

令和 3 年 5 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01795

研究課題名(和文) モジュール性を有するニューロ進化に基づく創発デザインに関する研究

研究課題名(英文) Research on emergent design based on neuro-evolution with modularity

研究代表者

伊庭 斉志 (Iba, Hitoshi)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：40302773

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではモジュール性を有するニューロ進化の有用性を検証した。検証法としては、各種ベンチマーク問題に適用した進化の結果に関して階層的な繰り返し構造が得られるかを解析した。モジュール性によって、ニューロ進化の時間的な発達過程で情報が再利用でき、新しい構造を展開できると期待される。それにより、従来の人工物設計に伴う困難さ(部分解から全体の解が適切に得られない点や環境の変化にロバストに適応できない点)の解決を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで神経回路網の進化と時間発展の考えを取り入れて構築されたモデルはほとんどない。さらにこの統一的な視点にたつて人工物設計での実証研究を試みるものは極めて少ない。そのため、本研究は理論的基盤にたつてニューロ進化の枠組みをロバストな設計に応用するという学術的な特色がある。本研究により、ニューロ進化による知能創発の有効性が、ハードウェアとソフトウェアの創発デザインを通して明らかになる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we verified the usefulness of modular neuro-evolution. As a verification method, we analyzed whether a hierarchical repetitive structure can be obtained for the results of evolution applied to various benchmark problems. The modularity is expected to enable the reuse of information and the development of new structures during the temporal evolution of neural structures. In this way, we attempted to solve the difficulties associated with the design of conventional artifacts (i.e., the inability to obtain an appropriate overall solution from partial solutions and the inability to adapt robustly to changes in the environment).

研究分野：進化計算と知能創発

キーワード：進化計算 遺伝的アルゴリズム 遺伝的プログラミング ニューロ進化

1 . 研究開始当初の背景

近年、盛んに研究されているディープ・ラーニングであるが、その特徴として、ビッグデータでの大規模な計算資源が前提とされている。一方で、そのような条件(とくにビッグデータ)が伴わないような工学的問題も数多くある。たとえば、長期的な展望をもって条件判断をしなくてはならないロボットの行動計画やハードウェア・デザイン、試行錯誤を伴う問題解決などである。また時間発展を伴うプランニングに関しても、記憶の扱いが難しいためにディープ・ラーニングで十分に解決されているわけではない。

知能や機能の創発のための重要な特徴としてモジュラ性(機能的に関連した構造の統合および無関係な構造の分離)が注目されている。このメカニズムは、遺伝子制御から生体の適合度に至るまで、生物組織のさまざまなレベルで観察されている。たとえば、Hox 遺伝子(大部分の後生動物門で体節を規定するマスタ制御遺伝子)のように、活性化されると高次の構造の成長につながり、不活性のときには成長を抑制するような遺伝子集団の存在が報告されている。また、大脳において類似した性質の神経細胞が集まる円柱状の領域(皮質柱やコラム構造)が知られており、ネズミの感覚野ではヒゲの一本一本に対するコラムが存在するとされている。さらに脳の神経網では、ギャップ・ジャンクション(双方向結合)によるモチーフ構造の研究もなされている。

2 . 研究の目的

従来的人工物設計では、環境変化に対するロバスト性、誤差への柔軟な対処、部品間の精度のばらつきの調整などの課題を解決しなくてはならず、人手でかつ経験に頼った試行錯誤が不可欠であった。一方、計算機による自動設計では、(1)探索過程で構造物が複雑化して空間計算量が莫大になる、(2)構造物の機能が多様な環境変化をあらかじめ想定できない、(3)その結果得られた構造の頑強性が必ずしも高くない、などの点が指摘されていた。つまり、探索の言葉でいえば、部分解からの全体解への構成や適切な修正が必要である。そこで本研究では、**ニューロ進化のモジュラ性**の枠組みを利用して構造物を生成し、**頑強な知能創発**を実現する。ここで創発であるとは、システムの時間発展の中に情報(人工物の構造と機能)がコード化されていることを意味する。モジュラ性に基づく知能創発により、**動的な実際的な応用問題**に対しての**創発デザイン**を実現する。

