

魚眼ステレオカメラを用いた 全天周時系列画像からのオーロラ3次元計測

竹内 彰^{*1}, 藤井 浩光^{*2}, 山下 淳^{*2}, 田中 正行^{*3},
片岡 龍峰^{*4}, 三好 由純^{*5}, 奥富 正敏^{*3}, 淺間 一^{*6}

Aurora 3d-measurement from whole-sky time series image using fish-eye stereo camera

Akira TAKEUCHI^{*1}, Hiromitsu FUJII^{*2}, Atsushi YAMASHITA^{*2},
Masayuki TANAKA^{*3}, Ryuho KATAOKA^{*4}, Yoshizumi MIYOSHI^{*5},
Masatoshi OKUTOMI^{*3} and Hajime ASAMA^{*6}

^{*1,*2,*6} Department of Precision Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*3} Department of Mechanical and Control Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

^{*4} National Institute of Polar Research
10-3 Midori-cho, Tachikawa-shi, Tokyo 190-8518, Japan

^{*5} Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Received 31 July 2015

Abstract

Three-dimensional analysis of aurora is important for the research of solar wind and magnetic storms, because aurora reflects the relationship between solar wind and terrestrial magnetism. Therefore a method to reconstruct a three-dimensional shape of aurora precisely is demanded. In this paper, a method to measure three-dimensional shape of aurora by using only two fish-eye cameras is proposed. Two fish-eye cameras were installed at Fairbanks, Alaska, U.S.A to get the time series images of aurora. The images photographed by the cameras are performed calibration by using the star to estimate the camera attitude. The dense feature points are detected from the images of aurora by using template matching though the image of aurora has few characteristic pattern. Moreover, a feature point tracking between two images continuing in time is performed to improve precision of the feature point detection. Then the three-dimensional coordinates of feature points are calculated by triangulation, aurora shape is measured and visualized.

Key words : Aurora 3D-Measurement, Fish-eye stereo camera, Whole-sky image, Template matching, Feature point tracking

No.15-00428 [DOI: 10.1299/transjsme.15-00428]

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*2} 正員, 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻

^{*3} 東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*4} 国立極地研究所 (〒 190-8518 東京都立川市緑町 10-3)

^{*5} 名古屋大学太陽地球環境研究所 (〒 464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

^{*6} 正員, フェロー, 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻

E-mail of corresponding author: takeuchi@robot.t.u-tokyo.ac.jp

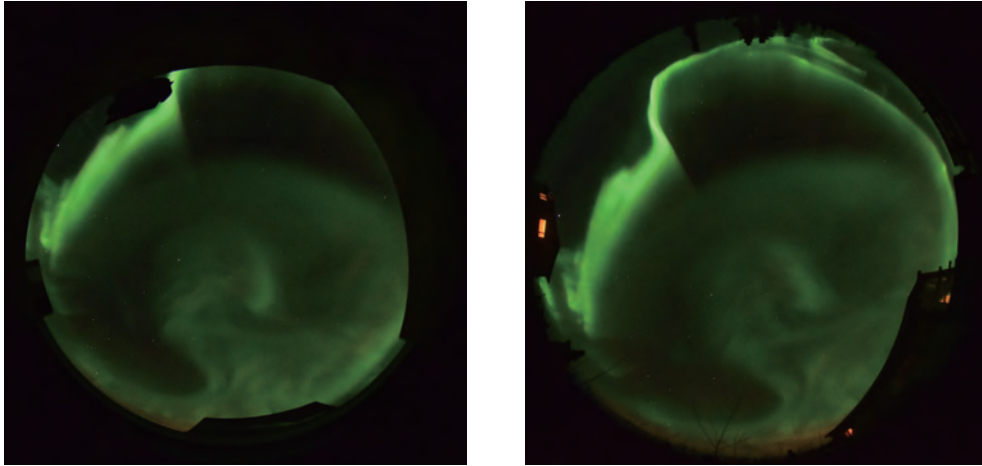


Fig. 1 Image pair for stereo measurement

1. 緒 言

オーロラとは、太陽より放出されたプラズマ粒子が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。太陽から地球に向かって放出されたプラズマ粒子は地球に到達すると一旦地球の磁力線に沿って蓄えられ、何らかのきっかけで磁力線に沿って加速しながら逆流し地球大気と衝突するときにオーロラが生じる。オーロラが生じるときオーロラの中には大電流が流れていることが知られており、この大電流はときに GPS や人工衛星を用いた通信などの我々の生活に欠かせない技術や機器に悪影響を及ぼすため(上出, 1999), オーロラがいつどのように生じるかを知ることは大変重要である。オーロラがいつどのように生じるかを知ることは、言い換えればプラズマ粒子の加速メカニズムやプラズマ粒子のエネルギー分布を知ることであるが、それらは未だ解明されていない。

オーロラの立体形状やその色は、オーロラ発光の原因となる逆流し地球に流れ込むプラズマ粒子のエネルギー分布を反映している。そのためオーロラの3次元形状の計測はプラズマ粒子のエネルギー分布や加速メカニズムのより詳しい理解に繋がると期待されている。したがってオーロラの3次元形状を正確に計測することは非常に重要である。

オーロラは発生時刻や発生場所に規則性がなく、更に絶えず形状を変化させるという点から広範囲を恒常的に計測する必要がある。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が、地上から正確な3次元計測を恒常的に行うことは非常に困難であった。

Störmer は地上2地点からオーロラを撮影し手動により対応点を求めることでオーロラの大まかな高度・形状を推定した(Störmer, 1915)。しかしオーロラ画像は特徴の少ない画像のため非常に限定された部分の形状や高度しか推定することができず、更に使用されたカメラのキャリブレーションも厳密でなく正確性に欠けた手法であった。その後、地上から撮影したオーロラ画像中のエッジに注目しオーロラを計測する方法が提案されてきた(Stenbaek and Hallinan, 1979, Brown et al., 1976)。しかし、これらの手法ではオーロラ画像中のエッジ部分の高度しか推定することができず、オーロラ全体の計測を行うことはできなかった。また Aso らや Tanaka ら(Aso et al., 1998, Tanaka et al., 2011) は7地点から TV カメラにより撮影されたオーロラをコンピュータトモグラフィ解析し、その3次元形状の復元を試みている。しかしこれらの手法では非常に大規模な装置を用いる必要がある。一方、ロケットなどを用いた宇宙空間からの計測もなされているが(Sharp, 1971, Nishimura et al., 2010), これらの手法においても撮影範囲や撮影時間に制限がある。

そこで本研究では、地上に設置した魚眼カメラで取得した画像のみからオーロラの3次元計測を行う手法を提案し、正確な3次元計測に必要な、オーロラ画像から正確に特徴点を検出する手法を提案する。恒常的に撮影が可能であり広範囲を撮影可能な画角の大きい魚眼カメラによって、連続的に変化するオーロラ画像対を取得し3次元計測に利用することで、撮影範囲や撮影時間の制限を解消する。そしてオーロラの形状や高度を正確に計測するために、設置されたカメラの姿勢や向きを補正するキャリブレーションを行い、オーロラ画像中から特徴点を密に正確に検出する。

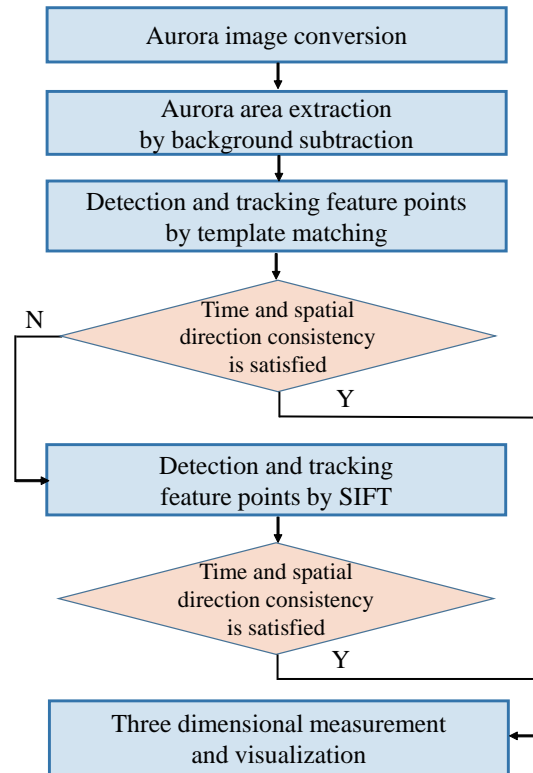


Fig. 2 Flow chart of the proposal method

2. 提案手法

本研究では2地点から同時に撮影された画像を用いてオーロラのステレオ計測を行う。より広範囲のオーロラを撮影するために地上に設置する2台のカメラを魚眼カメラとする。2台のカメラは天頂方向に向けて設置され、同期をとりながら上天を撮影し続けることによってカメラ上空の同時刻画像対を取得し続ける。取得されるオーロラ画像対の例を図1に示す。図1のような画像対からオーロラの3次元計測を行う。

2台の魚眼カメラにより得られた同時刻のオーロラ画像対に対して、画像変換により各カメラの姿勢の違いを補正することで平行化し、魚眼レンズによる歪みを補正する。その後、補正された画像対からテンプレートマッチングによって特徴点を検出し対応付ける。更に特徴点の時間方向への追跡を行い特徴点の整合性を判定することでマッチングの精度を上げる。最後に得られた全ての特徴点対に対して三角測量の原理から高度を算出することでオーロラの3次元形状を計測する。以上の本研究における提案手法のフロー図を図2に示す。以下で詳細に提案手法を説明する。

