

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	地球カメラと画像処理による衛星の姿勢決定法と軌道上評価
Title(English)	
著者(和文)	菊谷侑平
Author(English)	Yuhei Kikuya
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11917号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:松永 三郎,野田 篤司,奥富 正敏,古谷 寛,遠藤 玄,中西 洋喜
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11917号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	菊谷 侑平		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	松永 三郎	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	野田 篤司	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「地球カメラと画像処理による衛星の姿勢決定法と軌道上評価」と題し、以下の 8 章から構成される。

第 1 章「序論」では、研究背景と目的を述べる。超小型衛星の利用用途の拡大に伴い、姿勢決定・制御系への要求が高まっている。超小型衛星では体積等に厳しい制約が課されるが、現在主流の姿勢センサである恒星センサは大きな光学系を必要とし、小型化が困難である。そこで本研究では小型可視光カメラを用いた地球カメラに着目する。地球カメラは小型・軽量化に有利である反面、地表の季節や天候等の影響を受けること、被写体の同定に大きな計算コストを要することなどの課題がある。そこで本研究では、機械学習による画像識別と、低計算コストな姿勢計算アルゴリズムの提案、及び天候の影響を受けづらい姿勢変化検出を提案し、数値シミュレーションや地上実験、地球周回軌道上実験を通して有効性を示すことを目的とする。

第 2 章「数学的定式化」では、本論文で使用する基礎的な姿勢キネマティクス、画像幾何学について整理する。

第 3 章「絶対姿勢決定」では、本論文で提案する地球カメラを用いた 3 軸姿勢決定法について述べる。画像マッチングに基づく既存の方法における課題の一つである、季節や天候変化等に対する堅牢性を高めるために、画像識別を利用して陸と海の地形データに変換した上で地図データとのマッチングを行う方法を提案する。また、マッチングの計算コスト削減のため、独自の投影変換を提案する。さらに、数値シミュレーションを通して提案アルゴリズムの妥当性や、利用可能範囲、姿勢決定精度、実行速度等の見積もりを行う。提案アルゴリズムは陸と海のパターンに基づくため大洋上等では利用できないものの、地球全域のおよそ 50% の領域で 3 軸姿勢決定が可能であることを示す。また、提案する画像識別結果-地図データのマッチング法は通常と比較して 1 桁程度実行時間を短縮可能であることを示す。

第 4 章「相対姿勢決定」では、絶対姿勢決定が利用不可能な、曇天時や大洋上等で姿勢情報を補間する目的で、地球カメラで続して撮影した画像から相対姿勢すなわち姿勢変化を推定することを提案する。画像間の姿勢を推定する基本原理を述べた後、衛星では比較的正確な軌道情報が取得可能という特性を利用した改良アルゴリズムを提案する。具体的には、エピポーラ幾何に基づく方法と、並進情報を利用して精度改善を図る方法、衛星位置・姿勢情報から地表特徴点位置を大まかに推定して姿勢行列を推定する新しい方法を示す。また、これらの方法をそれぞれ数値シミュレーションで評価し、連続撮影した画像の解析による相対姿勢決定の有用性を示すほか、提案アルゴリズムが従来の方法より最大で 1 桁程度精度向上が期待できることを示す。

第 5 章「軌道上実証のための装置開発と運用」では、提案アルゴリズムの軌道上実証実験に使

用する実験装置「DLAS (Deep Learning Attitude Sensor)」について述べる。DLAS は超小型カメラや計算機等を備えた実験装置であり、JAXA の「革新的衛星技術実証 1 号機」の実証テーマとして採用され、2019 年にこれを搭載した衛星「RAPIS-1」が地球周回低軌道に投入されている。その後約 1 年間の運用を行い、軌道上実証実験を行うことで、本論文で提案する地球カメラによる姿勢決定法の有用性を示す。

第 6 章「絶対姿勢決定の軌道上実験」では、DLAS にて実施した絶対姿勢決定の軌道上実証実験結果を示す。衛星が搭載する高精度な姿勢センサに基づく姿勢データと比較することで、DLAS による絶対姿勢決定の性能評価を行う。事前の数値シミュレーションによる見積もりと比較して利用可能範囲がやや少ない結果となったものの、好条件下では 1deg オーダーの精度で軌道上・オンボードでの 3 軸姿勢決定に成功し、提案アルゴリズムの妥当性を示している。

第 7 章「相対姿勢決定の軌道上データによる評価」では、DLAS で実際に撮影した連続画像を使用して、地上にて行った相対姿勢決定の評価結果を示す。衛星進行方向に設置したカメラを利用した場合、既存の同サイズ帯のジャイロセンサと同等程度である 10^{-3}deg オーダーの精度で相対姿勢検出が行えることなど、地球カメラによる相対姿勢決定の特徴を明らかにする。

第 8 章「結論」では、本論文の結論および今後の課題を述べる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	菊谷 侑平		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	松永 三郎	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	野田 篤司	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This paper describes methods to determine the attitude of micro-/nano-satellites using an Earth camera. Although Earth cameras have the advantage of smaller size, they require more complex processing to detect and analyze objects than other sensors, such as star sensors. Therefore, the applications so far have been mostly used in batch processing. The purpose of this paper is to propose and evaluate methods to solve these problems in order to realize autonomous and real-time attitude determination by earth cameras.

First, an algorithm to determine three-axis attitude using image recognition technology and geometrical consideration is proposed. Matching of preloaded map data with terrain data using image recognition provides robustness compared to traditional image-to-image matching. In addition, a new matching method that contributes to speed up is proposed.

Second, a method to detect attitude changes from analyzing continuous images is proposed to complement the cases when terrain information cannot be detected. In addition to the basic method for detecting attitude between images, a method using satellite orbit information is proposed.

Finally, these methods were evaluated in an on-orbit experiment. An experimental device was developed and put into low Earth orbit. An on-orbit real-time attitude determination experiment was conducted, and the validity of the proposed method is demonstrated, although there is some limitation on the areas that can be used due to the principle of using terrain information. The attitude change detection was evaluated in a batch process using the collected actual images. It is found that it is possible to detect an attitude change with an accuracy comparable with that of other rate sensors in the same size range, although real-time performance is an issue.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).