

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04854

研究課題名（和文）ニューロモーフィックなアプローチが拓く極限探査における着陸航法技術の研究

研究課題名（英文）Research on landing navigation technology for exploration missions in extreme environment by neuromorphic approaches

研究代表者

福田 盛介（FUKUDA, Seisuke）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：50332151

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、有人探査が困難で無人機が本質的に活躍する「極限探査」の自在な実現のために、生物の脳神経のふるまいを模倣したニューロモーフィックなプロセッシング（スパイクングニューラルネットワークなど）や、視神経を模したニューロモーフィックなセンサ（対象の輝度変化を非同期的に出力するイベントカメラなど）を探査機上の着陸航法処理に導入し、高速応答性や低消費電力などの観点で従来技術とは不連続かつ革新的なメリットを供し得ることを実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生物学的なコミュニティにより研究が進められてきたニューロモーフィックな技術を、宇宙探査機のオンボード処理に成功裏に適用した本研究成果は、未踏領域への極限探査を可能にし、人類のフロンティアを開拓することに貢献するという学術的意義のみならず、低リソース動作という観点でニューロモーフィック技術と本質的に親和性のあるアプリケーションを拡大し、IoT分野などの低消費電力での動作が必要となる民生技術/社会インフラへの波及を促進するという点で、社会的な意義も極めて高い。

研究成果の概要（英文）：In this research, in order to realize flexible unmanned exploration missions in extreme environment where manned activities are essentially difficult, neuromorphic processing (e.g., spiking neural networks) that imitates the behavior of the brain nerves of living organisms and neuromorphic sensors that imitates the optic nerves, which are for example event-based cameras that can output the change of the target brightness asynchronously, were successfully introduced into the landing navigation on the spacecraft. The experimental results show that the neuromorphic approach can provide discontinuous and innovative merits in terms of latency and low power consumption.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：ニューロモーフィック スパイクングニューラルネットワーク 太陽系探査 月着陸 画像航法 イベントカメラ

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は小型月着陸実証機 SLIM の開発などを通して、着陸機の画像航法の研究開発を遂行してきた。研究開始時点の技術的状況として、探査機搭載の画像航法の実装は、MPU はもとより、FPGA を用いた高速化を図った場合においても、耐放射線性を有する宇宙用 FPGA のゲート数や演算速度の制約から、比較的単純な手法 / アルゴリズムをロバスト化して実現することで、システムの成立を図る必要があった。設計開発作業の体感としては、搭載計算機の性能は地上の汎用 PC と比して 2 桁程度劣り、将来の自在な探査活動を俯瞰するにあたり、不連続な技術革新でこのボトルネックを打破することが必要であるとの認識が背景にあった。

これに対し、ニューラルネットワークは直訳の通り、脳の神経回路網に着想を得た学習・識別手法であるが、爆発的に流行・普及した深層学習 (ディープラーニング) を含め、実際の脳モデルとは大きく乖離する形で発展してきた。その中において、スパイク型ニューラルネットワーク (SNN) は、生物学的なコミュニティが生物を忠実に模倣する (ニューロモーフィック) ことを目的に研究が進められてきた。ニューロモーフィックなプロセッサチップが海外で数例開発されていたが、それらは主としてハードウェアとしての研究の成果であり、実利用を見据えた工学的なアプローチとして、そのアーキテクチャ上において、どのようなスキームでアプリケーションを構成するかについては、民生分野を含めても未だ黎明期の段階であった。

2. 研究の目的

有人活動が本格化する将来の宇宙探査において無人機に課せられる役割は、人間が実施するには危険な、あるいは人間の生存が維持できないような極限的な領域での自在な活動であり、とりわけ着陸航法技術の一層の向上が必要不可欠である。特に、崖などの険しい地形に対しても安全かつロバストに着陸誘導するためのセンサには極めて高い応答性が求められ、また、土星圏等の低エネルギー下においては航法演算を司るコンピューティング環境への低消費電力要求が苛烈となる。これらの要求に対する技術解は、通常のアーキテクチャをベースにしたものでは見通しが立たず、何らかの革新的な着想に基づく不連続なブレークスルーが必要である。これに対し本研究は、自然界の生物が自己のナビゲーションやセンシングを非常に低エネルギーでロバストに達成していることを想起し、生物的な機能を再現あるいは模倣するニューロモーフィックなアプローチを探査機の航法技術に適用し、極限探査の可能性を拓くことを目指す。低リソースという切り口を鑑みると、太陽系探査における極限的な要求とニューロモーフィック技術の親和性は高く、本研究はニューロモーフィックなデバイスを宇宙機の着陸航法に具体的に適用し、高速応答性や低消費電力などで多大なメリットが得られることを確認・検証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) スパイク型ニューラルネットワークの導入と学習方法の検討

