

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 4 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540114

研究課題名(和文) 超広視野・超高精度オーロラ3次元ステレオ計測

研究課題名(英文) Precise 3D Measurement of Aurora Using Fish-Eye Stereo Camera

研究代表者

山下 淳 (Yamashita, Atsushi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30334957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数地点に設置した広視野な魚眼カメラを用いて、オーロラの全天3次元形状・位置を高精度に計測する手法を構築した。具体的には、極寒地であるアラスカでオーロラ映像の自動連続撮影が可能な高信頼全天撮影装置の開発した。また、視野が広い半面で歪みが大きい魚眼カメラの内部パラメータ(レンズの歪み特性や焦点距離など)および外部パラメータ(カメラの設置位置と設置姿勢)の高精度同定手法を構築した。更に、3次元立体視可能なオーロラのステレオ映像の自動生成手法を構築した。以上により、超広視野・超高精度の3次元オーロラステレオ計測を実現した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a methodology for 3D measurement and visualization of aurora were proposed. To analyze auroras, two fish-eye cameras were set in Poker Flat Research Range, Alaska, USA. The feature points were detected from a pair of images captured by fish-eye cameras, the three-dimensional points were triangulated, and 3D aurora shapes were visualized in 3D space.

研究分野：ロボット工学

キーワード：計測工学 画像処理 コンピュータビジョン オーロラ 3次元計測 ステレオ計測 魚眼カメラ 可視化

## 1. 研究開始当初の背景

オーロラとは、太陽より放出されたプラズマ粒子が地球の磁力線に沿って極地付近に流入し、大気中の原子と衝突することによって起きる発光現象である。そのためオーロラの色や形状、分布する高度は太陽由来のプラズマのエネルギー分布や磁気嵐といった現象と大きく関係している。太陽風や磁気嵐は、現在世界的に欠かせないものとなっているGPSや人工衛星を用いた通信に直接的な悪影響を及ぼす。したがって、オーロラを精度良く3次元センシングすることは、それらの現象の影響を明らかにすることに繋がるため非常に重要である。

オーロラを計測しようとする試みは、様々な方法を用いてこれまでも行われてきた。しかしオーロラは発生時刻や発生場所が一定ではない点や、変化が不規則で連続的ではないという点から地上から正確な計測を行うことは非常に困難である。そこでロケットなどを用いた宇宙空間からの計測がなされているが、恒常的に計測することは容易ではない。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、工学分野のコンピュータビジョン技術と、理学分野の観測技術を有機的に結合し、オーロラの超広視野・超高精度ステレオ3次元計測技術を構築することを研究の目的とする。

具体的には、地上に設置され恒常的に空を撮影する2台の魚眼ステレオカメラを用いて、オーロラを3次元センシングする手法を新規に提案する。

## 3. 研究の方法

本研究では、オーロラの超広視野・高精細ステレオ3次元観測システムの実現を目指す。

長時間のオーロラ映像を正確に撮影するため、連続自動映像撮影装置を開発し、アラスカで実際にオーロラ映像を撮影する。

また、観測前に特殊装置を利用して画像の歪みやカメラ間の位置姿勢関係を同定する方法に加えて、観測後に観測画像のみからカメラパラメータを同定する方法の構築を目指す。具体的には、オーロラ画像中に同時に写る星の位置情報を利用し、カメラパラメータを同定する。

更に、同定したカメラパラメータを元に、画像の歪みや画像間の位置姿勢関係を補正して、3次元立体視が可能なオーロラのステレオ映像を再構築する手法を確立すると同時に、オーロラの超高精度3次元計測を行う。最終的に、パラメータ同定結果を用いて、任意視点から見たオーロラのステレオ映像を再構築する手法を提案する。

### (1) オーロラ映像の連続自動撮影装置の開発とアラスカでのオーロラ映像撮影

極寒地においても安定して動作するオーロラ映像の連続自動撮影装置を開発する。広視野魚眼レンズを取りつけた超高精細一眼レフカメラとデータ保存装置をノート型パソコンに接続して制御を行う。

