

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：32708

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18133

研究課題名(和文) 自己身体表象を基にした異なる身体性を有する学習ロボット間での転移学習

研究課題名(英文) Transfer learning using body representation between heterogeneous learning robots

研究代表者

河野 仁 (Kono, Hitoshi)

東京工芸大学・工学部・助教

研究者番号：70758367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、ヒトの脳内に備わっているとされている身体表象の変容メカニズムを参考に、ロボットが身体性の違いを自動的に獲得する手法の開発が目的である。ロボットが自動的に身体の構造や各要素部品(リンクやジョイントなど)の接続関係、関係性を獲得することで、転移学習に必要な身体性の違いを記述しマッピング作業を自動化する。研究成果として、ロボットが自動的に身体構造を学習するボディキャリブレーションを提案・開発し、物理演算シミュレーション内で構築した仮想多脚型ロボットと2種類の実多脚型ロボットを用いて、それらのロボット間で強化学習と転移学習を実行し、提案手法の有用性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、ヒトの脳内で動作していると考えられる身体表象や身体図式の理論をロボットに応用することにより、ロボット間における異なる身体的構造を自動的に記述できることにある。これにより社会的意義としては、様々な学習ロボット間での知識の再利用、すなわち転移学習の際に身体性や構造の違いをヒトが定義する必要がなく、より転移学習の実世界応用を支援する技術である。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to develop a method which is automatically calculation the difference among heterogeneous robots' body structure based on body representation. Transfer the knowledge is needed the mapping description method between robots' heterogeneity. In this research, a body calibration is proposed and developed in which the robot automatically learns the own body structure. The proposed method evaluated using virtual multi-legged robot constructed in the physics simulation and two types of real multi-legged robots. Reinforcement learning and transfer learning were performed between developed robots, and the usefulness of the proposed method was evaluated.

研究分野：知能ロボット

キーワード：強化学習 転移学習 身体図式 ボディキャリブレーション 多脚型ロボット 物理演算シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

我が国では超高齢社会の到来に伴い、自律的に多様な仕事を遂行する人工知能や知能ロボットの社会実装が期待され、研究が活発に行われている。行動を伴う知能ロボットの学習アルゴリズムは代表的なものに強化学習があるが、近年は既に獲得した知識を新たなタスクで再利用する転移学習というフレームワークの議論がなされている。通常、強化学習における知識は、感覚器（センサ）からの入力に対する最適な出力（行動）の対が記述される。そのため、転移学習はロボットのハードウェア構成や機能（以降、身体性と呼ぶ）が同一なロボットやエージェントでの知識再利用が容易である。しかし、何十年も同じロボットの身体性が保たれる保証はなく、機能向上や交換、様々な理由により時系列的なロボットの身体的な変化が発生することは確実であり、転移学習が困難となる。類似エージェント間であれば、「身体性の違いとその対応関係」（マッピング）を行うことで転移が可能であることが Taylor らにより示されている [Taylor, M. E., 2009]。しかし、マッピングはヒトにより手動で設計され、あらかじめロボットにプログラムする必要はある。

一方、ヒトは身体性の変化に対して柔軟に適応することが可能である。例えば、身体の成長や、道具を使った場合の身体の拡張がある。これらの身体性の変化に適応できるメカニズムがヒトの脳内に存在することが認知心理学で明らかとなっている。ヒトが身体性の変化に適応するメカニズムの 1 つに身体表象がある。身体表象は脳内における体のイメージであり、これにより実際の身体の変化に対して適応的に制御することができると考えられている。

ロボットにおいても身体表象や身体図式などを記述し、その変化を制御することにより異なる身体性を持つロボットで学習した知識の再利用が可能であると考えられる。また、ヒトを対象とした身体表象の変容機構は、ロボットに直接応用することができないため、本研究では強化学習ロボットの転移学習を対象として、身体表現システムの実現によるマッピングの自動化が最終目標である。

2. 研究の目的

本研究では、身体性の異なる強化学習ロボット間における自律的な知識再利用（転移学習）の実現のために、これまでヒトにより設計されてきたマッピングを身体表象である身体図式として記述することで自律的に学習、身体表象の変更を行うメカニズムの開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では強化学習とりわけ Q 学習を前提に転移学習を行う。転移学習は前述のとおり、異なる身体性を有するロボット間ではマッピングが必要であった。マッピングの自動化においてはいくつかの研究が報告されているが、車輪型ロボットのような構成を前提としたエージェントが多く、例えば多脚型のような多くの関節構成を持つロボットにおけるマッピング自動化方法は提案されていない。そこで本研究では、強化学習・転移学習の両学習とは別に 1 姿勢における各行動より得られるセンサ情報を用いて身体図式獲得を行う。強化学習や転移学習に使用するセンサ類以外に Body calibration のためにセンサを搭載する。センサ搭載例を図 1 に示す、Body calibration を行うすべてのロボットにセンサを搭載する必要がある。

