

3 地点魚眼画像による特徴点の誤検出除去を用いた オーロラの3次元ステレオ計測

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

3D Stereo Measurement of Aurora Eliminating False Detection of Feature Points by Fish-eye Images from Three Viewpoints

Akira Takeuchi^{*1}, Hiromitsu Fujii^{*1}, Atsushi Yamashita^{*1},
Masayuki Tanaka^{*2}, Ryuho Kataoka^{*3}, Yoshizumi Miyoshi^{*4},
Masatoshi Okutomi^{*2} and Hajime Asama^{*1}

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

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

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

^{*4} Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Three-dimensional analysis of aurora is important for our lives because the apparatuses which are indispensable for our lives such as GPS and artificial satellite are affected by the outbreak of the aurora. Therefore a method to reconstruct a three-dimensional shape of aurora precisely is demanded recently. In this paper, a method to increase accuracy of the three-dimensional reconstruction of aurora more than our previous method is proposed by using three fish-eye cameras. The coordinate systems Σ_1 and Σ_2 which makes two cameras parallelism are used. In Σ_1 , camera B is parallel to camera A, and in Σ_2 camera C is parallel to camera A. First, the position coordinates of the feature points on the image A in the coordinate system Σ_1 are converted into the position coordinates in the coordinate system Σ_2 . Second, the position coordinates of the feature points on the image C corresponding to the detected feature points between the image A and image B are calculated by stereo transition. By comparing the converted position and calculated position of the feature points, the false correspondence of the feature points is detected.

Key Words : Three-dimensional measurement, Fish-eye stereo camera, stereo transition

1. 序 論

オーロラとは、太陽より放出された太陽風中に含まれるプラズマ粒子が、地球大気中の原子と衝突することによって生じる発光現象である。オーロラの発生メカニズムを図1に示す。太陽より地球に吹き付ける太陽風中のプラズマ粒子は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逆流し極地付近に流入する。そのときオーロラは発生する。規模の大きなオーロラが発生するとき地球の上空では極

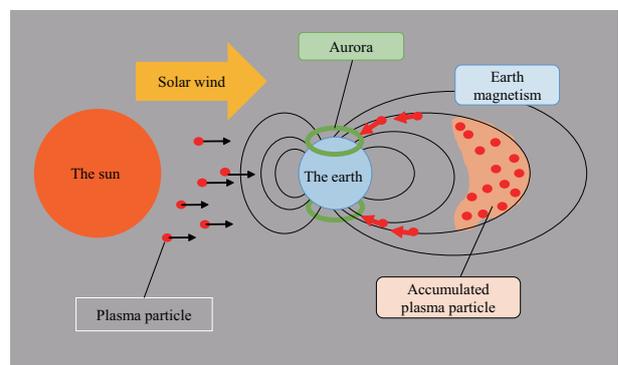


Fig. 1 The mechanism of the aurora outbreak

めて大きい電流が流れることが知られており、またそれはいまや我々の生活に不可欠な通信やGPSに悪影響を及ぼすこともある⁽¹⁾。そのような不利益を未然に

^{*1} 東京大学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) takeuchi@robot.t.u-tokyo.ac.jp

^{*2} 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)

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

^{*4} 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)

防ぐためにはオーロラ発生に至るプラズマ粒子の逆流のきっかけやメカニズムを詳しく知る必要があるが、それは未だ詳しく解明されていない。しかしオーロラの形状や分布する高度は、太陽由来のプラズマのエネルギーに依存しており、逆流メカニズム解明に大きく関係している。そのため、オーロラの形状を正確に計測することは前述の問題を解決する上で非常に重要である。

オーロラを計測しようとする試みはこれまでも行われてきた。Störmer は地上 2 地点からオーロラを撮影し手動で対応点を求めることで大まかなオーロラの形状や高度を推定した⁽²⁾。また、地上から撮影したオーロラ画像中のオーロラのエッジに注目しオーロラの計測を試みた方法も提案されている⁽³⁾。しかしこれらの手法では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なかった。更に使用したカメラのキャリブレーションも厳密ではなく正確性に欠けていた。その後、TV カメラやロケットを用いた計測がなされているが、撮影可能範囲や時間が限定されるという問題点があった⁽⁴⁾⁽⁵⁾。オーロラは発生時刻や発生場所を正確に知ることが容易ではないため、TV カメラやロケットを用いた手法では継続的な計測や大量のデータの取得は困難である。

