

令和 4 年 5 月 9 日現在

機関番号：13301
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19K12136
研究課題名（和文）樹状突起ニューロンによる非線形的フィルターをもつ畳み込みニューラルネットワーク
研究課題名（英文）Convolutional neural network with non-linear filters by dendrite neurons
研究代表者
唐堂 由其（Todo, Yuki）
金沢大学・電子情報通信学系・准教授
研究者番号：70636927
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）：本研究は現在の畳み込みニューラルネットワークにおける画像の局所的な特徴抽出を担う畳み込み層に非線形な特性を利用することにより、回転やアフィン変換のような、より複雑な変化に対する不変性が実現できる非線形的フィルターを実現した。更に、樹状突起ニューロンを用いた超非線形畳み込みニューラルネットワークの実装を行った。本研究で提案した非線形的畳み込みニューラルネットワークを実装し、その動作を確認した。最後に、金沢医科大学からの糖尿病系球体顕微鏡画像の生データを使い、本研究で提案した非線形的畳み込みニューラルネットワークで糖尿病性病変の診断への有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した非線形的畳み込みニューラルネットワークが神経細胞樹状突起の構造まで予測できたことから、脳の高次視覚野における神経細胞樹状突起のより詳細な手がかり（シナプスの種類や位置や樹状突起の形状など）を得ることにより、脳の動作原理の理解・解明に道を開くことが大いに期待できる。更に、本研究で提案した非線形的畳み込みニューラルネットワークが一次視覚野に特定の傾きの輪郭に反応する方位選択細胞を検証し、全方位的に細かい方位特徴でも抽出することができた。これにより医療診断においてもガン細胞の二次元的かつ全方位的な病変部を明確・効率よく認識できることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study introduced new non-linear characteristics into filters of the convolutional layer, which is responsible for local feature extraction of images in current convolutional neural networks, to realize non-linearity for more complex changes such as rotation and affine transformation. Furthermore, we implemented a super-nonlinear convolutional neural network using dendrite neurons. We implemented the nonlinear convolutional neural network proposed in this study and confirmed its operation. Finally, using the raw data of diabetic glomerular microscopic images from Kanazawa Medical University, we confirmed the effectiveness of the non-linear convolutional neural network proposed in this study for the diagnosis of diabetic lesions.

研究分野：脳型情報処理

キーワード：畳み込みニューラルネットワーク 神経細胞樹状突起 脳の動作原理 方位選択細胞 全方位的な病変部

1. 研究開始当初の背景

一般物体認識(一般画像認識)とは、制約のない実世界画像を言葉によって説明するタスクであり、古くから人工知能の究極的な問題の一つとされてきた。現在、畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional Neural Network)をはじめとする深層学習(ディープラーニング)はさまざまな機械学習タスクで驚異的な性能を実現していて、画像認識分野における躍進は研究業界のみならず広く一般的に大きなインパクトを与え、現在の人工知能ブームの顔になっている。しかし、現在の畳み込みニューラルネットワーク(CNN)における画像の局所的な特徴抽出を担う各畳み込み層(フィルター)では、単純な線形荷重和が用いられているため、特徴の微小平行移動に対する不変性は実現できるが、回転やアフィン変換のように、より複雑な変化に対する不変性は実現できない。そのため、現時点では画像の世界最高精度である73.1%の認識率でも、医用画像によるガンなどの難病診断においてはトップクラスの医師の79%には勝てない。

更に、深層学習の父と呼ばれるカナダトロント大学のHinton教授は、現在の畳み込みニューラルネットワーク(CNN)が既に重大な限界に直面していると警告している(Is AI Riding a One-Trick Pony?, MIT Technology Review, 2017)。