脳神経のふるまいを模倣したニューロモーフィックプロセッサの動作が、非同期なイベントベースのニューラルネットワークとして実装されていることから、ニューロモーフィックプロセッサで実行可能な SNN を導入し、その学習方法を重力天体着陸の画像航法における代表的なタスクであるクレータ識別を例として検討する。

(2) ニューロモーフィックなセンサの活用

SNN への入力として、生物の視神経を模し、対象の輝度の変化を非同期的に出力するニューロモーフィックセンサ (イベントカメラ) と組み合わせた検証を行う。

(3) 時空間パターン識別性能の向上

天体表面に対する着陸航法において必須な空間情報の把握に向けて、本質的には時間方向の情報処理に優れた SNN に対し、空間領域での特徴パターンを識別・抽出する性能を向上させるため、SNN のネットワーク構造に対する新たな改変を行う。

(4) 必要消費電力の推算

(1) ~ (3) で検討・開発する処理を、実際のニューロモーフィックプロセッサ上で動作させるために必要な消費電力量の見積もりを行う。

4. 研究成果

(1) SNN の学習方法について、以下の二つのアプローチを検討した。

- 深層学習に代表される人工的なニューラルネットワーク (ANN) を、SNN へと変換する。具体的には、ANN の活性化関数と SNN の応答関数が同様の機能をネットワーク内で持つことに着目し、操作可能な活性化関数のふるまいを、実際の応答関数の形へと似せることにより、ANN での学習結果を SNN に直接転送する (図 1)。
- SNN において直接的に学習を実施する。そこでは、ネットワーク内の情報伝達にフィードバ

ックを付加する再帰ユニットや、誤差逆伝搬を可能とする疑似勾配を導入し、学習を進捗させる。

シミュレーション画像を用い、月面上のクレータの識別処理を試行した結果、ANN からの変換や直接学習に伴う精度低下は、一定程度に抑制できることを確認できた。

(2) イベントカメラは、生物の動的な視覚情報の処理を模擬した画像センサであり、画素ごとの輝度の変化に応じたイベント（スパイク）の列を非同期的に出力する（図 2）。通常の光学カメラにおける差分検出と異なり、フォトダイオードの出力をハードウェア的に処理してスパイクを出力するため、時間分解能やレイテンシが極めて高く、また消費電力が非常に低いことが特徴である。(1)で示したクレータ識別処理の実験の入力にイベントカメラを適用し、スパイクニューラルネットとの親和性を実証的に示した。さらに、イベントカメラは輝度情報を電圧に対数変換した上で差分を取るという原理により、超高ダイナミックレンジ性能を有する。本研究では、太陽条件が厳しいミッションにおける情報抽出を念頭に、イベントカメラを用いたステレオ視などの実験的な検討を実施した。

(3) スパイク列を入力・処理する SNN は、原理上は時間方向の情報処理に特色があるが、セマンティックセグメンテーションと呼ばれるような空間的な領域識別のタスクへの適用にあたっては、時空間情報の適切な取り扱い（コーディング）が必要となる。(1)で示した SNN の直接学習の検討で取り上げた再帰ユニットが、状態遷移に全結合接続を用いているのに対し、本研究ではこれに入力ゲートや膜電位忘却ゲートを導入することで、時空間パターン識別性能の向上を図った（図 3）。本方式をフラッシュ LiDAR によるパルスデータに適用し、着陸候補領域の安全 / 非安全を判定する処理が高精度に実施可能であることを示した。

(4) 上記の各提案手法について、ネットワーク中のニューロンの発火回数から、ニューロモフィックプロセッサに実装した際の動作を推算し、既存のプロセッサについて公開されているスパイクあたりのエネルギー値を用いて、必要な消費電力の換算を行った。その結果は、粗い見積もりであるものの、既存の計算アーキテクチャと比較し、消費電力を数桁程度低く抑えることが可能であるという概算が得られた。今後、実ハードウェア上で動作させ、検証を行う。

