

魚眼カメラを用いたオーロラのステレオ観測のためのカメラパラメータ推定

Camera Parameter Estimation for Aurora Observation Using Stereo Fish Eye Camera

森 祥樹^{*1} 山下 淳^{*2} 田中 正行^{*3} 片岡 龍峰^{*3}

三好 由純^{*4} 金子 透^{*1} 奥富 正敏^{*3} 浅間 一^{*2}

Yoshiki Mori^{*1}, Atsushi Yamashita^{*2}, Masayuki Tanaka^{*3}, Ryuho Kataoka^{*3}

Yoshizumi Miyoshi^{*4}, Toru Kaneko^{*1}, Masatoshi Okutomi^{*3}, Hajime Asama^{*2}

^{*1} 静岡大学 ^{*2} 東京大学 ^{*3} 東京工業大学 ^{*4} 名古屋大学

^{*1} Shizuoka University, ^{*2} The University of Tokyo,

^{*3} Tokyo Institute of Technology, ^{*4} Nagoya University

E-mail: yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract

高さ方向を含めたオーロラの3次元形状を観測することは困難とされており、これまで行われたことがない。本研究では、魚眼カメラを用いてオーロラの3次元形状の連続ステレオ観測を行うこと目的とし、そのために必要なカメラパラメータであるカメラ姿勢を、夜空の星をキャリブレーションターゲットとして利用することで推定する手法を提案する。実験結果により、提案手法の有効性が示された。

1 序論

オーロラは、太陽風と地球磁気圏との相互作用によって地上から約100~200kmの高度に発生し、その形状はオーロラを発生させるメカニズムを反映している。よってオーロラの3次元形状計測は、オーロラを発生させる電子エネルギースペクトルの推定などの観点で重要である。しかし、オーロラの3次元形状を連続的に観測することは困難とされており、これまで行われたことがない。そこで、地上からのオーロラの高さ方向を含んだ3次元形状の連続ステレオ観測を本研究の目的とする。

広範囲を計測する手段として、通常より広い視野を持つ魚眼カメラによる計測がある[1]。本研究では、一度の撮影で全空の映像を撮影可能な魚眼カメラを用いたオーロラのステレオ観測を行う。

オーロラの撮影は、オーロラ3Dプロジェクト(aurora3d.jp)によって、アラスカ大学のポーカーフラット観測所にて行われた。実際の撮影画像を図1に示す。

ステレオ観測にはカメラパラメータとしてカメラの内部パラメータと外部パラメータが必要となる。

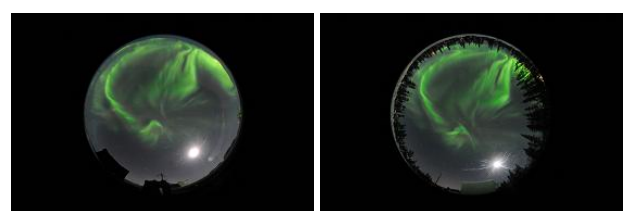
内部パラメータは画像中心、レンズの歪みパラメータなどである。外部パラメータはカメラ位置、カメラ姿勢である。内部パラメータ推定はアラスカでの実際の撮影に使用されたカメラ構成が再現出来なかったため、ほぼ同じカメラ構成で仮の内部パラメータの推定を行う。また、オーロラ撮影装置にはGPSが搭載されているため、位置情報はGPSのデータを利用することとし、本論文ではカメラ姿勢の推定を行う手法を提案する。

魚眼カメラのパラメータのキャリブレーションに関する研究[2][3][4]は盛んに行われている。また、夜空の画像を使用したキャリブレーションの研究[5]も行われている。本研究では、星をキャリブレーションターゲットとして利用する。

2 魚眼カメラ

2.1 撮影装置構成

オーロラの観測は、アラスカに設置された2組の撮影装置で行う。撮影装置は主に無停電電源(UPS)、PC、魚眼カメラ、撮影データ保存用ハードディスクで構成される。2台の撮影装置は、観測所の全天ドーム内および図2に示す屋外観測用のケースの中に設置されている。



