法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-06

普遍的性質の発見による汎化能力の獲得と学習による状態行動空間の分化（国際共同研究強化）

伊藤, 一之 / ITO, Kazuyuki

(雑誌名 / Journal or Publication Title)
科学研究費助成事業 研究成果報告書
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
5
(発行年 / Year)
2019-06-05

様　式　Ｆ－１９－２

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　　元 年　　６ 月　　５ 日現在

機関番号：３２６７５
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間：2016～2018
課題番号：１５ＫＫ００１５

研究課題名（和文）普遍的性質の発見による汎化能力の獲得と学習による状態行動空間の分化（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Generalization using properties of the real world and autonomous division of state-action space(Fostering Joint International Research)

研究代表者
伊藤　一之（ITO, Kazuyuki）

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：９０３４６４１１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　8,500,000円
渡航期間：　12ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では，「汎化機能を実現しているものは，学習により得られる内部モデルではなく，実世界に最初から存在している普遍的性質である」との仮説をたて，この「実世界の普遍的性質を利用した適応的な振る舞いの生成」について検討した．また，その一例として，シリコンゴムにより構成された柔軟な身体を持つ多脚型ロボットを開発し，環境に合わせて異なる移動パターンを強化学習により自律的に獲得可能であることを示した．さらに，この強化学習で獲得された政策は，他の類似した環境に対して追学習を行うことなくそのまま適用することが可能であることを示し，提案手法により，強化学習の政策を汎化することが可能であることを確認した．

研究成果の学術的意義や社会的意義
従来の「汎化とは多数の情報や経験を統計的に処理して共通の性質を抜き出すこと」という枠組みに対する対案として，「実世界の性質を利用して様々な状況に適応可能な身体を構成すること」という新しい枠組みを提案した点において学術的意義は大きい．
また，実際のロボットを用いてその有用性を検証しており，この技術は，今後，災害対応や，インフラ点検，農林業など，複雑な未知環境で働くロボットを実現する上での基礎となり，社会的貢献も大きいと考えられる．

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on properties of the real world, and we proposed a framework to realize adaptive behavior of a robot using properties of the real world.
We developed a soft multi-legged robot based on the proposed framework, and we demonstrated that the developed robot could obtain locomotion patterns for given environments using reinforcement learning. We also confirmed that the obtained policy to realize the locomotion pattern is generalized and is applicable for other similar environments without additional learning.

研究分野：知能ロボット

キーワード：知能ロボット　ソフトロボット　汎化　強化学習　多脚ロボット　インフラ点検　災害対応

様　式　Ｆ－１９－２

１．研究開始当初の背景

未知環境において適応的かつ自律的に振る舞うことが可能なロボットを実現することは極めて難しく，くしくも，福島第一原子力発電所の事故処理では，世界最高水準の技術を結集したとしても，ロボットは，遠隔操作によって簡単な作業をこなす程度にしか機能しないことが明らかになった．これは，工場などの既知環境を前提とする従来のロボット技術が未知環境においては有効に機能しないことを示しており，未知環境を前提とした新たな枠組みが求められている．

この問題は，ロボットの持つ限られた知覚能力および計算資源を用いて，複雑な実世界にいかにして対処するかという問題に起因するものであり，学習能力を有するロボットでは特に P1「実時間学習の問題」，P2 「汎化能力の欠如の問題」の二つの問題として表面化する．

一般に，複雑な実環境において適応的に振る舞うためには，ロボットには多くの自由度が必要とされる．従って，ロボットの状態および行動を記述するための空間は，組み合わせ爆発により指数的に増加し，この広大な空間において学習を行うためには，膨大な試行回数が必要とされる．しかし，時間的制約により，多数の試行を行わせることは困難であり，実時間で学習を完了させることは事実上不可能である．

また，実環境では，全く同一の状況に再び遭遇することは極めてまれであり，過去の経験をもとに，類似した異なる状況において適切に動作するための汎化能力が必要とされる．汎化能力を持たないロボットは，遭遇する全ての状況を異なる新たな状況と認識してしまうため，学習が進展せず，適切に動作することができない．したがって，未知環境を対象とした場合には，わずか数十回程度の試行回数で，さまざまな状況に適応可能な汎化された方策を獲得する必要があり，これは，従来の「コンピュータおよびアルゴリズムの改良による高速化」の枠組みでは事実上実現不可能な極めて困難な課題である．

