模倣の計算理論に向けて： 力学的不変量による模倣機序の説明†

鳥居 拓馬*・日高 昇平*

身体模倣は他者の行為から自分の行為を学ぶ社会学習の基礎といえる。模倣に関する仮説はいかにして模倣者が行為の同一性を認識するかの説明を求められる。本論文では、模倣のメカニズムに関する4つの既存の仮説を検討する。著者らが模倣の仮説に要求するひとつの基準は計算機シミュレーションやロボットでの実装可能性である。もし既存の仮説に不備や曖昧な点があれば、その仮説を素直に実装できず、実際に動作するものを作るには追加の前提が必要となる。本論文では、既存の仮説をその実装を試みた研究とともに批判的に検討することで、既存の模倣の仮説がもつ未解決問題や暗黙の前提を明らかにする。加えて、身体環境系を力学系とみなす立場から、力学的不変量に基づく著者らの模倣に関する仮説を簡潔に論じる。既存の仮説が身体姿勢の感覚表現の対応づけを強調するのに対して、著者らの仮説は身体動作の自由度（力学的不変量）の対応づけを強調する。

キーワード：模倣、計算理論、仮説の実装可能性、力学的不変量

1. 模倣の問題：異なる感覚表現間で同じ行為を生成する

子供は大人をまねする。とくに訓練させずとも、子供は大人の動作を自分で再現しようとする。他者をまねる行為は模倣（imitation）と呼ばれる。ヒトの場合、学びはまねびと言われる。まねから学ぶことは、ヒトの社会的能力、さらには文化発展の基盤ともいわれる [1]。子供・大人を問わず、模倣は他者の行為から自分の行為を学ぶ社会学習の基礎と考えられる。

一般に模倣と言うとき、模倣者（imitator）が実演者（demonstrator）の動作やその結果を自分の動作で再現する行為をいう。模倣者本人の立場からは、模倣者は見たこと（実演者の動作や結果）と行うこと（模倣者の動作や結果）をある意味で一致させることを目指す。いわば、模倣者における模倣とは異なる感覚器を通してえた身体に関する表現の間で「同じ行為」を作りだす行為といえる。Meltzoff and Moore [2] は、新生児の表情模倣の謎は、生後まもなく視覚的経験に乏しい新生児が、他者視点から自分の表情を見ることも過去の経験もないにもかかわらず、他者と同じ表情を作れる点にあると主張した。「同じ行為」を作ると言っても、異なる個体は厳密に同一の身体（骨格や外見）をもたない。それゆえ、何をどのように「同じ」とみなすかは模倣のメカニズムを論じる上で中心的な問題である。

私たちが自分の身体を知る感覚は固有受容感覚、内部受容感覚、外部受容感覚に分類される。運動制御において、私たちはこれらの感覚器を通してえた身体・環境の情報を使う。このうち、外部受容感覚（e.g., 視覚）は他者の身体の状態を知ることにも使える。しかし、固有受容感覚および内部受容感覚を通じ

て他者の身体を知ることはできない。また、他者の固有・内部受容感覚器の情報を直接にはえられないため、外部受容感覚器で他者の動作を知覚しても、その運動制御のすべての性質を同定することはできない。こうした感覚情報の非対称性（知覚できない他者の感覚情報の存在）にもかかわらず、人は（多くの場合、乳幼児であっても）他者を容易に模倣できる。したがって、模倣メカニズムの説明には、直接観察できない運動制御を行う他者の動作を自分の動作によって再現する行為を、いかにして実現するかを明らかにする必要がある。

複数の個体が同じような動作を示すことはヒト以外の生物集団でも見られる。Byrne [3] は多種生物において異なる個体と同じような動作を生み出すメカニズムを分類した。この分類で大きな分岐点となるのは、模倣者側の個体の動作が他個体の動作や結果を再現する意図でなされたかどうかにある。生物の動作の中にはある結果の知覚がある種の動作を反射的に引き起こす。一方、ヒトは随意的な模倣を行える。Byrne [3] は随意的な模倣をさらに2つに分ける。一般に、ある結果（目的）を引き起こす動作（手段）は複数ありえる。このとき、実演者の動作の結果のみを必ずしも同じではない動作で再現するものは結果模倣（emulation）と呼ばれ、他方、実演者の動作とその結果を両方再現するものは真の模倣（true imitation）と呼ばれ区別される。¹本稿で結果模倣と呼ぶ emulation は目的模倣（goal emulation）とも呼ばれるが、そこでいう「目的」は典型的には、観念的なものではなく、「行為によって引き起こしたい環境の変化」や「行為の結果」などあくまでも観察可能なものを意味する。本稿では「目的」をこの意味で用いる。曖昧さを避ける

† Toward Computational Theory of Imitation: An Account for the Mechanism of Imitation Based on Dynamical Invariants
Takuma TORII and Shohei HIDAKA

* 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

1 たとえば、[4]の心理実験では、実演者は自分の「額」でボタンを押す動作を模倣者に見せる。このとき、模倣者が自分の「手」でボタンを押す場合が結果模倣に当たり、模倣者が自分の「額」でボタンを押す場合が真の模倣に当たる、と考えられる。

ため、本稿では「結果模倣」を用いる。²Byrne [3] の分類にはないが、広義の随意的な模倣には、他者の目的や結果の再現を必ずしも伴わず、他者の動作そのものをただ再現する場合もある（子供が親の仕事の様子をまねるなど）。本論文では、実演者の動作を再現するもの（結果の再現を必ずしも要求しない）を動作模倣と呼ぶ。

ヒトの子供（14 か月以上）は結果模倣も真の模倣も行えるとする報告は数多くある。Meltzoff [5] や Warneken and Tomasello [6] は、大人（実演者）の動作が意図通りでない場合でも、その偶発的な動作を見たヒトの子供（模倣者）は大人の目的（引き起こしたい環境の変化）を汲み取った動作を行える傾向を示した。Bekkering et al. [7] や Gergely et al. [4] は、動作のみか簡単な道具を使う課題では、大人の目的（環境の変化）がその動作から明らかな場合には、子供は必ずしも大人の動作を再現せず、その目的（環境の変化）を達成する効率的な動作を選ぶ傾向を示した。一方、Nagell et al. [8] や Horner and Whiten [9] は、複雑な道具を使う課題では（大人の目的が不透明なためか）、大人目線では無意味で非効率的な動作だとしても、ヒトの子供は大人の動作をとりあえず再現する傾向を示した。

多様な経験的知見に関して、なぜ・いかにしてヒトの子供は模倣できるのかを説明すべく、さまざまな仮説が提案されてきた。³著者らの見解では、これら既存の仮説は、模倣の中心的問題を、異なる感覚器を通してえた身体に関する表現の間で「同じ行為」を作りだす問題だと考える点で共通する。具体的には、新生児の表情模倣に関する Meltzoff and Moore [2] では、模倣者は固有受容感覚（e.g., 体性感覚）で自分の身体を知覚し、外部受容感覚（e.g., 視覚）で他者の身体を知覚し、これら2つの感覚入力を「同じ」にするまでの運動計画を決める問題だと考える。⁴ここでの「同じ行為」とは、自分の右手と他者の右手のように、異なる身体の同一名称をもつ部位を同じように動かすという意味合いをもつ。⁵多くの既存の仮説はこうした運動する身体部位の一致まで含んだ狭義の「同じ行為」を想定すると思われる。しかし、既存の仮説では異なる個人は厳密に同一の身体をもたないとしながらも、仮説を記述するさいに何を同一の部位（まとめ）とするかを暗黙に想定するなど「素朴

な身体部位の同一性」に依拠し、異なる感覚表現の間で「同じ行為」を作るという模倣の成立条件が明示されていない。

本論文では、計算理論の構築を目指す認知科学の立場から、模倣に関する既存の説明・仮説を批判的に検討する。著者らは、ヒトの模倣は目標の行為と何らかの意味で同じとみなせる随意的な動作⁶であるという立場をとる。著者らは、既存の仮説と同じく、模倣者の直面する問題は、異なる感覚（e.g., 視覚と体性感覚など）上に表現された動作の間で「行為の同一性」を認識する問題だと考える。次節では、既存の仮説に暗黙に仮定された「素朴な同じさ」を明確にしながら、既存の仮説の共通点・相違点を紹介する。模倣の計算理論の構築に向けて、著者らは計算機シミュレーションあるいは物理的なロボットによる実装可能性を重視する。もし仮説に何らかの不備や暗黙の前提があれば、それを埋めることなしには実装不可能である。その点で、実装可能性は仮説の妥当性の1つの基準である。近年ではロボットや機械学習を用いた模倣の研究も盛んであるが、一般に、仮説の不備を埋めるため、ヒトの模倣を説明する上では必ずしも成り立たない前提条件を置くことで実装を可能にしている。こうした実装の都合上追加された前提は、既存の仮説・モデルがもつ暗黙の前提であり、今後何が解明すべき点であるかを明確に指し示すと考えられる。しかし、こうした実装上の前提は技術的な詳細に埋もれ、往々にして見落とされがちである。そこで本論文では、既存の仮説とともに、既存の仮説の実装を行った理論・モデル研究を紹介し、実装時に追加された前提条件を明示する（3節）。本稿のもうひとつの目的は、3節の既存研究の概説と批判を踏まえて、著者らによる、新しい視点からの模倣の理論的な枠組みを提案することにある（後に詳しくみるが、既存の仮説および著者らの仮説を表1にまとめた）。4節では著者らの仮説を論じる。