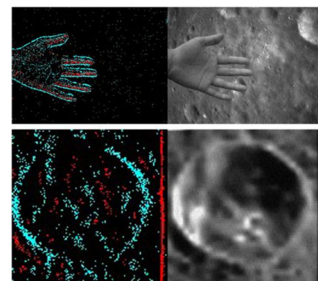
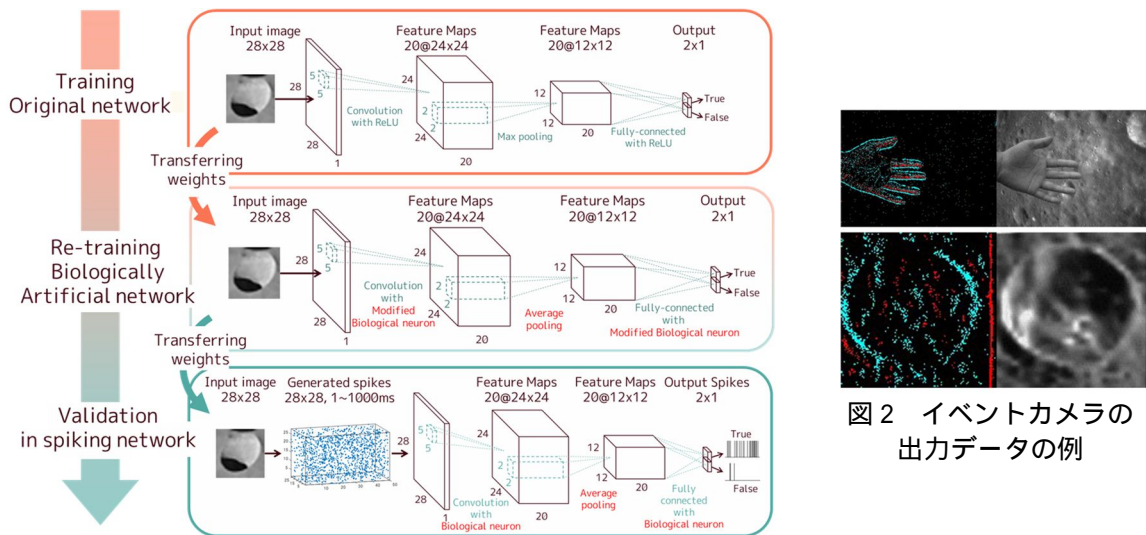


図 2 イベントカメラの出力データの例

図 1 ANN から SNN への変換による学習

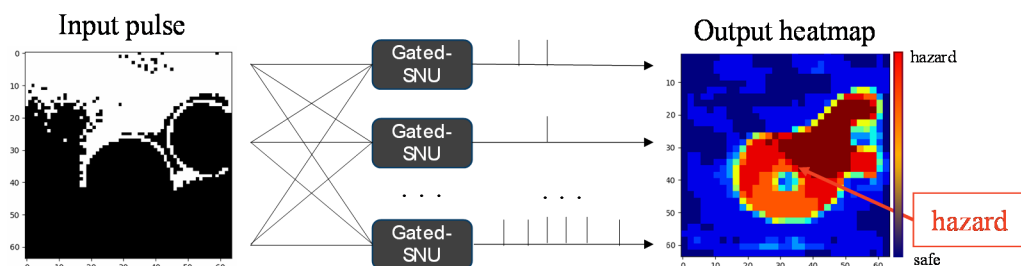


図 3 SNN の時空間パターン識別性能の向上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 0件）

1. 著者名 K. Kariya and S. Fukuda	4. 巻 18
2. 論文標題 Initial study of neuromorphic application for vision-based navigation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 pp.108-115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.18.108	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 K. Kariya and S. Fukuda
2. 発表標題 Study of neuromorphic application using spiking neural network for terrain relative navigation
3. 学会等名 16th International Planetary Probe Workshop (IPPW-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kariya and S. Fukuda
2. 発表標題 Module study of neuromorphic application for vision-based navigation
3. 学会等名 32th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 狩谷 和季, 福田 盛介
2. 発表標題 クレータ分類を例としたニューロモフィックコンピューティングの宇宙機航法に対する適用
3. 学会等名 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木下英明, 木村真一, 福田盛介
2. 発表標題 ニューロモーフィックコンピューティングによる宇宙機の地形相対航法におけるクレータ検出の検討
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kariya and S. Fukuda
2. 発表標題 Neuromorphic computing for spacecraft's terrain relative navigation: A case of event-based crater classification task
3. 学会等名 The 8th Annual Neuro-Inspired Computational Elements (NICE) workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kariya and S. Fukuda
2. 発表標題 Neuromorphic computing for spacecraft's terrain relative navigation: A case of event-based crater classification task
3. 学会等名 2021 IEEE Space Computing Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下英明, 木村真一, 福田盛介
2. 発表標題 スパイキングニューラルネットワークの時空間符号化性能の向上と宇宙機の着陸における障害物検知への適用
3. 学会等名 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川路晃汰, 福田盛介
2. 発表標題 太陽条件にロバストなイベントカメラステレオ視の実験的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Kinoshita, S. Kimura, and S. Fukuda
2. 発表標題 Real-time hazard detection for planetary landing using spiking neural networks
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

受賞：2021年日本神経回路学会優秀研究賞（狩谷和季，福田盛介）

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