この問題に対して，コンピュータによる計算に代わって，環境とロボットの身体との相互作用が注目され，Dynamics based control, Affordance, Morphological computation などの概念が提唱されている．しかし，これらの枠組みと学習の枠組みとの統合はなされておらず，実世界の性質や相互作用が学習に与える影響については十分に議論されていない．

２．研究の目的

「一を聞いて十を知る」という諺のとおり，生物は，「数少ない経験から未知の多数の事象に適用可能な汎化された振る舞いを構成することができる」．これは，高等生物だけではなく，小動物や昆虫などの下等生物にもみられる極めて優れた性質であり，従来の「多数の事象から少数の抽象化された事象を抜き出す」という統計学的な枠組みでは説明が不可能な対照的な現象である．

この生物の仕組みに注目し，本研究では，「汎化機能を実現しているものは，実世界に存在している普遍的性質である」との仮説をたて，この「普遍的性質を発見し汎化を実現するためのプロセス」と，「学習により状態・行動空間を分化させ，振る舞いの精度を向上させてゆくプロセス」の２つのプロセスからなる新しい学習の枠組みを提案し，特に，身体が柔軟な素材で構成され，極めて高い自由度を有するソフトロボットにこの枠組みを適用することでその有用性を確認する．

３．研究の方法

生物は，生態学的ニッチと呼ばれる，ある限られた環境に生息し，進化の過程においてその環境に対して特化した身体を獲得している．そして，その環境に適した身体を用いて周囲を探索することで，環境に存在する様々な性質のなかから，目的のタスクに必要な実世界の性質を探し出すことが可能となり，汎化された方策を，非常に少ない試行回数で獲得することができると考えられる．

本研究では，この枠組みに習い，第一段階として，設計者が，ロボットの活動する範囲を解析し，生物の進化に代わって，ロボットの身体を環境の性質が利用できるように設計する．具体的には，ソフトロボットの多自由度をすべて独立な自由度として設計するのではなく，力学的な拘束や，神経系を模した電子回路による拘束，環境との接触による拘束などを付加することで従属な自由度とし，コンピュータが処理しなければならない独立な自由度の数を削減する．次に，強化学習を基にした学習アルゴリズムを提案し，これをロボットに搭載することで，ロボット自身が，試行錯誤を通して，適応的な振る舞いを実現可能な枠組みを実現する．

４．研究成果

提案した枠組みを基に，ロボットの身体を環境に合わせて設計し，受動的に複雑かつ適応的な振る舞いが生成可能なソフトロボットを開発した．図１に，開発されたロボットの一例として，木やパイプなどの柱状物を昇降可能な多脚ロボットを示す．

ロボットの身体は，異なる硬度をもつ複数のシリコンゴムによって構成され，全身に張り巡らされたワイヤーを引くことで駆動する．ワイヤーは，張力方向に対しては力を発生させるものの，それ自体は柔らかく，柔軟な身体は，柔らかさを保持したまま運動することが可能となる．これにより，ワイヤーを引くという単純な動作だけで，複雑な形状の木に巻き付くような

複雑な振る舞いが受動的に生成される．

提案した身体の機構により，制御器は，身体の多自由度を制御する必要がなく，単にワイヤーを引くという単純な動作を行うだけで良い．したがって，学習によって適切な振る舞いを容易に獲得することが可能となる．

図２および図３は，開発したロボットの制御に強化学習を適用した際に，それぞれの環境において獲得された振る舞いを示している．どちらも，同一の学習アルゴリズムを用いているにも関わらず，図２では，パイプを登る振る舞いが，図３では，平面を移動する振る舞いが，それぞれの環境に合わせて自律的に獲得されていることが分かる．また，図４は図２における学習で獲得された振る舞いを，そのまま木の枝に適用したときの様子を示しており，追学習を必要とせず，異なる未知形状の柱状物を登ることが可能であることが確認できる．この結果は，提案した枠組みでは,獲得された政策は汎化された政策であり,未知の似通った環境に対して，そのまま適用可能であることをしめしており，本研究の目的が達成されていることが確認できる．