進化論的手法とニューラル・ネットワークを統合するアプローチが**ニューロ進化**であり、最適なネットワークを遺伝的に探索することで、試行錯誤によるネットワークの構築を可能にする。つまり、ニューロ進化ではタスクに応じて適切なネットワーク構造・サイズ(ノードの数)を適応的に学習することが可能であり、時間発展に応じて動的にネットワークが変化する。しかしながらニューロ進化による知能創発を、ハードウェアを含む**実際的な応用領域**で検証した研究はこれまでにほとんどない。

知能創発のための重要な特徴は**モジュラ性**である。モジュラ性が適切に作用することで、環境内の物理的・化学的变化から遺伝的変容などのランダムな変異に対して機能を維持しつつ、部分解から新奇の機能を獲得して新しい環境にも適応する。

本研究では、ニューロ進化の時間発展を**非線形力学系**や**代数学的手法**に基づいて解析することにより創発デザインのために必要なモジュラ性を制御し、的確な機能の創発を実現する。すなわち、人工物設計における、部分解からの全体解を適切に構成・修正する枠組みを構築するのが目的である。

3. 研究の方法

本研究では、**ニューロ進化**に基づいた知能創発のメカニズムを提案する。研究の目標は、進化計算とニューラルネットを用いたニューロ進化の理論的解析と、人工物設計のための枠組み(創発デザイン)の構築である。より詳細には以下の項目を実験的に検証することである。

- **スケーラビリティ**：多様な構造を少ない情報から表現できる。
- **モジュラ性**：発達過程で情報が再利用でき、新しい構造を展開できる。

提案手法は、理論的な基盤として、**力学系解析**や**代数的手法**を用いてニューロ進化の時間発展メカニズムを解析し、**モジュラ性**(機能的に関連した構造の統合と無関係な構造の分離)を制御する。モジュラ性は人工物の的確な機能を生成するための重要な特徴である。この研究においては統計と最適化を用いた最適構造の探索、および力学系の解析による時間発展メカニズムの解明を目的にする。さらに、提案するニューロ進化の有効性を、(1) **探索の効率性**、(2) **スケーラビリティ**、(3) **実領域問題への適用可能性**、の3点を重視して多数の実応用領域で検証する。

4. 研究成果

本研究ではモジュラ性を有するニューロ進化の有用性を検証した。検証法としては、各種ベンチマーク問題に適用した進化の結果に関して階層的な繰り返し構造が得られるかを解析した。モジュラ性によって、ニューロ進化の時間的な発達過程で情報が再利用でき、新しい構造を展開できると期待される。それにより、従来の人工物設計に伴う困難さ(部分解から全体の解が適切に得られない点や環境の変化にロバストに適應できない点)の解決を試みた。この点に関して、具体的には(1) 関数回帰のための代数的手法の構築、(2) ヒューマノイドロボットの動作生成、(3) 群ロボットによる協調搬送、(4) 音楽生成における潜在変数モデルの探索、(5) X線画像による危険物検知の5つの項目について実験的に検証した。