一方、脳科学の進展により神経細胞の樹状突起におけるシナプス間の非線形的相互作用に関する詳細な機構が判明しつつあるが、現在の畳み込みニューラルネットワークにはまだ導入に成功していない。このような知見を取り入れることにより、より高機能な認識機構などを実現できる可能性があり、問題解決の糸口を見つけ出すことが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、従来のMcCulloch & Pittsニューロンモデルに比べ、忠実かつ非線形的計算能力をもつ樹状突起ニューロンモデル(基盤研究(C)(2014-2017)により申請者の提案・実用化)を用いて、新しい非線形的フィルターをもつ畳み込みニューラルネットワークを構築する。具体的には、現在の畳み込みニューラルネットワークにおける特徴抽出機能(畳み込み層)を非線形的な特性をもつシナプスと樹状突起におけるシナプス間の非線形相互作用を考慮した樹状突起ニューロンモデルで実現し、非線形的な特徴抽出や論理的な特徴抽出などの機能を持たせる。このことにより、画像認識の性能を格段に向上させるだけでなく、革新的な医学診断や自然言語処理などの応用が可能となる。更に霊長類の脳の高次視覚野の再現が期待できる。

更に、本研究は従来のMcCulloch & Pittsモデルより忠実かつ高機能、より人間の認知モデルに近い樹状突起ニューロンモデル(DNM)技術を現在の畳み込みニューラルネットワーク(CNN)に取り込み、非線形的な特徴抽出機能や論理的な特徴抽出機能などの非線形的計算能力を持たせることができる。それは、一般物体認識の性能を向上させるより良い特徴を効率よく見つけ、画像の認識率を格段に向上させるだけでなく、医学診断や自然言語処理・推論などの汎用的な応用を広げ、更に脳の動作原理の理解・解明につなげる波及効果もある。

- 現在の畳み込みニューラルネットワーク(CNN)の枠組みでは位置不変性を獲得しているに留まり、位相不変性を実現する仕組みが備わっていない。しかも、その位相不変性

を実現する手法に関する研究はまだなされていないのが現状である。

- 本研究は、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) における位相不変性の実現に着目し、樹状突起ニューロンモデル (DNM) を用いて、回転やアフィン変換のような、より複雑な変化に対する位相不変性が実現できる非線形的フィルターを実現することによって、現在の人工知能で世界最高認識率の73.1%より、また、人間の専門家が認識できる認識率 (79%) よりも更に精度を向上させることを目標としている。
- 更に、樹状突起ニューロンモデル (DNM) は、神経細胞樹状突起の構造まで予測できることから、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) への適用により、脳の高次視覚野における神経細胞樹状突起のより詳細な手がかり (シナプスの種類や位置や樹状突起の形状など) を得ることにより、脳の動作原理の理解・解明に道を開くことが大いに期待できる。

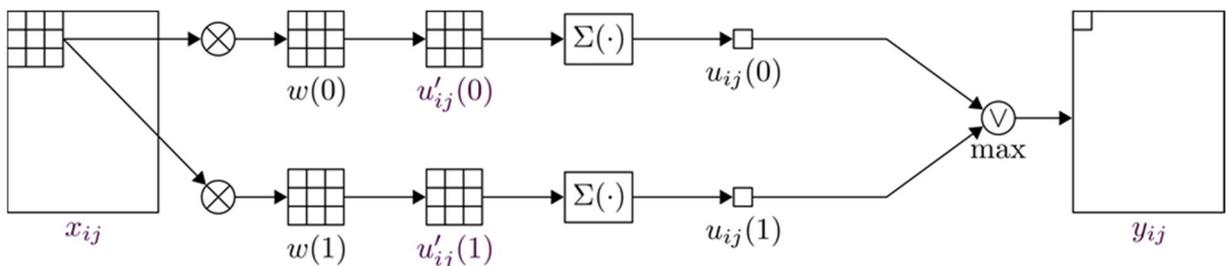
3. 研究の方法

現在の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) は古典的なMcCulloch & Pittsニューロンモデルを用いる多層のパーセプトロンの延長にあり、中に、画像の局所的な特徴抽出を担う各畳み込み層が最も中心的な役割を果たしている。その畳み込み層 (図 1 (a)) では、画像の画素とフィルターの画素の相関 (画素値の積) を空間的線形荷重和だけを考慮した一層のパーセプトロンを用いる。