これらの問題に対して、我々は地上に設置された 2 台の魚眼カメラによってオーロラの 3 次元形状を測定するという研究を行ってきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。カメラで定常的に空を撮影し続けることで恒常的なオーロラ計測を可能にし、広視野角を持つ魚眼レンズを用いることで撮影可能範囲が限定的でない計測手法を確立した。Fujii ら⁽⁶⁾は、得られた画像対に Scale-Invariant Feature Transgorm (SIFT)⁽⁹⁾ によるマッチングを用いることで特徴点を検出しオーロラの 3 次元計測を行うことに成功した。しかし、この手法では取得される特徴点数が少なく、更に精度も低かったことから十分な計測が行えているとは言い難かった。そこで我々は、画像対からテンプレートマッチングにより特徴点を検出し、対応付け、更に時間方向に追跡することで得られる特徴点数の数を大幅に増加させ、更に精度も向上させる手法を提案した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかし、この手法においても特徴点の誤対応は存在し、その誤対応は手動で発見し除去するほかないという問題点があった。

そこで、本研究では設置カメラを増加させ、そのカメラで撮影したオーロラ画像を特徴点誤対応の検出に使用することで誤対応を発見・除去し精度を更に向上させる手法を提案する。

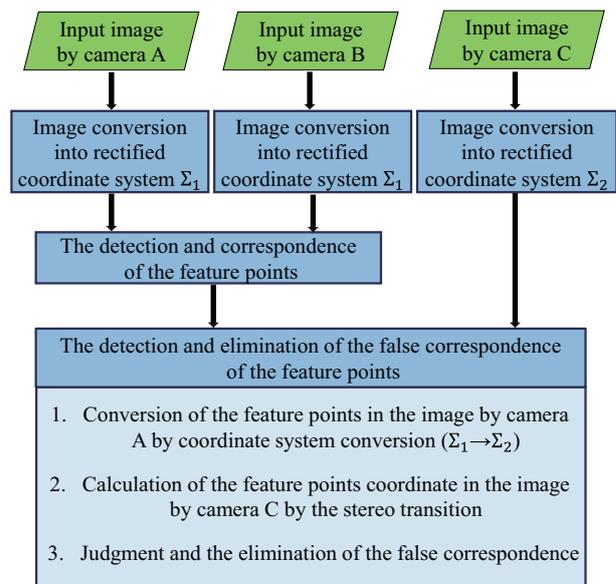


Fig. 2 Flow chart of the detection and elimination of the false correspondence of the feature points

2. 提案手法

本提案手法では、2 台のカメラを用いて取得したオーロラをステレオ計測システムで撮影した画像対（オーロラ画像対）から検出・対応付けされた特徴点群の中から、3 台目のカメラで取得したオーロラ画像を用いることで誤って対応付けされた特徴点を検出する。本研究においては、2 台のカメラ画像中から特徴点を検出・対応付けするために、我々がこれまでに提案してきた手法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を使用する。3 台のカメラ画像を用いて特徴点の誤対応を除去するまでのフロー図を図 2 に示す。画像のリクティブアイド座標系への変換、誤対応の検出手法の詳細について以下で説明する。

2.1 リクティブアイド座標系 まず、リクティブアイド座標系について説明する。リクティブアイド座標系は 2 台のカメラの画像を平行化するための座標系であり、3 台の各カメラ（カメラ A、カメラ B、カメラ C）で撮影された画像は入力された後、リクティブアイド座標系画像に変換される。リクティブアイド座標系と座標系変換について図 3 に示す。図 3 中、左のカメラをカメラ A、右のカメラをカメラ B とする。図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、赤矢印がその姿勢時の光軸を表している。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カメラ A の光学中心とし、X 軸をカメラ A の光学中心からカメラ B 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

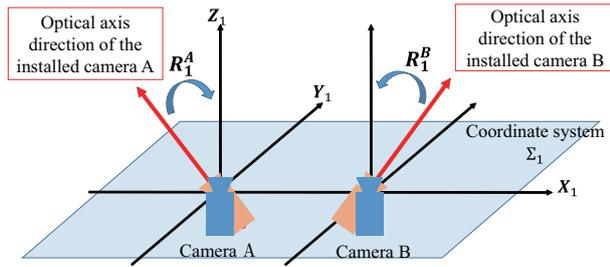


Fig. 3 The conversion to the rectified coordinate system

向と定義する。カメラ A とカメラ B からなるリクティファイド座標系を Σ_1 座標系と呼ぶこととする。そしてカメラ A とカメラ C からなるリクティファイド座標系を同様に定義し、 Σ_2 座標系と呼ぶこととする。