2. 模倣の問題に対する著者らの立場

次節で模倣に関する既存の仮説を紹介するに先立ち、著者らが模倣とは何と何の間で「同じ」を作りだす問題と捉えているかを表明するのが望ましい。新生児の表情模倣に限定しない場合、Meltzoff and Moore [2] の用いた、自分の身体を知覚する感覚は固有受容感覚、また他者の身体を知覚する感覚は外部受容感覚という区別は適切ではない。なぜなら、一般には自分の運動を計画するのに両方の感覚を使うからである（e.g., 到達課題では視覚を使う）。そこで、本稿では外部受容感覚・固有受容感覚という二分化で生じる混乱を避けるべく異なる用語を導入する。

本稿で用いる用語の関係を図1に示す。本稿では、模倣者の立場から、模倣者の身体全身を記述する全変数から構成される空間を状態空間と呼び、状態空間を S で記す。状態空間 S の1点 $s \in S$ は、例えばある瞬間の身体の姿勢、位置・速度、神経活動、筋活動などを含み、身体のある特定の状態を状態空間の一点として一意に記述する。 n 個の状態の系列を動作と呼ぶ。本来なら動作は $\{s_t\}_{t \in S^n}$ と書くべきだが、簡単のため、本稿では動作も s で略記する。通常、模倣者はこの状態空間によっ

2 観念的な意味での「目的」や「意図」に関して「目的を模倣する」とか「意図を模倣する」といった言い回しの解釈には現時点で明確な合意はないと思われる。

3 模倣に関しては、異なる観点から複数の概説論文がある。国内論文を中心に模倣の概説論文を一部紹介すると、[10] は発達心理学から、[11] は比較心理学から、[12] は比較認知科学から、[13] は教育心理学から、[14] は脳神経科学から、[15] は発達ロボット学から、[16] はロボット工学から、[17] は動物心理学の観点から、既存の仮説や知見をまとめている。

4 本稿の2節では、固有受容感覚／外部受容感覚に代わり、状態空間／観察空間を導入する。

5 しばしば、模倣の主たる問題は異なる身体部位間の対応関係（mapping / matching）を見つける「対応問題」（correspondence problem）だと言い表される [18]。身体部位の対応問題という考えは、[2] の active intermodal mapping 仮説や、[19] の direct matching 仮説といった名前にも表れる。模倣関連の論文にも身体部位の対応づけや結果の対応づけを冠する表題は多い。

6 目的を達成する手段としての随意的な動作を「行為」と呼ぶ [20]。

表 1 模倣に関する既存の仮説および著者らの仮説の比較表

模倣種類・現象	主張（仮説）	類似性・同一性	主張の前提・出発点	主張の問題点	実装例	実装時の作り込み
超感覚表現 Meltzoff・Moore (1997)	超感覚表現の仮定で表情模倣を説明可能	超感覚表現（身体記憶）	超感覚表現へ変換できる（自分の表情でも可能）	新しい区画「超感覚表現」に転嫁	画像処理 Aggarwal・Cai (1999) 他	同身体モデル、動作パタンの事前知識
自己模倣 Rochet (2002)	自己模倣から自己客体化を経て、模倣一般へ	視覚上の身体記憶（形状・変位）	自己客体化できる。視覚的類似性は所与	自己客体化の方法が不明。観察や実行を論じていない	Chaminade et al. (2008)	何を単位とするか、どう分節するかを作り込み
ミラーニューロン Rizzolatti et al. (2001) Heyes (2001)	ミラーシステムは模倣の基盤 → 模倣を説明可能	共起関係／連合関係	ミラーシステムありき	何を連合学習の単位とするかが不明	河合・長井・浅田 (2011) 他	何を単位とするか、どう分節するかを作り込み
最適制御 Wolpert・Doya・Kawato (2003)	「同じ脳」の前提で、他者の制御戦略を推定可能 → 模倣を説明可能	視覚上の身体記憶（位置・角度）	不確定な視覚的逆問題は解ける。同じ脳前提は成立	異なる身体間の逆問題は順問題が存在しない	数島・額谷・川入 (2001)	相手の内部状態を観察可能
力学的不変量 著者ら	自由度の対応づけで動作模倣を説明可能	力学的不変量（フラクタル次元）	状態から感覚への変換は滑らか		著者ら	（仮説の主張以上の追加仮定なし）

図 1 模倣者の視点からみた模倣の問題

て自分の身体の状態 s を直接的に観察できず、模倣者の感覚器を通して変換されたもの（像）を観察する。この自分の身体に関する観察を写像 $P: S \rightarrow \tilde{S}$ と表す。観察されたものを表す全変数が構成する空間を観察空間と呼び、観察空間を $\tilde{S}$ で記す。通常、観察写像 P は可逆ではなく、観察されたもの $\tilde{s} = P(s)$ から本来の状態 s を一意に定めることはできない。模倣者が直接知りえるのは、自分の身体の状態（動作） s に対応する、観察空間内の一点（系列） $\tilde{s}$ である。実演者は（模倣者とは一般には異なる）実演者に固有の状態空間をもち、この実演者の状態空間を Z で表す。模倣者は模倣者の感覚器を通して実演者の状態の像を観察する。この他者の身体に関する観察を表す写像を $P': Z \rightarrow \tilde{S}'$ とする。現実的には、私たち人は他者の身体の内部を観察できないなど、自分の身体に関する観察 P と他者の身体に関する観察 P' は一致しない。しかし、他者の身体を観察するときだけに用いる感覚器は知られていないことから、 P と P' は同一の観察空間 $\tilde{S}$ への写像か、あるいは P' の像は P の像を含む状態空間の部分空間になっていると想定できるだろう（図 1 では統合した）。ただし、自分の身体に関する観察と他者の身体に関する観察の関係をどう見るかは研究者により異なる（次節で詳しくみる）。模倣者は自分の身体に関する動作（状態の系列）の観察 $P(s)$ と他者の身体に関する動作 s の観察 $P'(s)$ を、模倣者のもつ類似性の尺度 $G: \tilde{S} \times \tilde{S}' \rightarrow \mathbb{R}$ で評価する（ $\mathbb{R}$ は実数の集合）。その類似性の下で、模倣者はその類似性を高めるような運動制御 $f: S \rightarrow S$ を探索できる。運動制御の探索ではあくまでも状態の観察 $P(s)$ に基づいて f を選ぶ。運動制御 f を実行すると、状態 s が変わり、状態の観察 $P(s)$ も変わる。探索で見つかったもっとも類似した運動制御を実行すれば、その結果生成される模倣者の動作は他者から見

ても模倣できたといえるものかもしれない。

上記のように、模倣者の視点で模倣を考える場合、異なる実演者と模倣者は一般には厳密な意味で同一の身体をもたないため、実演者と模倣者の動作がどんな意味で「同じ」あるいは「似て」いるかを明確にする必要がある。本稿では、この同一性あるいは類似性の認識こそが模倣メカニズムを論じる上で本質的であると考え、言い換えれば、この問題は、どのような抽象表現で、どのような評価基準で、実演者の姿勢や動作を再現できたと、模倣者が判断するのかという問題である。次節では、こうした「行為の同一性」の問題を中心に据えて身体模倣に関する既存の仮説をみていく。どのような抽象表現かを実装可能な水準で記述できていなければ、模倣者がどのように同じ動作を生成するのかを説明できたとはいえないだろう。次節で紹介するが、どんな抽象表現かに関しては模倣に関する既存の仮説はさまざまな説明を述べている。その一方で、その抽象表現の計算可能性に関しては、既存の仮説は未定義ゆえに実装不可能な概念や計算に依拠しており、結果的に「素朴な同じさ」を暗黙の前提としているというのが著者らの見解である。次節では、既存の仮説を実装しようと試みた研究を取り上げるなかで、既存の仮説が依拠する「素朴な同じさ」の問題をどのように乗り越えたかを詳しく述べる。

3. 感覚表現間対応づけとしての模倣

3.1 超感覚表現を介した能動的感覚間対応づけ

はじめに、模倣の問題は固有受容感覚と外部受容感覚の間の対応づけ（intermodal mapping）であると設定し、表情模倣の説明を与えるべく Meltzoff and Moore [2] により提案された仮説を紹介する。この仮説はその問題設定でも重要な役割を果たした。この仮説は模倣者（新生児）が実演者（大人）と同じ姿勢に向けて身体を動かすやり方まで詳細に記述した点で、具体的な現象の説明を目的としている。著者らの用語でいえば、Meltzoff and Moore [2] は、自己の観察 P を固有受容感覚、他者の観察 P' を外部受容感覚とした場合だと思われる（図 2）。

Meltzoff and Moore [2] によれば、新生児は固有受容感覚（体性感覚）で自分の表情を知覚し、外部受容感覚（視覚）で他者の表情を知覚するが、新生児（模倣者）が大人（実演者）の表情を模倣できるには能動的な異感覚間（固有受容感覚と外部受容感覚）の対応づけを要請する。たとえば、視覚的に捉えた他者

図2 Meltzoff and Moore [2] の仮説では、模倣者（新生児）は自分の身体表現 $P(s)$ と他者の身体表現 $P'(z)$ を両方とも超感覚表現 $HP(s)$, $HP'(z)$ へと変換し、超感覚表現で動作の同一性を評価する