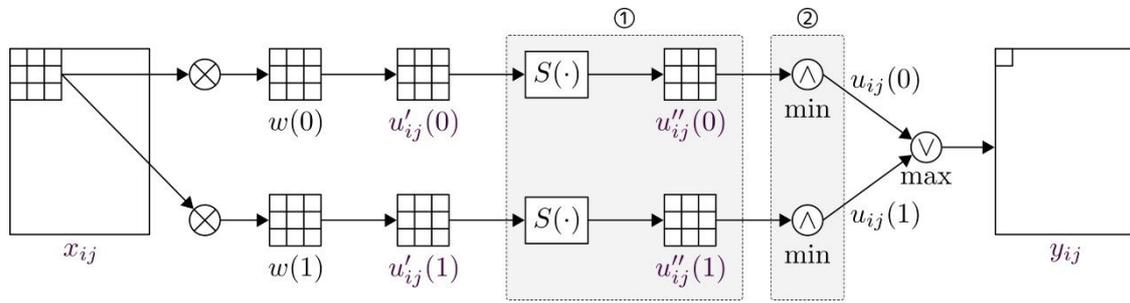
本研究では、申請者が提案した非線形な特性をもつシナプスと樹状突起におけるシナプス間の非線形相互作用を考慮した樹状突起ニューロンモデル (DNM: Dendritic Neuron Model) を用いて、非線形的畳み込みニューラルネットワークを構築する。具体的には、

(1) 現在の畳み込みニューラルネットワークにおける画像の局所的な特徴抽出を担う畳み込み層に申請者が提案したシナプスが持つ非線形な特性を利用し、画像の画素とフィルターの画素の相関 (画素値の積) を空間的線形荷重とし、その後非線形シグモイド関数 ($S(\cdot)$) を適用する (図 1 (b));

(2) 隣接する画素の相関性から、非線形処理後の画像の画素とフィルターの画素の相関 (画素値の積) を申請者が提案した樹状突起におけるシナプス間の非線形相互作用を利用し、更に掛け算 (\min) とすることにより、回転やアフィン変換のような、より複雑な変化に対する不変性が実現できる非線形的フィルターを実現する (図 1 (b))。



(a) 現在の線形的フィルター構造



(b) 提案する非線形的フィルター構造

(c)

図1 . 畳み込み層での1チャンネル、2フィルター（3×3）に関する計算内容

(3)樹状突起ニューロンを用いた超非線形的フィルターを構築し、線形的フィルターの左右の直線的なものだけに強い反応があるのに対し、非線形的フィルターでは、上下左右を問わずより全方向的に細かい特徴でも抽出できることを確認したうえ、医療診断においてもガン細胞の二次元的かつ全方向的な病変部を明確・効率よく認識できることを明らかにする。

(4)提案の非線形フィルターを用いて、現在の畳み込みニューラルネットワークと同様に、非線形フィルターを用いた畳み込み層と現在のプリーング層の順に、複数回繰り返すことによって構成される非線形的畳み込みニューラルネットワークを実装し、その動作を確認した上で、現在の畳み込みニューラルネットワークと性能やコストなどの面から比較研究を行い、更に画像認識への有効性を確認した上で、医療画像診断システムに適用する。

4 . 研究成果

(1) 本研究は、申請者が提案した非線形な特性をもつシナプスと樹状突起におけるシナプス間の非線形相互作用を考慮した樹状突起ニューロンモデル (DNM: Dendritic Neuron Model) を用いて、非線形的フィルターの構築を図った。具体的には、

現在の畳み込みニューラルネットワークにおける画像の局所的な特徴抽出を担う畳み込み層に申請者が提案したシナプスが持つ非線形な特性を利用し、画像の画素とフィルターの画素の相関（画素値の積）を空間的線形荷重とし、その後非線形シグモイド関数（ $S(\cdot)$ ）を適用した；