2.1 画像変換

まず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法により撮影されたオーロラ画像を変換し平行化する(Mori et al., 2013)。設置された2台のカメラの向きや姿勢は互いに異なっているため、画像変換によりこれらを一致させ2台のカメラが平行ステレオペアとなるような座標系を設ける。この座標系をリクティブアイド座標系と呼ぶこととし、この座標系への画像の変換の様子を図3(a)に示す。左側にあるカメラを左カメラ、右側にあるカメラを右カメラと定義し、以下この名称を用いて説明する。図3(a)中の赤いカメラの姿勢が設置されたままのカメラの姿勢を表し、赤矢印はその姿勢における光軸を表している。また、青いカメラの姿勢がリクティブアイド座標系に変換された後のカメラの姿勢である。リクティブアイド座標系の原点を左カメラの光学中心とし、X軸を左カメラの光学中心から右カメラの光学中心へ向かう方向とする。X軸とY軸に垂直で、地表から天頂に向かう向きにZ軸をとる。そして、Y軸は右手系に従い、原点における地表面の設置平面でX軸に垂直な方向と定義する。各カメラの光軸をリクティブアイド座標系Z軸に平行にし、カメラの向きを揃える回転パラメー

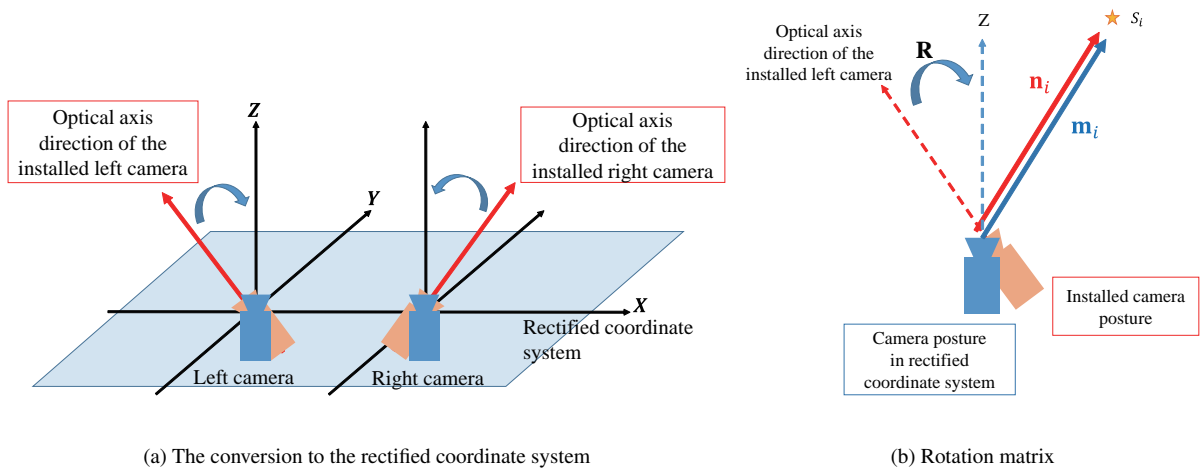


Fig. 3 The conversion to the rectified coordinate system using the star positions

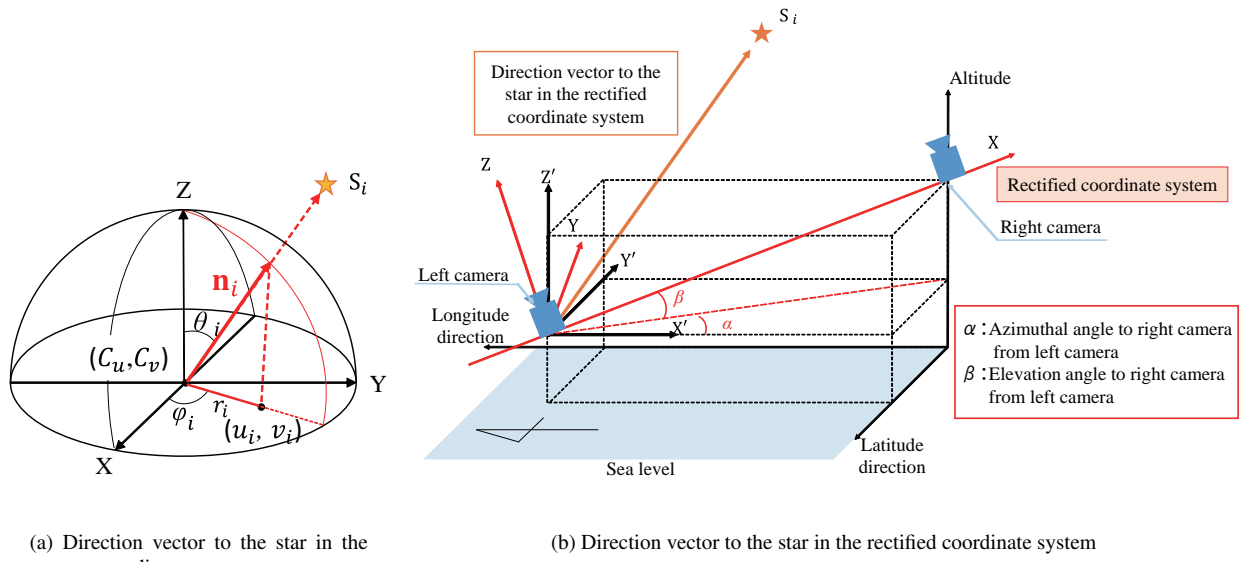


Fig. 4 Direction vector to the star

タを各カメラに対して算出することで平行化する。

カメラを平行化させるための回転パラメータの推定は、リクティブアイト座標系における星の方向ベクトルと、撮影される画像中の星の方向ベクトルを比較することにより求めることができる。ここでは、画像に写る N 個の恒星を比較していくことにより推定を行う。画像を取得した際のカメラ座標系における、観測地点から N 個の各星に向かう方向の単位ベクトルを $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_i$ とし、リクティブアイト座標系での観測地点から N 個の各星へ向かう方向の単位ベクトルを $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \dots, \mathbf{m}_i$ とする (ただし $i = 1, 2, \dots, N$)。また、 $\mathbf{n}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ 、 $\mathbf{m}_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$ と表す。カメラ姿勢と星の方向ベクトルを図 3(b) に示す。図 3(b) における赤色のカメラ姿勢を設置された状態でのカメラ姿勢、青色のカメラ姿勢をリクティブアイト座標系でのカメラ姿勢とする。点線の矢印で示された方向がそれぞれの姿勢でのカメラの光軸方向である。ここでカメラ座標系からリクティブアイト座標系への回転行列を \mathbf{R} とすると、式 (1) が成り立つ。

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{R}\mathbf{m}_i \quad (1)$$

式 (1) より、ベクトル \mathbf{n}_i 、 \mathbf{m}_i を求めれば回転パラメータを推定することができる。

設置されたカメラ座標系における、画像中の星への方向ベクトルを図 4(a) に示す。またリクティブアイト座標系における星の方向ベクトルを図 4(b) に示す。図 4(a) 中の x 軸、 y 軸、 z 軸はカメラ座標系の座標軸である。観測地

点から i 番目の星 S_i への方向ベクトルを赤矢印で表している。画像中心を (C_u, C_v) 、 S_i の画像中での位置を (u_i, v_i) 、画像中心からの画像上の S_i までの距離を r_i とおく。観測地点から S_i に向かう方向の単位ベクトルの算出するためには、図 4(a) に示すような星への方向を表す単位ベクトル (x_i, y_i, z_i) の極座標表示 (θ_i, ϕ_i) が求めれば良い。画像中心からの画像上の星までの距離 r_i は次の式 (2) により求まる。また本研究において用いる等立体角射影方式の魚眼レンズでは次の式 (3) が成り立つ。式 (3) における k は魚眼レンズの歪みパラメータである。

$$r_i = \sqrt{(u_i - C_u)^2 + (v_i - C_v)^2} \quad (2)$$

$$r_i = 2k \sin \frac{\theta_i}{2} \quad (3)$$

式 (2)、式 (3) を用いることにより、図 4(a) から式 (4)、式 (5) によって星の方向ベクトル (θ_i, ϕ_i) が算出される。式 (5) はどちらの式を用いても求めることができる。

$$\theta_i = 2 \sin^{-1} \frac{r_i}{2k} \quad (4)$$

$$\phi_i = \cos^{-1} \frac{u - C_u}{r_i}, \quad \phi_i = \sin^{-1} \frac{v - C_v}{r_i} \quad (5)$$

求めた星の方向を表す極座標表示の単位ベクトル (θ_i, ϕ_i) から、カメラ座標系における星の方向を表す直交座標表示の単位ベクトル (x_i, y_i, z_i) は式 (6) により得られる。

$$\mathbf{n}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_i \cos \phi_i \\ \sin \theta_i \sin \phi_i \\ \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

なお式 (3) 中の魚眼レンズ k の歪みパラメータの推定には、式 (3) を変形することにより得られる式 (7) を用いる。

$$k = \frac{r_i}{2 \sin \frac{\theta_i}{2}} \quad (7)$$

式 (7) において、 $\theta_i = 90^\circ$ のときの画像中心からのピクセル距離 r_i は画像半径となっているため、画像半径を得ることができれば歪みパラメータを推定することができる。しかし画像中の撮影領域の境界は不鮮明で、画像半径を計測することは困難である。