の「舌」と、体性感覚的に捉えた自分の「舌」が、どちらも「同じ」（対応づけるべき）身体部位としての「舌」だといえることを要請する。この要請に応えるため、Meltzoff and Moore [2] は視覚や体性感覚といった個々の感覚表現を超えた共通の超感覚表現（supramodal representation）を新生児がもつと仮定する（図2）。この仮定の下では、固有受容感覚と外部受容感覚のそれぞれから作られた2つの超感覚表現は直接比較できる。Meltzoff and Moore [2] は、具体的には「上唇の上に舌」のような、身体部位の空間配置の抽象的記述（organ relation / organ configuration）を新生児が超感覚表現として用いて模倣するという仮説を提示している。つまり、異なる動作主体の異なる感覚上の動作の同一性は、この超感覚表現の一致の意味で判断されることになる。

Meltzoff and Moore [2] はこのように動作の同一性を定義した上で、目標とする表情を作るまでの運動制御についても論じている。新生児はとにかく活発に身体を動かすが、この無作為に見える運動を通して「どんな運動をすればどんな表情を作れるか」をのちに引き出すための、運動計画と超感覚表現とを対応づける辞書を作るという。そして、目標とする実演者の表情を見せられると、感覚フィードバックを使いながら目標とする表情の超感覚表現までの運動計画を実行することを、2つの超感覚表現を一致させるまで繰り返す。

問題 Meltzoff and Moore [2] の説明は、超感覚表現という新しい概念装置を仮定することで、動作の同一性の問題に答える。もし彼らのいう超感覚表現の意味で新生児が動作の同一性を認識しているとする、新生児（模倣者）が大人（実演者）の身体部位を正しく（大人の直観に合う仕方）で分節化でき、さらに新生児自身の身体部位と対応づけできることになる。感覚入力から超感覚表現への抽象化に関して、Meltzoff and Moore [2] はひとつの可能性としての抽象化能力は生得的なものと想定している。しかし、その抽象化能力がどんなものかを具体的に論じていない点で、彼らの説明は超感覚表現という新しい（生得的）概念装置に模倣の問題を転嫁しているとも言える。また、実演者である大人の直観に合う身体分節に関する知識などを新生児に仮定できるかは疑問である。

実装 Meltzoff and Moore [2] を直接実証したものではないが、情報科学の一分野で、動作認識（画像処理）に関する研究は Meltzoff and Moore [2] と類似した発想に基づくと考えられ

図3 Rochat [27] の仮説では、模倣者は視覚的に捉えた身体姿勢 $P(s)$, $P'(z)$ で、自分の姿勢と他者の姿勢の「同じ」を評価する

る。動作認識・画像処理では、複数の連続写真から、被写体の動作パターンを認識する問題がある。この動作認識のアルゴリズムでは、3次元筒状部位によって構成された身体モデルを想定し、膨大な数の動作パターンを収めたデータベースに照合して、この筒状身体モデルの動作種類の中から連続写真に整合的なものを見つける [21–23]。新しい個体でも認識できるように、筒状身体モデルからは個人の身体特徴（外見や肢長など）は目的に応じて（研究者の判断で）捨象され、また、動作パターンの種類数も目的に応じて（研究者の判断で）範疇化される。この種のアルゴリズム（実装）では、筒状身体モデルが Meltzoff and Moore [2] の超感覚表現に近いものとみなせる。どれを同じ姿勢とみなすか、その抽象表現は研究者の直観や経験則に基づく裁量で決めることで実装が可能になる。このように、超感覚表現（筒状身体モデル）を実装するには膨大な前提知識を要する。

別の問題としては、Meltzoff and Moore [2] の説明が新生児の表情模倣などの特定の事例を超えて、一般の動作模倣にも適用できるかは疑問が残る。成長した子供は道具を使った動作を模倣できるようになるが、道具使用の場合、子供はどのような超感覚表現をもつのだろうか。Meltzoff and Moore [24] の結果に関しては、舌だし以外の動作は再現性が低いとの報告もある [25, 26]。新生児模倣とその後の模倣が同じメカニズムに従うかどうかにも議論の余地がある [11]。

3.2 自己模倣から自己客体化へ

次に紹介するのは、Meltzoff and Moore [2] が扱う「模倣者自身で見るができない」という性質をもつ表情模倣に対して、「模倣者自身でも見るができる」手足の動作の模倣に着想をえた仮説である。この仮説では、自己模倣（自分の手足の模倣）や結果模倣（環境で生じる結果の模倣）が真の模倣への発達段階にあると考える。著者らの用語でいえば、Rochat [27] は、自己の観察 P をとくに視覚、他者の観察 P' を同じく視覚とした場合だと考えられる（図3）。

自己模倣（self-imitation）とは自分の右手で自分の左手をまねるような行為をいう [27]。Rochat [27] は彼自身の仮説を述べるに先立ち「鏡に映った自分は完璧な模倣者だ」と言い表す。自己模倣では模倣者自身が実演者を兼ねるため、見ること（外部受容感覚）と行うこと（固有受容感覚）を両方同時に経験できる点で特別だと Rochat [27] は述べる。自己模倣を通じて、新生児（模倣者）は自分の身体を対象として自己を客体化でき

るようになるという。子供の発達において、模倣と自己分離の関わり（まねするもの・まねされるもの）を論じたのは Piaget だと言われる。このように自分の身体を模倣の対象として第三者視点でみられることは、他者の身体を模倣の対象とみることの前段階に位置づけられる。Rochat [27] は、成長した子供は、自分の身体が他者からどのように見えるかをまさに他者の視点から見ることで（図 3）、他者の動作を模倣しているのだという。この考えは、手で扱う道具使用の模倣など、模倣者と実演者がともに観察できる身体部位の動作やその結果を再現する状況まで一般化できると思われる。

実装 Chaminade et al. [28] は、新生児模倣における自己観察（self-observation）の役割をロボットで実演した。具体的には、自分の手は動かすと同時に自分自身でも見られることを利用し、まずはロボット自身の手で視覚運動（visuomotor）の連合関係を学習させると、のちに人間の手や木偶の手を見せた場合でもロボットは見せられた手と同じような運動を行えることを示した。この実装では、視覚入力の前処理（さまざまな種類の手の指部分を切り出す 2 値画像化）は研究者が指定しており、また模倣で扱う手の状態は指 4 本の屈伸（2 の 4 乗 = 16 通り）に限り、それをロボットが既知とするなど、実装上多くの事前知識が仮定されている。このロボット実験の成功は、事前知識によって小さく制約された模倣を扱う点に拠っていると考えられる。

問題 Rochat [27] 本人が主張するように、自己模倣を発達段階とするのは考察の価値ある議題だと思われる。しかし、自己模倣だけでは、他者の動作と自分の動作を同じ視点から見える場合しか説明できない。たとえば、手の動きの模倣は説明できるが、顔の動き（表情模倣）は自己模倣だけでは説明されない。Meltzoff and Moore [2] による模倣の問題定義の出発点は、この「自分では見えない動作の模倣」の問題を強調するものであった。表情模倣を含む、自分と他者の模倣には客観的な視点からの自己の身体を観察が要求されるが、Rochat [27] の議論では、「見えない部分」に関してどのように客観的な視点からの観察を形成するかは曖昧である。また、どんな動作を同じとするかに関しては、鏡写しの例から察するに、おそらく Meltzoff and Moore [2] 流の身体配置あるいは姿勢を想定すると思われる。しかし、もし仮に模倣者が自己客体化できる（自分の身体を俯瞰的に見た様子を想像できる）としても、どんな抽象表現を用いるかという問題は論じられておらず、この仮説もまた素朴な同一性に依拠している。

3.3 共起感覚運動の連合学習

前節の Rochat [27] による第二の説明は、表情模倣のような「自分の身体が見えない」場合の模倣を十分には説明できない。そこで提案されたのが本節で紹介する第三の枠組みである。この枠組みはミラーニューロンが形成されるメカニズムを解明することを通して、視覚表現と運動表現の対応問題を解決しようとする。Rizzolatti et al. [19] はミラーニューロンの反映する情報を身体の姿勢を知覚したものだと述べており、Meltzoff and Moore [2] のいう外部受容感覚と固有受容感覚それぞれで知覚したものにおおむね相当すると思われる。著者らの用語でい

図 4 Rizzolatti et al. [19] の仮説では、ミラーニューロンの働きにより、模倣者の視覚表現 $P'(z)$ は運動表現 $P(s)$ と連合的に対応づけられ、模倣者自身による「同じ」運動を直接的に（意識的な評価なしに）作りだす

ば、自己の観察 P の変換先は感覚表現全体（運動表現と視覚表現を含む）、他者の観察 P' の変換先は視覚表現全体に相当すると思われる（図 4）。

ミラーニューロン [29] と呼ばれる神経細胞は、自分の動作を実行したときと、同じような相手の動作を観察したときとで、どちらでも発火する。これは、運動の認識において運動の実行に関する神経回路が使われていることを示唆する。この知見から、Rizzolatti et al. [29] は、視覚表現は直ちに運動表現に翻訳されてミラーニューロンを共鳴（resonance）させることで視覚表現と運動表現の対応づけを実現すると仮説している（図 4）。直接対応（direct matching）と呼ばれるこの神経細胞レベルでの仮説はもともと行為の認識に関して視覚系だけでなく運動系も関与することを主張した。そこから膨らませて、Rizzolatti et al. [29] は、さまざまな種類の模倣の中でもとくに Byrne [3] が反応促進（response facilitation）と呼ぶ随意的でない種類の模倣に関してはミラーニューロンが一定の説明を与えると論じている。模倣の中でも反応促進を問題とする直接対応説では、模倣者が何を同じとするかは動作主体にとって無自覚のままであるが、同じかどうかはミラーニューロンの付随的な発火で無自覚ながらも検出できる。もしもう一段「なぜ」を問うとしたら、その直接対応を担うミラーニューロンの形成に関してだろう。しかし、どのようにミラーニューロンが形成されるかは進化的に形成されたとしか論じられていない [19]。

