

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19880

研究課題名（和文）深層学習を用いた自己-他者間の身体動作対応付けの獲得と模倣モデル

研究課題名（英文）Developmental Models of Self-Other Correspondence and Imitation by Deep Neural Networks

研究代表者

野口 渉（Noguchi, Wataru）

北海道大学・数理・データサイエンス教育研究センター・特任助教

研究者番号：60868082

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自己と他者の身体動作の対応（ミラーニューロン）および動作模倣を獲得可能な深層学習モデルを構築した。一人称視点において観測される自己身体と他者身体の見えの乖離を克服するために、モデルは予測学習を通して空間構造の表現及びその空間内での身体形状の表現（身体イメージ）を獲得する。獲得される身体イメージは一人称視点の座標系に限定されず、モデルの共有モジュールにおいて自他で共有な身体イメージとして利用され、同時にミラーニューロンおよび模倣能力が実現されることを示した。さらに、同様なモデルを拡張して、身体拡張のモデル、また、視点変換・視点取得能力を獲得するモデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築したモデルにおけるミラーニューロン・模倣能力の獲得メカニズムは、例えば模倣されるという経験により自己と他者の身体姿勢・動作の対応関係を明示的に与えられることを仮定しておらず、従来のモデルで仮定されていたような、模倣される経験を通じた連合学習による説明に加え、ミラーニューロン・模倣の発達メカニズムの解明に貢献することが期待される。また、構築したモデルによって、ミラーニューロン・模倣に限らず、視点取得能力も獲得可能であることを示しており、本研究のモデル・知見を拡張することで、より広範な社会的認知の発達の基盤的メカニズムの解明に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed deep neural network models that can acquire the correspondence between self and other body with mirror neurons as well as imitation ability. To overcome the discrepancy in appearance between the self and the other when viewed from a first-person perspective, the shared module of the model first acquires the spatial representation of the environment as well as the spatial representation of the body, i.e., body image, through predictive learning. In the shared module of the model, the superposition of the self and the other, i.e., the acquisition of a shared body image of the self and the other, is achieved, and at the same time, mirror neurons and imitation ability are acquired. In addition, we extended the model to include body extension and the acquisition of viewpoint transformation and perspective taking.

研究分野：人工知能

キーワード：深層学習 予測学習 ミラーニューロン 模倣 身体イメージ 視点取得

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

動作模倣は、視覚を用いた観察によって効率的に新しい行動を習得できる能力であり、生物の適応的な行動の伝承に寄与している。しかし、自己と他者の身体動作の対応 (= どのような運動信号によって模倣動作が可能か) は自明ではなく、模倣メカニズム解明のための研究が行われている。サルにおける研究では、他者の動作を観察する場合と、同じ動作を自分が行う場合の両方で活動する、つまり、自己と他者の動作の対応付けをコードするミラーニューロンが発見された [1]。しかし、ミラーニューロンがいかにして獲得されるかの解明には至っていない。ミラーニューロンと模倣能力の獲得メカニズムについては、計算モデルに再現することで、そのメカニズムの理解を試みる研究がある [2, 3]。従来のモデルには、親から子への模倣や鏡に映る自身の像を見る経験を通じた視覚と運動の連合学習を行うという、自身の動作と対応した他者の模倣動作を観察するという仮定が置かれていた。一方で、多くの場合頑健に模倣能力が発達する事実を鑑みれば、常に模倣されるわけではない経験の中での連合学習のみが、ミラーニューロン・模倣能力の獲得に寄与しているかという問いが残る。感覚器官を介して得る身体に関する経験のほとんどは、自身の運動に応じて動く自己身体とそれに明らかな対応はない他者身体を一人称視点から観察するものである。このような一人称視点の経験から、模倣されるという経験のような自他身体の対応の手がかりを明示的に与えられない状況下において、ミラーニューロン・模倣能力が獲得され得るか、され得るのであれば、いかにして可能となるか、という問いに応えるモデルが、その発達メカニズムの理解のために求められる。

2. 研究の目的

本研究では、自己と他者の身体動作の対応づけすなわちミラーニューロンとそれを利用した模倣能力の獲得メカニズムの解明に寄与するため、ミラーニューロンと模倣能力の獲得が可能な計算モデルを構築する。とくに一人称的経験のみから学習し、自己と他者の対応関係を直接教示されない状況において、ミラーニューロン・模倣能力を獲得可能なモデルを構築する。

