

氏 名 狩谷 和季

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2138 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 リソース制約環境下における探査機の自律地形相対画像航
法に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 橋本 樹明
東京大学大学院工学系研究科
准教授 津田 雄一
教授 澤井 秀次郎
教授 坂井 真一郎
教授 廣瀬 明
東京大学大学院工学系研究科
准教授 福田 盛介
東京大学大学院工学系研究科

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 狩谷 和季

論文題目 リソース制約環境下における探査機の自律地形相対画像航法に関する研究

Exploration missions for celestial bodies have been conducted in many countries not only for scientific interests such as exploring the origin of the solar system and the roots of life, but also for the development of science and technology. In recent years, as a vast amount of data with respect to the moon and Mars is acquired by orbiters, exploration areas required for landing missions shift from conventional easy-to-land locations to specific locations where precise observation is expected. Due to limitations on the achievable accuracy over long distances, conventional landing technologies based on inertial navigation systems do not have capabilities to meet the precise landing requirement. Therefore, achieving high-precision landing requires techniques to correct the position and/or velocity estimation error of the inertial navigation. Terrain relative navigation (TRN), which estimates state such as position and velocity of a spacecraft by comparing maps with landmarks in images of a planetary surface, is one of the guidance, navigation, and control (GN&C) functions to make it possible.

TRN on celestial bodies with gravity and long distance from the earth requires onboard and real-time image processing without communicating with ground stations because of high-speed descent and communication propagation delay. However, despite the demand for fast image processing tasks, space-grade computers perform worse than commercial ones. The performance degradation is mainly due to the inability to clock up caused by thermal constraints and the acquisition of radiation resistance. In the past decade, non-von Neumann type processor chips such as field-programmable gate arrays (FPGAs) are expected to improve the processing speed by parallel processing. The FPGAs are becoming mainstream of the image signal processors on spacecraft. However, at present, the space-grade processors lag behind by 1-2 orders of magnitude in the performance compared to the commercial ones. The computational performance is equivalent to that of general-purpose computers 20 years ago. Hence, it is difficult to directly use mainstream image processing algorithms as TRN functions. In addition, as future exploration missions make a more advanced landing to farther celestial bodies, power consumption requirements for processors become severer, and navigation algorithms become more complicated. Therefore, it is essential to bridge the gap between the complexity of algorithms and the performance of processors.

The thesis addresses this issue from the following two perspectives.

Development of TRN algorithms with a small amount of computation that can be processed onboard with the space-grade computers.

In order to perform autonomous terrain relative navigation using images in a situation where the computer performance is very low, it is necessary to maintain the performance while reducing the computational scale of the navigation algorithm. From this viewpoint, two types of terrain relative navigation methods that estimate position and velocity are proposed. **Position Estimation:** There are two types of location estimation methods: the problem of extracting feature points from terrain information contained in images and the problem of matching extracted feature points. In the former case, it is a problem to extract feature points that can be identified equally even in images obtained by orbiters and images obtained by the lander, which are different in time, sunshine and posture conditions. In the latter case, the problem is how to perform real-time matching with robustness and high accuracy, while the obtained feature points are missing, inserted, or misaligned. The position estimation method using sets of crater positions obtained from a lunar lander are proposed for the latter problem. The method uses a line segment as the minimum element when overlaying a map and model points. After global matching by line segments, the accuracy and robustness are ensured while reducing the computational complexity by searching for the correspondence of the point pattern locally. **Velocity Estimation:** When imaging the ground surface with a lander that moves at high speed, motion blur due to the movement of the lander during the exposure time occurs and the image degrades. When such degradation occurs, the information contained in the image becomes uncertain, which is a phenomenon that should be avoided in the field of image handling such as remote sensing. Hence, research on blind deconvolution that restores images without degradation from degraded images is conducted. On the other hand, the blurred image contains the movement information that caused the degradation, and the information is stored in the degradation function. Therefore, the method is proposed to calculate the velocity by estimating the amount of movement of the lander during the exposure time with a single image including motion blur as input.

Application of TRN algorithms to an innovative processor architecture operating on ultra-low power resources.

Recently, several studies have addressed asynchronous computing systems mimicking neurobiological architecture like our brain called neuromorphic computing. In the brain, communication between the neurons is achieved by asynchronous transmitting trains of action potentials (spikes) to the subsequent neurons. Because these individual spikes are sparse in time, each spike has a high amount of information. While conventional processors compute sequentially, the neuromorphic processors compute parallelly by asynchronous and sparse signals. The recent demonstration of the neuromorphic processor shows that convolutional neural networks (CNNs) with a

million spiking neurons on the chip can be operated with only a few tens of milliwatts of power consumption. The success of research on such neuromorphic processors brings the possibility that advanced vision-based navigation algorithms such as deep learning can work with the spacecraft's low power computing environment. Although the effectiveness of neuromorphic computing for space systems is discussed, no specific application exists. Research on deep artificial neural networks (ANNs) as a method of mimicking the computation of cranial nerves similar to spiking neural networks (SNNs) has been remarkably successful in the field of computer vision. Although the ANNs are brain-inspired, there are some differences in their computation and learning rules compared to the SNNs. The SNNs operate asynchronously by the sparse spike current trains, so that the neuromorphic processors can be expected to have lower power consumption than conventional clock-based circuits. The dynamics of spiking neurons is time-dependent, while artificial neurons used for the ANNs only handle numerical values representing the firing rate of the neuron without the timing information. In order to operate ANN-based applications on the neuromorphic processors, it is necessary to bridge the gap between the timing-based spiking neurons and the rate-based artificial neurons and to develop methods to make an SNN with equivalent functions as an ANN. Therefore, this study proposes a method to convert ANNs to SNNs in order to operate neural network based TRN algorithms on the neuromorphic processor, and the method also is evaluated accuracy and power consumption using a crater classification task as a specific application for TRN.