そこで魚眼レンズの歪みパラメータの推定に平行直線パターンを用いる。撮影装置で平行直線パターンを撮影し、得られた画像の消失点を利用し歪みパラメータを推定する (中野他, 2007)。魚眼レンズにより平行直線パターンを撮影すると歪みが生じるが、全ての直線は互いに平行なためカメラの光軸から 90° の点で消失点を持つ。式 (7) に $\theta_i = 90^\circ$ と、推定した画像中心から消失点までのピクセル距離 r_i を代入することにより、魚眼レンズの歪みパラメータを推定することができる。

次にリクティブアイド座標系における星の方向ベクトル \mathbf{m}_i を求める。 \mathbf{m}_i の算出を表した図を図 4(b) に示す。図 4(b) 中、 $X'Y'Z'$ 座標系を左カメラ設置位置における世界座標系、 XYZ 座標系をリクティブアイド座標系を表している。 \mathbf{m}_i を求めるためには、撮影した時刻における S_i の位置、つまり世界座標系における星への方向ベクトルを知る必要があるが、任意の時刻、位置、方向で観測したときの全ての星の位置は厳密に知ることができる。そこで本研究では、撮影装置を設置した場所の緯度、経度、高度といった情報を得るために撮影装置に GPS ユニットの搭載する。また、これによってカメラ間の方位角、仰角、高度差の情報を算出することができる。算出した方位角、仰角を用いることでカメラ設置位置での世界座標系における星への方向ベクトルを、リクティブアイド座標系における方向ベクトル \mathbf{m}_i へと変換することができる。

ここで、リクティブアイド座標系からカメラ座標系への回転行列 \mathbf{R} は N 個の星全てにおいて式 (1) を満たす行列である。よって、リクティブアイド座標系における星 S_i の方向ベクトル \mathbf{m}_i と、カメラ座標系における星 S_i の方向ベクトル \mathbf{n}_i から、回転行列 \mathbf{R} を用いたときの誤差 $\mathbf{n}_i^T \mathbf{R} \mathbf{m}_i$ の総和が最小となるような回転行列 \mathbf{R} を求めればよ

い. ゆえに, 式 (8) のような評価関数 e を設定し, 式 (9) のように e が最小となる回転行列 \mathbf{R} を左カメラ, 右カメラの場合それぞれにおいて推定する. なお式 (8) は 9 変数 1 次式で表されるため, 最急降下法で容易に求めることが可能であり局所解に陥る可能性も低い. そこで, 本研究では推定の際には最急降下法を用いる.

$$e = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{n}_i^T \mathbf{R} \mathbf{m}_i) \quad (8)$$

$$\mathbf{R} = \underset{\mathbf{R}}{\operatorname{arg\,min}} e \quad (9)$$

以上の処理によって 2 台のカメラは平行ステレオペアとなる. そして最後に, 式 (3) に基づいて魚眼レンズによる歪みを取り除く. 魚眼レンズを用いて取得した画像は画角の大きい画像周辺部に向かうほど歪みが大きく, 魚眼レンズのモデル式 (3) に基づいて補正をしても歪みが完全に除去できない場合がある. そのため以降の処理では十分に歪みを除去できる画角に限定して使用する.

2.2 背景差分によるオーロラ領域の抽出

オーロラは特徴的な模様が少なく特徴点を検出することが困難な被写体である. そのため, 星などの特徴の強い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. またオーロラのみの特徴点を対応付けるために, 木や構造物といったカメラの周囲の物体を特徴点検出範囲から除去しオーロラ領域を抽出する必要がある.

このことから本研究では, 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, 特徴点探索範囲からオーロラ領域以外の背景を除く. 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. 背景差分の手法としては Benzeth ら (Benzeth et al., 2008) の手法を用いる. 図 5 は背景差分の処理を行った図である. 図 5(a) が原画像, 図 5(b) が差分処理を行った後の画像を示しており, 白い領域が抽出された領域である. この処理によって, 木や構造物といった時間経過による変化のない被写体を除去することができる.

しかし, この処理では前景として抽出された領域にオーロラだけでなく星も含まれる. 前景領域に星が含まれる場合には 2 種類ある. 1 つは星が時間とともに位置を変えることから, オーロラのない領域で星自身が前景として抽出される場合であり, もう 1 つはオーロラが前景として抽出された領域において, オーロラの半透明性からオーロラを透かして星が存在する場合である. いずれの場合においても, 画像中で星が占める領域の画素数は 10 pixel 程度という画像に対して極めて小さい被写体であることから, 星の影響が十分小さくなるようにテンプレートマッチングの際のテンプレートサイズを画像中の星の大きさに対して十分大きく定めることで除外可能である. 特に前者の場合にはテンプレートマッチングの際にテンプレートの全てが前景領域に含まれる場合のみ探索を行うという制限を加えることでも探索範囲から星を排除できる.

この手法によりオーロラ以外の外的な影響を受けずに特徴点探索を行うことができる. 加えて, 画像対において前景の共通部分のみを探索することによって探索領域が減少し処理時間の削減を図ることができる.

2.3 特徴点の検出と対応付けの精度向上

本研究では, 同時刻に撮影された 2 枚のオーロラ画像対を用いてステレオ計測を行うことでオーロラの 3 次元計測を行う. そのため, 画像対において対応する同一点を検出する必要がある. この対応する同一な点を特徴点と呼ぶこととする. 本研究では特徴点の検出と対応付けのために, 広域でのテクスチャパターンを捉えられる性質をもつ正規化相互相関 (Zero-mean Normalized Cross-Correlation: ZNCC) によるテンプレートマッチングと, 回転や縮小・拡大といった変化がある場合にも対応付けが可能な性質を持つ Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) (Lowe, 2004) を併用する.

まず同時刻画像間においてはテンプレートマッチングによって画像間で類似する領域を対応付け, 領域の中心を特徴点と定義し画像間で点同士を対応付ける. 詳細を 2.4 節で述べる.

また正確な 3 次元計測のためには, より正確な特徴点の対応付けが必要である. そこで本研究では, 精度を向上させるために対応付けられた特徴点群のうち信頼性の低い点を検出し除去する. 信頼性の低い特徴点を検出す

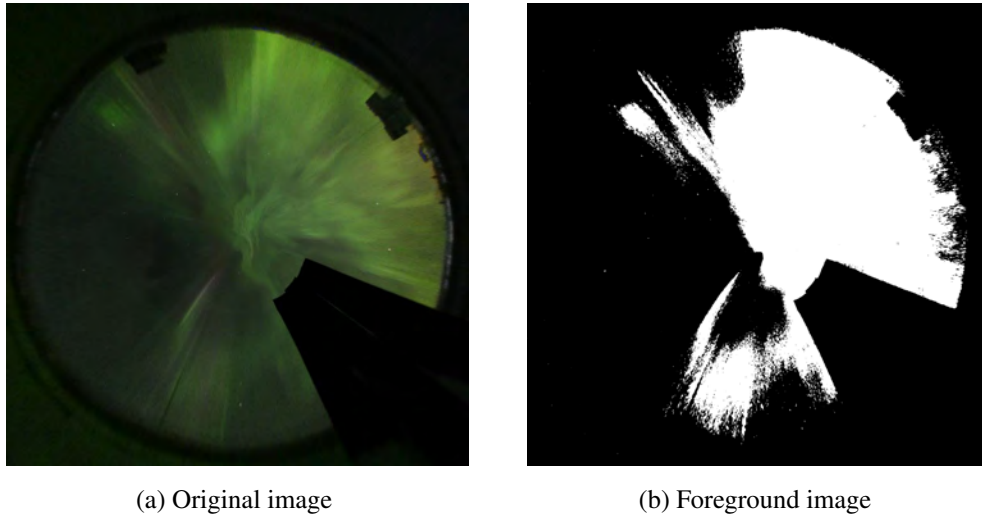


Fig. 5 Background subtraction

るために、検出された特徴点を時間方向に追跡し時空間での整合性を評価する。特徴点の追跡には、ZNCCを用いたテンプレートマッチングとSIFTを併用する。特徴点の追跡に関しては2.5節にて詳細を述べる。

2.4 テンプレートマッチングによる特徴点検出と空間方向の対応付け

2.3節にて述べた通り、本研究では画像間から特徴点を検出し対応付けるためにテンプレートマッチングを用いる。テンプレートマッチングは、一方の画像からある領域をテンプレートとして抽出し、もう一方の画像中からテンプレートに類似した箇所を探索する手法である。そのため画像の回転や拡大・縮小などの変化がある場合には対応付けがなされない。しかし特徴点を検出するための画像対は、リクティファイド座標系へと変換することで並行なペアになっており、更に同一の被写体を撮影していることから回転や拡大・縮小を考慮する必要はない。むしろオーロラ画像中には類似した模様が多いため、特徴点の検出に広く使用されているSIFTのような回転や拡大・縮小等も考慮できる特徴点検出手法を用いることで誤検出を招く恐れがある。つまり対象の形状に違いのない画像間においては、テンプレートマッチングのみを用いることでより正確な対応点の検出が行える。またテンプレートマッチングでは画像中の点同士を比較し対応付けるのではなく、抽出した領域同士の類似性を領域全体で総合的に判断する。そのためオーロラのような特徴が少ない画像間であっても、SIFTのような局所特徴量を用いた手法に比べ、対応する領域を数多く抽出することが可能である。これらのことからテンプレートマッチングは同時刻のオーロラ画像間の対応点検出に非常に有効な手法である。本手法では対応付けされた領域同士の中心の点を代表してそれぞれ特徴点と定義した。

