

# 複数視点魚眼映像による発生原理を考慮した オーロラの3次元形状計測と可視化

竹内 彰<sup>\*1</sup>, 藤井 浩光<sup>\*1</sup>, 山下 淳<sup>\*1</sup>, 田中 正行<sup>\*2</sup>,  
片岡 龍峰<sup>\*3</sup>, 三好 由純<sup>\*4</sup>, 奥富 正敏<sup>\*2</sup>, 浅間 一<sup>\*1</sup>

## 3D measurement and visualization of aurora considering generation principle by using multiple fish-eye image

Akira Takeuchi<sup>\*1</sup>, Hiromitsu Fujii<sup>\*1</sup>, Atsushi Yamashita<sup>\*1</sup>,  
Masayuki Tanaka<sup>\*2</sup>, Ryuho Kataoka<sup>\*3</sup>, Yoshizumi Miyoshi<sup>\*4</sup>,  
Masatoshi Okutomi<sup>\*2</sup> and Hajime Asama<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Precision Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

<sup>\*2</sup> Department of Systems and Control Engineering, School of Engineering, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

<sup>\*3</sup> National Institute of Polar Research  
10-3 Midori-cho, Tachikawa-shi, Tokyo 190-8518, Japan

<sup>\*4</sup> Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

In this paper, we proposed a method to measure and visualize 3D shape of aurora accurately. The proposed method considers not only information of aurora images taken by stereo camera system but also constraints based on the mechanism and physical knowledge of aurora generation. The corresponding points between a pair of stereo images are detected for measurement by triangulation. At the corresponding point detection, detection accuracy is improved drastically by using the information of geomagnetism and altitude of aurora's lower end. Then the shape is visualized by fitting NURBS surface to the detected corresponding points. Applying this method, the 3D shape of aurora which reflects the physical knowledge could be visualized.

**Key Words** : Aurora measurement, Fish-eye cameras, Corresponding point detection, Epipolar line

## 1. 緒 言

オーロラは、太陽から放出される太陽風に含まれるプラズマ粒子が、大気中の酸素や窒素などの分子と衝突することによって発生する発光現象である。プラズマ粒子は地球に到達した後に地球の夜側の地磁気線の中に侵入し、一旦蓄えられる。しかし、何らかのきっかけでプラズ粒子が地磁気に沿って地球の極地付近に逆流する際にオーロラが生じる(図1)。

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めて大きい電流が流れることが知られており、ときにこの大電流はいまや我々の生活に不可欠な通信機器やGPSに悪影響を及ぼすことがある<sup>(1)</sup>。そのよう

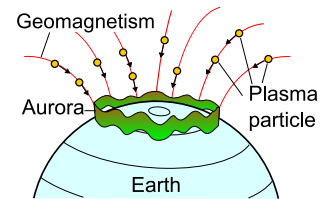


Fig. 1 The relationship between aurora generation and geomagnetism

な不利益を未然に防ぐためにオーロラ発生の位置や時刻を詳細に知ることは重要であるが、プラズマ粒子が極地付近へと逆流するきっかけは未だ解明されておらず、オーロラ発生を完全に予報することは困難である。

オーロラ発生の原因と考えられている太陽風の観測や研究は数多くなされており<sup>(2)</sup>、太陽風の向きや強度がオーロラの形状や分布する高度に大きく影響を与えることが知られている。そのためオーロラ形状や分布する高度の正確な計測は、前述の未解明な問題の解決

<sup>\*1</sup> 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

<sup>\*2</sup> 東京工業大学工学院システム制御系 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>\*3</sup> 国立極地研究所 (〒 190-8518 東京都立川市緑町 10-3)

<sup>\*4</sup> 名古屋大学宇宙地球環境研究所 (〒 464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

につながり非常に重要である。さらに、発生する位置や時刻が分からないというオーロラの性質から、位置や時間に限定されず持続的に計測可能な手法の確立が必要とされている。

オーロラ計測に関する研究はこれまでも行われてきた。Störmer や Brown らは地上に設置した2台のカメラによって取得した画像対から手動で対応点を求め、オーロラの高度を推定した<sup>(3)(4)</sup>。しかしこれらの手法ではオーロラの一部しか計測できず、使用された機器のキャリブレーションも不十分で精度に欠けるという問題点があった。また、近年では多数のカメラを用いた計測や、地上のカメラと人工衛星を用いた計測もなされているが、いずれも計測可能な範囲や時間が限定されているという問題点があった<sup>(5)(6)</sup>。