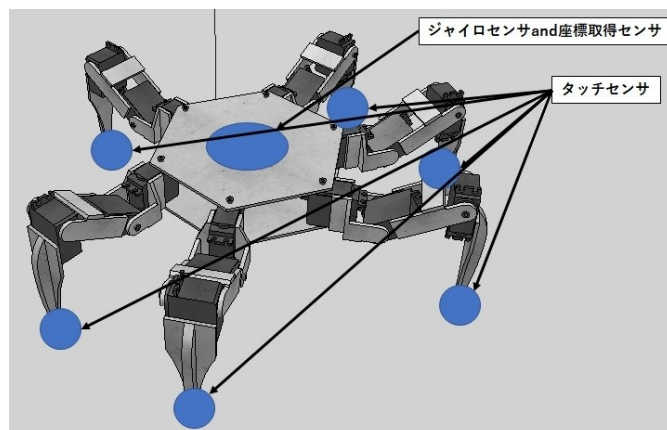


図 1 センサの搭載例

ロボットに搭載されたセンサを用いて Body calibration を実行することで、身体図式を記述していくが、提案手法の流れとして最初に著者らがボディベクトルと呼ぶロボットの行動前後のセンサ情報（ジャイロセンサと自己位置座標）変化量を算出する。また、ボディベクトルと同時にロボットの行動結果として出力されるフットベクトルを足先に搭載されたタッチセンサから算出する。ロボットはランダムに行動を繰り返し、行動指令値に対するボディベクトルとフットベクトルを用いて身体図式を記述する。提案手法における構成と流れの概略図を図 2 に示す。

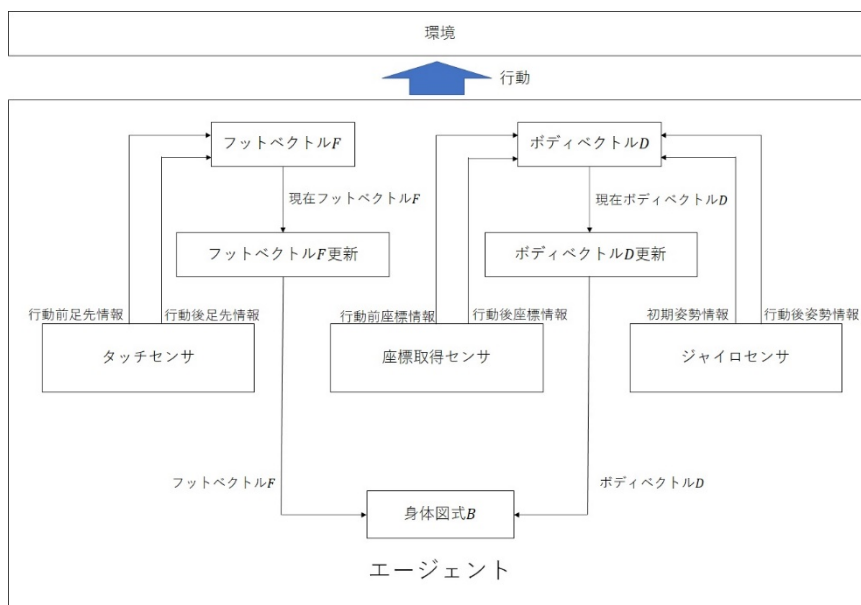


図 2 身体図式獲得手法の概略図

各ロボットにて Body calibration を実行し、得られた身体図式同士を用いてマッピングを行うが、ロボット間でのボディベクトルとフットベクトルのユークリッド距離を計算し、距離の短い行動同士のマッピングを行う。