装置は2台製作し、それぞれカメラパラメータの同定を事前に行っておく。この装置を実際にアラスカ・ポーカーフラット実験場に設置してオーロラ映像を撮影する。

### (2) オーロラ映像を用いたカメラパラメータの同定

本研究では、10km程度離れた位置にカメラを設置し、100~200kmの高さにあるオーロラの3次元ステレオ計測を行う。各カメラにはGPSが接続されている。

高精度3次元計測の実現には、カメラの外部パラメータ(カメラ間の位置と姿勢の関係)および内部パラメータ(魚眼レンズの歪みパラメータや焦点距離等)の同定が必要である。そこで、オーロラ映像に加えて、GPSの情報、星の地図や星の軌跡の情報を用いて、カメラパラメータを同定する手法を構築する。

### (3) オーロラの3次元形状・位置のステレオ計測

オーロラの最も頻度が多い高度は100~120kmであると言われている。1画素以内の精度でのステレオ計測が実現できたとすると、カメラ間距離を3kmとした場合の計測の分解能は2~3kmとなり、オーロラの形状および高さ分布の計測としては十分である。従って、1画素の精度でのオーロラのステレオ計測手法を目指す。ステレオ計測に用いるカメラパラメータは、(2)で同定した値を用いる。

まず、撮影されたオーロラ画像に対して、魚眼レンズによる歪みを補正すると同時に、2画像を平行ステレオペアに変換する。

次に、画像中のオーロラ領域の抽出を行う。オーロラは特徴点が少なく検出することが困難な被写体である。そのため、星などの特徴的な点が探索範囲の付近にある場合、検出結果が星の位置に大きく影響を受け誤検出を招く可能性が高まる。これは正確な特徴点検出を目的にするにあたり大きな問題である。このことから、特徴点を検出するにあたり前処理として背景差分の手法を用いることで特徴的な背景を除く。特徴点を探索する画像と、同地点で撮影されオーロラが写っていない画像との差分を抽出する。

次に、ステレオ画像の対応点を検出する。ここでは、テンプレートマッチングとSIFTマッチングを併用することにより、ロバストかつ正確に対応点の検出を行う。

上記の処理によって、画像間で互に対応する特徴点群を得る。それらを用いて全ての特徴点の3次元座標を計算する。

(4) 任意視点から見たオーロラ映像の可視化  
 前述の(3)の処理によって得られたオーロラの特徴点の3次元座標を任意視点から見た映像に変換して表示することで、オーロラの3次元形状を可視化する。

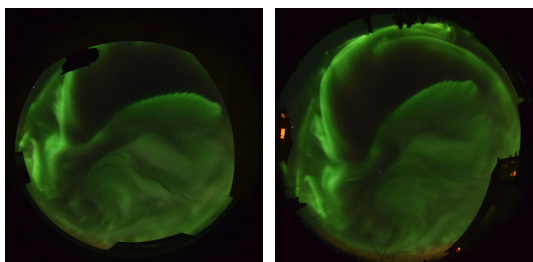
#### 4. 研究成果

オーロラ映像の連続自動撮影装置を図1に示す。オーロラ映像の自動撮影装置を2台開発し、アラスカ州のフェアバンクスにカメラ間隔8.1kmで設置して、10秒間隔で撮影を行った。また、格子模様が描かれたパターンをカメラで撮影し、カメラパラメータの同定を行った。