また、図 3 のように、 Σ_i ($i=1,2$) 座標系においてカメラ j ($j=A,B,C$) 設置時のカメラ座標系からリクティファイド座標系へと変換する回転行列を R_i^j と定義する。この回転行列に関しては従来研究⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同様、画像中の星の位置と星の地図を用いた手法で算出する。

2.2 特徴点の検出・対応付け 本研究では、特徴点の検出・対応付けを Σ_1 座標系に変換済みで平行化されたカメラ A 画像とカメラ B 画像で行う。我々の従来研究の手法⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同様にして特徴点の検出・対応付けを行う。特徴点の検出・対応付けのフローを図 4 に示す。まず、使用する魚眼レンズのモデルに基づいて画像の歪みを取り除く。その後、背景差分により画像中のオーロラ領域以外の領域を探索範囲から除外し、星等の特徴的な点による誤検出を減少させる。次に、画像対から対応する点を検出する。同時刻の画像間では回転・拡大・縮小といった変化がないという理由から、検出には輝度変化に強い正規化相互相関 (Zero-mean Normalized Cross-Correlation: ZNCC) によるテンプレートマッチングを使用し、類似する領域を対応付ける。この領域の中心を特徴点と定義する。対応付けられた特徴点群を時間方向へトラッキングし整合性をとることにより検出の精度を向上させる。時間方向へのトラッキングには、テンプレートマッチングに加え、回転・拡大・縮小に頑健な特徴を持つ SIFT を併用する。これにより、カメラ A 画像とカメラ B 画像から特徴点を検出し対応付けを行なう。

2.3 特徴点の誤対応の除去 カメラ A 画像とカメラ B 画像間で対応付けられた特徴点对から誤まって対応付けられた点を除去する。しかし、検出される特徴点の数は膨大であり、1つ1つを目視により正誤を確認することは困難である。そこで、カメラ C 画像を用いることにより、自動で特徴点の誤対応を検出する手法を提案する。特徴点对が正確に対応付けられてい