4. 研究成果

本研究では、物理演算シミュレーションによる強化学習と身体図式獲得を行い、その計算機シミュレーションで獲得した知識（行動価値関数）を実多脚ロボットに転移する実験を行い提案手法の有用性を評価した。物理演算シミュレーションには Webots を使い、仮想多脚ロボットとしては図 3 に示すモデル（以下、ロボットモデル）を製作した。ロボットモデルは、18 自由度を有する多脚型であるが計算機シミュレーションによる高速な強化学習が実行可能である。また、ロボットモデルにおいても Body calibration を実行し、身体図式を獲得しておく。ロボットモデルにおける強化学習は、直進の歩行動作を強化学習し、転倒や胴体を地面につけないで歩行できるように報酬や学習用のパラメータを事前に調整している。そこで獲得した知識を図 4 と図 5 に示す実多脚型ロボットに転移学習を行う。ロボットモデル同様に 2 つの実多脚型ロボットにおいても Body calibration による身体図式を獲得しておき、転移学習時に提案手法によるマッピングを実行する。提案手法の検証のため、ロボットモデルと実多脚型ロボット 1 は身体構成が同様である。実多脚型ロボット 2 は他のロボットと関節数は同様であるが、脚の可動方向が異なり身体性が異なる設定となっている。



図 3 仮想多脚型ロボット

実多脚型ロボットにおける転移学習のタスク設定としては、計算機シミュレーションと同様に初期位置からの直進歩行動作としている。実多脚型ロボットは転移学習時も強化学習しており、スタート地点からゴール地点（ロボット前方 30 mm）までの移動を行う。実験環境として実多脚型ロボットは卓上で動作し、天井部に設置されたカメラによりロボット本体のマーカを認識し自己位置を計測する。自己位置座標はロボットの 1 行動ごとに記録される。ロボットモデルで獲得した行動価値関数と Body calibration により獲得した身体図式をもとに各実多脚型ロボットへ転移学習した結果の例を図 6 と図 7 に示す。図 6 と図 7 のグラフは俯瞰視点でのロボットの移動軌跡であり、Y 軸が進行方向となる。グラフの単位は X 軸 Y 軸両方ともに [mm] である。

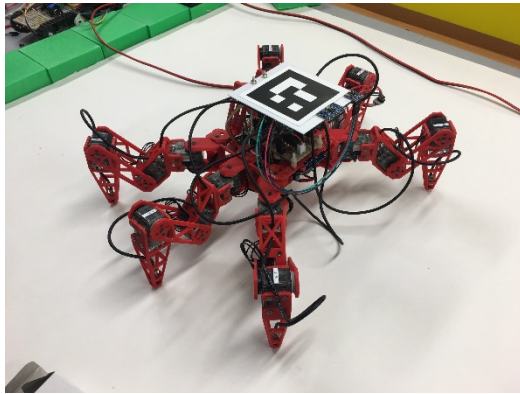


図 4 実多脚型ロボット 1

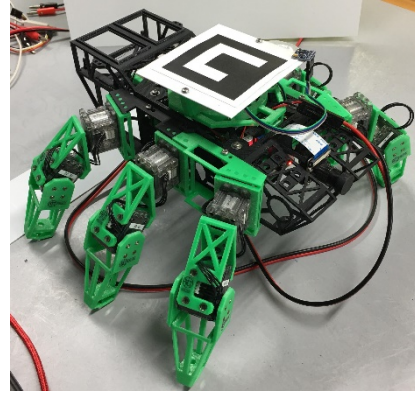


図 5 実多脚型ロボット 2

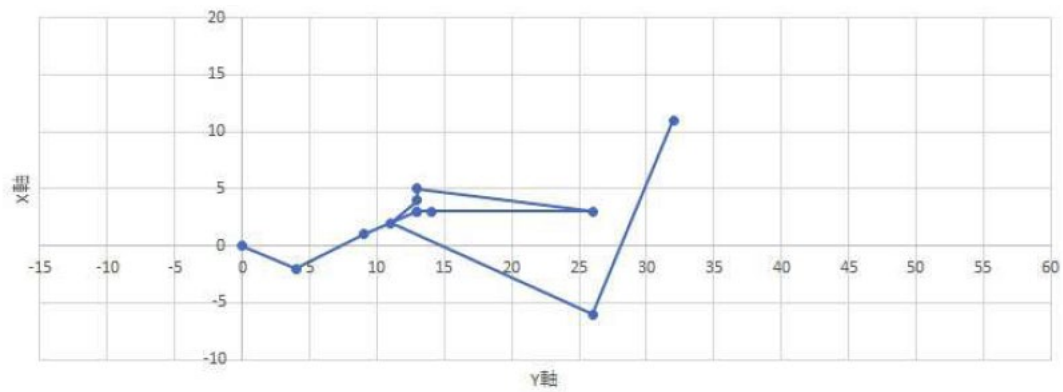


図 7 身体性が等しいエージェント間の転移学習結果 (移動軌跡)