本手法ではテンプレートマッチングを行う上での類似性の評価指標として、オーロラ画像全体の明るさが変化してもオーロラの模様で類似性を評価できるよう、画像の輝度値の変化に強いZNCCを用いる。またテンプレートのサイズは2.2節で述べた通り星の影響が十分小さくなる大きさとし、一定とする。

本研究に用いられる2台のカメラは図3(a)で示したように平行ステレオペアとなっており、得られた画像間にはエピポーラ拘束が成り立つ。そのためエピポーラ拘束を利用しマッチングの探索範囲を限定する。探索範囲を限定することによって効率的に整合性のとれた特徴点検出を行う。

2.5 時間方向への特徴点追跡

オーロラは絶えず動きのある現象であるため、連続するフレーム間であっても特徴点が消失・出現する可能性があることから追跡は容易ではない。しかし時間経過によるオーロラの形状変化には連続性があることから連続するフレーム間のオーロラ画像には類似性があると考えられる。そこで本研究では時間経過によるオーロラの形状変化とその類似性を利用して特徴点を追跡し、より正確な3次元形状の復元を狙う。

まずテンプレートマッチングを用いて特徴点の追跡を行う。フレーム間で変化の少ない部分は、フレームの前後

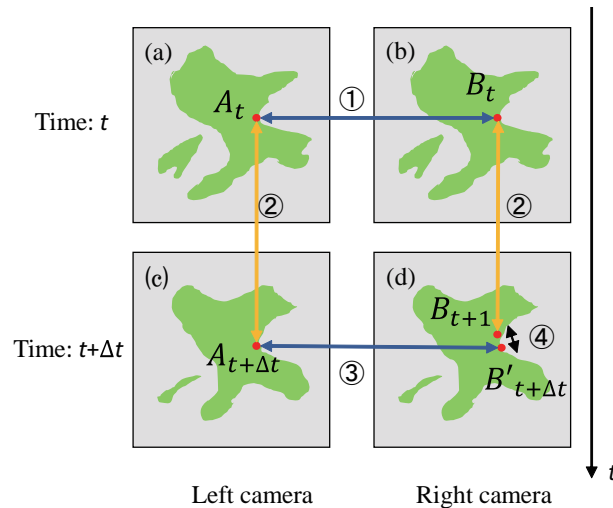


Fig. 6 Tracking method of the feature point

で類似した形状をしているためテンプレートマッチングにより追跡が可能である。時刻 t における特徴点が時刻 $t+\Delta t$ において追跡可能であった場合、時刻 $t+\Delta t$ においてもその点は特徴点である。これを利用して時刻 $t+\Delta t$ における空間方向の特徴点検出の正当性を評価することによって、より正確な特徴点検出を行う。

逆にテンプレートマッチングにより追跡不可能な部分は、オーロラ形状が大きく変化した、または形状が回転や拡大・縮小したと判断できる。オーロラは類似した形状をしていても回転や拡大・縮小している可能性がある。そこで我々の先行知見 (久保他, 2014, Fujii et al., 2014) を基に、時間方向での対応点検出には回転や拡大・縮小変化に頑健な SIFT を併用する。テンプレートマッチングによって追跡されなかった点に対して SIFT マッチングによる追跡を行う。時刻 t における特徴点が SIFT によって追跡可能であった場合、時刻 $t+\Delta t$ においてその点は特徴点であると判断でき、追跡できなかった場合その点は時刻 $t+\Delta t$ においては特徴点でないと判断できる。これらの処理によってより正確な特徴点検出が可能になる。更に連続する時刻間の形状が関連付けられることで、求められるオーロラの 3 次元形状は時間経過による連続性が保たれる。

2.5.1 テンプレートマッチングによる特徴点追跡

テンプレートマッチングによる特徴点追跡によって、時間経過による形状変化が少なく、回転や大きさの変化がない箇所を探索する。本研究では、追跡可能性の判断においても ZNCC における類似性の評価によって判断する。ZNCC による類似性の評価が高い場合、テンプレートに類似した箇所が探索できたとし追跡可能であるとする。

テンプレートマッチングによる特徴点の追跡手法を図 6 に示す。図 6 の (a), (b) は時刻 t , (c), (d) は時刻 $t+\Delta t$ に撮影されたオーロラ画像を示す。また (a), (c) は左カメラ, (b), (d) は右カメラによって撮影されたオーロラ画像を示している。それぞれ緑の模様はオーロラを表している。特徴点の追跡と整合性の評価は図 6 内に示された番号の順番に従って行われる。

① 時刻 t における空間方向の特徴点検出

同時刻 t に撮影された画像間で特徴点を検出する。対応する特徴点を A_t, B_t とする。

② 時間方向の特徴点検出

特徴点 A_t, B_t に対応する特徴点をそれぞれ時刻 $t+\Delta t$ の画像から検出する。検出された場合、 A_t, B_t に対応する特徴点を $A_{t+\Delta t}, B_{t+\Delta t}$ とする。検出されない場合、形状が大きく変わったと判断し、追跡を終える。

③ 時刻 $t+\Delta t$ における空間方向の特徴点検出

時刻 $t+\Delta t$ で特徴点 $A_{t+\Delta t}$ に対応する特徴点 $B'_{t+\Delta t}$ を探索する。

④ 追跡可能性の判断

特徴点 $B_{t+\Delta t}$ と $B'_{t+\Delta t}$ の画像中の距離を比較する。テンプレートマッチングに使用したテンプレートの大きさよりも画像中で距離が小さい場合、ほぼ同じ部分を表しているとし $B'_{t+\Delta t}$ を正しい特徴点とする。反対に画像

中の距離が大きい場合、整合性がとれていないため $B'_{t+\Delta t}$ は正しい特徴点ではないと判断し特徴点に加えない。以降、手順 1~4 を各時刻で行い特徴点の検出、追跡を続けることにより各時刻における対応する点群が抽出される。

2.5.2 SIFT による特徴点追跡

テンプレートマッチングによって追跡されなかった点に対して SIFT による追跡を行うことで、回転や大きさの変化はあるが形状変化の少ない箇所の探索を行う。まずテンプレートマッチングによる追跡がなされなかった時刻 t の点の SIFT 特徴量を抽出する。この抽出した特徴量に近い SIFT 特徴量を持つ点を時刻 $t+\Delta t$ の画像から探索する。また 1 フレームの間に生じるオーロラの移動や変形は大きなものではないため、時刻 $t+\Delta t$ の画像から探索する領域を、時刻 t での特徴点の位置の周辺に限定する。そしてテンプレートマッチングによる追跡同様、時刻 $t+\Delta t$ の画像間で SIFT による特徴点の対応付けを行い整合性をとる。整合性がとれた場合、特徴点は追跡されたとする。また、テンプレートマッチング同様にエピソード拘束を利用して探索範囲を限定することで効率的な検出を行う。

2.6 3次元計測と可視化

特徴点の検出、追跡を行うことによって同時刻の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ことでオーロラの 3次元計測を行う。本研究では、背景差分によって抽出したオーロラ領域からテンプレートマッチングを用いて特徴点を検出している。しかし抽出されたオーロラ領域には特徴的なテクスチャパターンの少ない領域が存在する。そのような領域においては 2枚の画像中から正確に特徴点を検出することは困難な場合があり、誤検出の可能性が高くなる。この課題に対して、誤対応された特徴点では高度や画角が正確に対応付けられた特徴点群から大きく外れることに注目し、高度や画角の条件を満たさない点を外れ値として除外することで誤対応の特徴点を除去する。

本手法では魚眼レンズによる歪みを補正する際に、補正後の画像中から任意の画角 ω 内の領域のみを抽出し特徴点検出用の画像として使用する。そのため、検出された特徴点は Z 軸を中心に画角 ω 内に存在する。また、現在知られているオーロラの色と高度の関係(上出, 1999)から、オーロラの色情報により特徴点の存在する高度の範囲を限定することができる。オーロラの存在する高度が h_1 [km] から h_2 [km] であるとき、その範囲外にある点群を外れ値とする。ある特徴点 (x_i, y_i, z_i) と原点を通る直線が Z 軸となす角を θ_i とすると、以下の式 (10) が成り立つ。

$$\tan \theta_i = \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{z_i} \quad (10)$$

そこで、次の 2つの式 (11), (12) を満たさない点に関しては外れ値として除去する。

$$0 \leq \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{z_i} \leq \tan \frac{\omega}{2} \quad (11)$$

$$h_1 \leq z_i \leq h_2 \quad (12)$$

そして外れ値除去後の特徴点群を 3次元空間中にプロットすることでオーロラの 3次元形状を可視化する。本手法では特徴点を追跡し連続する時刻間のオーロラの特徴点を関係付けているため、時間経過による特徴点の動きを確認することでオーロラ形状の時間経過による変化を確認することが可能である。プロットする点の色はそれぞれ、3次元座標を求めるために用いた 1対の特徴点のうち、左カメラによって撮影された入力画像の特徴点の座標の色を使用する。