隣接する画素の相関性から、非線形処理後の画像の画素とフィルターの画素の相関（画素値の積）を申請者が提案した樹状突起におけるシナプス間の非線形相互作用を利用し、更に掛け算（ \min ）とした。

更に、樹状突起ニューロンモデル (DNM: Dendritic Neuron Model) の非線形特性を確認するため、モデルから学習アルゴリズムまでシミュレーションなどを行い、その成果としてニューラルネットワークの分野において最も権威のある学術雑誌である International Journal of Neural Systems に発表した (Neurons with Multiplicative Interactions of Nonlinear Synapses, Yuki Todo, Zheng Tang, Hiroyoshi Todo, Junkai Ji and Kazuya Yamashita, 29巻、8号、1950012-1950029 頁、2019/05)

最後に、非線形フィルターの優位性を検証するため、線形的フィルターで正しく検出できない運動方向検出問題に対し、非線形的フィルターを用い、上下左右を問わずよ

り全方位的運動方向検出に成功した。

- (2) 本研究は現在の畳み込みニューラルネットワークにおける画像の局所的な特徴抽出を担う畳み込み層に非線形な特性を利用し、回転やアフィン変換のような、より複雑な変化に対する不変性が実現できる非線形的フィルターを実現した。更に、樹状突起ニューロンを用いた超非線形畳み込みニューラルネットワークの実装を行った。具体的に、樹状突起ニューロンを用いた非線形フィルターを用いて、現在の畳み込みニューラルネットワークと同様に、非線形フィルターを用いた畳み込み層と現在のプーリング層の順に、複数回繰り返すことによって構成される非線形的畳み込みニューラルネットワークを実装し、その動作を確認した。また、それを現在の畳み込みニューラルネットワークと性能やコストなどの面から比較研究を行った。
- (3) 本研究で提案した非線形的畳み込みニューラルネットワークで画像認識への有効性を確認した上で、一次視覚野に特定の傾きの輪郭に反応する方位選択細胞を検証した。実験結果から、 135° の理想な直線に対し、 135° 方位検出細胞のみに強い反応があるのに対し、同様な 135° の棒に対し、上下(90°)左右(0°)、 45° 、 135° を問わずより全方位的に細かい方位特徴でも抽出することができた。これにより医療診断においてもガン細胞の二次元的かつ全方位的な病変部を明確・効率よく認識できることが期待される。更に、本研究で提案した非線形的畳み込みニューラルネットワークを実装し、その動作を確認した上で、実際の画像診断に適用し、臨床医との共同研究で従来のCNNと性能やコストなどの面から比較研究を行った。最後に、金沢医科大学からの糖尿病系球体顕微鏡画像の生データを使い、本研究で提案した非線形的畳み込みニューラルネットワークで糖尿病性病変の診断への有効性を確認した。本研究は、それらを用いた糖尿病性腎症の早期病理変化の解明を目的とした。また、現状の病理標本は、得られた組織のうち切り出された一部を観察するのみで、大部分の病理組織標本は観察されなかったり、標本作成過程で破棄されたりすることが多かったため、本研究では病理解析の必要性を認識し具体的な目標を持った研究者と、病理標本作成に長けた病理医および臨床医との協力を得ながら、糖尿病性腎症早期病変の発生・進展機序を、立体病理像を用いて解析することが可能であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ji Junkai, Tang Yajiao, Ma Lijia, Li Jianqiang, Lin Qiuzhen, Tang Zheng, Todo Yuki	4. 巻 6
2. 論文標題 Accuracy Versus Simplification in an Approximate Logic Neural Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems	6. 最初と最後の頁 1~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNNLS.2020.3027298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Wang Shi, Yu Yang, Zou Lin, Li Sheng, Yu Hang, Todo Yuki, Gao Shangce	4. 巻 8
2. 論文標題 A Novel Median Dendritic Neuron Model for Prediction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 192339~192351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.3032948	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Song Zhenyu, Tang Yajiao, Ji Junkai, Todo Yuki	4. 巻 201-202
2. 論文標題 Evaluating a dendritic neuron model for wind speed forecasting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Knowledge-Based Systems	6. 最初と最後の頁 106052~106052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.knosys.2020.106052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Qian Xiaoxiao, Tang Cheng, Todo Yuki, Lin Qiuzhen, Ji Junkai	4. 巻 2020
2. 論文標題 Evolutionary Dendritic Neural Model for Classification Problems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Complexity	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2020/6296209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tang Cheng, Ji Junkai, Tang Yajiao, Gao Shangce, Tang Zheng, Todo Yuki	4. 巻 92
2. 論文標題 A novel machine learning technique for computer-aided diagnosis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Applications of Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 103627 ~ 103627
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engappai.2020.103627	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Xiaosi, Cai Zonghui, Wang Yirui, Todo Yuki, Cheng Jiujun, Gao Shangce	4. 巻 8
2. 論文標題 TDSD: A New Evolutionary Algorithm Based on Triple Distinct Search Dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 76752 ~ 76764
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.2989029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Yirui, Gao Shangce, Yu Yang, Wang Ziqian, Cheng Jiujun, Yuki Todo	4. 巻 8
2. 論文標題 A Gravitational Search Algorithm With Chaotic Neural Oscillators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 25938 ~ 25948
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.2971505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Zhe, Gao Shangce, Wang Jiaxin, Yang Haichuan, Todo Yuki	4. 巻 2020
2. 論文標題 A Dendritic Neuron Model with Adaptive Synapses Trained by Differential Evolution Algorithm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Intelligence and Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2020/2710561	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Yirui, Gao Shangce, Yu Yang, Wang Ziqian, Cheng JiuJun, Yuki Todo	4. 巻 8
2. 論文標題 A Gravitational Search Algorithm With Chaotic Neural Oscillators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 25938 ~ 25948