(a) カメラ A

(b) カメラ B

図1 撮影画像

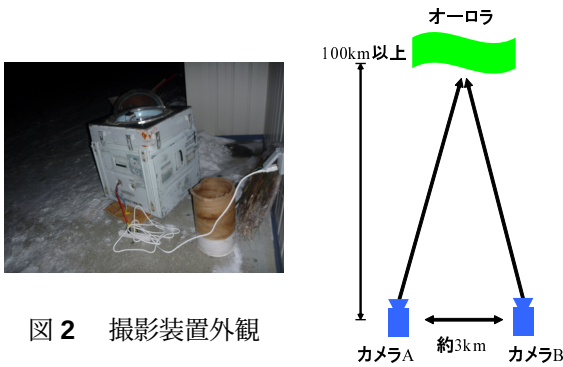


図2 撮影装置外観

図3 カメラ位置

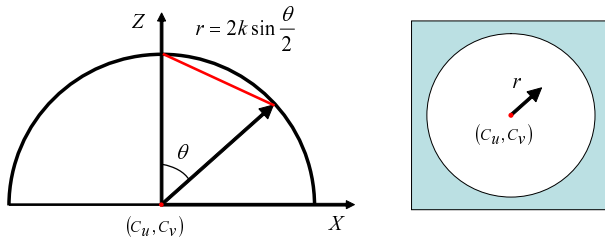


図4 等立体射影方式

2.2 カメラ位置

アラスカに設置された2つの魚眼カメラのカメラ間の距離は約3kmである。そこから、上空約100kmに発生するオーロラを撮影する(図3)。撮影装置にはGPSが取り付けられている。カメラの位置情報は、このGPSの情報を使用する。

2つのカメラの位置関係は、カメラBから見てカメラAが東から南に16.014degの方向に位置する。また、2つのカメラの高度関係は、カメラBから見てカメラAが5.670deg見上げる位置にある。

2.3 魚眼レンズモデル

魚眼カメラは、半球状の視野を持つカメラである。一般に、1台の通常のカメラに魚眼レンズを取り付けた構造をしている。

取り付ける魚眼レンズのモデルは、画角による解像度の変化がない等距離射影方式や、三角関数で像の大きさを近似する正射影方式や当立体射影方式など、射影方式により分類される[6]。本研究で用いる魚眼レンズのモデルは、

$$r = 2k \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

で表される、等立体角射影方式である(図4)。

ここで、 r は画像中心(C_u, C_v)からのピクセル距離、 θ はカメラ光軸からの角度、 k は魚眼レンズの歪みパラメータである。カメラ姿勢を推定するために必要となるカメラの内部パラメータは、画像中心(C_u, C_v)、魚眼レンズの歪みパラメータ k である。

表1 取得するパラメータ

パラメータ	内容
C_u, C_v	画像中心
k	魚眼レンズの歪みパラメータ

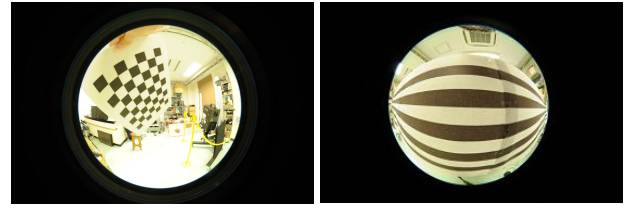


図5 画像中心の推定

図6 歪みパラメータの推定

3 カメラパラメータ推定手法

3.1 カメラの内部パラメータ

カメラ姿勢の推定を行うにあたって必要となるカメラの内部パラメータは表1の通りである。

実際のアラスカで撮影を行ったカメラでの内部パラメータの推定が行えなかったため、近いカメラ構成として、カメラは違うが魚眼レンズはアラスカでの撮影に使用したレンズを用いて内部パラメータのキャリブレーションを行い、その値を仮の内部パラメータとして使用する。

図5に示すように、チェックパターンの撮影を行いOcamCalib Toolboxを使用して画像中心を推定する[7]。

魚眼レンズの歪みパラメータは、図6に示すように直線パターンの撮影を行い推定する[8]。直線パターンの撮影を行い、カメラの光軸から90degの画像座標を推定する。式(1)に推定した画像座標の画像中心からの距離 r と $\theta = 90 \text{ deg}$ を代入することにより魚眼レンズの歪みパラメータである k を求める。

