

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

○久保 堯之 (東京大学), 山下 淳 (東京大学), 田中 正行 (東京工業大学)
片岡 龍峰 (国立極地研究所), 三好 由純 (名古屋大学)
奥富 正敏 (東京工業大学), 浅間 一 (東京大学)

Three Dimensional Measurement and Visualization of Aurora Using Stereo Fish Eye Camera

○Takayuki KUBO (The University of Tokyo), Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo),
Masayuki TANAKA (Tokyo Institute of Technology), Ryuho KATAOKA (National Institute of
Polar Research), Yoshizumi MIYOSHI (Nagoya University), Masatoshi OKUTOMI (Tokyo
Institute of Technology), and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract—Three-dimensional analysis of aurora is important for electronic beam research in ionosphere, because aurora reflects the electromagnetic relationship between the Earth and the Sun and it is the only visible phenomena of the relationship. Therefore, a method to gather huge number of three dimensional data easily and precisely is in demand. In this paper, a method to estimate three-dimensional aurora shape and position from only two stereo images is proposed. Triangulation is used for calculating the positions of characteristic points. Moreover, the visualization way of aurora from the calculated point positions is also introduced.

Key Words: Aurora, Visualization, Stereo Vision, 3D Measurement, Fish Eye Camera

1. 序論

オーロラは、太陽風と地球の磁場のせめぎあいにより地上から約 100-500km 上空でプラズマが大気圏に流入する際に発光する現象である。そのため、オーロラの色や高度、発生メカニズムはプラズマのエネルギー分布や太陽フレアや磁気嵐等を反映している。よって、オーロラの正確な 3 次元計測は送電システムや人工衛星などの電磁波を用いた技術の発展に必要不可欠である。さらに、3DTV やプラネタリウムなど、3D 映像コンテンツとしての需要も近年高まっている。

しかし、オーロラは発生場所・時刻を正確に予測できないこと、不規則で連続的な動きをすること、微小発光の集合体であること、特徴点の少ない被写体であることから、その観測は困難を極める [1][2]。飛行機や人工衛星からオーロラを撮影することも行われているが、観測が大掛かりとなり、コストも莫大なものとなるため、大量のデータを得ることは困難である。

以上のことから、本研究では十分な時間的・空間的分解能で大量のデータを得るため、地上より 2 台の魚眼カメラを用いて計測することを目的とする。魚眼カメラは 180° 近い画角を持ち全空の撮影ができるため、発生方向が予測困難なオーロラであっても常に撮影可能となる。なお、本研究ではこの魚眼カメラをアラスカのポーカーフラット研究所 (PFRR) に設置し、全天画像を取得する。実際に 2 台の魚眼カメラ A、カメラ B によって撮影された画像をそれぞれ Fig. 1, Fig. 2 に示す。

2. 提案手法

まず、撮影された 2 枚の画像を星を用いたキャリブレーション [3] によりリクティファイド座標系に従って変換する (Fig. 3)。その後、2 枚の画像より特徴的な対応点を探す。その対応点の画像中の位置は、魚眼レンズ特有の歪みからその対応点の 3 次元ベクトルを導く。そして 2 枚の画像から探索された対応点の三次元ベクトルデータより、三角測量の原理に基づきその点の三次元座標を算出する。最後に、得られた三次元座標をドロネー分割により三角形メッシュ化し、各三角形にテクスチャマッピングを行うことでオーロラを可視化する。

2.1 リクティファイド座標系

撮影されたオーロラ画像でキャリブレーションを行い、リクティファイド座標系に変換する。リクティファイド座標系は Fig. 3 の様に定める。画像撮影時のカメラ方向を赤いベクトルで、変換後のカメラ方向を黒いリクティファイド座標系 Z 軸で示す。カメラ A を原点とし、カメラ A の光学中心からカメラ B の光学中心に向かう方向に X 軸、Y 軸を原点における地表面の接地平面上で、X 軸に垂直で右手系を構成する方向とする。Z 軸を X 軸および Y 軸に垂直かつ地球から離れる方向とする。カメラが宇宙方向にむけて設置されていることから、ここでは星をキャリブレーションターゲットに用いたキャリブレーションが使用可能である [3]。