また、特徴点から NURBS 曲面を求めテクスチャを貼ることで滑らかなオーロラの 3次元形状を復元する。

3. 実 験

本研究で提案した手法の有効性を検証するために、実際にオーロラを撮影し提案手法を適用し計測を行った。



(a) Outward appearance of fisheye camera system (b) Inside of fisheye camera system

Fig. 7 Fisheye camera system



Fig. 8 The place where the cameras were installed

3.1 実験環境

本研究では撮影に図7で示した魚眼カメラを用いた。図7のように地上に設置され天頂方向に向けられた2台の魚眼ステレオカメラによって撮影された画像対を入力画像として使用した。2台のカメラはアメリカ合衆国アラスカ州のフェアバンクスにカメラ間隔8.11kmで設置した。設置したカメラの位置関係を図8に示す。2台のカメラ共に撮影はノートPCによって制御され、露光時間は1.3秒、撮影間隔 Δt は10秒とした。本手法において2台のカメラによる撮影のタイミングを完全に同期させる必要があるため、撮影開始前にあらかじめ制御用に用いるPCのPC内時刻を世界標準時に一致させた。以降の説明において使用するデータは、現地時刻の2014年11月21日1時02分30秒を初期時刻 t としている。

撮影により取得されるオーロラ画像のサイズは6,000 pixel \times 4,000 pixelであるが、取得された画像は円周魚眼画像であるため円周外にあたる領域を切り取って使用する。取得されたオーロラ画像の画像中心を中心として3,200 pixel \times 3,200 pixelの大きさに切り取った画像を本実験における入力画像とする。

3.2 画像変換

時刻 t での左カメラ、右カメラの入力画像をそれぞれ図9(a)、図9(b)に示す。またそれらをリクティブアイド座標系に変換し、魚眼レンズによる歪みを取り除いた画像を図9(c)、図9(d)に示す。画像が平行化されていることが確認できる。なお本実験においては、魚眼レンズによる歪みを取り除く際に十分歪みを取り除くことができる画角を試行錯誤的に決定し、画角140°内の範囲のみを使用した。

3.3 同時刻画像間の空間方向での特徴点検出結果

テンプレートマッチングによる、同時刻間の特徴点検出の結果を図10に示す。画像変換済みの同時刻画像対図9(c)、図9(d)を入力とし、それらに対してテンプレートマッチングを行い検出した特徴点を赤くプロットした画像を出力とする。出力結果をそれぞれ図10(a)、図10(b)に示す。入力画像と出力結果を比較すると、オーロラの模様の類似している部分に赤い点がプロットされ、オーロラのない領域にはプロットされていないことが確認できる。なお、本実験においてテンプレートサイズは星の影響が十分小さくなるよう試行錯誤的に決定し、100 pixel \times 100 pixelとした。

3.4 時間方向への特徴点追跡結果

3.4.1 テンプレートマッチングによる特徴点追跡結果

時刻 t の画像間で特徴点検出を行った結果である図10(a)、図10(b)中の全ての特徴点に対して、テンプレートマッチングを用いて特徴点追跡と整合性の評価を行った結果を図10(c)、図10(d)に示す。追跡され整合性のとれ

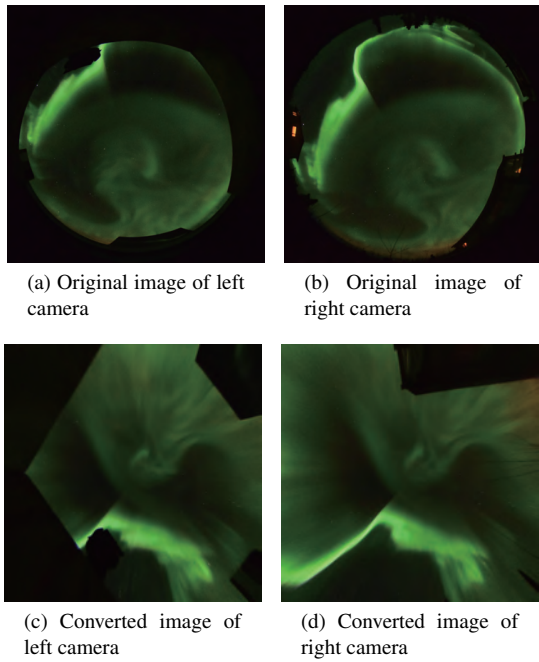


Fig. 9 Image conversion

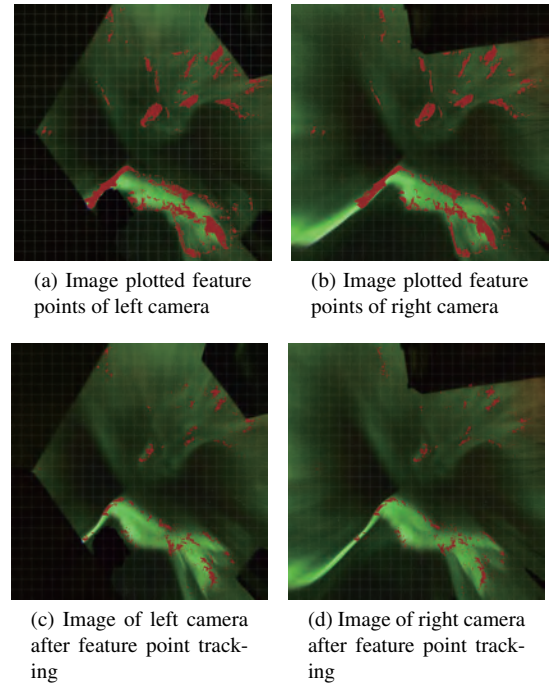


Fig. 10 Results of feature point detection and tracking

た特徴点を図 10(c), 図 10(d) に赤点で示している。

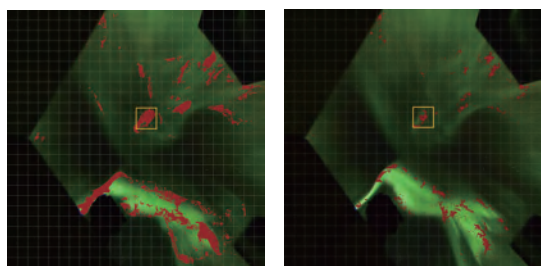
テンプレートマッチングによる特徴点追跡の結果の傾向を表した図を図 11 に示す。図 11(a), 図 11(b) はそれぞれ特徴点追跡前, 追跡後の画像である。また図 11(a), 図 11(b) 中の黄色い四角の部分拡大した図が図 11(c), 図 11(d) である。図 11(c), 図 11(d) 中の赤いプロットを除き, オーロラのテクスチャを確認できるようにしたものが図 11(e), 図 11(f) である。これらを比較すると, 時間経過によるオーロラの変化が少なく, 図 11(e), 図 11(f) 中で模様の類似している部分のみが図 11(c), 図 11(d) において赤く検出されており, 変化の大きい部分では追跡を終了できていることが確認できる。

3.4.2 SIFT マッチングによる特徴点追跡結果

SIFT マッチングによる特徴点追跡結果を図 12 に示す。図 12(a) はテンプレートマッチングによって追跡されなかった時刻 t の点群のうち, SIFT によって追跡可能と判断される点を赤い点によって表した図である。また図 12(b) は, 図 12(a) の点群を SIFT によって追跡した結果の, 時刻 $t+1$ における点群を黄色の点で表している。図 12(c), 図 12(d) は図 12(a), 図 12(b) 中の右下の青い四角を拡大した図である。図 12(e), 図 12(f) は図 12(c), 図 12(d) からプロットされた点を除いた図である。これらを見比べると, 図 12(c) の青い四角中の模様が図 12(f) 中では傾いていることが確認できる。形状の傾きの変化があっても図 12(c) 中の赤い点が追跡され図 12(d) 中で黄色くプロットされている。これにより形状が回転変化しても類似した箇所を追跡できることが確認された。

3.5 オーロラの 3 次元計測結果

時刻 t , 時刻 $t+\Delta t$ のそれぞれにおけるステレオ画像対に対してテンプレートマッチング, SIFT マッチングを用いて特徴点検出, 追跡を行うことによって時間方向に連続する 2 フレームで互いに対応する特徴点群を得る。これらの特徴点群から, 魚眼レンズによる歪みを取り除く際に制限した画角とオーロラの存在し得る高度 $h_1[\text{km}]$ から $h_2[\text{km}]$ の範囲外にある特徴点を外れ値として除去した。本実験に使用した画像中のオーロラは緑色であるため, Kataoka ら (Kataoka et al., 2013) により報告されている緑色オーロラの存在範囲から, $h_1 = 50$, $h_2 = 200$ とした。外れ値除去後の特徴点群を用いてオーロラの 3 次元形状を可視化した結果を図 13 に示す。図 13(a), 図 13(b) が時刻 t におけるオーロラをそれぞれ地上から見上げた図, 側面から見た図となっている。また, 図 13(d), 図 13(e) は時刻 $t+\Delta t$ におけるオーロラをそれぞれ地上から見上げた図, 側面から見た図を示している。図 13(c), 図 13(f) はそれぞれ時刻 t , 時刻 $t+\Delta t$ の点群に NURBS 曲面をフィッティングさせ可視化し, オーロラの上空から見た図である。これらの結果における形状の類似性から, 連続するフレーム間でオーロラの形状が連続的に変化している