3.2 カメラの外部パラメータ

一般に、キャリブレーションを行うカメラの外部パラメータは、カメラの位置と姿勢である。本研究ではカメラの位置情報については、撮影装置のGPSの情報を使用する。よって外部パラメータはカメラ姿勢についてのみ推定を行う。

カメラの位置情報は、撮影装置に付いているGPSを利用して取得する。カメラの経度、緯度および海拔は表2の通りである。

表2 カメラの位置と海拔

	カメラA	カメラB
緯度	N 65 °07 '7.128 "	N 65 °07 '35.766 "
経度	W 147 °25 '58.008 "	W 147 °29 '47.982 "
海拔	516m	205m

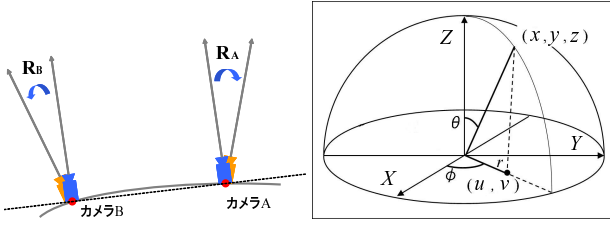


図 7 姿勢推定

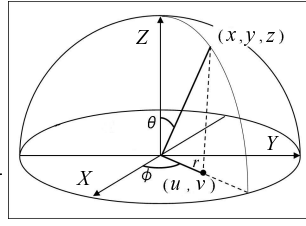


図 8 星の方向ベクトル

3.2.1 カメラ姿勢推定

本研究は、ステレオ観測のためのカメラパラメータ推定を目的としている。まず、図7に示すように、青色で表す2つのカメラが平行ステレオとなる姿勢をカメラ A, B それぞれに設定する。そして、その姿勢をから、黄色で表す実際のカメラ姿勢への回転行列の推定を行う。カメラが平行ステレオとなる姿勢については 3.2.3 項にて説明する。

3.2.2 画像からの星の方向ベクトル算出

回転行列の推定には星の方向ベクトルを使用する。本項では、実際に撮影された画像から、写っている星のカメラ座標系での方向ベクトルの求め方を述べる。方向ベクトル (x, y, z) を求めるには、図8における θ , ϕ が求まれば良い。

画像中心からの距離 r は画像座標を (u, v) とすると、

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

が成り立つ。よって、式(1)より、光軸からの角度 θ が算出される。また、

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

$$\cos \phi = \frac{v - C_v}{r} \quad (4)$$

より、X 軸からの角度 ϕ が算出される。

求めた θ , ϕ から、方向ベクトル (x, y, z) は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

で得られる。

3.2.3 リクティファイド座標系

本研究では、平行ステレオとなる姿勢の座標系をカメラ A, B それぞれに設定する。原点をそれぞれのカメラの光学中心とする。X 軸をカメラ A の光学中心か

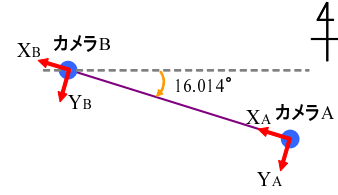


図 9 リクティファイド座標系 (X 軸, Y 軸)

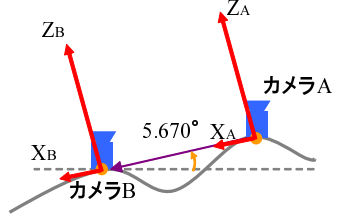


図 10 リクティファイド座標系 (X 軸, Z 軸)

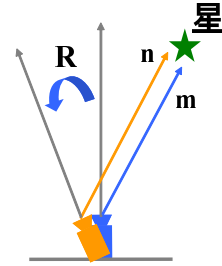


図 11 カメラ姿勢と星の方向ベクトル

ら、カメラ B の光学中心に向かう方向とする。Y 軸を原点における地表面の接地平面で、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 軸に垂直で地球から離れる方向とする。この座標系をリクティファイド座標系と呼ぶ。リクティファイド座標系での軸の方向を図9、図10に示す。