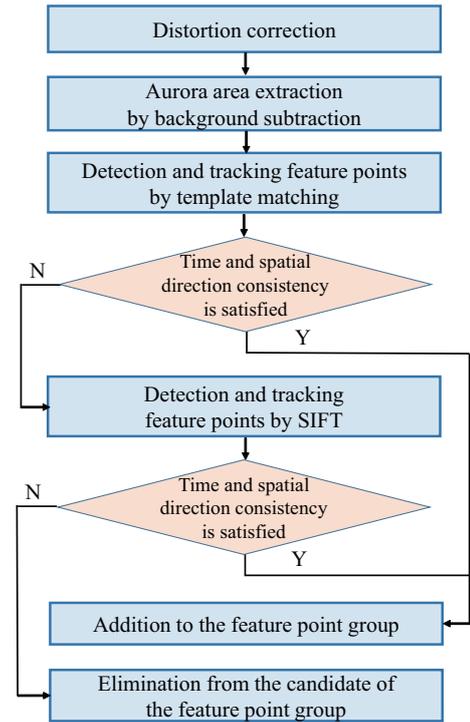


Fig. 4 Flow chart of the proposal method

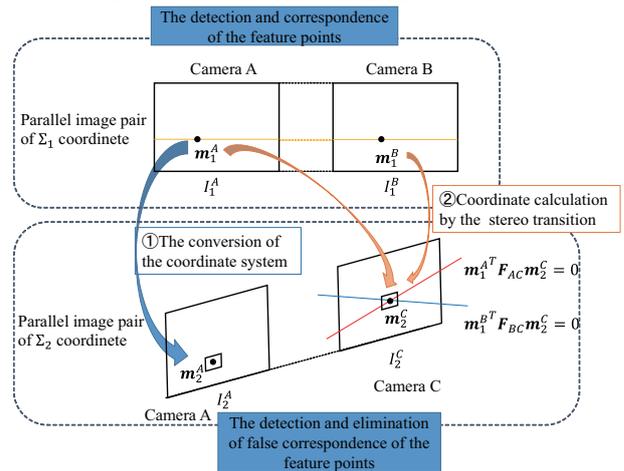


Fig. 5 The removal technique of the false correspondence of the feature points

るかを判断する手順を図 5 に示す。 Σ_i ($i=1,2$) 座標系におけるカメラ j ($j=A,B,C$) の画像を I_i^j と定義する。図 5 中における m_1^A , m_1^B は I_1^A , I_1^B 間で対応付けられている特徴点の座標を表している。この m_1^A , m_1^B の対応付けの正誤を判断する手順を以下で詳細に説明する。

2.3.1 座標変換によるカメラ A 画像上における特徴点座標変換 Σ_1 座標系におけるカメラ A の画像 I_1^A 上での特徴点の座標 m_1^A を、 Σ_2 座標系におけるカメラ A の画像 I_2^A 上における座標に変換する。図 5 上の青矢印に相当する処理である。特徴点 m_1^A から求める I_2^A 上の特徴点の座標を m_2^A とする。

また、 I_1^A 画像上の座標 m_1^A の 3 次元方向ベクトルを

I_1^A, I_2^A 画像上の座標 \mathbf{m}_2^A の 3 次元方向ベクトルを \mathbf{l}_2^A とする. 画像上の座標と 3 次元方向ベクトルは使用する魚眼レンズのモデル式を介して互いに一意に定まる関係にあるので, \mathbf{m}_1^A から \mathbf{l}_1^A を算出することができ, 逆に \mathbf{l}_2^A から \mathbf{m}_2^A を算出することができる. ここで, Σ_1 座標系に変換前のカメラ A 座標系において \mathbf{l}_1^A に対応する 3 次元方向ベクトルを \mathbf{n} とすると, 以下の式 (1), 式 (2) が成り立つ.

$$\mathbf{n} = \mathbf{R}_1^A \mathbf{l}_1^A \quad (1)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{R}_2^A \mathbf{l}_2^A \quad (2)$$

式 (1), 式 (2) から以下の式 (3) が成り立つ.

$$\mathbf{l}_2^A = \mathbf{R}_2^A{}^{-1} \mathbf{R}_1^A \mathbf{l}_1^A \quad (3)$$

以上の式により, I_1^A 画像上の特徴点の座標 \mathbf{m}_1^A から, I_2^A 画像上における座標 \mathbf{m}_2^A を求めることができる.

2.3.2 ステレオ画像の遷移によるカメラ C 画像上における特徴点座標算出 次に, Σ_2 座標系におけるカメラ C 画像である, I_2^C 画像上における特徴点の座標 \mathbf{m}_2^C を算出する. \mathbf{m}_2^C の算出のために, カメラ A とカメラ C 間, カメラ B とカメラ C 間の基礎行列 \mathbf{F}_{AC} , \mathbf{F}_{BC} を求め用いる.

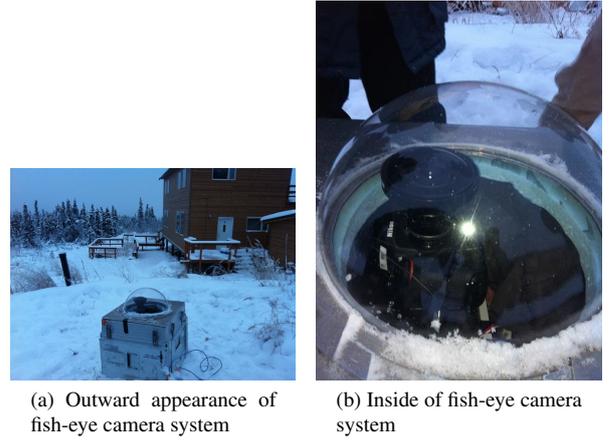
基礎行列と各画像上の座標の間には以下の式 (4), 式 (5) で表される関係が成り立つ.

$$\mathbf{m}_1^A{}^T \mathbf{F}_{AC} \mathbf{m}_2^C = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{m}_1^B{}^T \mathbf{F}_{BC} \mathbf{m}_2^C = 0 \quad (5)$$