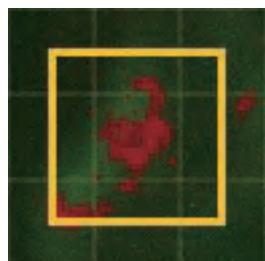


(a) Image before feature point tracking by template matching

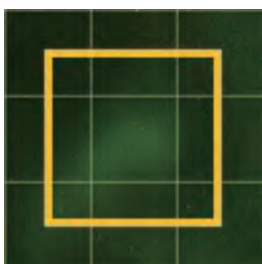
(b) Image after feature point tracking by template matching



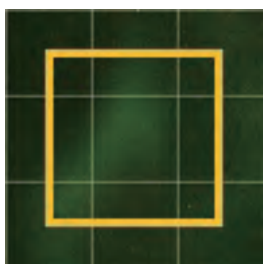
(c) Enlarged image before feature point tracking by template matching



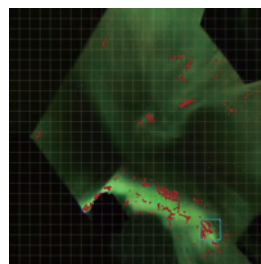
(d) Enlarged image after feature point tracking by template matching



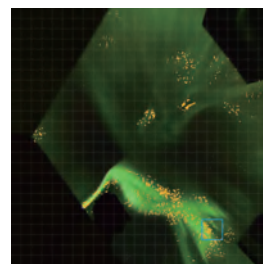
(e) Background of enlarged image before feature point tracking by template matching



(f) Background of enlarged image after feature point tracking by template matching



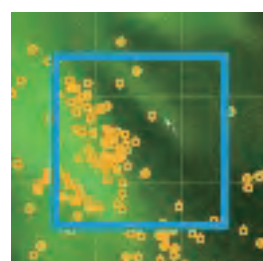
(a) Image before feature point tracking by SIFT



(b) Image after feature point tracking by SIFT



(c) Enlarged image before feature point tracking by SIFT



(d) Enlarged image after feature point tracking by SIFT



(e) Background of enlarged image before feature point tracking by SIFT



(f) Background of enlarged image after feature point tracking by SIFT

Fig. 11 Tendency of feature point tracking by using template matching

Fig. 12 Tendency of feature point tracking by using SIFT

ことが確認できた。

4. 提案手法の評価

本研究で提案した特徴点の検出，対応付け手法の有用性についての評価を行う。本研究では，正確な特徴点を得ることが難しい被写体であるオーロラを魚眼ステレオカメラにより3次元計測するために，背景差分やテンプレートマッチングを用いた特徴点検出手法を提案した。そこで，単に同時刻画像間からSIFTのみを用いて特徴点を検出し対応付けた場合の結果と比較することによりオーロラの特徴点の検出に対する本手法の有用性の評価を行う。正確な3次元計測のためには，オーロラ領域から得られる対応点数が多く，精度が良い必要がある。このことから，オーロラ領域から得られた特徴点の数とその精度について評価を行う。

まず得られる特徴点数について評価する。画像のオーロラ領域のうち，オーロラが存在し得る高度 (Kataoka et al., 2013) や画角の条件を満たす特徴点を検出できた割合を比較する。背景差分によってオーロラ領域の画素数を求め，これが求められる最大の特徴点数とする。本手法とSIFTのみを用いた手法をそれぞれ使い，得られる特徴点数を記録したものを表1に示す。時刻 t から時刻 $t+2\Delta t$ までの画像に対して行った。また，時刻 t の画像に対して，本手法とSIFTのみをそれぞれ用いて特徴点検出を行った結果画像を図14に示す。

表1から，SIFTのみを用いた方法では取得された特徴点は各時刻において1%未満であるのに対し，本提案手法では，各時刻において20%前後の条件を満たす特徴点を検出できており，平均して約24倍の特徴点を得られ

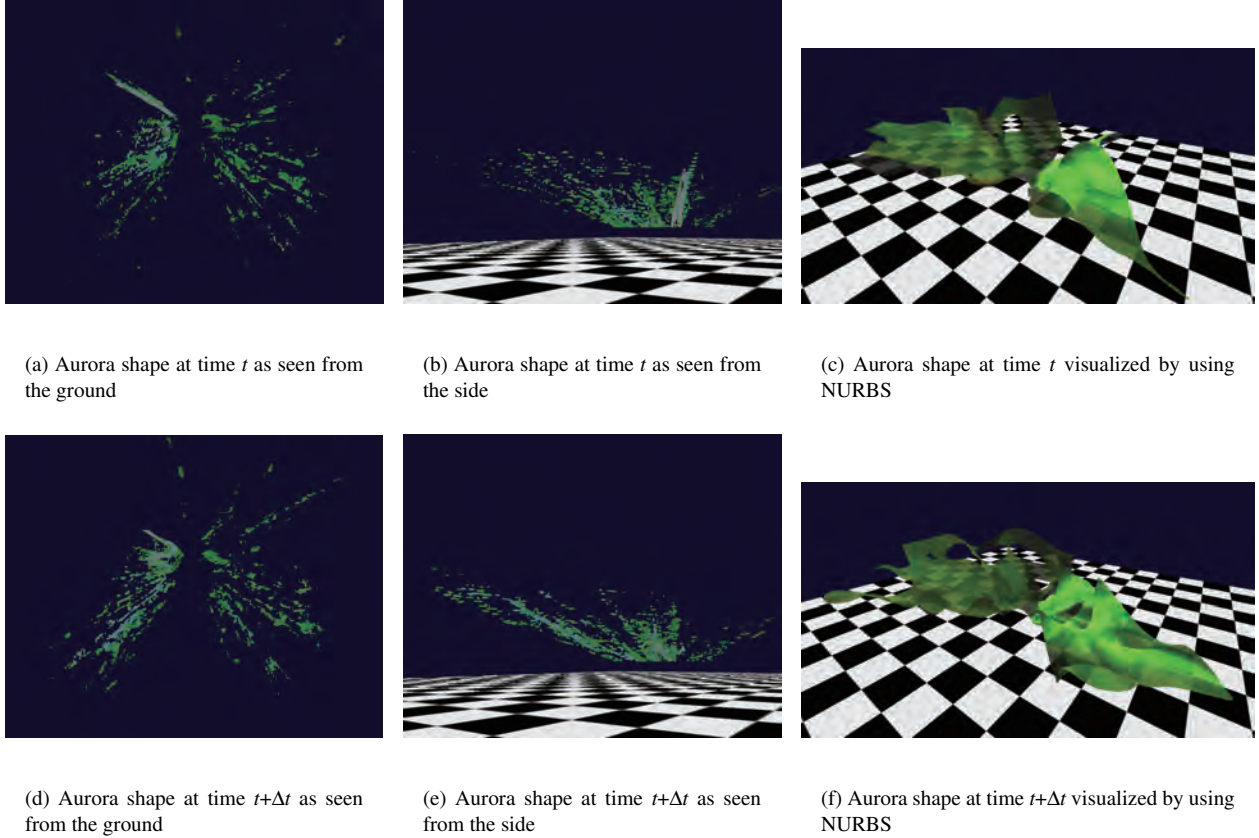


Fig. 13 3D-shape of aurora

Table 1 The ratio of the detected feature points to the aurora area

Time	The number of the pixels in the aurora area	The number of feature points detected by the proposed method	The number of feature points detected by only SIFT
t	159,549	27,147 (17.01 %)	1,048 (0.66 %)
$t+\Delta t$	136,540	31,479 (23.05 %)	1,078 (0.79 %)
$t+2\Delta t$	167,812	32,486 (19.36 %)	1,242 (0.74 %)

たことが分かる。この結果から、本提案手法を用いることでオーロラ画像から取得できる特徴点数の大幅な増加が可能となったことが確認された。

次に、取得された特徴点の精度の評価を行う。本手法と SIFT のみ用いた手法によってそれぞれ特徴点を取得し、ある任意の同領域中の特徴点のうち正確に対応付けられた特徴点の割合を精度とし比較する。今回は比較する領域として、同様の箇所から対応点を検出できているという理由から、時刻 $t+2\Delta t$ の画像中の図 15 に示すような領域を選んだ。なお正確に対応付けられているかの判断は目視によって行った。精度の評価結果を表 2 に示す。これにより、取得される特徴点数の増加のみならず、取得特徴点の精度も大幅に向上していることが確認できる。

また、本研究では、特徴点の検出の際に、オーロラの時間経過による形状変化とその類似性を考慮することにより、フレーム間の特徴点同士を関連付けた。そのため本提案手法では、時刻の連続するフレーム間においてオーロラの 3 次元形状はある程度の類似性を保ちつつ変化するという、形状の連続性が保たれる。そこで、時刻の連続するオーロラの 3 次元形状の連続性を目視により比較し評価する。提案した手法を用いて 3 次元可視化されたオーロラを、時系列順に配置した図を図 16 に示す。10s を単位時間とし、時刻 t から $t+2\Delta t$ までのオーロラ形状の