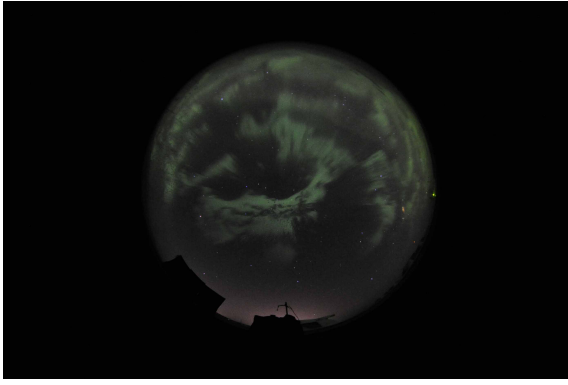


Fig.1 カメラ A による撮影画像

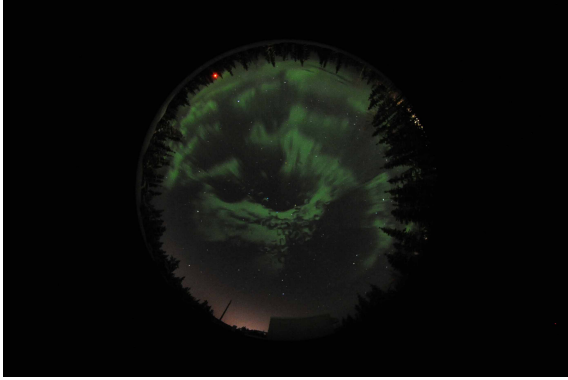


Fig.2 カメラ B による撮影画像

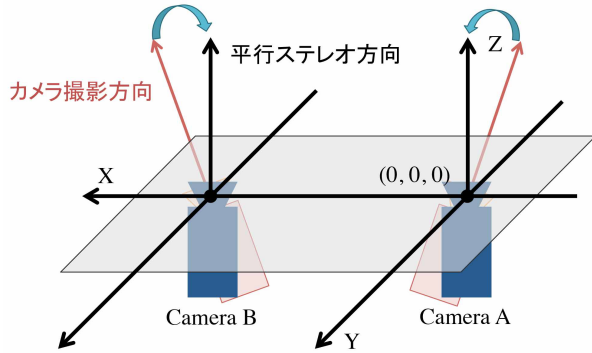


Fig.3 リクティファイド座標系

2.2 特徴点抽出

本研究ではオーロラはカーテン状の平面構造であると仮定する。オーロラは縁や折り曲がった部分などの特徴点を持つ、実空間上の同一点を投影している点を、カメラ A、カメラ B それぞれで撮影された画像内で手動探索する。画像座標中の座標を (u, v) と表す (Fig. 4)。