The thesis consists of five chapters.

In the first chapter, necessity and problems of TRN technologies are shown. Also, the objective and the outline of the thesis are presented.

Chapter 2 "Environment Surrounding Autonomous Image Processing in Spacecraft" outlines the prerequisites for reading the thesis. Specifically, the computer environment in spacecraft and image processing techniques in terrain relative navigation are explained.

In Chapter 3, "Terrain Relative Navigation in Current Low-Computer Resource Environments", TRN methods that can estimate position/velocity information autonomously in real-time even in situations where the computer environment is low in resources are proposed. These methods are evaluated for their mountability by implementing them on a radiation-resistant computer that is used in spacecraft.

Chapter 4 "Terrain Relative Navigation for Future Low-Resource Exploration" anticipates necessity of advanced TRN in low-energy resource environments for future exploration, and focused on neuromorphic computing as a solution. Specifically, in a neuromorphic computing architecture, it is confirmed and verified that there is an advantage in low power consumption and performance by applying the terrain relative

navigation application.

Finally, in Chapter 5, the achievements obtained in Chapter 3 and 4 are summarized, and the final conclusions is stated.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 狩谷 和季

Title
論文題目 リソース制約環境下における探査機の自律地形相対画像航法に関する研究

本論文は、「リソース制約環境下における探査機の自律地形相対画像航法に関する研究」と題し、月惑星探査のための着陸機において、機上で実施する光学画像を用いた自律的な地形相対航法を研究の対象としている。宇宙機の計算機環境が演算能力や低消費電力要求など、リソース制約が多分に存在する現状を鑑み、

- 画像処理アルゴリズムの計算規模を効果的に低減することにより、低演算リソースの計算機上においても地形相対航法を実行可能にするアプローチ、
- 現状の計算機より格段に低電力リソースで動作する革新的なプロセッサアーキテクチャに地形相対航法手法を適用するアプローチ、

という二つの方向性に基づいた一連の研究の成果をまとめたものであって、5章からなる。

第1章「序論」では、宇宙機における地形相対航法の概要を紹介しつつ、本論文が取り組むべき課題（問題点）を整理し、その上で、本論文の構成を述べている。

第2章「宇宙機における自律画像処理を取り巻く環境」では、本研究の背景をなす事柄として、宇宙機の計算機性能を具体的に整理し、その上で動作する航法アルゴリズムの現状を過去のミッションでの実施例を紹介しつつ解説している。

第3章は「現状の低計算リソース環境における地形相対航法」と題し、月着陸機を題材として、計算機環境が低リソースである状況においても、リアルタイムかつ自律的に位置・速度情報を推定可能な地形相対航法手法をそれぞれ提案している。位置推定手法では、従来は計算複雑度が高いとされる点パターンマッチングについて、地図とモデル点とを重ね合わせる際の最小要素としての線分に着目し、線分による大域的なマッチングの後に、局所的に点パターンの対応を探索する手法を考案している。速度推定では、画像処理による移動量の抽出では従来複数枚の画像間における差分を見る手法が主流であるところ、単一の画像に含まれる劣化過程としての動きブレに着目し、ブレの成分に保存された移動量から速度の推定を行う手法を提案している。いずれの手法についても、月面を模擬した画像によってその推定精度が確認され、また実際に宇宙機で使用される耐放射線性の計算機への実装評価を行うことで、その搭載性が確認されている。

第4章は「将来の低リソース探査に向けた地形相対航法」と題し、将来の遠方探査においてはさらなる低エネルギーリソース環境下にて、高度な地形相対航法の必要性があることを予見し、その解決手段として、従来の計算機アーキテクチャとは異なる方式で処理を

行う、ニューロモーフィックコンピューティングの適用を提唱している。ニューロモーフィックプロセッサは脳神経のふるまいを模倣しており、その動作は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行されるため、本研究では、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) をニューロモーフィックプロセッサで実行可能なスパイクニューラルネットワーク (SNN) へと変換する手法が提案されている。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 に直接転送することで、SNN の学習を完了させることをねらうものである。本手法の有効性は、地形相対航法の重要な要素であるクレータ識別を例としてシミュレーションにより検証され、ANN に対する精度比較とともに、ネットワーク中のニューロンの発火回数から、別途研究開発が進められているニューロモーフィックプロセッサで実行した際の動作が推算され、従来の計算機に比して極めて低い消費電力で実行可能であることが示されている。このような超低消費電力性に着目した SNN の具体的なアプリケーション構築については研究例が少なく、宇宙分野では例が見られない。

第 5 章は「結論」で、本論文の主要な成果のまとめを行っている。

以上これを要するに、本論文は、リソース制約が存在する宇宙機の計算機環境において、自律的な地形相対航法を実現するため、アルゴリズム上の工夫と新規ハードウェアの適用という両面から種々の新たな提案を行い、有効性を検証したものであって、宇宙工学上貢献するところが少なくない。本論文を構成する主な内容は、査読付き論文 3 件、国際会議 4 件に発表されており、博士論文としての独創性を有し、かつ十分な学術水準に達していると認められる。また、上記論文・発表の筆頭著者であることから、出願者の本研究についての主体的な取り組みが認められる。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。