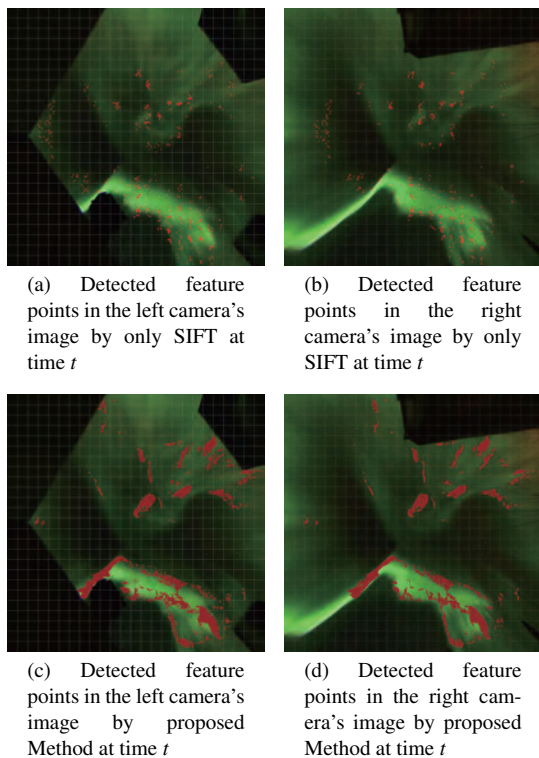


Fig. 14 Comparison of the number of the detected feature points

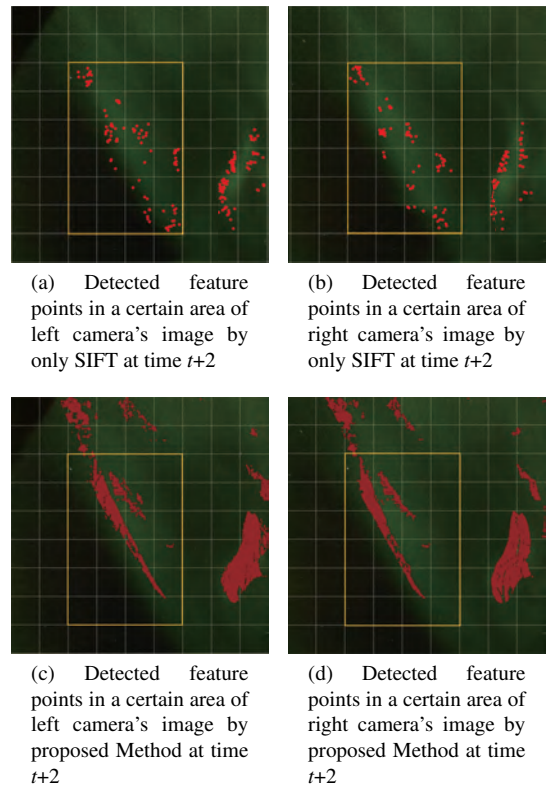


Fig. 15 Comparison of the accuracy of the detected feature points

Table 2 Accuracy of the detected feature points in a certain area

	Proposed method	Only SIFT
The number of all feature points	1,629	96
The number of accurate feature points	1,419	21
Accuracy	87.2 %	21.8 %

変化を示す。ここで左列の図はオーロラを地上から見上げた図であり、画像中心から上の向きが北である。また、中央列の図はオーロラを側面から見た図となっており、画像中心から右の向きが北を表している。右列の図は各時刻における点群に NURBS 曲面をフィッティングし、オーロラ上空から見た図である。時系列順にオーロラ形状を追っていくと、オーロラの連続性を保ちつつ形状を変化させていることが確認できる。なお、本手法は時間的に連続する2つのステレオ画像対に対して適用可能なため、撮影した全ての時刻においてオーロラの連続した形状変化を確認することが可能である。

また3次元空間にプロットした特徴点群に NURBS 曲面をフィッティングすることによって推定されたオーロラの形状の妥当性を判断するために、魚眼カメラにより撮影した実際のオーロラ画像を平行化し歪みを除去した画像と、NURBS 曲面をフィッティングすることで復元したオーロラの3次元形状を魚眼カメラ設置位置から見上げた図とを比較する。復元した3次元形状を見上げた視点位置や見上げる角度、拡大率は、設置された魚眼カメラを平行化し歪み補正を行った後と一致するように調整した。比較した図を図17に示す。図17(a)は実際のオーロラ画像、図17(b)は復元したオーロラ形状を上記の条件で2次元画像に投影した図を表している。両者を見比べると、オーロラ画像中において特徴的なテクスチャのある箇所や、逆に特徴的なテクスチャのない箇所のテクスチャパターンが類似していることが目視によって確認できる。したがって、NURBS 曲面をフィッティングすることによって復元したオーロラ形状は現実のオーロラに類似していると定性的に評価できる。

以上のことから、魚眼ステレオカメラを用いて地上からオーロラの3次元計測を行い、取得したオーロラ画像対から正確に特徴点検出を行うために本手法を用いることは有効であることが示された。

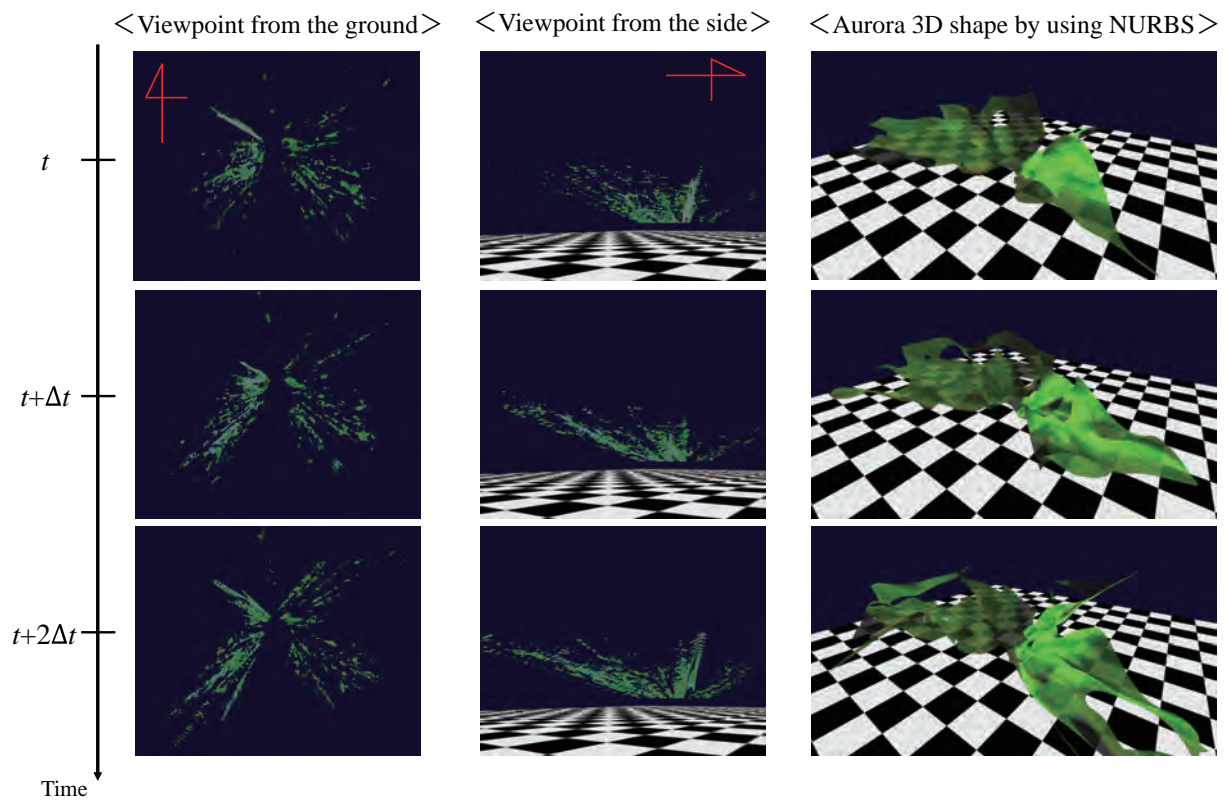
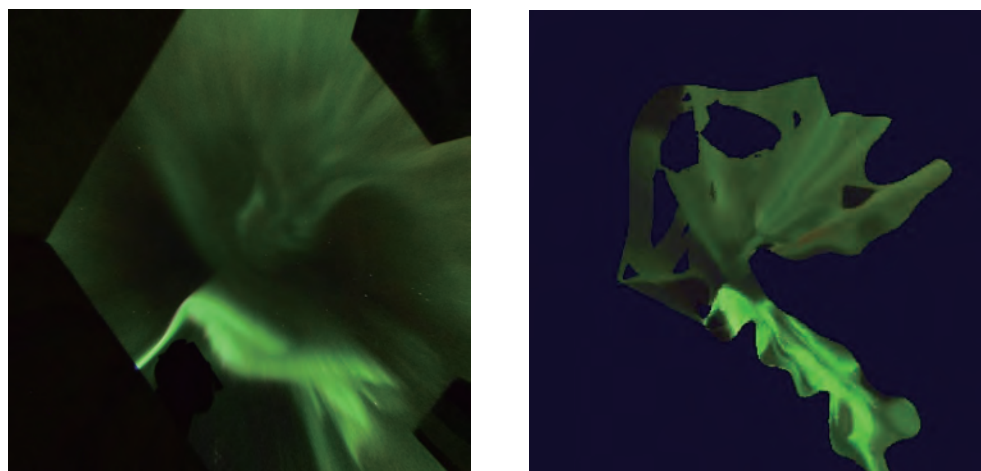


Fig. 16 Shape change of the aurora by the time progress



(a) The actual aurora image after eliminating distortion by fish-eye lens
 (b) The reconstructed aurora image by NURBS reprojected on the two dimensional image