連合系列学習（associative sequence learning）[30,31] は、視覚表現と運動表現の同時生起を連合学習することで（図 4）、見たときにも行うときにも発火するニューロンを形成できると述べる。実際には、自分の動作を実行しつつ全身を観察することは通常できない。そこで、Heyes [31] によれば、連合関係の学習には自分と同じ動きをしてくれる他者の助けが必要である。Heyes [31] は、すでに誰かの動作を模倣できる実演者の助けを借りて模倣者と実演者で「鏡写し」を作りだすことで、模倣者は自分の身体を記述する運動表現と実演者の身体を記述する視覚表現の間で対応関係を連合学習できると述べる。この連合学習により、視覚表現から運動表現への神経接続が形成され、模倣者は実演者と同じ運動を実行できる。この説明では、何を同じとするかは模倣者が判断するのではなく、学習データを与える実演者の選択に依存する。

問題 Rizzolatti et al. [29] は彼らの直接対応説が扱う模倣

の範囲を主に反応促進に限定している。著者らもミラーニューロンの存在が反応促進のような（随意的でない）条件反射的な模倣を神経生理学レベルで説明しうることが認められる。姿勢の同期など、人でも無意識の模倣を報告する研究はある。しかし、ミラーニューロンが随意的な行為としての模倣にどこまで寄与できるかは憶測（speculation）に留まる [19]。著者らの立場では、随意的な行為としての模倣を扱う仮説は、著者らの考える模倣の中心的問題すなわち、模倣者は随意的な模倣を行うさい、どんな評価基準をもつか、どんな抽象表現をもつかを明言すべきである。これらに関して、条件反射的なミラーニューロンがあるというだけでは十分に明らかにされない。模倣の中心的問題は、ミラーニューロンが動作の模倣にどのように貢献するかという問いとは区別して、理論的な説明を要するといえるだろう。

問題 連合学習 [31] は、ミラーニューロンによる模倣の説明を支持し、それを補完する立場といえる。この連合学習は、大胆に簡略化すれば、視覚表現の集合と運動表現の集合との積集合上で共起頻度を数えることに相当する。姿勢や動作が連続的に変位できるとすると、各感覚表現集合の要素数は無限にある。厳密に同じ要素が出現する確率はほとんどゼロに近い。つまり、この連合学習を実装するには、各感覚表現集合の要素（まとめ）を定義すること、すなわち類型化がまず必要であると考えられるが、Rizzolatti et al. [19] や Heyes [31] では具体的には論じられない。この類型化は本質的に同一性の定義と同じである。その点で、連合学習 [31] はどうやればミラーニューロンを形成できるか（アルゴリズム）を述べるが、何のためにミラーニューロンを形成するか（計算理論）は述べられないといえる。

実装 連合学習に基づきミラーニューロンの形成をロボット実験した研究 [32,33] では、ロボットのとりうる動作の種類を限定したうえで、どのような動作の種類がありえるか、どこをどのように抽象化すればよいか、どんなときに同じ動作とみなせばよいか、などの事前知識を研究者がロボットに与えるなどして、何を同じとするか（どんな評価基準か、どんな抽象表現か）に関する仮説上の曖昧さと実装上の問題を回避している。

ミラーニューロンは、同じ生物種の動作を知覚したときだけでなく、動作に付随して生じる音や [34]、異なる生物種でもレパートリーにある種類の動作であれば [35]、さらに、動作の目標や結果を予測できるときには後半の動作を見なくても [36]、活動するとされる。Wohlschläger et al. [37] は、Bekkering et al. [7] の動作模倣に関する心理実験の結果を踏まえ、動作よりも意図が、正しくは、実演者の動作の結果（彼らは目的や意図と呼ぶ）を知覚することが模倣者の動作を生じさせるとする、目標誘導型仮説（theory of goal-directed imitation）を提案している。目標誘導型仮説は、すべての運動表現がある視覚表現の像として表現されるとする観念運動性仮説（ideomotor theory） [38,39] を拡張する。これらの考えはミラーニューロンとも親和性がある。極端に思えるが、視覚表現と運動表現の対応づけという問題そのものを回避しうること点で強力である。しかし、現状ではミラーニューロンと同様に、ある興味深い現象の記述に留まって

おり、随意的な行為としての模倣の問題には具体的な説明を与えていない。

3.4 最適フィードバック制御と逆問題

動作模倣では実演者と同じような動作や姿勢を生成することが最終的な目標になる。この点で言えば、模倣とは異感覚間の対応づけであるという Meltzoff and Moore [2] 流の感覚主導の考え方に対して、模倣とは個人的な運動制御の社会的な拡張であるという運動主導の考え方がある。この運動主導の考え方はミラーニューロンにも一部共通する。運動制御の理論構築を牽引してきたのは最適制御理論である。最適制御理論は望ましい環境状態を達成するための制御器（環境状態を入力とし、運動命令を出力する関数）を設計する方法を与える。最適制御理論のなかで、たとえば Wolpert et al. [40] は脳神経系を制御器とみなし、制御器の操る身体は環境の一部とみなされる。この定式化から、最適制御理論の用語で「状態」(state) は制御器の観察したもの、すなわち本稿 2 節（図 1）の用語では（状態 s そのものではなく）自分と他者の状態の観察 $P(s)$ および $P'(s)$ を意味する。また、身体の実 3 次元空間での位置座標を「配置」(configuration) ということがある。感覚器を通して観察された「状態」や「配置」は制御器に対する感覚入力となる。本節では混乱を避けるため、最適制御理論の用語としての「状態」を括弧つきで記す。

Wolpert et al. [40] は最適フィードバック制御（以下、最適制御）の類比で、模倣を説明できるとする。最適制御では自分の「状態」を入力とし運動命令を出力する制御関数を求めるが、この類比で、社会的な模倣では観察できない部分も含めて他者の「状態」を推定し、その推定値を入力として自分の運動命令を出力する「制御関数」を求めればよいと論じる（図 5）。最適制御では、ある運動命令を実行した後に受けるであろう次の「状態」を予測することを順問題を解くという。これに対し、次の時点で目標とするある「状態」に至るにはどんな運動命令を実行すればよいかを与える問題を逆問題という。この枠組みにおいて動作の模倣は、推定された実演者の「状態」の系列を将来自分が取るべき模倣者の「状態」の系列とみなし、その「状態」の系列を再現する運動計画を実行する。

ここで問題となるのは、他者の身体に関しては（外部受容感覚を通した）身体の「配置」しか知ることができないので、（固有受容感覚を含む）「状態」を入力とする自分の制御関数には適合しない点である。しかし、この「配置」から「状態」を推定する問題は、複数の逆問題を解くことで可能になると Wolpert et al. [40] は述べる。具体的には、まず、自分の運動命令と自分の身体に関する「状態」の間の逆変換を求める（図 5、模倣者の身体の観察 $P(s)$ から模倣者の運動制御 f ）。そして、「自分も他者も同じ身体をもつ」という前提を制約条件として、他者の身体に関する「配置」と自分の身体に関する「状態」の間で「逆変換」を求め（図 5、実演者の身体の観察 $P'(z)$ から模倣者の身体の観察 $P(s)$ ）、さらに、「自分も他者も同じような身体および脳神経系をもつ」という前提を制約条件として、他者の身体に関する「配置」と他者の運動命令の間の逆変換を求める（図 5、実演者の身体の観察 $P'(z)$ から実演者の運動制御）。

図5 Wolpert et al. [40] の仮説では、「同じ身体および脳神経系をもつ」という前提で多段の逆問題を解くことで、実演者の運動命令の系列を推定できる。推定した実演者の運動命令の系列を模倣者の制御器で実行すれば、結果的に同じ動作を作り出す

この2段階の逆変換により、実演者の運動命令は模倣者の運動命令と対応づく。このようにして、推定した運動命令の系列から生成した模倣者の動作と、模倣者の観察した実演者の動作とは、模倣者の「状態」空間上で（感覚入力上で）同じかどうかを評価できるという。

問題 この最適制御に基づく説明では、どんな抽象表現かは逆変換先の「状態」により暗に定義される。動作の生成に関しても、逆変換が求まる前提で記述されている。そこで、この説明ではこの逆変換が求まるかどうか論点となる。模倣者は実演者の筋肉の緊張などは観察できないので、模倣者が実演者の身体に関してえた「配置」の系列 $P'(z)$ から、実演者本人が実演者本人の身体に関してえた「状態」の系列 $Q(z)$ を復元することは通常できない。一般に、未知のパラメータを含む変換の逆変換を求める問題は不良設定問題となる。不良設定問題では一般に解は1つに定まらない。制御理論では不良設定性は制約条件を導入して回避されるが、この議論の場合、模倣者の感覚器で捉えた実演者の「配置」系列 $P'(z)$ と実演者の感覚器で捉えた実演者の「状態」系列 $Q(z)$ の間の「逆問題」ではそもそも順方向の変換が存在しない点がとくに問題になる。この括弧付きの「逆問題」では体格や筋力など運動生成に関わる個体差も吸収することを要求されるが、この問題は「相手も自分と同じ身体と同じ脳神経系をもつから」という想定 [40] だけでは解消できそうにない。実際にはさまざまな違いをどのように抽象化すべきかは模倣の中心の問題のひとつと考えられる。この想定だけで模倣が可能になるには、実践的には、自分や相手の筋骨格モデルなど詳細な事前知識を要するだろう。