$$r = \sqrt{(u - C_u)^2 + (v - C_v)^2} \quad (1)$$

$$r = 2k \sin \frac{\pi - \theta}{2} \quad (2)$$

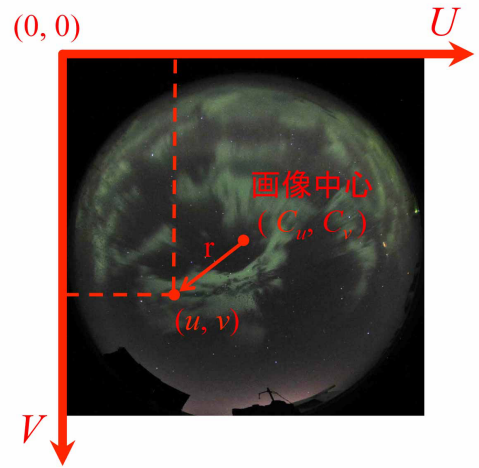


Fig.4 画像座標

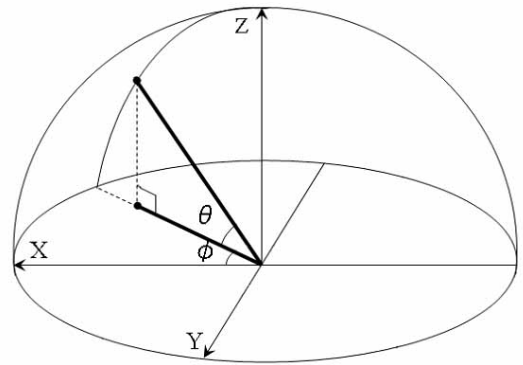


Fig.5 方向ベクトル

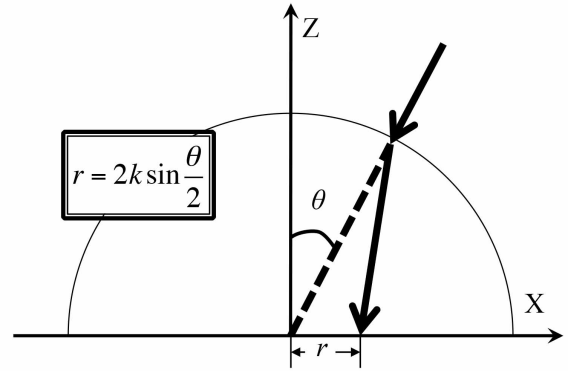


Fig.6 等立体角射影方式

$$\sin \phi = \frac{u - C_u}{r}, \cos \phi = \frac{v - C_v}{r} \quad (3)$$

2.3 3次元計測

画像中の各特徴点における位置座標 (u, v) を Fig. 5 に示す回転座標 (ϕ, θ) に変換する。等立体角射影方式の魚眼レンズは次の式 (1)-(3) に従って画像を投影する (Fig. 6)。魚眼レンズのゆがみ係数と画像光学中心はそれぞれ

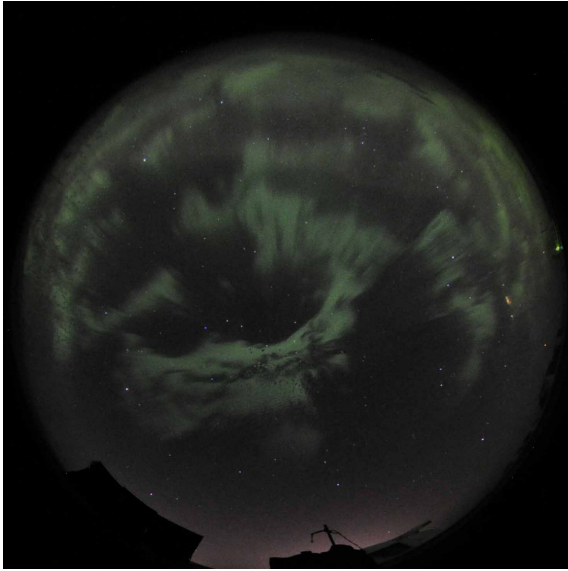


Fig.7 リクティファイド画像 A



Fig.8 リクティファイド画像 B

k , (C_u, C_v) と表記する. これにより, 各画像座標 (u, v) からその 3 次元方向ベクトル (ϕ, θ) が得られる.