Fig. 17 Comparison between the shape of actual aurora on the actual image after eliminating distortion by fish-eye lens and the shape of aurora reconstructed by NURBS on the two dimensional projection image

5. 結 言

本研究では、地上に設置した魚眼カメラで取得した画像のみからオーロラの3次元計測を実現し、取得したオーロラ画像対から正確に特徴点を検出する手法を提案した。精度良く計測を行うために、星を用いたキャリブレーションを行いカメラ姿勢を補正した。また正確な3次元計測のためにオーロラ画像中から対応点を数多く正確に検出する手法を提案した。背景差分、テンプレートマッチング、SIFT マッチングを異なるカメラ画像間と連続する時刻間画像に対して適用し、特徴点の検出と対応付け、信頼性の低い特徴点の除去を行い評価した。評価によっ

て本手法を用いることで特徴の少ないオーロラ画像からより密な特徴点を得られるのみならず、時間経過による形状変化が考慮されたより精密な特徴点検出が可能であると示された。これらにより、地上から魚眼カメラで撮影した画像のみから正確な3次元形状の測定を実現できた。

本研究では2台の魚眼ステレオカメラによって得られた画像対を用いて形状測定を行ったが、2台のカメラのみでは構造を完全に確認し計測することは困難であると考えられる。したがって今後の展望としてカメラ台数を増やした計測を行うことが挙げられる。また本研究では計測のための特徴点検出をテンプレートマッチングとSIFTを用いて行ったが、他の様々な特頂点検出手法での計測と比較によって、オーロラという特殊な対象の計測にとって有効な手法を検討することも今後の展望として挙げられる。

本研究における計測精度の評価は特徴点の対応付けの精度として行ったが、実際に撮影したオーロラの真値との評価は行えていない。オーロラは真値を取得することが困難な現象であるため、真値を得ることができるオーロラ以外の対象や擬似的にオーロラを表現した対象に本手法を適用しての評価を行うことは今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は、科研費挑戦的萌芽 25540114 および財団法人旭硝子の援助を受けた。

文 献

- Aso, T., Ejiri, M., Urashima, A., Miyaoka, H., Steen, A., Brandstorm, U. and Gustavsson, B., First results of auroral tomography from ALIS-Japan multi-station observations in March, 1995, *Earth Planets Space*, Vol. 50 (1998), pp. 81–86.
- Benezeth, Y., Jodoin, P. M., Emile, B., Laurent, H. and Rosenberger, C., Review and evaluation of commonly-implemented background subtraction algorithms, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition* (2008), pp. 1–4.
- Brown, N. B., Davis, N., Hallinan, T. and Stenbeak, N. H., Altitude of pulsating aurora determined by a new instrumental technique, *Geophysical Research Letter*, Vol. 2, No. 7 (1976), pp. 403–404.
- Fujii, H., Kubo, T., Yamashita, A., Takeuchi, A., Tanaka, M., Kataoka, R., Miyoshi, Y., Okutomi, M. and Asama, H., Aurora 3D-measurement and visualization using fish-eye stereo camera, *Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2014 Posters*, Article Np.24 (2014).
- Kataoka, R., Miyoshi, Y., Shigematsu, K., Hampton, D., Mori, Y., Kubo, T., Yamashita, A., Tanaka, M., Takahei, T., Nakai, T., Miyahara, H. and Shiokawa, K., Stereoscopic determination of all-sky altitude map of aurora using two ground-based Nikon DSLR cameras, *Annales Geophysicae*, Vol. 31, No. 9 (2013), pp. 1543–1548.
- 上出 洋介, オーロラ太陽からのメッセージ (1999), 山と溪谷社.
- 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 (2014), pp. 985–986.
- Lowe, D., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, Issue 2 (2004), pp. 91–110.
- Mori, Y., Yamashita, A., Tanaka, M., Kataoka, R., Miyoshi, Y., Kaneko, T., Okutomi, M. and Asama, H., Calibration of fish-eye stereo camera for aurora observation, *Proceeding of the International Workshop on Advanced Image Technology 2013* (2013), pp. 729–734.
- 中野 誠士, 李 仕剛, 千葉 則茂, 球面モデルの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*, Vol. J90-D, No.1 (2007), pp. 73–82.
- Nishimura, Y., Bortnik, J., Li, W., Thome, R., Lyons, L., Angelopoulos, V., Mende, S., Bonnell, J., Contel, O. L., Cully, C., Ergun, R. and Auster, H. U., Identifying the driver of pulsating aurora, *Science*, Vol. 330 (2010), pp. 81–84.
- Sharp, W., Rocket-borne spectroscopic measurements in the ultraviolet aurora: Nitrogen vegard-kaplan bands, *Journal of Geophysical Research*, ISSN 1530–1834 (1971), pp. 987–1005.
- Stenbaek, N. H. and Hallinan, T., Pulsating auroras: Evidence for noncollisional thermalization of precipitating electrons, *Space Physics*, Vol. 84, Issue A7 (1979), pp. 3257–3271.

- Störmer, C., Preliminary report on the result of the aurora borealis expedition to bossekop in the Spring of 1913—Third communication, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, Vol. 20, Issue 4 (1915), pp. 159–174.
- Tanaka, Y., Aso, T., Gustavsson, B., Tanabe, K., Ogawa, Y., Kadokura, A., Miyaoka, H., Sergienko, T., Brandstrom, U. and Sandahl, I., Feasibility study on generalized-aurora computed tomography, *Annales Geophysicae*, Vol. 29 (2011), pp. 551–562.

References

- Aso, T., Ejiri, M., Urashima, A., Miyaoka, H., Steen, A., Brandstorm, U. and Gustavsson, B., First results of auroral tomography from ALIS-Japan multi-station observations in March, 1995, *Earth Planets Space*, Vol. 50 (1998), pp. 81–86.
- Benezeth, Y., Jodoin, P. M., Emile, B., Laurent, H. and Rosenberger, C., Review and evaluation of commonly-implemented background subtraction algorithms, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition* (2008), pp. 1–4.
- Brown, N. B., Davis, N., Hallinan, T. and Stenbeak, N. H., Altitude of pulsating aurora determined by a new instrumental technique, *Geophysical Research Letter*, Vol. 2, No. 7 (1976), pp. 403–404.
- Fujii, H., Kubo, T., Yamashita, A., Takeuchi, A., Tanaka, M., Kataoka, R., Miyoshi, Y., Okutomi, M. and Asama, H., Aurora 3D-measurement and visualization using fish-eye stereo camera, *Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2014 Posters*, Article Np.24 (2014).
- Kataoka, R., Miyoshi, Y., Shigematsu, K., Hampton, D., Mori, Y., Kubo, T., Yamashita, A., Tanaka, M., Takahei, T., Nakai, T., Miyahara, H. and Shiokawa, K., Stereoscopic determination of all-sky altitude map of aurora using two ground-based Nikon DSLR cameras, *Annales Geophysicae*, Vol. 31, No. 9 (2013), pp. 1543–1548.
- Kamide, Y., *Aurora A Message from the Sun* (1999), YAMA-KEI Publishers Co., Ltd. (in Japanese).
- Kubo, T., Yamashita, A., Fujii, H., Tanaka, M., Kataoka, R., Miyoshi, Y., Okutomi, M. and Asama, H., 3D measurement of aurora movie photographed by stereo fish-eye camera, *Proceedings of the 2014 Japan Society for the Precision Engineering Autumn Meeting* (2014), pp. 985–986 (in Japanese).
- Lowe, D., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, Issue 2 (2004), pp. 91–110.
- Mori, Y., Yamashita, A., Tanaka, M., Kataoka, R., Miyoshi, Y., Kaneko, T., Okutomi, M. and Asama, H., Calibration of fish-eye stereo camera for aurora observation, *Proceeding of the International Workshop on Advanced Image Technology 2013* (2013), pp. 729–734.
- Nakano, M., Li, S. and Chiba, N., Calibrating fisheye camera by stripe pattern based upon spherical model, Vol. J90-D, No.1 (2007), pp. 73–82 (in Japanese).
- Nishimura, Y., Bortnik, J., Li, W., Thome, R., Lyons, L., Angelopoulos, V., Mende, S., Bonnell, J., Contel, O. L., Cully, C., Ergun, R. and Auster, H. U., Identifying the driver of pulsating aurora, *Science*, Vol. 330 (2010), pp. 81–84.
- Sharp, W., Rocket-borne spectroscopic measurements in the ultraviolet aurora: Nitrogen vegard-kaplan bands, *Journal of Geophysical Research*, ISSN 1530–1834 (1971), pp. 987–1005.
- Stenbaek, N. H. and Hallinan, T., Pulsating auroras: Evidence for noncollisional themalization of precipitating electrons, *Space Physics*, Vol. 84, Issue A7 (1979), pp. 3257–3271.
- Störmer, C., Preliminary report on the result of the aurora borealis expedition to bossekop in the spring of 1913—Third communication, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, Vol. 20, Issue 4 (1915), pp. 159–174.
- Tanaka, Y., Aso, T., Gustavsson, B., Tanabe, K., Ogawa, Y., Kadokura, A., Miyaoka, H., Sergienko, T., Brandstrom, U. and Sandahl, I., Feasibility study on generalized-aurora computed tomography, *Annales Geophysicae*, Vol. 29 (2011), pp. 551–562.