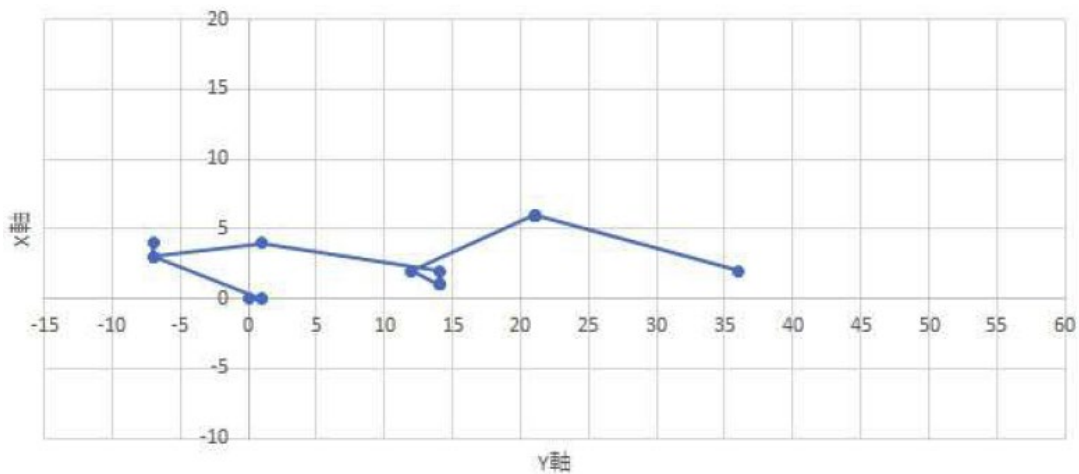


図 6 身体性が異なるエージェント間での転移学習結果 (移動軌跡)

実験結果から、ロボットモデルが計算機シミュレーションで強化学習により獲得した行動価値関数を、実多脚型ロボットがBody calibrationによるマッピングを用いて転移学習可能であることが示された。結果の対比として、ヒトが手動でマッピングを定義し従来の転移学習を実行した結果と、提案手法結果は同等の動作を実現できていることを確認している。実多脚型ロボットが直進せず、さらには前進と後退を繰り返しているのはロボットモデルの強化学習が十分でないことと、脚を動作させる反動で後退していることが実験中に確認されている。本研究の狙いは、マッピングの自動化による転移学習の性能向上ではなく、ヒトによるマッピングの省略、省力化である。そのため、提案手法により得られた成果は、本研究の目的を達成した。今後の課題としてマッピングの精度向上をはじめ、学習の高速化、実機から実機への転移による提案手法の効果検証などが上げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hitoshi Kono, Yuto Sakamoto, Yonghoon Ji, Hiromitsu Fujii	4. 巻 11
2. 論文標題 AUTOMATIC TRANSFER RATE ADJUSTMENT FOR TRANSFER REINFORCEMENT LEARNING	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Artificial Intelligence and Applications	6. 最初と最後の頁 47-54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5121/ijai.2020.11605	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 Hitoshi Kono, Ren Katayama, Yusaku Takakuwa, Wen Wen, Tsuyoshi Suzuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Activation and Spreading Sequence for Spreading Activation Policy Selection Method in Transfer Reinforcement Learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Computer Science and Applications	6. 最初と最後の頁 7-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 河野仁, 佐藤弘和	4. 巻 42
2. 論文標題 強化学習の転移学習における転移率を用いた再利用方策学習進捗の可逆性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東京工芸大学工学部紀要	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 池田悟, 河野仁
2. 発表標題 ヒトの身体表象を参考にした異なる身体性を有するロボット間での転移学習手法
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2019 in Hiroshima
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Kono, Tomohisa Mori, Yonghoon Ji, Hiromitsu Fujii, Tsuyoshi Suzuki
2. 発表標題 Development of Perilous Environment Estimation System Using a Teleoperated Rescue Robot with On-board LiDAR
3. 学会等名 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野仁, 三浦昇三, 温文, 鈴木剛
2. 発表標題 強化学習における方策転移度合い決定のための転移曲面の検討
3. 学会等名 第24回画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京工芸大学知能ロボットシステム研究室ホームページ http://irs101.em.t-kougei.ac.jp/</p>

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
---------	---------