これらの問題に対して、我々は地上に設置された魚眼カメラによってオーロラの3次元形状を計測する研究を行ってきた<sup>(7)~(10)</sup>。カメラで定常的に空を撮影し続けることで持続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計測可能な範囲が大きい計測手法を確立した<sup>(7)</sup>。また、画像対からブロックマッチングにより密な対応点を検出することで3次元形状の計測を可能にし、さらに時間方向への追跡<sup>(8)(9)</sup>や複数視点からの計測<sup>(10)</sup>により、画像情報から誤対応点を検出し除去することで計測精度を向上させた。

しかしこれらの手法では、画像中のオーロラ領域においてテクスチャの変化の乏しい領域から正確に対応点を検出することは困難であった。オーロラはテクスチャの変化が乏しい領域を多く有する現象であるため、そのような領域においても密で正確な対応点検出は正確な計測に不可欠である。

従来手法では計測に画像情報のみを用いていたが、加えてオーロラの発生要因や物理的特性などの既に解明されている物理的知見を活用することで、テクスチャの変化が乏しい領域からの対応点検出が期待できる。さらに対応点が互いに物理的な整合性のとれた関係となるように検出することで、より正確な3次元計測や形状復元が期待できる。そこで、本研究ではオーロラ画像情報に加えて、オーロラ形状を決定する重要な要因である地磁気の情報やオーロラの存在高度範囲といった物理的知見に着目し、それらに対応点検出の際の拘束として利用した3次元計測手法を提案する。

## 2. アプローチ

提案手法のフローを図2に示す。本研究では、地上に設置した2台の魚眼カメラによって取得したオーロラ画像対を入力とし、レンズによる歪みの除去や画像

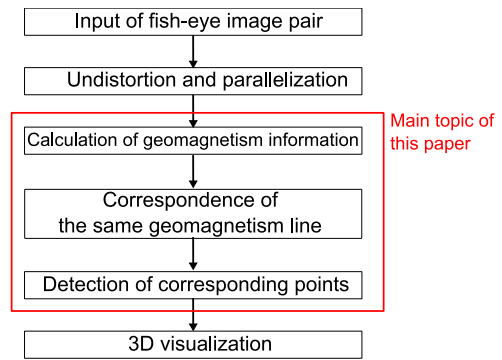


Fig. 2 Pipeline of the proposed method

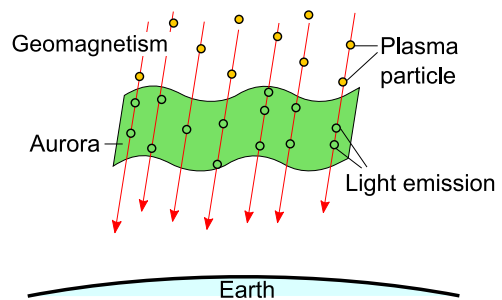


Fig. 3 Aurora and geomagnetism seen from ground

対の平行化処理を行う。続いて処理後の画像対から対応点を検出し、三角測量の原理を用いてオーロラの3次元形状を計測し可視化する。提案手法では、対応点検出の際に画像情報に加えてオーロラの物理的性質を利用することで計測精度を向上させる。

オーロラはプラズマ粒子が地磁気に沿って地球へ逆流する際に生じる現象であり、地磁気線上で発光する光の集合体である(図3)。そのため地上から観測したオーロラ形状は同時刻の地磁気方向と密接に関係しており、その下端の高度は逆流するプラズマ粒子の勢いを反映している。そこで本研究では、地磁気やオーロラの下端付近の高度情報を用いて画像間に対応する地磁気線を検出し、対応点検出に利用する。

## 3. 提案手法

**3.1 入力画像の平行化** 本研究では、地上に設置し同期をとった2台の魚眼カメラを用いて同時刻に撮影した画像対を入力として使用する。オーロラは高度100 km以上の上空で発生するため、三角測量による計測に十分な視差を得るために2台のカメラは大きく距離をおいて設置する必要がある。そのため2台のカメラの姿勢を設置時に調節することによって正確な平行ステレオペアにすることは困難である。そこで画像処理により入力画像対を平行ステレオ画像対へと変換する。また入力画像対は魚眼レンズ特有の歪みを有しているため、従来手法<sup>(7)</sup>と同様の手法により、ステ

