴行, 中島秀之 著: 一人称研究のすすめ—知能研究の新しい潮流—, 近代科学社 (2015)
- [諏訪 15b] 諏訪正樹, 藤井晴行: 知のデザイナー—自分ごととして考えよう—, 近代科学社 (2015)
- [諏訪 16a] 諏訪正樹: 「こつ」と「スランプ」の研究—身体知の認知科学—, 講談社 (2016)
- [諏訪 16b] 諏訪正樹: 「自分ごととして考える」ことを促す認知実験のあり方, 建築批評 *Web Journal*, Vol. 9 (2016年7-9月号) (2016)
- [Takens 81] Takens, F.: Detecting strange attractors in turbulence, D. A. Rand and L.-S. Young, eds., *Dynamical Systems and Turbulence*, Lecture Notes in Mathematics, Vol. 898, pp. 366-381, Springer-Verlag (1981)
- [Turvey 90] Turvey, M. T.: Coordination, *American Psychologist*, Vol. 45, No. 8, pp. 938-953 (1990)
- [Uno 89] Uno, Y., Kawato, M. and Suzuki, R.: Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement - minimum torque-change model, *Biological Cybernetics*, Vol. 61, pp. 89-101 (1989)
- [浦 06] 浦 智史, 諏訪正樹: 表現における身体性—視覚優位からの脱却, 日本認知科学会第23回大会発表論文集, pp. 138-139 (2006)

2017年1月18日 受理

著 者 紹 介



古川 康一 (正会員)

1967年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年、電気試験所入所。1982年新世代コンピュータ技術開発機構へ出向。1992年慶應大学環境情報学部教授。1994年同大学院政策・メディア研究科教授。2008年退職、同大学名誉教授。2010年嘉悦大学大学院ビジネス創造研究科教授。2015年退職。工学博士。本学会フェロー。日本ソフトウェア科学会名誉会員。

諏訪 正樹 (正会員) は、前掲 (Vol. 32, No. 2, p. 217) 参照。



日高 昇平 (正会員)

2002年九州大学理学部生物学科卒業。2007年京都大学大学院情報学研究所博士後期課程修了, 博士 (情報学, 京都大学) 取得。2008年 Indiana Universityにて博士研究員。2010年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科助教。言語・認知発達, 意味認知の計算論的メカニズムの解明を目的に, 心理学実験・情報理論・機械学習・非線形時系列解析などを駆使した研究を行う。