リクティファイド座標系での星の方向は星の赤緯、赤経と撮影装置の位置情報と撮影時間から算出する。

3.2.4 カメラ姿勢推定手法

図11における青色のカメラ姿勢をリクティファイド座標系をとる姿勢、黄色のカメラ姿勢を実際のカメラ姿勢とする。リクティファイド座標系における星の方向ベクトル $\mathbf{m}$ の真値は観測位置と観測時間から算出可能である。カメラ座標系における星の方向ベクトル $\mathbf{n}$ は、撮影された画像の画像座標から算出される。よってリクティファイド座標系からカメラ座標系への回転行列を $\mathbf{R}$ とすると、

$$\mathbf{n} = \mathbf{R}\mathbf{m} \quad (6)$$

が成り立つ。

式(6)は各カメラごとに独立して成立しているため、カメラ A, B それぞれのリクティファイド座標系からカメラ座標系への回転行列 $\mathbf{R}_A$, $\mathbf{R}_B$ は独立に推定可能である。よって、リクティファイド座標系における星の

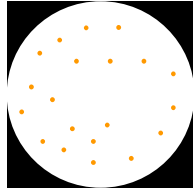


図 12 シミュレーション画像（イメージ）

方向ベクトル $\mathbf{m}$ とカメラ座標系における星の方向ベクトル $\mathbf{n}$ から，以下の評価関数 E が最小となる回転行列 $\mathbf{R}$ を推定する．

$$E = 1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\mathbf{n}_k^T \mathbf{R} \mathbf{m}_k) \quad (7)$$

ここで， N は推定に使用する星の数， $\mathbf{m}_k$ ， $\mathbf{n}_k$ はそれぞれ k 組目のリクティファイド座標系における星の方向ベクトル $\mathbf{m}$ とカメラ座標系における星の方向ベクトル $\mathbf{n}$ である．

4 回転行列推定実験

4.1 シミュレーション

実際の撮影画像から回転行列の推定を行う前に，提案手法の正当性を確認するためにシミュレーションを行った．

シミュレーションは図 12 のような画像を想定して行った．画像サイズは 180×180 pixel，推定に使用する星の数は 20 である．

内部パラメータとして，画像中心の座標を (90,90) とした．また，レンズの歪みパラメータを 63.634 とした．回転行列推定の真値として設定した回転行列 $\mathbf{R}_t$ は

$$\mathbf{R}_t = \begin{bmatrix} 0.935755 & -0.302933 & -0.180540 \\ 0.283165 & 0.950581 & -0.127335 \\ 0.210192 & 0.068031 & 0.975290 \end{bmatrix}$$

である．

一方，推定の結果得られた回転行列は，

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.935755 & -0.302933 & -0.180540 \\ 0.283165 & 0.950581 & -0.127335 \\ 0.210192 & 0.068031 & 0.975290 \end{bmatrix}$$

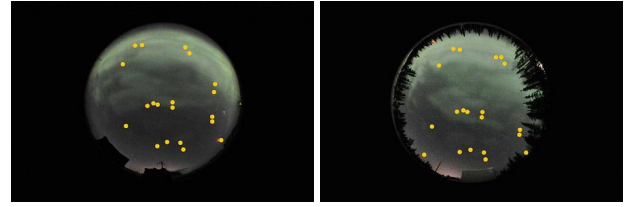
となった．

推定結果が真値と一致したため，提案手法によりカメラ姿勢を表す回転行列の推定を行えることを確認できた．

4.2 使用画像

回転行列の推定にはアラスカで撮影された画像を使用する．画像サイズは 2784×1848 pixel，回転行列の推定に使用した星の数はカメラ A 画像，カメラ B 画像ともに 20 である．