与えられたデータ点からその生成モデルとなる関数を推定する問題は、関数回帰と呼ばれており、広い分野にわたり登場する。ニューロ進化におけるモジュール性の同定においても関数回帰に帰着できる問題が数多くある。本研究では、代数的手法に基づいてこの問題を解決する枠組みを提案した。関数回帰における本質的な問題は、与えられる有限のデータ点を生成するモデルが無数に存在するという点である。従って、モデルを固定しそのパラメタを推定する場合は、その無数の解のうちの一つ、あるいはごく一部しか発見できない。またそのようにして発見される解は、仮定したモデルの形に強く依存するため、適切なモデルに関する事前の知識が求められる。進化計算やニューロ進化において頻繁に利用される遺伝的プログラミングでは、モデルを含めて解の探索を行うため、モデルに関する事前の知識をほとんど必要としない。また、複数の解を同時に探索・提示できるという利点もあり、関数回帰の強力な手法として広く利用されている。本研究では、関数回帰において新たなイントロン(発現しない遺伝子型上の表現構造)を定義できることに注目した。関数回帰問題では入力としてデータ点が与えられる。このデータ点を代入した場合に常に0となるような部分木は、データ点上における関数の振る舞いに一切の効果を持たない。このような部分木をカーネルイントロンと呼ぶ。本研究では、多項式回帰において、このカーネルイントロンを取り除く代数的手法を提案した。これにより、ブロー現象(探索過程において構造の計算量が指数関数的に増大する現象)が抑制され、効率的な解の探索が可能になった。また最終的に出力される解が過度に複雑になるのを避けるのも可能になった。カーネルイントロンの除去は、データ点から計算された消失イデアルの基底を用いて、GPにおける関数を除することで行われている。提案手法は、ハイパーパラメタの経験的な調整を必要とせず、入力データ点から簡約の操作が自動的に決定される点にお

いても優れている。この問題の解法は機械学習においても入出力関係を明示的に記述する手法として有望であり、ニューロ進化の研究発展に寄与する。また進化計算や深層学習に対する上述のような代数的なアプローチはこれまでの研究にはほとんどなく、今後の発展が期待できる。

ヒューマノイドロボットの検証実験ではモジュール性を有するニューロ進化の有用性を確認することができた。より詳しく言えば、従来困難とされていたバク転やローラーコースターでの滑り動作を遺伝子ネットワークのニューロ進化に基づいて合成し、実機上で安定して動作することを検証できた。さらに実験の結果、地面の凹凸にかかわらず、前方に歩行して進めるような動作を生成することに成功した。この不整地歩行実験に関しての報酬はベースタスクと同じものを用いていた。それにもかかわらず、ニューロ進化を用いた場合の最終的な不整地歩行動作の成績が平地でのベース歩行動作における9割以上の成績になっていた。したがって、地面の凹凸に影響を受けない歩行動作を学習できたと考えられる。これは、ロボット前方の地形情報やロボットの向きといった新たな入力を基にして、ベースとなる動作制御を的確に改変できたことを示唆している。また、ベースとなる動作モジュールの入力状態に新しい情報を加えてニューロ進化を用いると、もとの制御器の出力を活かしながらより少ないエピソード数で高い成績を収めるのに成功しているのが分かった。したがって、モジュール構造を的確に利用することにより不整地歩行動作の効率的な生成が可能になっている。

また、モジュール性を有するニューロ進化とサブサンプレションアーキテクチャの考え方を組み合わせることで、ヒューマノイドロボットの全身動作を効率的に生成する手法を提案した。実験として、歩行動作の「不整地歩行動作」、「方向指定歩行動作」、「ほうき掃き動作」への拡張に成功し、本手法の有効性を示すことができた。さらにさまざまな動作の生成例から、新規モジュールにニューラルネット以外の制御器を混ぜて全体の動作を生成することも可能であるのがわかった。

群ロボットによる協調搬送の研究では、ロボットにとって未知の環境において自律的にタスクが完了することを目指した。より詳細には、自己組織化されたロボット群が的確にOBP(Occlusion-based pushing)を達成できるように学習を行った。従来の方法では、このタスクを達成できるのはオープンスペースのみであり、手動でロボットを誘導することが必要であった。本研究では、OBP手法を様々なロボット群に実装し、ニューロ進化のモジュール性に基づく制御法の有効性を検証した。

具体的には、未知の環境でエージェントが協力して目的地に向かって物体を押しという実験を行った。V-REPシミュレーションの結果から、既存の手法と比較して、提案方法は速度と信頼性の点で効果的であることが明らかになった。さまざまな実験を行った結果、モジュール性のあるニューロ進化によるロボット群が複雑な環境下で協力して物体を回収できることを実証した。さらに、提案手法に基づく群ロボットは、チームのメンバがミスを犯した後に自分たちを再編成するという印象的な行動も示していた。