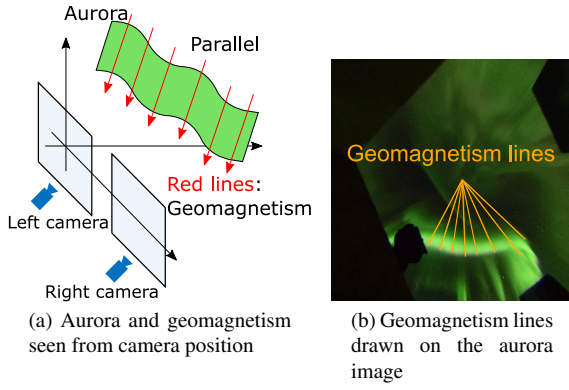


Fig. 4 The relationship between aurora image and geomagnetism lines

レオ画像対へと変換するとともに魚眼レンズのモデルに基づいて歪みを除去する。

**3.2 地磁気情報を利用した対応点検出** オーロラは半透明で特徴的なテクスチャの少ない対象であるため、画像情報のみからではオーロラ画像対における対応点を正確かつ密に検出することは困難である。そこで提案手法では、対応点検出の際に画像情報に加え、オーロラ形状を決定する大きな要因の1つである地磁気の偏角や伏角の情報を利用する。地磁気の偏角や伏角は緯度や経度によって異なるため、カメラ設置場所の緯度・経度情報から計算する。地磁気情報の計算には、地磁気の分布を全地球的スケールで数式によって表現したモデルである、国際標準地球磁場 (International geomagnetic reference field: the 12th generation) モデル (以下、IGRF-12) <sup>(11)</sup> を使用する。

**3.2.1 地磁気線の消失点位置の算出** カメラの緯度・経度情報と IGRF-12 に基づいて計算した地磁気の偏角と伏角から、地磁気を画像上に投影することが可能である。この投影した地磁気の線を地磁気線と呼ぶこととする。オーロラ上の地磁気と、オーロラ画像上に投影した地磁気線を図4に示す。前述したように地磁気は緯度・経度によって変化するが、図4(a)に示すようにカメラの撮像範囲では地磁気の変化は極めて小さく地磁気はほぼ平行とみなせる。地磁気が平行であるとき、画像上に投影される全ての地磁気線は図4(b)のように消失点で交わる。消失点の座標  $(u_v, v_v)$  は、画像中心を  $(C_u, C_v)$ 、カメラの焦点距離を  $f$ 、地磁気線の単位ベクトルを  $(n_1, n_2, n_3)$  とすると以下の式(1)で表すことができる。

$$(u_v, v_v) = \left( C_u + \frac{fn_1}{n_3}, C_v + \frac{fn_2}{n_3} \right). \quad (1)$$

消失点座標を算出することで、画像中でオーロラが存在するテクスチャ上のピクセルから地磁気線を算出

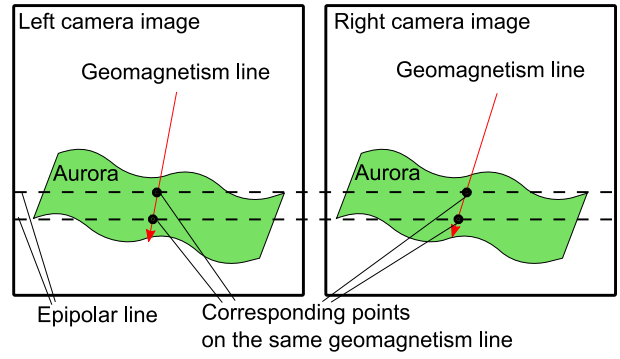


Fig. 5 Corresponding points detection using the same geomagnetism line and epipolar lines

可能となる。

なお、これ以降も画像の横軸を  $u$  軸、縦軸を  $v$  軸と表記する。

**3.2.2 エピポーラ線の利用による対応点検出** オーロラはプラズマ粒子が地磁気に沿って地球大気に流入することに起因する現象であることから、画像中のオーロラのテクスチャは地磁気線の傾きを反映している。そのため画像間における対応点は、画像間で対応する同一の地磁気線上に存在する。また、画像対をそれぞれ左カメラ画像、右カメラ画像と呼ぶとすると、左カメラ画像上の点に対応する右カメラ画像上の点はエピポーラ線上に存在する。よって図5に示すように、オーロラ画像対において、対応する地磁気線とエピポーラ線の交点に対応点を意味する。なお、本手法では画像対は平行ステレオ画像となっているため、エピポーラ線は全て画像の  $u$  軸に平行であり、対応点の  $v$  座標は等しい。よってオーロラ領域において、対応する地磁気線上の  $v$  座標の等しい点同士は全て対応点となる。

このように画像間で対応する地磁気線を同定することで、テクスチャ変化の極めて小さいオーロラ領域上であっても対応点を密に検出することが可能となる。

**3.3 地磁気線の対応付け** 画像間で対応する地磁気線を検出するために、地磁気線周辺の領域同士の類似性を評価する。具体的には地磁気線周辺のテクスチャをブロックとして切り出し、ブロック同士の類似度を計算し比較する。このとき、比較するブロック同士が射影変換の関係となっているため、ブロックを補正しマッチングを行う。