図１　木を登るソフトロボット

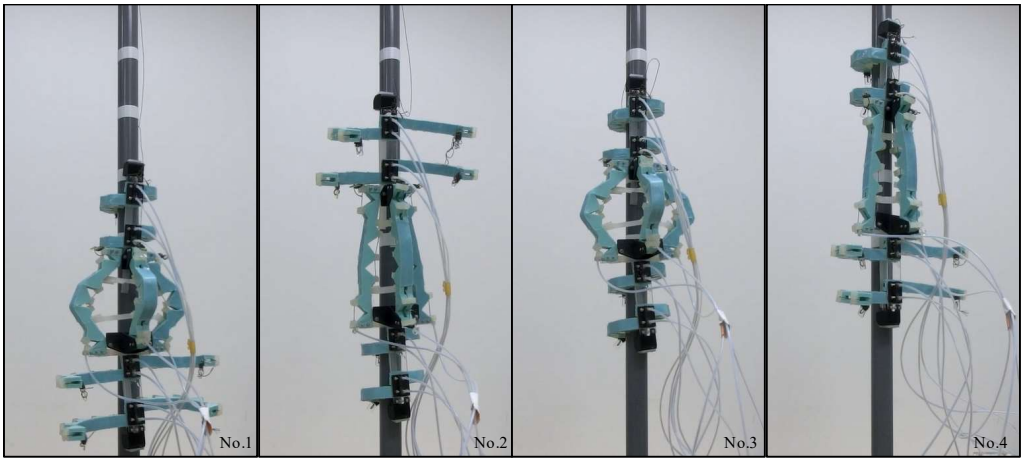

図 2 学習結果（パイプの登攀）

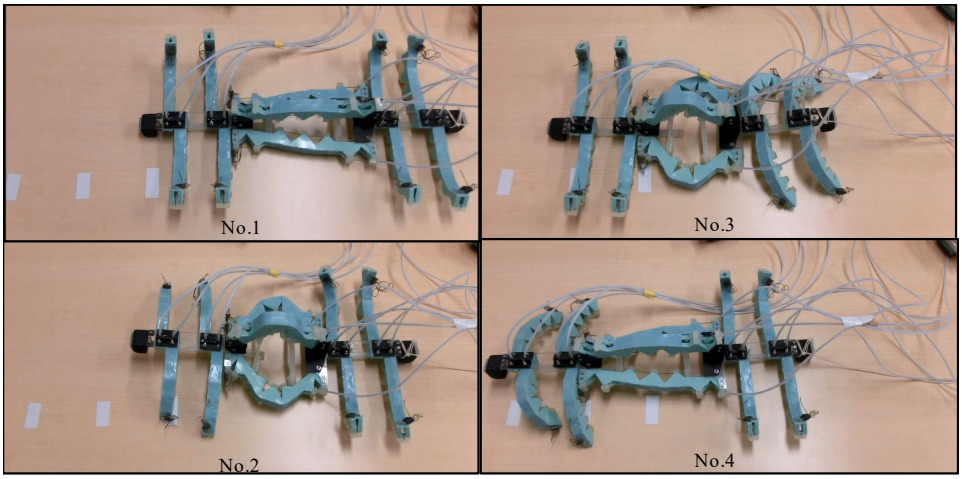

図 3 学習結果（水平面の歩容）

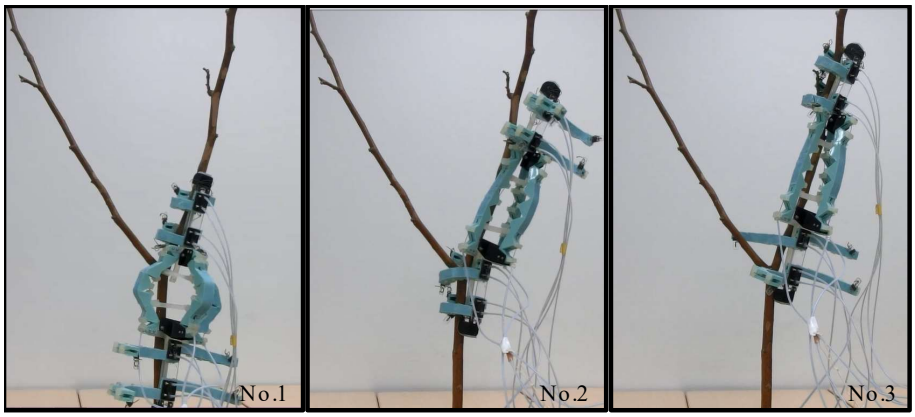

図４　獲得された政策を木の枝へ適用

５．主な発表論文等
（研究代表者は下線）

〔雑誌論文〕（計　5 件）

① K. Ito, R. Aoyagi, Y. Homma, “TAOYAKA-III : A Six-Legged Robot Capable of Climbing Various Columnar Objects”, Journal of Robotics and Mechatronics (JRM), Vol. 31, No. 1, pp. 78-87, 2019, DOI: 10.20965/jrm.2019.p0078 (査読あり)