実装 鮫島 et al. [41] は、Wolpert et al. [40] の基礎にある最適制御の考え方、modular selection and identification for control (MOSAIC) モデルを用いて、動作模倣の数値実験を行った。鮫島 et al. [41] は単振子を動作主体とみなし、実演者（単振子）の動作を MOSAIC モデルで分節化し、模倣者（単振子）の身体で再生（リプレイ）することで類似の動作を再現した。この数値実験では、「相手も自分と同じ身体と同じ脳神経系をもつ」という想定と同じく、模倣者と実演者がほとんど同じ身体構造および制御器を有する場合には類似の動作を再現できたが、他方、大きく異なる身体構造や制御器の場合はうまくいかなかった。したがって、類似の身体・神経系をもつという条件の下で

は Wolpert et al. [40] の仮説はある程度まで実証（実装）されたようにみえる。しかし、この数値実験は、模倣者の観察できる実演者の身体に関する「配置」系列 $P'(s)$ と実演者の観察できる実演者の身体に関する「状態」系列 $Q(z)$ が同一であるという、言い換えれば模倣者が実演者の固有受容感覚を透視できるという前提で行われ、この前提により Wolpert et al. [40] の仮説の難点、すなわち括弧付きの「逆問題」をこの数値実験では実質的に回避して実装を行っている。単振子の場合には精密に作り上げれば逆問題を解けるかもしれないが、ヒトの骨格など複雑な系では実質的に不可能に近いと考えられる。

3.5 総括

本節では既存の模倣に関する仮説を、その仮説に関連する実装研究と、実装上の追加前提を取り上げて紹介した。以上を表1にまとめた。著者らの立場では、模倣の説明は、模倣者はどのような抽象表現で自分の動作と他者の動作が同じかどうか（似ているかどうか）を評価しているかを論じるべきである。本稿で紹介した既存の仮説は瞬間的な姿勢の一致・類似をもって、模倣の評価基準とするように思われる。そのうえで、自分の動作と他者の動作は異なる感覚器を通して観察されるが、どんな抽象表現を用いて評価しているかがひとつの論点である。どんな抽象表現かに関して既存の仮説はさまざまな見解を示す一方で、その抽象表現を仮定することの妥当性に関しては暗黙的なことが多い。一例として、Meltzoff and Moore [2] では超感覚表現への変換に関して暗黙的であり、Wolpert et al. [40] は「状態」空間の仕様や逆変換の可能性に関して暗黙的である。模倣の仮説 [2, 27, 40] がどんな抽象表現かを明示的に記述しないので、その仮説の実装では、感覚入力の処理（符号化）に必要な事前処理を課題に合わせて研究者が作り込んで与えたり [21–23, 28]、あるいは異なる感覚入力と同じ特徴空間に属するものと単純化するなど [41]、仮説の欠点を補完してようやく実装できている研究が多い。ミラーニューロンに基づく仮説は、基本的にはミラーニューロンの働きにより（異なる感覚間の変換なしに）感覚入力は直接的に運動命令を引き起こすという直接対応 [19] の考えを踏襲する。このとき、対応づけにおいて生物個体は何を要素単位（まとまり）とするかは仮説で述べられていない。そのため、ロボットなどでの実装では、何を要素単位とするかを課題に合わせて、研究者自身が作り込んで実装している [32, 33]。このように、現状提案されている模倣の仮説はどんな抽象表現かを表面的に記述する一方で、その抽象表現の妥当性を具体的に論述できておらず、提案されている仮説だけでは実装可能ではない。

既存の4つの説明はどんな抽象表現かに関して表面上異なる見解を示す一方で、どんな評価基準か（何を同じとするか）、あるいは模倣で何を達成すべきかに関してある点では共通した暗黙の前提を置くように思われる。それは Meltzoff and Moore [2] と類似した、模倣で何を達成すべきかは「同一の身体部位を同じく動かすこと」だという考え方である。この考え方の下では、第一にどうやって同一の身体部位を認識するのが論点になる。この同一性の認識は、Meltzoff and Moore [2] や Rizzolatti et al. [29] では（生得的な）事前知識によって、

Heyes [31] では連合学習によって、Wolpert et al. [40] では逆変換によって達成される。しかし、この対応づけの前段階として、身体部位の類型化（何を身体の部分（まとまり）とするか）、また、どのように模倣者とは異なる実演者の身体と比較するかは暗黙のままである。もし異なる身体の間で身体部位の対応関係を見つけていることが模倣の必要条件ならば、模倣の説明は、どんな種類の変換（移動、回転、拡大）や抽象化を適用すれば同じ（異なる）ことを示せるかを論じる必要がある。

さらに留意すべき別の共通点として、既存の説明はいずれも、動作の模倣を各瞬間毎の対応づけ問題 [18] の繰り返しとみなしている。すなわち、各動作の瞬間で彼らの考える模倣の問題（身体部位の対応問題）が解ければ、その寄せ集めとして動作全体が模倣できると考える。Wolpert et al. [40] のように、ある動作を複数の「部分」の連なりとみなすこともできる。しかし、通常、生物の動作はある程度滑らかであり、継ぎ接ぎというよりは、長期的な履歴依存性をもつと考えるほうが自然である。生物の動作は長期的な履歴依存性をもつというこの考えは動作の時空間パターンを活用することとも相性がよい。過去から現在までの履歴（状態系列）は未来の状態を予測する情報をもつ。既存の説明は、各瞬間での身体部位の空間的な対応問題に注視するあまり、身体動作の時間的な性質に内在する情報に着目してこなかった。著者らは、力学系としての身体の作りだす運動のもつ情報は、何を同じとするか（動作認識）だけでなく、いかに同じ動作を作るか（動作生成）に関して有効な手がかりを与えると考える。

4. 力学的不変量の同じさによる模倣

本節では、著者らの、不変量に基づく模倣の仮説を論じる。この仮説では関心ある対象間（e.g., 模倣者の身体と実演者の身体）の変換規則を陽に求めない。代わりに、関心ある対象（e.g., 動作）の不変量を調べることで、対象の同じさを判定する。異なる対象はこの不変量の意味で同じとみなされる。

初めに、本節の骨子すなわち著者らの仮説を基礎づける論理を述べる。著者らの仮説は動作模倣を主たる説明対象とする。動作模倣では、ふたつの身体が生みだす動作の間で同一性（同じさ）を模倣者が評価できる必要がある。まず、著者らは、動物の身体はある種の力学系とみなせること、さらに、動物の感覚器は滑らかな変換とみなせることを前提とする。この条件下において、非線形力学系理論によれば、力学系の軌道は滑らかな変換に対して力学的不変量の1つである「フラクタル次元」を保存する。つまり、もし身体動作が力学系であり、かつ、模倣者の感覚器を通じた身体動作の像が滑らかな変換でえられるならば、状態空間での身体動作の軌道（感覚器を通す前）と観察空間での身体動作の軌道（感覚器を通す後）の構成する力学系は同じフラクタル次元をもつ。この性質を踏まえ、著者らは、力学的不変量の同一性の意味で、模倣者は「異なる感覚器を通して知覚した複数の身体動作の間で同じさを評価できる」という仮説を提案する。換言すれば、著者らの仮説では、模倣者は実演者と自身の身体動作とともに力学的不変量で特徴づけ、その類似性に基づき身体動作の類似性を認識していると考えられる。以上が、動作模倣を達成するうえで、どのように動作を

特徴づけるかに関する著者らの仮説である。以下では、本質的に同型の論理構造を持つ幾何学図形の同一性の判定を例に用いて著者らの仮説の肉付けを行う。そのあと、本段落の内容をさらに詳しく述べる。

著者らの仮説のアイデアを幾何学図形的具体例（図6）で説明する。著者らの仮説は次の考え方に着想をえる。2つの幾何学図形が「同じ」か否かを判定する問題は、ある図形から別の図形へと変換する関数の種類を特定する問題（群論）に置き換えられる。例えば、ユークリッド幾何学では、上向き正三角形（ Δ ）と下向き正三角形（ ∇ ）は180度回転か水平鏡像反転、さらに平行移動という変換を適用して重ねることができるとき、2つの三角形を合同という（図6、方法1、逆変換を求める）。こうした図形の合同（同値類）を調べるもう1つの方法は、特定の変換に対して変わらない量を使って図形を特徴づける方法である（図6、方法2、不変量の一致性から変換の存在を調べる）。こうした、ある種の変換に対して変わらない（数学的）対象の性質を、その種の変換に対する不変量という。具体的には、任意の三角形の3辺の長さを $(a_1, a_2, a_3) \in R^3$, $a_1 \leq a_2 \leq a_3$ 、と書けば、変換を求めて三角形を重ねることなく、2つの三角形を3辺の長さから構成される量 (a_1, a_2, a_3) が同じならばそれらを合同だと言える。またこの量 (a_1, a_2, a_3) は任意の回転・鏡像・並進に対して不変量となっている。つまり、3頂点からなる図形のこの意味での同一性（i.e., ある回転・鏡像・並進で同じ図形へと変換できる）を扱う際に、量 (a_1, a_2, a_3) は図形の特徴を与える。不変量は対象を“特徴づける”と言われ、対象を「同じもの」に分類する指標となる。このとき、変換（上記の例では、2つの三角形が合同か否かを判別する際の回転・鏡像・並進）を明示する必要はないため、不変量による特徴づけは、多くの場合、計算量の点でも節約的である。つまり、ある図形の不変量による特徴づけは、あるクラスの変換の下で対応づけが存在するかを明示的に変換を求めずに調べる方法である。