さらに、地磁気線の誤対応を減少させるために、物理的に解明された知見を用いて探索範囲を制限する。オーロラは発光の集合体であるが、地上から観測した場合、その発光は下端部のやや上部で最も強度が大きいことが知られている<sup>(12)</sup>。以降、オーロラ上の最も強度の大きい発光部をオーロラの最輝部と呼ぶ。この最

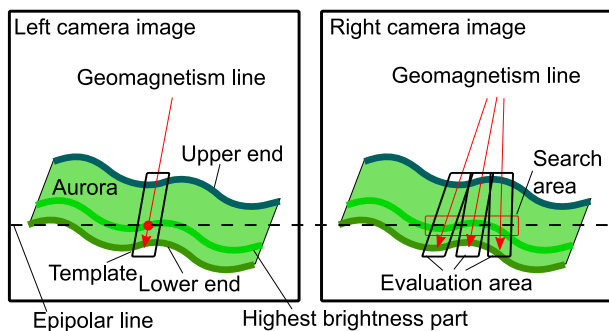
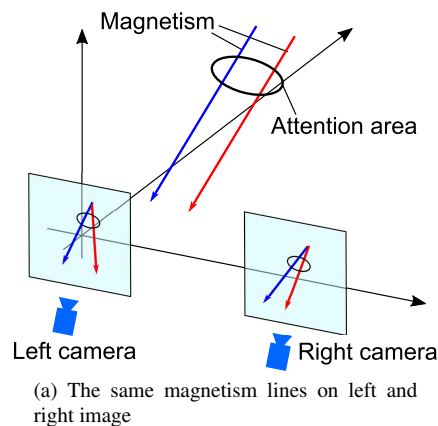


Fig. 6 Corresponding geomagnetism line detection by using block matching along the geomagnetism line

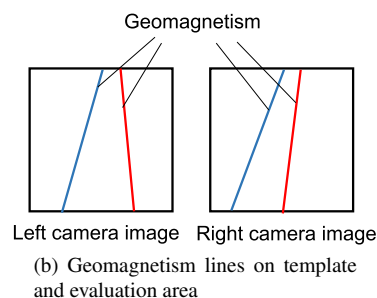
輝部の存在高度はオーロラの種類によって異なるが、それぞれの存在範囲は物理的な知見として得られている<sup>(12)</sup>。そこで本研究では最輝部の高度情報を探索範囲の制限に利用する。

**3.3.1 周辺領域の類似度の評価による地磁気線の対応付け** 画像間で対応する地磁気線を、ブロックマッチングによる類似度の評価によって検出する。地磁気線に対応付ける具体的な手法を図6に示す。まず画像処理によってオーロラ領域から、オーロラの下端部と上端部、最輝部を抽出する。そして左カメラ画像上のオーロラ最輝部から1点抽出し、この点を通る地磁気線周辺の領域をオーロラの下端から上端まで切り抜きテンプレートとする。次に右カメラ画像において、左カメラ画像中から選んだ最輝部を通るエピポラ線上に探索領域を設定する。探索領域から1点抽出し、テンプレートと同様に地磁気線周辺の領域を切り抜き、これを評価領域とする。このときテンプレートと評価領域間には、ブロック自体の形状の違いや被写体の変形が存在する。そのため類似度の評価の前にそれらを補正する必要がある。ブロックの補正に関しては3.3.2項にて述べる。なおテンプレートと評価領域の類似度は、輝度変化に頑健な正規化相互相関 (Zero-mean Normalized Cross-Correlation: ZNCC) によって評価する。

テンプレートや評価領域を決定するために類似度を評価する地磁気線上に設定した最初の1点をそれぞれの代表点と呼ぶこととする。テンプレートの代表点座標を  $(u_r, v_r)$ 、評価領域の代表点座標を  $(u_i, v_i)$  とする。右カメラ画像の探索領域  $u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max}$  において、代表点を移動させながら逐一ブロックを補正しテンプレートとの類似度  $R_{u_i v_i}$  を評価する。そして最もテンプレートとの類似度の高い評価領域を、テンプレートに対応するブロックとする。以上より、対応するブロックの代表点座標  $(u_r, v_r)$  は以下の式(2)によって決定される。