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.2971505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhe Wang, Shangce Gao, Jiaying Wang, Haichuan Yang, and Yuki Todo	4. 巻 2020
2. 論文標題 A Dendritic Neuron Model with Adaptive Synapses Trained by Differential Evolution Algorithm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Intelligence and Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2020/2710561	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Yu, Shangce Gao, Yirui Wang, Zhenyu Lei, JiuJun Cheng, and Yuki Todo	4. 巻 7
2. 論文標題 A multiple diversity-driven brain storm optimization algorithm with concrete structure and adaptive parameters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 126871 - 126888
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2939353	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shuangyu Song, Xingqian Chen, Cheng Tang, Shuangbao Song, Zheng Tang, and Yuki Todo	4. 巻 7
2. 論文標題 Training an Approximate Logic Dendritic Neuron Model Using Social Learning Particle Swarm Optimization Algorithm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 141947 - 141959
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2944682	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yajiao Tang, Junkai Ji, Yulin Zhu, Shangce Gao, Zheng Tang, and Yuki Todo	4. 巻 2019
2. 論文標題 A differential evolution-oriented pruning neural network model for bankruptcy prediction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Complexity	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2019/8682124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xiaoxiao Qian, Yirui Wang, Shuyang Cao, Yuki Todo, and Shangce Gao	4. 巻 2019
2. 論文標題 Mr2DNM: A Novel Mutual Information-based Dendritic Neuron Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Intelligence and Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2019/7362931	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuki Todo, Zheng Tang, Hiroyoshi Todo, Junkai Ji and Kazuya Yamashita	4. 巻 29
2. 論文標題 Neurons with Multiplicative Interactions of Nonlinear Synapses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Neural Systems	6. 最初と最後の頁 1950012-1950029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0129065719500126	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Zhenyu Han, Jiarui Shi, Yuki Todo, and Shangce Gao
2. 発表標題 Training Dendritic Neuron Model with Whale Optimization Algorithm for Classification
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC-2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Pengxing Cai, Haichuan Yang, Yu Zhang, Yuki Todo, Zheng Tang, and Shangce Gao
2. 発表標題 A Sine Cosine Algorithm Enhanced Spherical Evolution for Continuous Optimization Problems
3. 学会等名 2020 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jiarui Shi, Jia Yu, Chiyun Lee, Yuki Todo, and Shangce Gao
2. 発表標題 A Hybrid Spherical Search and Whale Optimization Algorithm
3. 学会等名 2020 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Linfeng Du, Yu Zhang, Syuhei Sato, Yuki Todo, Zheng Tang, and Shangce Gao
2. 発表標題 Differential Evolution-Based Wingsuit Flying Search for Optimization
3. 学会等名 2020 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhen Li, Haichuan Yang, Zhiming Zhang, Yuki Todo, and Shangce Gao
2. 発表標題 Spherical Evolution Enhanced with Salp Swarm Algorithm
3. 学会等名 2020 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sicheng Liu, Sichen Tao, Haichuan Yang, Lin Jiang, Yuki Todo, and Shangce Gao
2. 発表標題 Using Grey Wolf Hunting Mechanism to Improve Spherical Search
3. 学会等名 2020 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jiaru Yang, Yu Zhang, Ziqian Wang, Yuki Todo, and Shangce Gao
2. 発表標題 Wingsuit Flying Search Enhanced by Spherical Evolution
3. 学会等名 The 15th International Conference on Bio-inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Zhang, Zhenyu Lei, Zhiming Zhang, Yuki Todo, Zheng Tang, and Shangce Gao
2. 発表標題 A Spherical Search-based Archive Update Mechanism for Self-adaptive Differential Evolution
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhiming Zhang, Zhenyu Lei, Yu Zhang, Yuki Todo, Zheng Tang, and Shangce Gao
2. 発表標題 A Hybrid Spherical Evolution and Particle Swarm Optimization Algorithm
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 发表者名 Zhe Wang, Haichuan Yang, Ziqian Wang, Yuki Todo, Zheng Tang, and Shangce Gao
2. 发表标题 A Novel Spherical Search Based Grey Wolf Optimizer for Optimization Problems
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS 2020) (国际学会)
4. 发表年 2020年