著者らの考える身体動作の同一性を調べる問題は幾何学図形の合同性を調べる問題（図6）と本質的に同型の数理的な構造をもつ。本節では、動作を生みだす身体のある種の力学系とみなすとき、フラクタル次元によりその力学系を特徴づけることを論じる。これを具体的に論じるため、幾何学図形を用いた図6と類比的に、力学系理論に基づく著者らの仮説の概略を図7に示した。図6に対して図7では、「幾何学図形」が「力学系の軌道」に、「3辺の長さ」が「フラクタル次元」に置き換わっている。著者らの仮説の中心的なアイデアは、身体動作（力学系の軌道）の間の対応の存在を調べる際に、模倣者は力学系の不変量「フラクタル次元」の同一性を評価するというものである。幾何学図形の合同性に関する例（図6）でいえば、著者らの仮説は不変量を調べる方法（図7、方法2）といえる。図7には、もう1つの方法として、逆変換を求める方法も並列して図示した。3.4節で論じたように、異なる身体の間ではそもそも順方向の変換が存在しておらず、動作模倣を行うには存在しない「逆変換」を求めねばならない。著者らの不変量を調べる方法は、図形の合同を調べるときと同様に、逆変換を求める方法とは異なり、その困難な計算を回避できるという利点がある。

図 6 幾何学図形の合同性（同一性）を調べる 2 つの方法．方法 1 では，2 つの幾何学図形を“ぴったり”重ねるような逆変換を明示的に求める．方法 2 では，逆変換を陽に求めず，三角形の形状（位置や向きに依らない）を記述する不変量（3 辺の長さ）の一致性により，方法 1 で求めた逆変換の“存在”を調べる．三角形を特徴づけるやり方は複数ある．ひとつのやり方は 3 辺の長さを指定する．別のやり方は 2 辺の長さとその間の角度を指定する．最小限必要な変数の数（3 次元）は自由度と呼ばれる

図 7 力学系の軌道の同一性を調べる 2 つの方法．方法 1，最適制御理論 [40] の考え方では 2 つの軌道の間の「逆変換」を求める．方法 2，著者らの考え方では，「逆変換」を陽に求めず，力学系の性質（滑らかな変換に依らない）を記述する不変量「フラクタル次元」の一致を調べる．単関節の振子は自由度 1 の身体（1 つの関節角）をもち，その動作は直線的・1 次元的である．二関節の振子は自由度 2 の身体（2 つの関節角）をもち，その動作は平面的・2 次元的である

では，著者らの仮説の詳細に移ろう．上記の幾何学図形の具体例からも見て取れるように，三角形の合同を特徴づける不変量は必ずしも他の図形（四角形，円など）の特徴づけに有効とは限らず，一般に何が不変量になるかはその対象と変換の性質に依存する．この対象と変換の性質への依存性は模倣の説明を考える上で理論上の制約を与えると考えられる．著者らの仮説を論じるにあたり，模倣者の状態空間 S や観察空間 S' ，自分の身体に関する観察 P ，他者の身体に関する観察 P' がどのようなものと想定されるか，それらの仕様を明確にすることが望ましい．なぜなら，ある空間の点を別の空間へと写す変換の性質はこれらの仕様にも依存するはずだからである．人体は支柱たる骨，骨を結ぶ関節，骨を動かす筋肉，筋肉を操る神経細胞，

これらの協調によってある動作を生み出す．関節角や筋張力などを変数（いわば直交する軸）とする高次元の座標系を考えれば，その 1 点は人体の個別の状態を一意に記述し，人体の運動は筋骨格系の高次元空間上の 1 本の軌道（状態の系列）となる．神経細胞や化学物質の変化速度を考えると，この軌道は十分に滑らかだと想定できる．このような滑らかな高次元空間上の 1 点が，模倣者自身の状態空間の 1 つの要素 $s \in S$ だと本稿では想定しよう．実演者は状態空間上で滑らかな軌道 z を生成するが⁷，その軌道そのものは模倣者には観察されない．代わりに，模倣者の視覚 P は実世界の 3 次元空間上で物事を捉え

7 これまで通り，状態空間の一点と系列はどちらも s や z で表す．

図8 著者らの仮説では、模倣者は、状態空間から観察空間への変換 P , P' でも保存される力学的不変量 $DP(s)$, $DP'(s)$ により動作を特徴づけ、動作の「同じ」を評価する

る。⁸実演者の身体の軌道は実世界の3次元空間上に埋め込まれた、身体部位（たとえば関節を点とする）の同時に生成される n 本の軌道 $P(z_1), \dots, P(z_n)$ として模倣者には観察される。このような3次元空間上での複数の軌道を、実演者の動作を模倣者が捉えた観察空間の要素だと本稿では想定しよう。

人間の動作においては、状態空間、観察空間、どちらの空間上の軌道も十分に滑らかと仮定できる。身体の動作はある程度長期的な履歴依存性を持ち、空間上を転移して離れた場所に出現したりできない。その点で、身体は連続時空間の力学系とみなせる。定常状態における力学系の軌道はアトラクタと呼ばれる。状態空間上のアトラクタとその像である観察空間上のアトラクタがどちらも十分に滑らか（可微分多様体）であれば、すべての各点の近傍で1対1対応がつく（微分同相写像）。言い換えれば、状態空間と観察空間がこのような位相的特性を充たすならば、状態空間上のアトラクタ（ s や z ）がもつ力学的不変量「次元」は観察空間上のアトラクタ（ $P(s)$ や $P'(z)$ ）においても保存される。つまり、状態空間の1点と観察空間の1点の間で、それらの状態をなす変数の集まりがどう対応するか（正解のない対応問題）を明示的に解かなくとも（変換規則を示さなくとも）、それぞれの空間で個別に力学的不変量を計算することで、異なる感覚器 P と P' で捉えた2つの動作の同じさを評価できる（図8）。例えば、表情模倣では、模倣者は実演者の表情を視覚で捉えるが、模倣者自身の表情を視覚で捉えられない[2]。この場合、模倣者は体性感覚を用いて自身の表情を知覚してその軌道から不変量を計算していると考えられる。

現実的には、人体は閉じた系ではないので、人体の生み出す軌道は外乱の影響を受ける。しかし、軌道を生み出す運動の制御は感覚のフィードバックを受けるので、軌道に対する外乱の影響を少なからず軽減する。このような系はフィードバックをもつ運動の制御を更新規則とする疑似的な力学系とみなせる。その（疑似）定常的な軌道は疑似的なアトラクタとみなせる。その場合でも、力学的不変量を計算することはできる。こうした力学系の構成するアトラクタの滑らかな変換に対する不変量の1つとして、フラクタル次元（ハウスドルフ次元）[42]が知

られている。本稿では、フラクタル次元を力学系を特徴づける量の1つの候補として考察する。

アトラクタ間の変換規則を陽に求めずとも、力学系の不変量の1つであるフラクタル次元を調べることで、アトラクタ間のある種の同値性、そのアトラクタの間に微分可能な関数（bi-Lipschitz 関数；以下、滑らかな変換）による対応づけが存在するかを評価できる。つまり、異なる感覚で捉えた動作の間の同じさを評価できる。より具体的には、模倣者が自分の動作を観察したもの $P(s)$ と模倣者が実演者の動作を観察したもの $P'(z)$ の間で模倣者はその同じさを評価できる。フラクタル次元は状態空間の各点におけるその力学系の「自由度」を表す。一般に、ある系の自由度はその系のもつ独立したパラメータの数をさす（図6に三角形の例を示した）。身体の自由度というとき、典型的にはすべての身体部位に関して独立に調整可能な移動方向の合計数をさす。しかし、本稿のように、動作の自由度というときには、ある動作を生み出すのに必要な最小数の独立したパラメータの数だと解釈できる（図7に振子の例を示した）。通常ある動作を生み出すのに身体すべての自由度を使うわけではないので、動作の自由度は身体の自由度よりも低くなる。著者らの仮説は、動作模倣において模倣者は実演者の動作の力学的不変量を有用な手がかりとして知覚し、力学的不変量の表す自由度の意味で同じ動作を探索して生成する、というものである。

著者らは模倣の中心の問題は「知覚した複数の動作の間で同一性を認識すること」だと考える。個人の動作は高次元空間の軌道としてさまざまな感覚を通して知覚される。個人個人で身体は異なる。そこで、複数の動作を比較するには何らかの抽象化（類型化）を行う必要がある。この抽象化に関して、著者らの仮説は、身体動作を力学系とみなせ、かつ、感覚器を滑らかな変換とみなせるならば、滑らかな変換でも保存される力学系の不変量が動作模倣を行うさいの有力な抽象表現になりうることを主張する。

一般には、自由度の意味で同じとみなせる複数の異なる動作がありえる。著者らの仮説は、どんな基準でさまざまな動作が同じとみなされるか（同一の問題）を述べる一方で、それらの同じとみなせる動作の中からどれを選択すべきか（選択の問題）までは答えていない。たとえば、実演者の左手の動作に対して、模倣者は左手で返すべきか右手で返すべきか。著者らの意見ではどちらでも模倣と認められうる。したがって、自由度だけでは決定されない対称性に関して、社会的・心理的な理由からどちらの方が相応しいなどの選好によって実演に使う身体部位が決められることがありえるだろう。対称な身体部位の選択の問題は本質的な運動の同一の問題の先にあると著者らは考えている（選択の問題に向けた著者らの進行中の研究は[43]など）。

著者らの仮説と既存の仮説は大きく2つの点で異なる。第1に、提案仮説は、それを力学系として捉えるために十分な数の身体部位の特徴点の軌道（バイオロジカルモーションのようなデータ）を模倣者が知覚できることを前提とするが、それよりさらに抽象化された身体表現を要求しない。むしろ、視覚を中心とした知覚系でえられる身体動作のデータから、力学系の特