3. 研究の方法

計算機上のシミュレーションにおいて、ミラーニューロンと動作模倣の能力を獲得するモデルを構築し、能力の獲得に必要なとされたモデルの構成要素を考察することでそのメカニズムの理解を試みる。能力を獲得する基盤となる神経回路のモデルとして、深層学習に基づくモデルを用いることで、生物と同様なあらかじめ組織化されていない経験を重ねることによる発達のシミュレーションを試みる。とくに、代表者が過去に関わり共同で提案した自己と他者の重ね合わせメカニズムに基づくモデル [4] を、自他の身体姿勢・動作の対応づけを可能となるように拡張する。重ね合わせメカニズムでは、神経回路ネットワーク内の共有されたモジュールで並列に情報が処理され、自己と他者の表現が共有モジュール上に共有された形で獲得される。先行研究においては、空間を移動するエージェントを用いたシミュレーションにより自己と他者の共有された空間的位置の表現が重ね合わせメカニズムにより獲得されることが示されているが、本研究においては、身体姿勢の動作に関わる経験を学習するシミュレーションを行うことで、身体動作に関わる自己と他者の重ね合わせを生じさせるモデルの構築を試みる。なお、ミラーニューロンの獲得については、必ずしも実際の生物で観察される詳細な特性と一致することを期待せず、自己と他者の姿勢・動作を同様な仕方でコードするという特性に注目した。

4. 研究成果

(1) 研究期間初期には、空間的な構造に基づく身体表現を所与のものとして共有モジュールを用いることで、自他の重ね合わせを生じ、ミラーニューロンの獲得と模倣を実現するモデルを構築した。モデルは、SDF (Signed Distance Function) により様々な姿勢におけるロボットの3次元身体形状 (身体イメージ) を表現する。3次元空間中での変換を担うモジュールを備えた上で、視覚画像を入力として空間的に離れた場所の他者身体の3次元形状を再現する学習を行うと、自己の身体イメージを他者に重ね合わせるように身体イメージが変換されるように学習が進むことが確認された。このとき、自己と共有されたモジュールを用いて他者の身体形状を表現するためにミラーニューロンが獲得される。

なお、事前実験においては、空間構造に基づく身体表現を介さず、単に視覚画像を予測するモデルを構築していたが、共有モジュールを用いることのみでは自他の重ね合わせが生じることはなかった。これは、一人称視点に写る自己と他者の見えが大きく異なるためであり、自他の重ね合わせを生じさせるために、例えば鏡を利用して自己身体の三人称的見えを観察するなど一人称見えと三人称的見えを結びつけるヒントが必要であった。これらの結果から、一人称視点の経験から空間構造および空間における身体形状の表現を獲得することが自他の重ね合わせに必要なであることが示唆された。

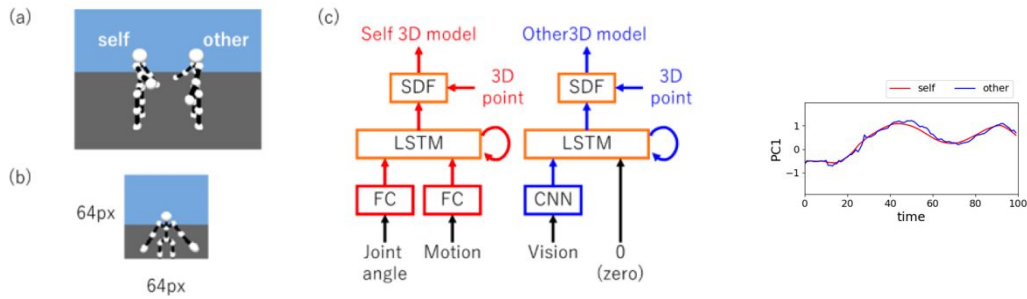


図1 SDF に基づく身体イメージを用いた自他身体の重ね合わせモデル (左, 中). 獲得されたミラーニューロン表現 (右)