その両 3 次元ベクトル (ϕ_1, θ_1) , (ϕ_2, θ_2) をカメラ A, B 間の距離 d と共に式 (4)-(6) に代入し, 各特徴点の 3 次元位置座標 (x, y, z) を推定する [4].

$$x = \frac{d \tan \theta_2}{\tan \phi_2 - \tan \phi_1} \quad (4)$$

$$y = \frac{d \tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \phi_2 - \tan \phi_1} \quad (5)$$

$$z = \frac{d \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin \theta_2 \cos \phi_1 - \sin \theta_1 \cos \phi_2} \quad (6)$$

2.4 可視化

抽出された各特徴点の 3 次元座標より, オーロラを 3 次元空間上に描画する. まず, 各特徴点をドロネー分割手法によって三角形メッシュを作成する. その後, テクスチャマッピングとしてカメラ A より撮影された画像をその三角形メッシュに貼り付ける [5]. これにより, カメラ A 地点より観測されるオーロラを復元することが可能となる.

3. 実験

3.1 実験環境

本研究では, オーロラ 3D プロジェクト (aurora3d.jp) によって, アラスカ州フェアバンクス, ポーカーフラット研究所 (PFRR) にて撮影された画像を用いた. 取得画像は先行研究 [3] に従ってキャリブレーションを行い, 測定座標系に従う平行ステレオ画像へと変換すると同時に, 画像光学中心を中心に 1470×1470 pixel に切り出した. Fig. 7, Fig. 8 が Fig. 1, Fig. 2 より得られた実際の入力画像である. また, キャリブレーションにより得られた

各種パラメータは, カメラ間距離 $d = 3.1$ km, 画像中心 $(C_u, C_v) = (1360.70, 933.75)$, レンズのゆがみパラメータは $k = 519.02$ であった. 対応点検出は手動にて, 77 個の特徴点で行った.

Table 1 カメラ位置

	Camera A	Camera B
Latitude	N 65°07'07.128	N 65°07'35.766
Longitude	W 147°25'58.008	W 147°29'47.982
Altitude	516m	205m

Table 2 撮影環境

Date	2011/01/05 23:43:39
Camera	NIKON D3S
Lens	Sigma 4.5mm F2.8 EX DC HSM Circular Fisheye
Image Size	2784 × 1848 pixel
Exposure Time	5s

3.2 実験結果

提案手法により, Fig. 7, Fig. 8 の入力画像中のオーロラを 3 次元空間に再構築した. Fig. 9 は天頂より 45° , Fig. 10 は天頂より 30° の位置から見た様子である. また, Fig. 11 は得られた特徴点の高度別個数である. この結果, 同地点でのプレーンスイープ法による高度算出 [6][7] で得られたオーロラの高度分布 50 – 400 km とオーロラの存在範囲が一致することが確認された (Fig. 11).