音楽生成はユーザの好みに合致するような構造的データを探索する最適化問題の 1 つとして考えられる。本研究の目的は、対話的進化計算(IEC: Interactive evolutionary computation)に基づく音楽生成において、ニューロ進化のモジュール性を用いて潜在変数モデルの探索空間を制約し探索を効率化させることである。近年、DAW(Digital Audio Workstation) ソフトウェアなどコンピュータ上での音楽制作環境の進歩に伴い、素人でも比較的容易にプロ同様の環境で作曲ができるようになった。しかしながら、作曲作業そのものは未だにすべて手動で行われている。対話的進化を用いた音楽生成によって作曲作業を部分的に自動化することで、音楽制作をより気軽に身近なものにできる。さらに、プロの音楽家にとっても予想外の出力をする確率論的な性質は魅力的なツールとなり得ると考えられる。

音楽についてより優れた遺伝子表現を提案し IEC による音楽生成を改善することは、上述の観点から有意義である。本研究では VAE(Variational AutoEncoder)が音楽データから学習した潜在変数をニューロ進化の遺伝子として扱う。進化計算において問題のエンコーディングは探索の性能に大きく影響する。一般に進化計算においては優れた形質を持った個体同士の染色体は似通った構造になることが好ましいが、VAE によって獲得された潜在変数についてもこのような性質が見られる。そのために本研究では、VAE によってモデル化された潜在空間を適切に探索するためにモジュール構造を有するニューロ進化を設計した。

本研究ではドラムパターンとメロディの生成を扱った。従来手法では特定ジャンルの音楽に対象を絞り、そのジャンルの音楽に関する知識を駆使し、遺伝的操作や木構造に工夫をしなければならなかった。一方、提案する手法では、どのようなジャンル・形式の音楽でも単変数の時系列データで表現できれば同じように扱うことができる。評価実験の結果をもとにして、本手法の音楽生成における有用性を実験的に検証した。さらに、VAE の潜在空間を IEC の遺伝子 (= ニューロ進化のモジュール構造) とすることで、音楽空間における効率的な探索を実現しユーザの好みに合致する音楽生成を可能にした。

X線画像による危険物検知については、ペットボトル、ナイフ、はさみなどの危険物の検出率をニューロ進化に基づいて従来手法から向上させることに成功した。これは自然画像で得られる訓練データでの学習結果を X 線画像の認識に適応して学習させるという転移学習の枠組に基づいている。ニューロ進化を転移先のドメインでの再学習に適用することで、X線画像のような訓練例の少ない分野での画像認識を可能にする枠組を提案した。従来手法による結果と比較して、モジュール性を利用したニューロ進化では mAP の値を優位に改善するネットワーク構造が得られた。また、危険物を実際に検出できた件数である True Positive は増加した。さらに、誤って危険物以外の物体を検出した件数である False Positive は減少し、誤って危険物を検出しなかった(見逃した)件数である False Negative も減少した。したがって危険物検出のタスクにおいては Recall, Precision とともに改善され、性能が有意に向上したことになる。