(2) 触覚および身体固有感覚の学習を通し, 空間構造および空間に基づく身体イメージを獲得するモデルを構築した. 構築したモデルは予測符号化/予測処理仮説に基づき, 環境を様々な姿勢で探索したのちに, ある身体姿勢において観測される触覚を予測する学習を行う. シミュレーション上の簡易なアームロボットの触覚と固有感覚 (関節角度) に基づいて, ある姿勢において物体に触れた触覚を予測する. さまざまな姿勢での観測を集めて, その後新たな姿勢において得られるはずの触覚を予測する, という予測学習を繰り返すと, モデルは予測するための効率的な表現として, 空間構造および自身の身体 (手のひら) の空間配置を内部の表現として構築することが確認され, これが身体イメージと見做せる. モデルは Transformer 構造をもち, 多数の観測情報をまとめて環境の状態をエンコードすることができる. さらに同様な構造を視覚予測の場合にも応用することでも, 環境の空間構造および視覚上に写る身体の空間構造 (身体イメージ) が獲得されることを示した. また, 同モデルは, 触覚と視覚の観測を単一のモデルで扱うマルチモーダルモデルとしても構築し, 獲得される空間表現や身体イメージは触覚と視覚で共有の表現となることが確認された. これは, 生物脳で観察される身体の表現である 2 種感覚ニューロンと呼ばれる神経細胞に類した, 空間中の身体領域に伴って視覚及び触覚の受容野が変化する特性を示した.

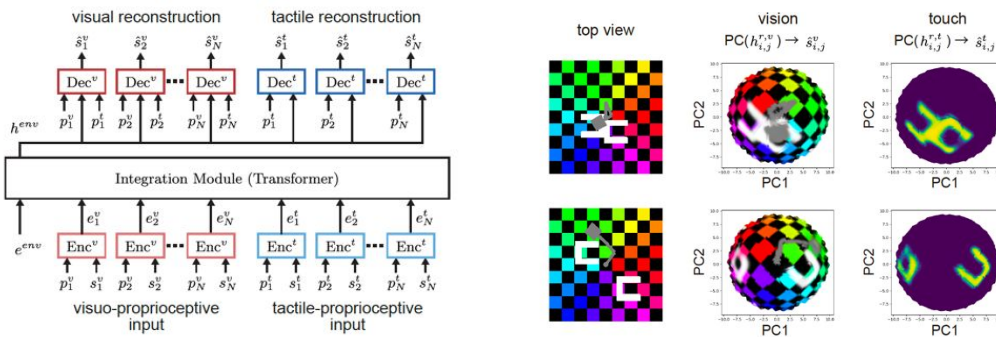


図2 空間構造・身体イメージを獲得するモデル (左). 獲得される空間表現 (右)

また, 得られた身体イメージを獲得するモデルを拡張し, 身体拡張の現象をシミュレーションするモデルを構築した. (2) の視覚と触覚の共有な身体近傍空間の表現を獲得するモデルにおいて, ロボットが道具を持つ, 持たない, の 2 パターンの状況をシミュレートし学習させる. この学習の結果, 道具を持つ場合に, 身体イメージが道具領域に拡張する, という現象が確認された. このとき, ロボットの手のひらの触覚センサに対応する内部表現が, 道具を持つ場合持たない場合で異なる空間領域に変換されることが確認された. この結果は, 構築したモデルが身体の変容を許容するものであり, 身体拡張のメカニズムに加え, 自己と異なる身体をもつ対象との自他の重ね合わせのメカニズムの説明にもつながる可能性がある.

(3) 上記(1)および(2)の知見を組み合わせ, 一人称視点の経験から構築した自己の身体イメージを他者に重ね合わせることでミラーニューロンと模倣能力を獲得するモデルを構築した. 上記(2)のモデルと同様に視覚と身体姿勢に関する固有感覚の依存関係を学習する予測学習に基づき身体イメージを獲得するモデルと, (1)の共有モジュールを備え, 身体イメージの変換により自他を重ね合わせるモデルを組み合わせた. モデルは, (a)自己のみで環境および身体を探索し空間表現と身体イメージを構築する段階, (b)他者と対面して身体イメージを他者と重ね合わせる段階, の 2 つの段階の学習を通し, ミラーニューロンを獲得する. 獲得したミラーニューロン

に基づき、視覚により観測した他者の取る姿勢を模倣することが可能になる。モデルは2つの段階において一貫して一人称視点の視覚の予測学習を行い、当初の研究目的である一人称視点の経験のみからのミラーニューロンと模倣能力を獲得するモデルを構築できたといえる。ただし、本課題研究期間内においては、モデルは単純化されたシミュレーション上のみで検証され、また、獲得される空間および身体イメージの表現は2次元の平面的なものに限定されており、より現実的な環境での検証および3次元の空間表現の獲得が可能なモデルへの拡張が課題である。