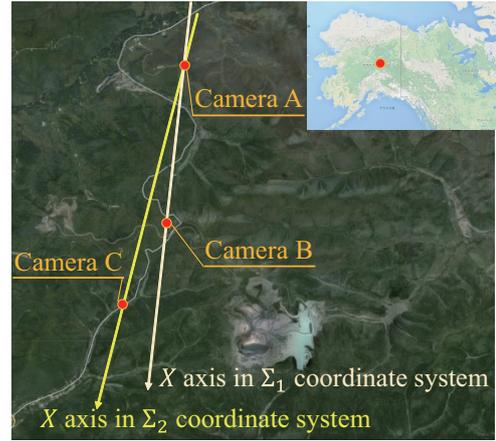
上記の式 (4), 式 (5) は, 画像 I_2^C 上におけるある直線を表す式になっており, \mathbf{m}_1^A に対応する I_2^C 上の点は式 (4) で表される直線上に存在し, \mathbf{m}_1^B に対応する I_2^C 上の点は式 (5) で表される直線上に存在することを意味している. つまり, 式 (4), 式 (5) で表される 2 直線の交点が \mathbf{m}_2^C となる. これにより, 対応づいた特徴点対の座標 $\mathbf{m}_1^A, \mathbf{m}_1^B$ から \mathbf{m}_2^C を算出することができる.

基礎行列の算出には, I_1^A と I_2^C 間, I_1^B と I_2^C 間において正確に対応づいている点を少なくとも 8 組以上用意する必要がある. 本研究では目視によっても正確に対応する点を選ぶことが可能であることから, 画像間に共通して撮影されている星を手動にて 30 個程度選び基礎行列を求めた.



(a) Outward appearance of fish-eye camera system

(b) Inside of fish-eye camera system



(c) The place where three cameras were installed

Fig. 6 Fish-eye camera system and the place where the cameras were installed

2.3.3 誤対応の判断 以上の処理により, I_1^A, I_1^B 間で対応付けられた特徴点に関して, I_2^A 上での座標 \mathbf{m}_2^A と I_2^C 上の座標 \mathbf{m}_2^C を求めることができた. もし I_1^A, I_1^B 上の特徴点が正しく対応付けられているならば, \mathbf{m}_2^A と \mathbf{m}_2^C も対応付いているはずである. つまり, \mathbf{m}_2^A と \mathbf{m}_2^C が対応付いていないならば, I_1^A, I_1^B 間の特徴点の対応付けは誤りである. そこで, \mathbf{m}_2^A と \mathbf{m}_2^C が対応付いているかどうかを調べるために, I_2^A 上における \mathbf{m}_2^A 周辺の領域と I_2^C 上における \mathbf{m}_2^C 周辺の領域の類似度を評価する. この類似度が小さい場合, \mathbf{m}_1^A と \mathbf{m}_1^B は誤対応と判断し, 特徴点群から除去する.

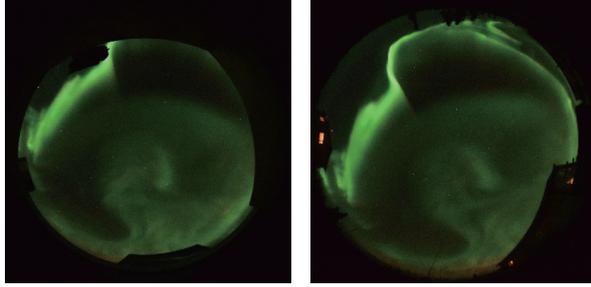
本研究では類似度の評価のために, 明るさの変化に頑健という理由から ZNCC を使用する.

3. 実験結果

本研究では 3 台の魚眼カメラを地上より天頂方向にむけて設置し撮影した画像データを用いる. カメラをアラスカ州フェアバンクスに設置しており, 撮影は同時に 10 秒間隔で行った. 設置したカメラの外観と, 設置した場所を図 6 に示す. また各カメラには GPS 情

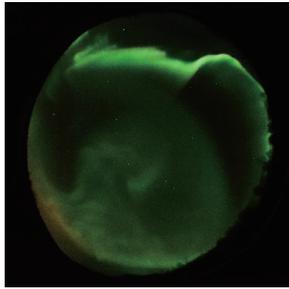
Table 1 Information of the camera position

Camera	Latitude	Longitude	Height
Camera A	N 65.12°	W 147.43°	489 m
Camera B	N 65.05°	W 147.45°	662 m
Camera C	N 65.01°	W 147.50°	364 m