図 13 は，推定に使用した星の座標を黄点でプロットした図である．推定に使用した星の名前と画像座標を表 3 に示す．また，カメラの内部パラメータである画



(a) カメラ A

(b) カメラ B

図 13 星の座標

像中心の座標は (1360.70, 933.75) である．レンズの歪みパラメータは 519.02 である．

表 3 星の名前と画像座標

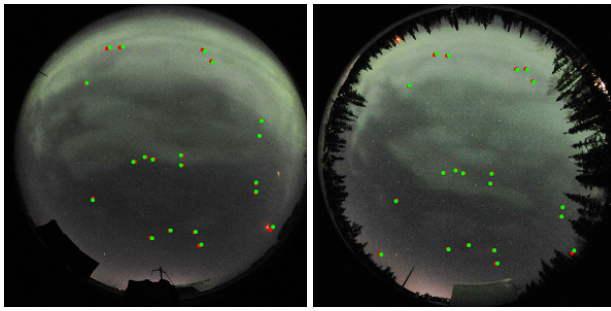
星の名前	カメラ A	カメラ B
	座標 (u,v)	座標 (u,v)
ベガ	(1027,581)	(1093,593)
デネブ	(1203,405)	(1284,447)
サドル	(1140,409)	(1225,440)
アークトゥルス	(1056,1149)	(1028,1154)
デネボラ	(1344,1334)	(1283,1388)
スピカ		(957,1413)
ゾスマ	(1434,1296)	(1382,1368)
アルギエバ	(1556,1303)	(1506,1393)
レグルス	(1583,1365)	(1521,1456)
アルカイド	(1253,964)	(1258,1017)
シザール	(1308,940)	(1317,1005)
アリオト	(1347,952)	(1354,1019)
メラク	(1484,980)	(1486,1069)
ドゥーベ	(1484,931)	(1492,1021)
シェダー	(1601,426)	(1664,517)
ルーシュバー	(1639,480)	(1696,576)
カペラ	(1875,764)	
メンカリナン	(1865,837)	
カストル	(1849,1064)	(1837,1184)
ポルックス	(1849,1108)	(1832,1229)
プロキオン	(1931,1279)	(1893,1394)
カフ		(1616,517)

4.3 実験結果

回転行列推定実験の結果は以下ようになった．

$$\mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} 0.983326 & 0.145196 & 0.109489 \\ -0.165367 & 0.964433 & 0.206212 \\ -0.075653 & -0.220880 & 0.972362 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_B = \begin{bmatrix} 0.946128 & 0.286162 & 0.151501 \\ -0.297000 & 0.953347 & 0.054044 \\ -0.128967 & -0.096128 & 0.986979 \end{bmatrix}$$



(a) カメラ A

(b) カメラ B

図 14 プロット結果

カメラ A, B それぞれの星の方向ベクトルの平均角度誤差, 画像上でのピクセル誤差, 平均角度誤差の大きさの誤差が生じている状態で 100km 先の物体を計測した場合に, 計測結果が奥行き方向にどれだけ誤差が生じるかを表 4 に示す.

表 4 角度誤差

	カメラ A	カメラ B
平均角度誤差	0.84deg	0.57deg
画像上での誤差	約 15pixel	約 10pixel
奥行き方向誤差	約 33km	約 25km

図 14 は実際の撮影画像の魚眼部分を正方形に切り出した図である. カメラ A, B それぞれについて, カメラ座標系での星の方向ベクトル $\mathbf{n}$ を緑点でプロットした. また, 推定で得られた回転行列 $\mathbf{R}$ とリクティファイド座標系での星の方向ベクトル $\mathbf{m}$ から算出した $\mathbf{Rm}$ を赤点でプロットした.

式 (6) より図 14 における緑点と赤点が重なっているほど精度が高い. 赤点と緑点のずれの傾向として, 単純な縦, 横の平行移動や回転などでは小さくすることができない方向にずれている. また, 画像の中心から離れるにつれてずれの大きさが大きくなっていく傾向がある.

誤差の原因として, 仮の内部パラメータを利用しているため, 実際のカメラの内部パラメータと違っていることが考えられる.

また, 魚眼カメラは視野が非常に広く, 地平線に近い方向まで撮影することができる. しかし, 天体からの光線が真空の宇宙から地球の大気圏に入ると屈折し, 見かけの高度が真高度と違って見える大気差が, 特に地平線に近い高度での天体に顕著に見られる (図 15). そのため, 大気差による星の光線の屈折などが考えられる.

また, 撮影装置には, カメラの上に透明の半球ドーム状のカバーがある. 撮影装置カバーの中心とカメラの光軸が一致していないことが考えられる. そのため, 撮影装置カバーによる星の光線の屈折の影響によりず

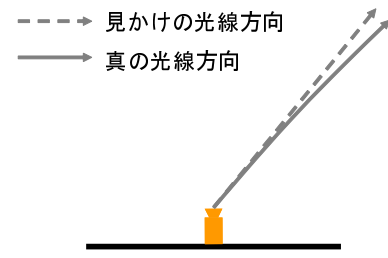


図 15 大気差

れが生じていると予想される.