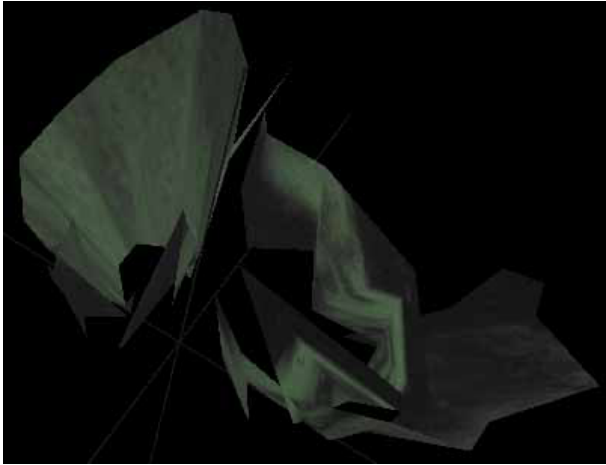


Fig.9 3次元復元結果 1

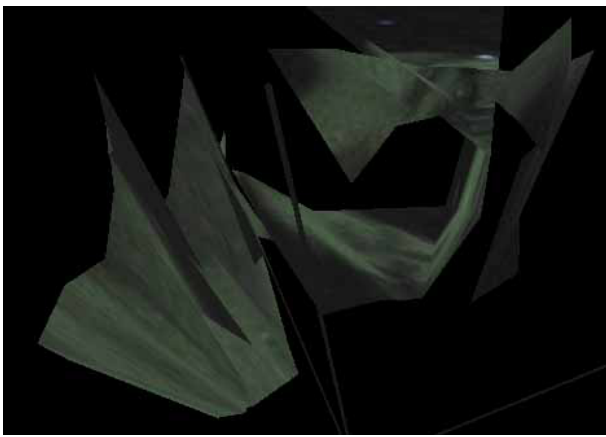


Fig.10 3次元復元結果 2

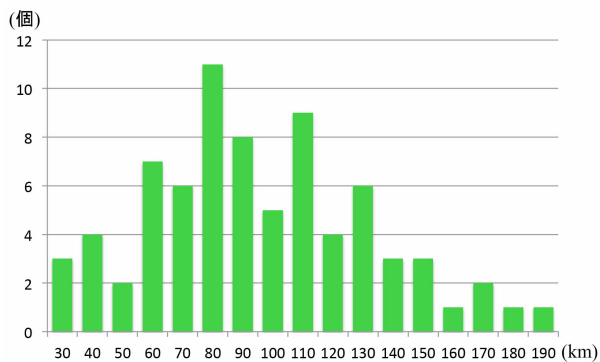


Fig.11 高度分布

4. 結論

本研究ではオーロラの三次元座標を求め、それをテクスチャマッピングで可視化する手法を提案した。計測されたオーロラの高度より、その妥当性が確認された。

しかし、オーロラが特徴点の少ない物体であるため、今後計測精度を向上するためにはマッチング精度の向上が求められる。そのためにはオーロラの高度に対するカメラ間

距離を延ばし、カメラの台数を増やす等の撮影系への提案が不可欠である。

また、本研究では対応点検出作業を手動で行ったが、対応点検出の自動化を行い連続画像をより迅速に計測可能にすることで、オーロラの動きの研究にも貢献していくことが望まれる。

謝辞

本研究の一部は、科研費挑戦的萌芽研究 25540114「超広視野・超高精度オーロラ 3次元ステレオ計測」の援助を受けた。

参考文献

- [1] 麻生 武彦, 江尻 全機, 宮岡 宏, 小野 高幸, 藪 哲郎, 六車 和彦, 橋本 岳, 安陪 稔: “アイスランド・オーロラステレオ観測と画像のトモグラフィ解析”, 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J77-D-II, No. 1, pp69-78, 1994.
- [2] Urban Brändström and Kirsti Kauristie: "The Auroral Large Imaging System-Design, Operation and Scientific Result", IRF Scientific Report 279, 2003.
- [3] 森 祥樹, 山下 淳, 田中 正行, 片岡 龍峰, 三好 由純, 金子 透, 奥富 正敏, 浅間 一: “魚眼カメラを用いたオーロラステレオ観測のためのカメラパラメータ推定”, 第18回画像センシングシンポジウム講演論文集, IS4-14, pp.1-8, 2012.
- [4] 西本 武志, 安藤 武実, 山口 順一: “魚眼ステレオを用いた三次元計測”, 第13回画像センシングシンポジウム予稿集, IN2-13, pp.1-6, 2007.
- [5] 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: “全方位画像中の特徴点と直線エッジの同時拘束と基線長の自動決定に基づく Structure from Motion による三次元環境モデル生成”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.4, pp.399-410, 2012.
- [6] R. Kataoka, Y. Miyoshi, K. Shigematsu, D. Hampton, Y. Mori, T. Kubo, A. Yamashita, M. Tanaka, T. Takahei, T. Nakai, H. Miyahara, and K. Shiokawa: “Stereoscopic Determination of All-sky Altitude Map of Aurora Using Two Ground-based Nikon DSLR cameras”, Annales Geophysicae, Vol.31, No.9, pp1543-1548, 2013.
- [7] 重松 界, 三好 由純, 片岡 龍峰, 田中 正行, 山下 淳, 森 祥樹, 久保 亮之, 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, 2013.