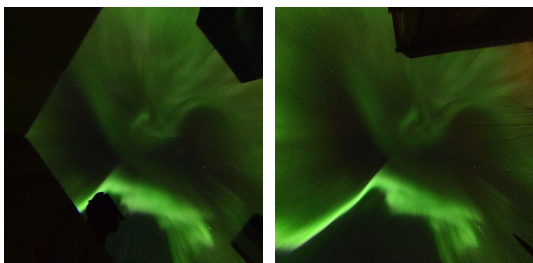
図1 オーロラ映像の撮影装置

撮影したオーロラ画像の例を図2に、並行ステレオペアに変換した画像の例を図3に、それぞれ示す。



(a) カメラ1画像 (b) カメラ2画像

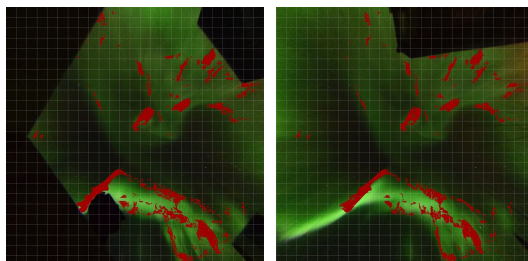
図2 取得したオーロラ画像の例



(a) カメラ1画像 (b) カメラ2画像

図3 平行ステレオペアに変換した画像の例

対応点を自動的に検出した結果の例を図4に示す。図中の赤い部分が、2枚の画像間に対応する箇所である。特徴点が少なく対応点検出が難しいオーロラ映像においても、正しく対応点を検出できていることが分かる。



(a) カメラ1画像 (b) カメラ2画像

図4 対応点の自動検出結果の例

最終的に、オーロラの特徴点の3次元座標を任意視点から見た映像に変換して表示した結果の例を図5に示す。地上に設置したカメラを用いて観測した映像を用いることで、上空からの別視点映像を生成できていることが分かる。

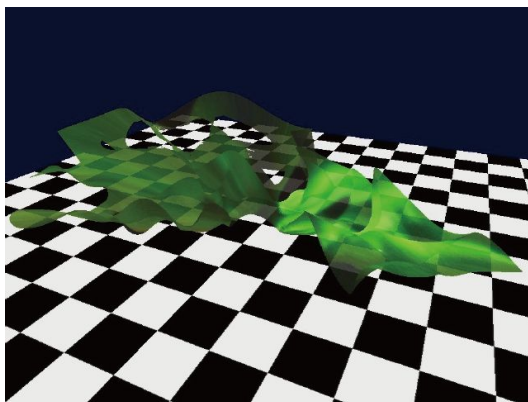


図5 任意視点から見たオーロラの3次元可視化結果の例

以上により、オーロラの超広視野・超高精度3次元ステレオ計測、およびその結果を用いたオーロラの3次元形状の可視化を実現した。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Ryuhō Kataoka, Yoshizumi Miyoshi, Kai Shigematsu, Donald Hampton, Yoshiki Mori, Takayuki Kubo, Atsushi Yamashita, Masayuki Tanaka, Toshiyuki Takahei, Taro Nakai, Hiroko Miyahara and Kazuo Shiokawa: "Stereoscopic Determination of All-sky Altitude Map of Aurora Using Two Ground-based Nikon DSLR Cameras," *Annales Geophysicae*, Vol.31, No.9, pp.1543-1548, September 2013, 査読有, doi:10.5194/angeo-31-1543-2013.

〔学会発表〕(計 10 件)

福田 陽子, 片岡 龍峰, 田中 正行, 山下 淳, 三好 由純, 塩川 和夫, 海老原 祐輔, Donald Hampton, 西村 耕司, 鈴木 理紗, 岩上 直幹: “機械学習に基づく自動判定を応用したオーロラ高速撮像システム,” 第 21 回画像センシングシンポジウム講演論文集 (SSII2015), パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2015 年 06 月 11 日~12 日.

竹内 彰, 藤井 浩光, 山下 淳, 田中 正行, 片岡 龍峰, 三好 由純, 奥富 正敏, 浅間 一: “オーロラの 3 次元計測のための形状変化を考慮した特徴点追跡,” 第 20 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.18-24, 軽井沢プリンスホテル(長野県北佐久郡軽井沢町), 2015 年 03 月 15 日~16 日.