4.4 画像変換

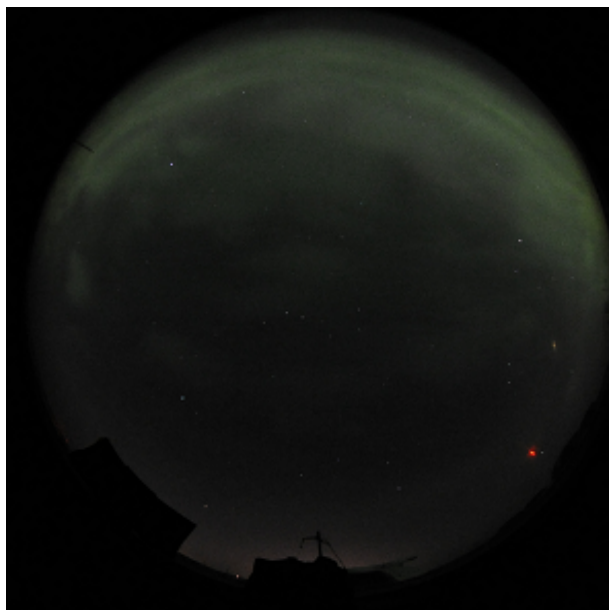
実験の結果推定された回転行列を使用して, 観測画像の変換を行った. 画像変換は, カメラ A, B ともにリクティファイド座標系を取る姿勢の方向へ向けた場合の撮影画像となるように変換を行った. 変換前の画像 2 パターンを図 16, 図 18 に. 画像を変換した 2 パターンの結果を図 17, 図 19 に示す. 図 17 は回転行列の推定に用いた画像を変換した結果である. また, 図 19 はオーロラの動きが大きく鮮やかに写っている画像を選択して変換した. ただし, 変換前の画像は魚眼画像部分を正形状に切り取っている.

これらの画像を科学技術館にあるシンラドームと呼ばれる立体映像を投影する施設での投影を行った. 著者らが視認で, 変換なしの画像と変換を行った画像を比較した結果, 後者の画像を投影した方がより立体感が出ていることが確認できた.

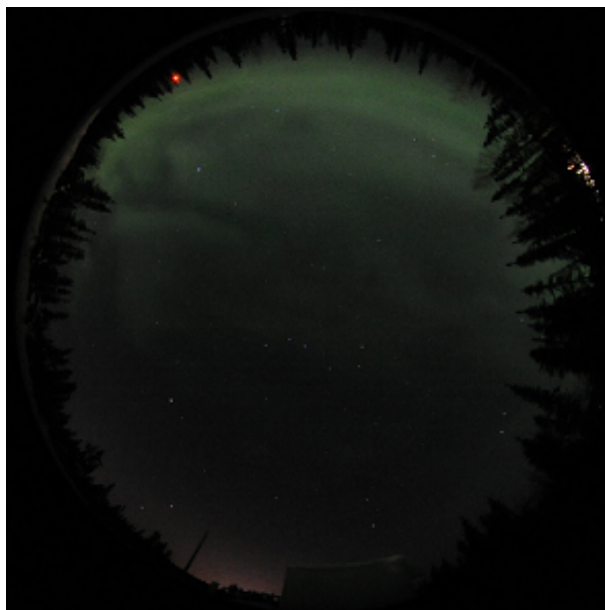
5 結論

本研究では星をキャリブレーションターゲットとして, 魚眼カメラのステレオ観測に必要なカメラパラメータであるカメラ姿勢の推定を行った. 実験結果により提案手法の有効性を確認した.

今後の課題として, 実環境で撮影された画像から内部パラメータの推定, 撮影装置のカバーや大気差による星の光線の屈折の考慮が挙げられる. これらを解決することによりカメラ姿勢の推定精度の向上が期待できる.