本提案手法で得られた最終世代の個体のネットワーク構造を見ると、中間の層から、最終層に近い側の入力を持つ層に向かってバイパスが伸びていた。これは医療画像のセグメンテーションにおいて成果を上げた U-Net に類似した U 字型の構造である。大きい特徴マップを持つ層からの出力を、小さい特徴マップを持つ層にバイパスすることで、小さい物体を検出しやすくする作用があると考えられる。このように、従来はマニュアルで構成したモジュール構造が進化の結果得られたことは、本提案手法の有効性を確認するものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Yoshihiko Hasegawa	4. 巻 98
2. 論文標題 Thermodynamics of Collective Enhancement of Precision	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 32405
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 Yoshihiko Hasegawa	4. 巻 97
2. 論文標題 Multidimensional Biochemical Information Processing of Dynamical Patterns	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 22401
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 Hasegawa Yoshihiko	4. 巻 97
2. 論文標題 Multidimensional biochemical information processing of dynamical patterns	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 22401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physreve.97.022401	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 Hasegawa Yoshihiko, Van Vu Tan	4. 巻 123
2. 論文標題 Fluctuation Theorem Uncertainty Relation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 110602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.123.110602	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 Kera Hiroshi, Hasegawa Yoshihiko	4. 巻 7
2. 論文標題 Spurious Vanishing Problem in Approximate Vanishing Ideal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 178961 ~ 178976
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2958648	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 Tran Quoc Hoan, Hasegawa Yoshihiko	4. 巻 99
2. 論文標題 Topological time-series analysis with delay-variant embedding	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 32209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.032209	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Naotake Masuda, Hitoshi Iba
2. 発表標題 Musical Composition by Interactive Evolutionary Computation and Latent Space Modeling
3. 学会等名 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2018, Miyazaki, Japan, October 7-10, 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hossein Izadi Rad, Ji Feng, Hitoshi Iba
2. 発表標題 GP-RVM: Genetic Programming-Based Symbolic Regression Using Relevance Vector Machine
3. 学会等名 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2018, Miyazaki, Japan, October 7-10, 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lekang Zou, Tanaka Yusuke and Iba Hitoshi
2. 発表標題 Dangerous objects detection of x-ray images using convolution neural network
3. 学会等名 SICBS 2018 : 2nd International Conference on Security with Intelligent Computing and Big-data Services (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Landaez, Ysmaldo Dohi, Hiroshi Iba, Hitoshi
2. 発表標題 Swarm Intelligence for Object Retrieval Applying Cooperative Transportation in Unknown Environments
3. 学会等名 ICRAI 2018: the 4th International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satish Kumar Jaiswal, Hitoshi Iba:
2. 発表標題 Coevolution of mapping functions for linear SVM
3. 学会等名 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kera,H. and Hasegawa,Y.
2. 発表標題 Approximate Vanishing Ideal via Data Knotting
3. 学会等名 Te Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀場貴裕, 伊庭斉志
2. 発表標題 パラメトリック遺伝的プログラミング
3. 学会等名 進化計算シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楊突, 伊庭斉志
2. 発表標題 遺伝的アルゴリズムを用いた誤判定音声合成
3. 学会等名 進化計算シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木一弘, 伊庭斉志
2. 発表標題 動的環境最適化におけるAffinity Propagationを用いた粒子群最適化
3. 学会等名 進化計算シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 海内映吾, 伊庭斉志
2. 発表標題 進化計算を用いた時間依存型確率的化学反応の推定
3. 学会等名 進化計算シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoyuki Kawabata, Hitoshi Iba
2. 発表標題 Evolving Humanoid Robot Motions Based on Gene Regulatory Network
3. 学会等名 4th IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics, ICARM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計5件

1. 著者名 Hitoshi Iba	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 245
3. 書名 Evolutionary Approach to Machine Learning and Deep Neural Networks: Neuro-Evolution and Gene Regulatory Networks	

1. 著者名 伊庭 斉志	4. 発行年 2018年
2. 出版社 株式会社オーム社	5. 総ページ数 224
3. 書名 ゲームAIと深層学習	

1. 著者名 伊庭斉志	4. 発行年 2017年
2. 出版社 株式会社オーム社	5. 総ページ数 240
3. 書名 人工知能の創発	

1. 著者名 Hitoshi Iba	4. 発行年 2019年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 262
3. 書名 AI and Swarm: Evolutionary approach to emergent intelligence	

1. 著者名 伊庭 斉志	4. 発行年 2019年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 264
3. 書名 深層学習とメタヒューリスティクス	

〔産業財産権〕

〔その他〕

伊庭研究室 http://www.iba.k.u-tokyo.ac.jp/
--

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
研究 分 担 者	長谷川 禎彦 (Hasegawa Yoshihiko) (20512354)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授 (12601)	

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