8 感覚 P は要件を充たせば任意の感覚器のあつまりでよい。たとえば、模倣者自身の姿勢の知覚に通常は視覚だけでなく体性感覚も使われる。体性感覚もまた視覚とは異なるが滑らかな軌道を与えるものとみられる。

徴づけという形で身体動作の表現を構成する点に身体動作の模倣の本質があると考え、この考えは、Meltzoff and Moore [2] の仮説とは異なり、命題的記述という“抽象化された身体表現”がえられることは前提ではなく、それ自体を説明の対象とする。第2に、Meltzoff and Moore [2], Rizzolatti et al. [29], Wolpert et al. [40] が前提する身体部位の名称通りの対応関係 (e.g., 実演者の「右手」が模倣者の「右手」など) に関する事前知識を著者らの仮説は前提とせず、実演者と模倣者のどの身体部位がどれに対応すべきかも説明されるべき対象とする。すなわち、著者らの仮説の立場は、他者の身体部位をどの自分の身体部位と対応づけるか・同一とみなすかは、模倣の問題に直面する模倣者自身が選択すべき事柄だということである。力学系の不変量がこのような対応づけ問題に有用な特徴量となりうるかという点に関しては、部分的に [44] などでの経験的な証拠が示されている。

以上から、本論文で紹介した既存の説明の多くが模倣の目的を「同じ身体部位で同じ動作を生成すること」と考えたのに対し、著者らは「対応づけの可能な力学的な性質をもつ動作を生成すること」だと捉える点を強調したい。ここには、模倣を定義する上で、何をもって同じ動作とするかの考え方の違いがある。著者らは、同じ身体部位・同じ動作である必要はないと考える。すでに述べた通り、フラクタル次元はその系の自由度の定量化の一種である。したがって、実演者のある運動を生成するのに十分な自由度 (例えば、関節の可動域や動作軸など) をもつ模倣者の身体部位を自分の運動を生成するために選択するときにフラクタル次元は有効な特徴量となる。子供が行う動物のまねなどは動作模倣の1つの典型例だと考えられる。具体的に言えば、子供がゾウやワニのまねをするとき、腕を使ってゾウの鼻を表したり、腕を使ってワニの顎を表すだろう。これは身体部位を対応づけるというより、その身体動作の自由度 (フラクタル次元) を対応づけたと考えたほうが自然に思われる。既存の仮説が着目する身体部位の対応問題に対し、著者らの仮説は自由度の対応問題に着目するといえるだろう。

前節で既存の仮説を紹介したさい、その多くが模倣者に膨大な事前知識を仮定することをみた。このような事前知識を子供に仮定することは難しい。既存の仮説の実装では、ある表現を別の表現に変換したり、あるいは逆変換を求めたりするのはアドホックな補助情報 (拘束条件) を使用することで達成される。これは観察対象を無理やりある枠内に嵌め込むようなもので、基本的には別ものに捉え直すことになり、必ずしも本来の性質が保存されない。他方、力学的不変量の推定は滑らかな運動の性質に関する経験的知識で可能と思われる。不変量とはそもそもある種の変換により変わらない性質であり、アドホックな補助情報を使用せずとも、不変量を保存する条件を充たせば不変量を抜き出すことは理論的には可能である。

本稿では力学的不変量の抽出に関わる生物学的機構を論じていない。これは本稿の議論とは独立に議論されるべき予想であるが、多くの生物の感覚器では外部環境の恒常的性質を抽出・活用できるものが進化的に形成されたように、身体動作に関する人の感覚器もまた身体動作のもつ不変的性質を抽出・活用できるような構造をもつのではないかと、著者らは予想してい

る。力学的不変量の抽出方法に関して、計算理論を論じる著者らの仮説は、たとえばミラーニューロンのような神経細胞集団がその神経生理学的基盤を担う可能性を排除しない。身体動作の模倣に関する既存の仮説が神経生理学から計算理論までさまざまなレベルで論じられてきたことを踏まえると、著者らの仮説は、既存の仮説が抱える問題を「解決」するものではなく、それゆえ、既存の仮説とともに検証されるべき新しい仮説のひとつである。著者らの仮説は、力学的不変量という切り口をもって既存の仮説が抱える問題を「回避」しうる新しい計算理論のレベルの説明のひとつだと、著者らは考えている。

提案仮説の検証可能性

著者らの仮説は、ある程度まで生物学的に妥当な前提のもとで、模倣者 (ヒト) が力学的不変量「フラクタル次元」を計算でき、フラクタル次元の一致の意味で動作の同一性を評価できる (それが可能である) ことを主張する。しかし、実際に人がフラクタル次元を利用しているか、どんな条件のときにフラクタル次元を利用できるのかなどに関して、著者らの仮説は直接的に証拠を与えるものではない。したがって、今後の課題は著者らの仮説を経験的に検証していくことである。このとき、著者らの仮説で中心的な役割を担うフラクタル次元は経験的なデータからでも推定可能 (実装可能) なので、著者らの仮説は経験的に検証できる。

検証事項としては、第一に、ある動作を観察したときに人がフラクタル次元の変化や差異を検出できるか否かを心理実験で確かめることが考えられる。第二に、ある動作を観察してその動作を自分の身体で模倣させたとき、ふたつの動作がフラクタル次元の意味で同一といえるかを心理実験で確かめることが考えられる。さらに、心理実験と並行して、数値実験 (計算機シミュレーション) で仮説を検証することも有用であろう。著者らの研究では、単振子を身体とみなした数値実験を行い、フラクタル次元を利用すればある程度まで正解に近い動作の同一性の認識が可能であることを示している [45]。この数値実験では、異なる自由度を有する2種類の単振子 (実演者) を用意し、それらの生成する見かけ上類似した動作を仮想的なエージェント (模倣者) が識別できるかを課題とした。そこで心理実験の一例として、同様の動作データを映像化して被験者に提示することで、被験者が動作を生み出す制御系の違いを見抜けるかを調査できる。数値実験の結果によれば、もし人間がフラクタル次元を計算できるならば、本課題でも高い正答識別率をもつと予測される。今後は、経験的・理論的の両側面から、動作模倣に関する著者らの仮説を検証するとともに、動作の認識から動作の生成までを扱えることを示すことで、図8に図示した動作模倣の全体像を解明していきたい (運動生成の一部は [43] など)。その先に、自閉症スペクトラムに見られる“逆さバイバイ” (手のひらを自分自身に向けて“バイバイ”動作をする) のような非典型的な動作模倣などの興味深い現象が著者らの仮説とどんな関係にあるかを明らかにできると期待される。

5. 結論

身体模倣の理論や仮説では、模倣者が何の意味で同一性を認

識するか説明を求められる。本稿では、模倣に関する既存の仮説を計算機シミュレーションや物理的なロボットでの実装可能性という観点から批判的に検討し、実装に際して新たに追加された前提条件を調べることで、既存の仮説の問題点を明らかにした。この検討を踏まえ、既存の仮説が模倣の問題を感覚表現の間の連合や逆変換を見つける問題とみなすのに対し、著者らは不変量による同一性の認識の問題を論じた。不変量を用いることで、逆変換に付きまとう不良設定問題を回避できる。力学的不変量「フラクタル次元」を計算できるには、動作の軌道を捉える感覚器に対して、滑らかさという前提条件を要請する。この前提条件は、不良設定問題を解決できるという前提条件に比べれば弱いといえる。本稿では、動作模倣に関して「変換規則を陽に求めない」新しい理論的枠組みを提示した。