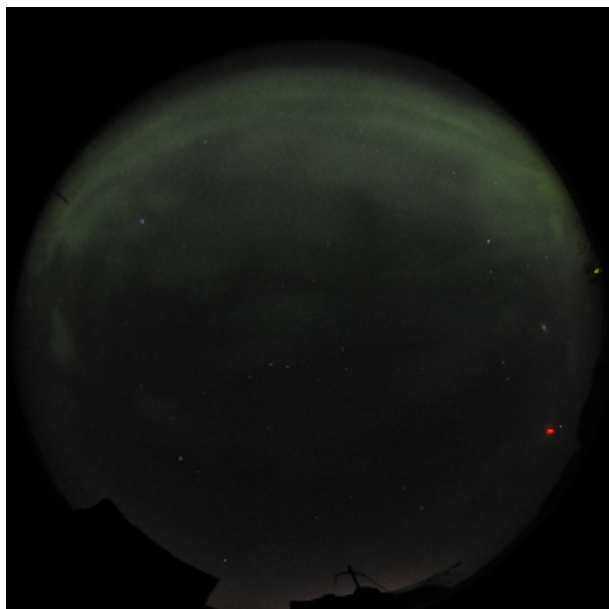


(a) カメラ A



(b) カメラ B

図 16 変換前画像 1



(a) カメラ A



(b) カメラ B

図 17 画像変換結果 1

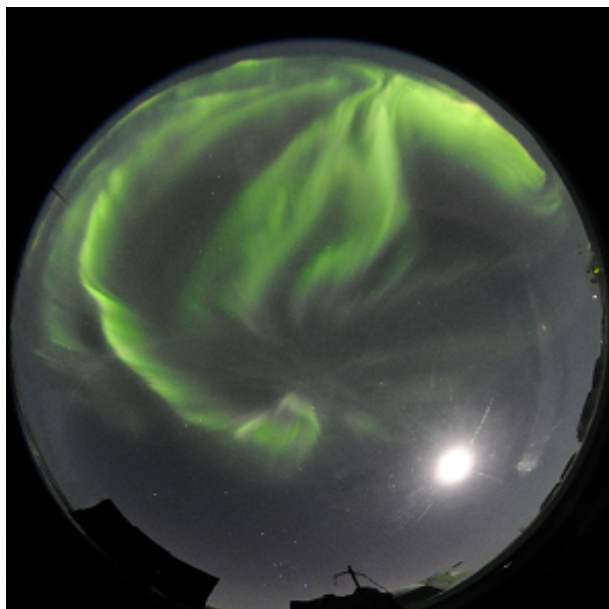


(a) カメラ A



(b) カメラ B

図 18 変換前画像 2



(a) カメラ A



(b) カメラ B

図 19 画像変換結果 2

謝辞

本研究の遂行において、アラスカ大学ポーカークラフト実験場の利用許可と、ドン・ハンプトン他現地スタッフの協力を深く感謝する。

本研究へのニコン・イメージング・ジャパンによるカメラ機材の提供に感謝する。

本研究は名古屋大学太陽地球環境研究所との共同研究である。

なお、本研究の一部は、平成 22 年度、23 年度の放送文化基金および旭硝子財団の助成を受けた。

参考文献

- [1] 永森千貴, 西本武志, 山口純一: “魚眼ステレオ視覚センサ”, 第 12 回画像センシングシンポジウム予稿集, pp.137–140, 2006.
- [2] 鳥居秋彦, 井宮淳: “画像理解のための中心カメラ系の解析”, 情報処理学会研究報告 CVIM 2006, No.51, pp.243–258, 2006.
- [3] 駒形英樹, 石井郁夫, 高橋章, 若月大輔, 今井博英: “魚眼カメラ内部パラメータの幾何学的キャリブレーション法”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J89-D, No.1, pp.64–73, 2006.
- [4] 中野誠士, 李仕剛, 千葉則茂: “球面画像獲得のための魚眼カメラの校正”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J88-D-2, No.9, pp.1847–1856, 2005.
- [5] Andreas Klaus, Joachim Bauer, Konrad Karner, Pierre Elbischger, Roland Perko and Horst Bischof: “Camera Calibration from a Single Night Sky Image”, Proceeding of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’04), Vol.1, pp.151–157, 2004.
- [6] 立花康夫, 河合敏勝, 小林洋介, 栗原哲也, 菊池孝之: “魚眼レンズ写真から任意焦点レンズ画像への変換”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.22, pp.25–30, 2007.
- [7] Davide Scaramuzza, Agostino Martinelli and Roland Siegwart: “A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras”, Proceeding of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS’06), pp.5695–5701, 2006.
- [8] 中野誠士, 李仕剛, 千葉則茂: “球面モデルに基づくしま模様パターンを用いた魚眼カメラの校正”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J90-D, No.1, pp.73–82, 2007.