竹内 彰, 藤井 浩光, 山下 淳, 田中 正行, 片岡 龍峰, 三好 由純, 奥富 正敏, 浅間 一: “テンプレートマッチングを用いた形状変化を考慮したオーロラの魚眼ステレオ計測,” ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集 (ViEW2014), IS1-35, pp.1-6, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2014 年 12 月 04 日~05 日.

Hiromitsu Fujii, Takayuki Kubo, Atsushi Yamashita, Akira Takeuchi, Masayuki Tanaka, Ryuho Kataoka, Yoshizumi Miyoshi, Masatoshi Okutomi and Hajime Asama: “Aurora 3D-Measurement and Visualization Using Fish-Eye Stereo Camera,” *Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2014 Posters*, Article No.24, Shenzhen (China), December 2014.

久保 堯之, 山下 淳, 藤井 浩光, 田中 正行, 片岡 龍峰, 三好 由純, 奥富 正敏, 浅間 一: “魚眼ステレオカメラで取得したオーロラ動画の 3 次元計測と可視化,” 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.985-986, 東京大学(東京都・文京区), 2014 年 3 月 18 日~20 日.

久保 堯之, 山下 淳, 田中 正行, 片岡 龍峰, 三好 由純, 奥富 正敏, 浅間 一: “魚眼ステレオカメラを用いたオーロラの 3 次元計測と可視化,” 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2013), pp.1111-1114, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市), 2013 年 12 月 18 日~20 日.

Kai Shigematsu, Yoshizumi Miyoshi, Ryuho Kataoka, Yasunobu Ogawa, Masayuki Tanaka, Atsushi Yamashita, Yoshiki Mori, Takayuki Kubo, Don Hampton and Shinobu Machida: “Altitude Variation of Aurora Breakups during a Magnetic Storm on March 17, 2013 (2013 年 3 月 17 日の磁気嵐時に発生したオーロラ爆発の高度変化),” 第 4 回極域科学シンポジウム講演予稿集, 国立極地研究所(東京都立川市), 2013

年 11 月 12 日~15 日.

Ryuho Kataoka, Yoshizumi Miyoshi, Kai Shigematsu, Don Hampton, Yoshiki Mori, Takayuki Kubo, Atsushi Yamashita, Masayuki Tanaka, Toshiyuki Takahei, Taro Nakai and Hiroko Miyahara: “Stereoscopic Determination of All-sky Altitude Map of Aurora Using Two Ground-based Nikon DSLR Cameras,” 第 4 回極域科学シンポジウム講演予稿集, 国立極地研究所(東京都立川市), 2013 年 11 月 12 日~15 日.

重松 界, 三好 由純, 片岡 龍峰, 田中 正行, 山下 淳, 森 祥樹, 久保 堯之, Don Hampton, 町田 忍: “円周魚眼デジタルカメラのステレオ撮影によるオーロラ発光高度の推定,” 第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会予稿集, R006-08, 高知大学(高知県高知市), 2013 年 11 月 2 日~5 日.

重松 界, 三好 由純, 片岡 龍峰, 田中 正行, 山下 淳, 森 祥樹, 久保 堯之, Don Hampton, 荻野 竜樹: “円周魚眼デジタルカメラのステレオ撮影によるオーロラ発光高度の推定,” 日本地球惑星科学連合 2013 年大会予稿集, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2013 年 5 月 19 日~24 日.

〔その他〕

ホームページ

<http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/yamalab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山下 淳 (YAMASHITA, Atsushi)  
東京大学大学院・工学系研究科・准教授  
研究者番号: 30334957

### (2) 研究分担者

田中 正行 (TANAKA, Masayuki)  
東京工業大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号: 60401543

片岡 龍峰 (KATAOKA, Ryuho)  
国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号: 90462671

三好 由純 (MIYOSHI, Yoshizumi)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号: 10377781

### (3) 連携研究者

奥富 正敏 (OKUTOMI, Masatoshi)  
東京工業大学・理工学研究科・教授  
研究者番号: 00262303

浅間 一 (ASAMA, Hajime)  
東京大学大学院・工学系研究科・教授  
研究者番号: 50184156