(a) Input image A

(b) Input image B



(c) Input image C

Fig. 7 Input images

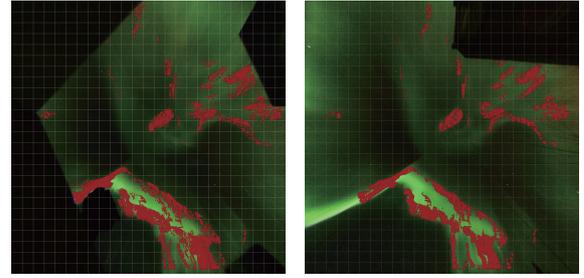
報を取得できる機器が取り付けられており位置情報を取得した．取得した各カメラの位置情報について表 1 に示す．

3.1 2カメラ画像間の特徴点の検出・対応付け 同時に撮影したオーロラ画像を入力とする．入力画像を図 7 に示す．これらの入力画像のうち，カメラ A 画像，カメラ B 画像をリクティブアイド座標系 Σ_1 に変換し，カメラ A 画像，カメラ C 画像をリクティブアイド座標系 Σ_2 に変換した．本研究では，等立体角射影方式の魚眼レンズを使用したため，等立体角射影方式の式に基づいて画像から歪みを取り除き，画角 140 度の範囲のみを使用した．

Σ_1 座標系に変換され，歪みの取り除かれた I_1^A , I_1^B 画像対から特徴点を検出し対応付けた．結果を図 8 に示す．図中にプロットされた点が検出された特徴点を表している．この画像対から，38,154 個の特徴点が検出され，対応付けがなされた．

3.2 特徴点の誤対応検出 I_1^A , I_1^B 間で対応付けられた 38,154 個の特徴点の中から誤まった対応付けのなされている特徴点对を提案手法を用いて検出した．

誤対応であると判断された特徴点の例を図 9, 図 10 に示す．検出した特徴点のうち， I_1^A 上のある特徴点を I_2^A 上に投影した点を中心に，その周辺領域を切り抜



(a) The feature points in the image A

(b) The feature points in the image B

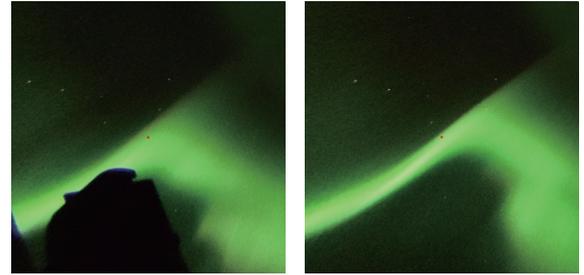
Fig. 8 The result of the detection and correspondence of the feature points between I_1^A and I_1^B



(a) The position of the feature point on I_2^A

(b) The position of the feature point on I_2^C

Fig. 9 The example of the false correspondence between I_2^A and I_2^C



(a) The position of the feature point on I_1^A

(b) The position of the feature point on I_1^B

Fig. 10 The example of the false correspondence between I_1^A and I_1^B

いた結果が図 9(a) である．また I_1^A , I_1^B 上の特徴点から基礎行列を用いて算出した I_2^C 上の特徴点を中心に，その周辺領域を切り抜いた結果が図 9(b) である．それぞれ特徴点を中心にプロットされている．図 9(a) と図 9(b) において，プロットされた特徴点周辺のオーロラテクスチャを見比べると，特徴点がオーロラの同一箇所プロットされていないことが目視によっても確認できる．

図 9(a) と図 9(b) 上に示した特徴点を逆に I_1^A , I_1^B 上に投影したものを図 10 に示す． I_1^A 上に投影した特徴点を中心に周辺領域を切り抜いた結果が図 10(a) であり， I_1^B 上に投影した特徴点を中心に周辺領域を切り抜いた結果が図 10(b) である．それぞれの図の中心には