1. 发表者名 Qianqian Li, Yang Yu, Ziqian Wang, Yuki Todo, and Shangce Gao
2. 发表标题 Improved Teaching-Learning-based Optimization Algorithm with Advanced Learning Strategy
3. 学会等名 2020 12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC 2020) (国际学会)
4. 发表年 2020年

1. 发表者名 Qianqian Li, Yang Yu, Ziqian Wang, Yuki Todo, and Shangce Gao
2. 发表标题 A Novel Brain Storm Optimization Algorithm Driven by Sine-Cosine Search Mechanism
3. 学会等名 2020 12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC 2020) (国际学会)
4. 发表年 2020年

1. 发表者名 Sichen Tao, Kaiyu Wang, Zhiming Zhang, Chiyan Lee, Yuki Todo, and Shangce Gao
2. 发表标题 A Hybrid Spherical Search and Moth-flame Optimization Algorithm
3. 学会等名 2020 12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC 2020) (国际学会)
4. 发表年 2020年

1. 発表者名 Kaiyu Wang, Sichen Tao, Zhiming Zhang, Yuki Todo, and Shangce Gao
2. 発表標題 A Hybrid Spherical Search and Sine Cosine Algorithm
3. 学会等名 2020 12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Zhang, Zhenyu Lei, Zhiming Zhang, Yuki Todo, Zheng Tang, and Shangce Gao
2. 発表標題 A Spherical Search-based Archive Update Mechanism for Self-adaptive Differential Evolution
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhiming Zhang, Zhenyu Lei, Yu Zhang, Yuki Todo, Zheng Tang, and Shangce Gao
2. 発表標題 A Hybrid Spherical Evolution and Particle Swarm Optimization Algorithm
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhe Wang, Haichuan Yang, Ziqian Wang, Yuki Todo, Zheng Tang, and Shangce Gao
2. 発表標題 A Novel Spherical Search Based Grey Wolf Optimizer for Optimization Problems
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究 分担 者	唐 政 (Tang Zheng) (90227299)	富山大学・学術研究部工学系・教授 (13201)	

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