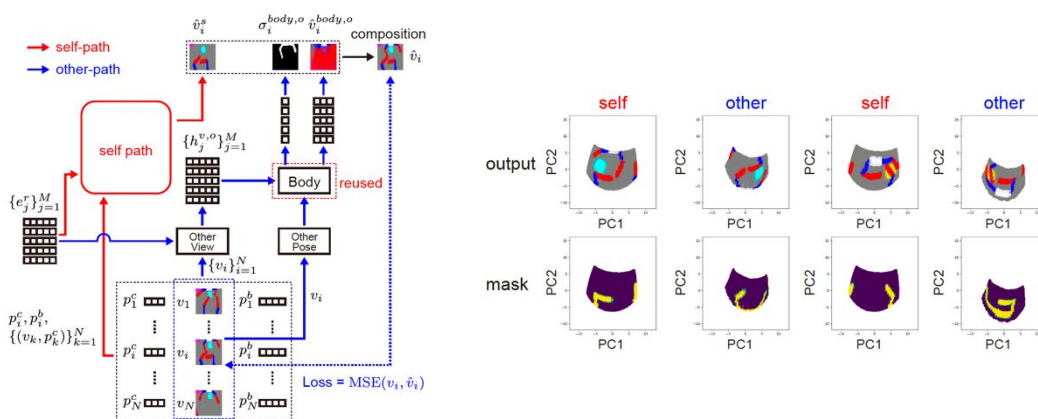


図3 自他で共有な身体イメージを獲得するモデル(左). 共有な身体イメージにより内部空間に再構築される自己と他者の身体(右)

また、環境中の物体に対する他者の動作を予測する学習を組み合わせることにより、他者視点の視覚画像を内部的に生成する、いわば視点取得の能力を獲得するモデルについての結果も得ている。視点取得は他者理解・社会的認知において機能する認知能力の一つであり、この結果は、ミラーニューロンや模倣に限らない社会的認知の基礎となるメカニズムの理解に貢献すると期待される。この成果については、本報告書執筆時点で、現在論文投稿の準備中である。

< 引用文献 >

Rizzolatti, G., & Sinigaglia, C. (2016). The mirror mechanism: a basic principle of brain function. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(12), 757-765.

Oztop, E., Kawato, M., & Arbib, M. A. (2013). Mirror neurons: functions, mechanisms and models. *Neuroscience letters*, 540, 43-55.

Press, C., Gillmeister, H., & Heyes, C. (2007). Sensorimotor experience enhances automatic imitation of robotic action. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1625), 2509-2514.

Noguchi, W., Iizuka, H., Taguchi, S., & Yamamoto, M. (2019). Spatial Representation of Self and Other by Superposition Neural Network Model. *Proceedings of the ALIFE 2019: The 2019 Conference on Artificial Life (2019)*, 531-532.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Noguchi Wataru, Iizuka Hiroyuki, Yamamoto Masahito, Taguchi Shigeru	4. 巻 12
2. 論文標題 Superposition mechanism as a neural basis for understanding others	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-06717-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 野口 渉、飯塚 博幸、山本 雅人	4. 巻 66
2. 論文標題 視覚と運動の予測学習を通して空間認知を獲得する深層学習モデル	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 139 ~ 144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11509/isciesci.66.4_139	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 野口 渉、飯塚博幸、山本雅人
2. 発表標題 Masked Autoencoding による触覚と固有受容感覚の経験を通じた身体近傍空間の認識
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野口 渉、飯塚博幸、山本雅人
2. 発表標題 Transformer Autoencoder による視覚・触覚で共有な身体近傍空間表現の獲得
3. 学会等名 2023年度 人工知能学会全国大会（第37回）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野口 渉
2. 発表標題 感覚運動予測学習による物体形状表現の獲得モデル
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuki Auchi, Wataru Noguchi, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto
2. 発表標題 Understanding intention of others through visual predictive learning based on superposition mechanism
3. 学会等名 The Fifth International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM 5th 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野口 渉, 飯塚 博幸, 山本 雅人
2. 発表標題 深層学習モデルによる自己と他者の共有身体イメージの獲得
3. 学会等名 第19回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wataru Noguchi, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto
2. 発表標題 Multimodal Plastic Body and Peripersonal Space Representation Developed Through Learning of Visuo-Tactile-Proprioceptive Sensations
3. 学会等名 The 2023 Conference on Artificial Life (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wataru Noguchi, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto
2. 発表標題 Acquiring Viewpoint Transformation to Reuse Self Body Image for Other on Self-Organized Internal Spatial Coordinate System
3. 学会等名 The 2023 IEEE International Conference on Development and Learning (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関