② 佐藤祐亮, 岩津智士, 伊藤一之, 支援物資の継続的な供給を目指した災害対応システムの提案 - アリの反応閾値モデルを基にした自律分散型システム-, 知能と情報(日本知能情報ファジィ学会誌), Vol. 31, No. 1, pp. 586-591, 2019, DOI: 10.3156/jsoft.31.1_586 (査読あり)

③ 齋藤明日希, 永山和樹, 本間義大, 青柳龍志, 伊藤一之, 大道武生, 芦澤怜史, 松野文俊, 三次元環境を移動可能な多脚型ロボット-身体の柔軟性を利用した未知環境への適応-, 計測自動制御学会論文集, Vol. 54, No. 9, pp. 695-704, 2018, DOI:10.9746/sicetr.54.695 (査読あり)

④ Asuki Saito, Kazuki Nagayama, Kazuyuki Ito, Takeo Oomichi, Satoshi Ashizawa, and Fumitoshi Matsuno “Semi-Autonomous Multi-Legged Robot with Suckers to Climb a Wall”, Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 30, no.1, pp.24-32, 2018, DOI: 10.20965/jrm.2018.p0024 (査読あり)

⑤ Kazuyuki Ito, Shunsuke Hagimori “Flexible manipulator inspired by octopus: development of soft arms using sponge and experiment for grasping various objects”, Artificial Life and Robotics, Vol.22, No. 3, pp. 283-288, 2017, DOI: 10.1007/s10015-017-0360-7　(査読あり)

〔学会発表〕（計　9 件）

① T. Mukai, K. Ito, “Flexible manipulator inspired by Octopi - Comparative study of pushing and pulling mechanisms in realizing intelligent behavior”, Proc. of The Twenty-Forth International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 24th 2019), pp. 393-396, 2019（査読あり）

② M. Okino, K. Nagayama, K. Ito, T. Oomchi, S. Ashizawa, F. Matsuno, “URARAKA IV: Multi-Legged Robot with Suckers to Climb a Wall -Autonomous climbing and recovery from miss-

adsorption –", Proc. of 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (IEEE ROBIO 2018), pp. 2341-2346, 2018（査読あり）

③ K. Ito, Y. Homma, R. Aoyagi, "Generalization ability of a soft robot in reinforcement learning-Application to a soft climbing robot TAOYAKA-S II-", The Workshops sessions at the2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2018), 2018（査読なし）

④ M. Okino, K. Nagayama, K. Ito, T. Oomchi, S. Ashizawa, F. Matsuno, "URARAKA IV: Multi-Legged Robot with Suckers - Moving on ceiling – ", International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018（査読なし）

⑤ K. Ito, Y. Homma, R. Aoyagi, J. Rossiter, "TAOYAKA-S: The soft six-legged robot climbing columnar object", Proc. of International Conference on Robotics and Automation (ICRA2018), pp. 2716, 2018.（査読なし）

⑥ Kazuki Aihara, Kazuyuki Ito, "Adaptive switching mechanism of leg stiffness for multi-legged robot", Proc. of the 6th International Electrical Engineering Congress (iEECON), pp.759-762, 2018 （査読あり）

⑦ Ryushi Aoyagi, Yoshihiro Homma, Kazuyuki Ito, "Six-legged robot capable of climbing various columnar objects", Proc. of the International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), pp. 24-29, 2017 （査読あり）

⑧ Yoshihiro Homma, Ryushi Aoyagi, Kazuyuki Ito, Fumitoshi Matsuno, "Four-legged robot capable of moving in a three-dimensional environment - Developing a robot capable of climbing unknown columnar objects - ", Proc. of the International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM), 2017 （査読あり）

⑨ Yuzo Chojin, Kazuyuki Ito, "Perception using properties of the real world –Task to distinguish objects in cans–", Proc. of the International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB), pp. 288-291, 2017 （査読あり）

〔図書〕（計　１件）

① 伊藤一之「実装 強化学習 C によるロボットプログラミング」, オーム社, 2018, 総ページ数 164.

〔その他〕

ホームページ等

Intelligent Robotics Laboratory, Hosei University
https://www.youtube.com/channel/UCFLo1SPFfPIIRbfKDWYtTVA

６．研究組織

研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名：ジョナサン　ロシター

ローマ字氏名：Jonathan Rossiter

所属研究機関名：ブリストル大学

部局名：ブリストルロボット研究所

職名：教授

※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、研究者個人に帰属されます。