謝辞

匿名査読者の方々に感謝申し上げます。本研究は JSPS 科学研究費補助金 JP16H05860, JP17H06713, JP20H04994 の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] M. Tomasello: *The Cultural Origins of Human Cognition*, Harvard University Press, 2001.
- [2] A. N. Meltzoff and M. K. Moore: "Explaining facial imitation: a theoretical model," *Early Development and Parenting*, Vol.6, Nos.3-4, pp. 179-192, 1997.
- [3] R. W. Byrne: "The evolution of intelligence," in *Behaviour and Evolution*, P. J. B. Slater and T. R. Halliday eds., Cambridge University Press, pp. 223-265, 1994.
- [4] G. Gergely, H. Bekkering, and I. Kiraly: "Rational imitation in preverbal infants," *Nature*, Vol.415, No.6873, p. 755, 2002.
- [5] A. N. Meltzoff: "Understanding the intentions of others: Re-enactment of intended acts by 18-month-old children," *Developmental Psychology*, Vol.31, No.5, pp. 838-850, 1995.
- [6] F. Warneken and M. Tomasello: "Altruistic helping in human infants and young chimpanzees," *Science*, Vol.311, No.5765, pp. 1301-1303, 2006.
- [7] H. Bekkering, A. Wohlschläger, and M. Gattis: "Imitation of gestures in children is goal-directed," *The Quarterly J. of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, Vol.53, No.1, pp. 153-164, 2000.
- [8] K. Nagell, R. S. Olguin, and M. Tomasello: "Process of social learning in the tool use of chimpanzee (*Pan troglodytes*) and human children (*Homo sapiens*)," *J. of Comparative Psychology*, Vol.107, No.2, pp. 174-186, 1993.
- [9] V. Horner and A. Whiten: "Causal knowledge and imitation/emulation switching in chimpanzees (*Pan troglodytes*) and children (*Homo sapiens*)," *Animal Cognition*, Vol.8, No.3, pp. 164-181, 2005.
- [10] 大藪泰: "赤ちゃんの模倣行動の発達—形態から意図の模倣へ—," バイオメカニズム学会誌, Vol.29, No.1, pp. 3-8, 2005.
- [11] 明和政子: "身体マッピング能力の基盤を探る," ベビーサイエンス, Vol.8, pp. 2-13, 2009.
- [12] 川合伸幸: "模倣と行為の理解に関する最近の研究の紹介: ミラーシステム, サル, 乳児の模倣," 認知科学, Vol.14, No.1, pp. 155-160, 2007.
- [13] 佐伯胖: "模倣の発達とその意味," 保育学研究, Vol.46, No.2, pp. 347-357, 2008.
- [14] 村田哲: "模倣の神経回路と自他の区別," バイオメカニズム学会誌, Vol.29, No.1, pp. 14-19, 2005.
- [15] 小嶋秀樹: "発達ロボティクスからみた模倣とコミュニケーションのなりたち," バイオメカニズム学会誌, Vol.29, No.1, pp. 26-30, 2005.
- [16] C. Breazeal and B. Scassellati: "Robots that imitate humans," *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.6, No.11, pp. 481-487, 2002.
- [17] T. R. Zentall: "Imitation: definitions, evidence, and mechanisms," *Animal Cognition*, Vol.9, No.4, pp. 335-353, 2006.
- [18] K. Dautenhahn and C. L. Nehaniv: "The correspondence problem," in *Imitation in Animals and Artifacts*, K. Dautenhahn and C. L. Nehaniv eds., The MIT Press, pp. 41-61, 2002.
- [19] G. Rizzolatti, L. Fadiga, L. Fogassi, and V. Gallese: "From mirror neurons to imitation: Facts and speculations," in *The Imitative Mind: Development, Evolution and Brain Bases*, A. N. Meltzoff and W. Prinz eds., Cambridge University Press, pp. 247-266, 2002.
- [20] N. A. Bernstein: *Dexterity and Its Development*, Psychology Press, 1996.
- [21] J. K. Aggarwal and Q. Cai: "Human motion analysis: a review," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.73, No.3, pp. 428-440, 1999.
- [22] T. B. Moeslund, A. Hilton, and V. Krüger: "A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.104, Nos.2-3, pp. 90-126, 2006.
- [23] D. Weinland, R. Ronfard, and E. Boyer: "A survey on vision-based methods for action representation, segmentation, and recognition," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.115, No.2, pp. 224-241, 2011.
- [24] A. N. Meltzoff and M. K. Moore: "Imitation of facial and manual gestures by human neonates," *Science*, Vol.198, No.4312, pp. 74-78, 1977.
- [25] M. Anisfeld: "Neonatal imitation," *Developmental Review*, Vol.11, No.1, pp. 60-97, 1991.
- [26] M. Anisfeld: "Only tongue protrusion modelling is matched by neonates," *Developmental Review*, Vol.16, No.2, pp. 149-161, 1996.
- [27] P. Rochat: "Ego function of early imitation," in *The Imitative Mind: Development, Evolution and Brain Bases*, A. N. Meltzoff and W. Prinz eds., Cambridge University Press, pp. 85-97, 2002.
- [28] T. Chaminade, E. Oztup, G. Cheng, and M. Kawato: "From self-observation to imitation: visuomotor association on a robotic hand," *Brain Research Bulletin*, Vol.75, No.6, pp. 775-784, 2008.
- [29] G. Rizzolatti, L. Fogassi, and V. Gallese: "Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action," *Nature Reviews Neuroscience*, Vol.2, pp. 661-670, 2001.
- [30] M. Brassa and C. Heyes: "Imitation: is cognitive neuroscience solving the correspondence problem?," *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.9, No.10, pp. 489-495, 2005.
- [31] C. Heyes: "Causes and consequences of imitation," *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.5, No.6, pp. 253-261, 2001.
- [32] 河合祐司, 長井志江, 浅田稔: "視覚の精緻化が導くミラーニューロンシステムの発達モデル," 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1A3-2:1-4, 2011.
- [33] 長井志江: "認知発達の原理を探る: 感覚・運動情報の予測学習に基づく計算論的モデル," ベビーサイエンス, Vol.15, pp. 22-32, 2016.
- [34] C. Keysers, E. Kohler, M. A. Umiltà, L. Nanetti, L. Fogassi, and V. Gallese: "Audiovisual mirror neurons and action recognition," *Experimental Brain Research*, Vol.153, No.4, pp. 628-636, 2003.
- [35] G. Buccino, F. Lui, N. Canessa, I. Patteri, G. Lagravinese, F. Benuzzi, C. A. Porro, and G. Rizzolatti: "Neural circuits involved in the recognition of actions performed by noncon-specific: an fMRI study," *J. of Cognitive Neuroscience*, Vol.16, No.1, pp. 114-126, 2004.
- [36] M. A. Umiltà, E. Kohler, V. Gallese, L. Fogassi, L. Fadiga, C. Keysers, and G. Rizzolatti: "I know what you are doing: a neurophysiological study," *Neuron*, Vol.31, No.1, pp. 155-165, 2001.
- [37] A. Wohlschläger, M. Gattis, and H. Bekkering: "Action genera-

- tion and action perception in imitation: an instance of ideomotor principle,” *Philosophical Trans. of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol.358, No.1431, pp. 501-515, 2003.
- [38] A. G. Greenwald: “Sensory feedback mechanisms in performance control: with special reference to the ideomotor mechanism,” *Psychological Review*, Vol.77, No.2, pp. 73-99, 1970.
- [39] W. Prinz: “Perception and action planning,” *European J. of Cognitive Psychology*, Vol.9, No.2, 1997.
- [40] D. M. Wolpert, K. Doya, and M. Kawato: “A unifying computational framework for motor control and social interaction,” *Philosophical Trans. of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol.358, No.1431, pp. 593-602, 2003.
- [41] 鮫島和行, 銅谷賢治, 川人光男: “強化学習 MOSAIC: 予測性によるシンボル化と見まね学習,” *日本ロボット学会誌*, Vol.19, No.5, pp. 551-556, 2001.
- [42] C. D. Cutler: “A review of the theory and estimation of fractal dimension,” in *Nonlinear Time Series and Chaos: Dimension Estimation and Models*, World Scientific, pp. 1-107, 1993.
- [43] T. Torii and S. Hidaka: “How can we help others?: a computational account for action completion,” *Proc. of the 40th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2018)*, pp. 2569-2574, 2018.
- [44] S. Hidaka: “Identifying kinematic cues for action style recognition,” *Proc. of the 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2012)*, pp. 1679-1684, 2012.
- [45] 鳥居拓馬, 日高昇平: “模倣学習の機序解明に向けた意図推定のモデル化：倒立振り課題の分析,” *知能と情報*, Vol.31, No.5, pp. 826-833, 2019.

(2020 年 8 月 17 日 受付)

(2021 年 1 月 26 日 採録)

[問い合わせ先]

〒923-1292 石川県能美市旭台 1-1

北陸先端科学技術大学院大学

鳥居 拓馬

E-mail: tak.torii@jaist.ac.jp

—— 著 者 紹 介 ——

とりい たくま [非会員]

2014 年北陸先端科学技術大学院大学博士課程単位取得退学。2016 年博士（知識科学）。2012 年ハートフォードシヤ大学にて訪問研究員。2014 年東京大学大学院工学系研究科にて研究員。2016 年北陸先端科学技術大学院大学にて研究員。現在、同大学助教。日本認知科学会、人工知能学会会員。人の意味認知とくに計画・意図に関する研究に従事。

ひだか しゅうへい [正会員]

2007 年京都大学大学院情報学研究科博士課程修了。博士（情報学）。同年インディアナ大学にて博士研究員。2010 年北陸先端科学技術大学院大学助教。現在、同大学准教授。言語・認知発達、意味認知の計算論的メカニズムを解明することを目的に、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。日本認知科学会、人工知能学会などの会員。

Toward Computational Theory of Imitation: An Account for the Mechanism of Imitation Based on Dynamical Invariants

by

Takuma TORII and Shohei HIDAKA

Abstract:

Children can imitate adults' actions with ease. An imitator who observed demonstrator's action can produce a bodily movement which is supposed to be similar with it. Any theory and hypothesis of imitation is required to describe how the imitator recognizes the similarity or identity of actions, i.e., in what sense from the imitator's point-of-view the produced and the observed action can be similar or identified. In this paper, we review four existing hypotheses on the mechanism of imitation. One of our criteria for the hypotheses in this review is the possibility of implementation and validation of the hypotheses in computer simulations or physical robots. A straightforward implementation without any additional ad-hoc assumption would be difficult, if the hypothesis to be implemented is flawed. Thus, the computer-based and/or physical implementation tests if a hypothesis accounts for the imitation mechanism sufficiently. This motivates us to critically review and clarify the existing literature on imitation in the sense of technical and theoretical plausibility of the existing hypotheses. We review the four existing hypotheses on imitation with some of them had been implemented in a form of computer simulations and/or robots. By pointing out the additional assumptions for the implementation, this review will reveal the latent requirements for an account for the imitation, that has not been addressed well. Lastly, we briefly propose our own account for imitation, in which bodily movements are characterized and identified on the basis of dynamical invariants under smooth transformations.

Keywords: imitation, computational theory, implementability of hypothesis, dynamical invariant

Contact Address: **Takuma TORII**
Japan Advanced Institute of Science and Technology
1-1 Asahidai, Nomi, Ishikawa 923-1292, Japan
E-mail: tak.torii@jaist.ac.jp