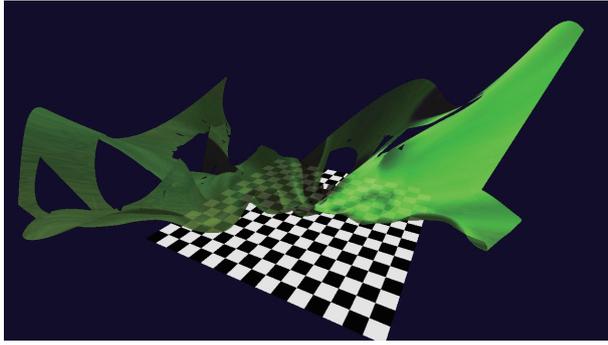


Fig. 11 Three-dimensional shape of the aurora measured by the proposed method

特徴点がプロットされている。本来この特徴点はテンプレートマッチングによって検出され対応付けられた点であるため、オーロラの同一箇所にプロットされるべきである。しかし、図 10(a) と図 10(b) を見比べると、オーロラの異なる箇所に特徴点がプロットされていることが目視によって確認できる。これは特徴点の対応付けが誤っていることを意味する。このことから、本手法によって誤対応の検出が可能であることが確認できた。

対応付けられた 38,154 個の特徴点から、本提案手法を用いることで 19,483 個の特徴点を誤対応と判断し除去した。そして特に正確に対応付けがなされたと判断される特徴点を 18,671 個抽出した。これによって精度の良い特徴点を用いることができるため、更に精度の良いオーロラ 3 次元計測が可能となった。

3.3 3次元可視化 誤対応を除去した特徴点群の高度を三角測量の原理から算出し、3次元空間中にプロットした特徴点群に対して NURBS 曲面を貼ることでオーロラの 3次元形状を可視化した。可視化したオーロラを上空から見た結果を図 11 に示す。

4. 結 論

本研究では、特徴点検出に用いる 2 台のカメラに加え、更に 1 台の異なるカメラを用いることで特徴点の誤対応を検出・除去する手法を提案した。本手法を用いることで、検出される数が膨大で人力では対応付けの正誤確認が困難であった特徴点対群から誤って対応付けされている特徴点を自動で抽出することが可能になった。またそれにより正確に対応付いた特徴点のみを使用することができるため、より正確なオーロラの 3次元計測が可能となった。

今後の展望としては 2 点考えられる。1 つは、誤対応判断の閾値とそれによる精度変化の評価である。今回の実験では誤対応の検出漏れのないよう閾値を試行錯誤的に決定したため、今回誤対応と判断され除去され

た特徴点のうち、正確に対応付いている特徴点が存在する可能性がある。そのため適切な閾値の設定により、抽出される正確な対応点の数の増加が見込める。このことから、閾値と抽出される特徴点の対応付け精度の関係を調査する必要があると考えられる。次に本提案手法の精度の定量的な評価があげられる。本研究は対象がオーロラという再現不可能な自然現象であるため計測対象の真値を得ることができず、定量的な精度評価を行えていない。そのため真値を計測可能なオーロラを模した対象を計測することで本提案手法の有効性を定量的に評価する必要があると考えられる。

参 考 文 献

- (1) 上出 洋介, “オーロラ太陽からのメッセージ”, (1999), 山と溪谷社.
- (2) Carl Störmer, “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(1915), issue 4, pp. 159–174.
- (3) Neal Boyd Brown, Neil Davis, Thomas Hallinan and Hans Stenbaek-Nielsen, “Altitude of Pulsating Aurora Determined by a New Instrumental Technique”, *Geophysical Research Letter*, Vol. 3(1976), No. 7, pp. 403–404.
- (4) Yoshimasa Tanaka, Takahiko Aso, Bjorn Gustavsson, Kunio Tanabe, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Hiroshi Miyaoka, Tima Sergienko, Urban Brandstrom and Ingrid Sandahl, “Feasibility study on Generalized-Aurora Computed Tomography”, *Annales Geophysicae*, Vol. 29(2011), pp. 551–562.
- (5) William Sharp, “Rocket-Borne Spectroscopic Measurements in the Ultraviolet Aurora: Nitrogen Vegard-Kaplan Bands”, *Journal of Geophysical Research*, ISSN 1530–1834, (1971), pp. 987–1005.
- (6) 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*, (2014), Article No.24.
- (7) 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, (2015), pp. 18–24.
- (8) Akira Takeuchi, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita, Masayuki Tanaka, Ryuho Kataoka, Yoshizumi Miyoshi, Masatoshi Okutomi and Hajime Asama, “3D Visualization of Aurora from Optional Viewpoint at Optional Time”, *Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2015 Posters*, (2015), Article No. 9.
- (9) David Lowe, “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60(2004), Issue 2, pp. 91–110.