(a) The same magnetism lines on left and right image



(b) Geomagnetism lines on template and evaluation area

Fig. 7 Projective transform between a pair of aurora images

$$u_r = \arg \max_{u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max}} R_{u_i v_i} \quad (2)$$

$$v_r = v_i.$$

式(2)によって算出された座標  $(u_r, v_r)$  を通る地磁気線が、互に対応する地磁気線となる。また右カメラ画像の探索領域の範囲  $u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max}$  については3.3.3項にて後述する。

**3.3.2 マッチングのためのブロックの補正** 本研究では、左右のカメラを平行化しているため、左右画像上における地磁気線の消失点の座標は等しい。一方で左右のカメラには視差があるため、対応点の座標は  $u$  軸方向に異なる。そのため、画像間において対応する同一の地磁気線の傾きが異なる。左右カメラ画像における地磁気線の間接関係を図7に示す。また地磁気線の集合からなるオーロラの一部をブロックとして切り取った際、画像サイズに対してブロックが小さいならばブロックは平面を切り抜いていると近似できる。このとき、左右のブロックは射影変換の関係となるため、テンプレートマッチングの際に変形を補正する必要がある。

画像から切り取ったブロック領域に存在する地磁気線の傾きは全て異なるが、ブロックサイズが小さい場合には、ブロック内の地磁気線はほぼ平行とみなせる。



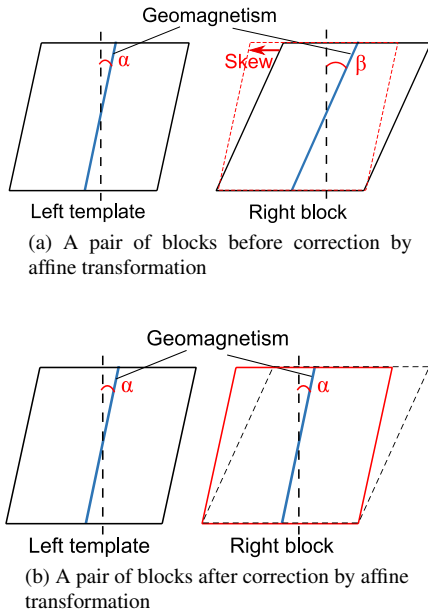


Fig. 8 Correction of block by affine transformation

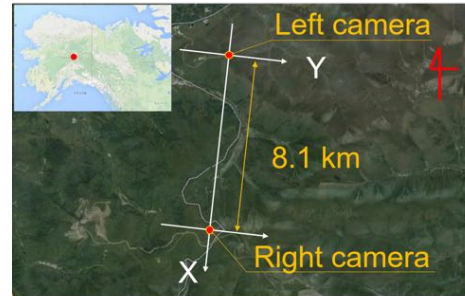
よって、左右のブロック間の射影変換の関係を、せん断のみのアフィン変換の関係と近似し補正する。

アフィン変換によるブロックの補正について図8に示す。図8(a)に補正前の左右のブロックの関係を、図8(b)に補正後の左右のブロックの関係を示している。青色の線がブロックの中心を通る地磁気線、黒色の破線が $v$ 軸に平行な線を表している。また右ブロックの図において、黒線は変換前のブロック形状、赤線は変換後のブロック形状を表している。図8(a)に示すように、補正前の左右のブロックでは中心を通る地磁気の傾きが異なる。この地磁気の傾きが等しくなるよう、右ブロックに対してアフィン変換を行う。変換前において、左ブロックを通る地磁気の傾きを $\alpha$ 、右ブロックを通る地磁気の傾きを $\beta$ とすると、右ブロックに対して $\beta - \alpha$ だけ傾くようにせん断変形処理を行う。図8(b)に示すように、この処理によって左右のブロックの中心を通る地磁気線の傾きは等しくなる。以上の処理によって、左右のブロックにおいて射影変換によるテクスチャの差異が補正され、またブロック同士が同一形状となるため、ブロックマッチングによって正確な類似度の評価が可能となる。

**3.3.3 探索範囲の限定** オーロラ画像は類似したテクスチャが多いため、探索範囲を制限せずに対応する地磁気線を検出した場合、誤対応する可能性が増加する。そこで、3次元空間におけるオーロラ最輝部の存在高度に関する物理的知見を用いて探索範囲を制限する。解明されている物理的知見から、オーロラの種類や色によってオーロラ最輝部高度の範囲を制限することが可能である。



(a) Outward appearance of fish-eye camera system (b) Inside of fish-eye camera system



(c) The place where two cameras were installed

Fig. 9 Appearance of fish-eye camera system and the place where the cameras were installed

物理的知見を基に、画像上のオーロラの種類や色から最輝部の存在高度 $h$ を $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$ としたとき、左画像中のテンプレートの座標 $(u_L, v_L)$ 、カメラ間の距離 $d$ を用いて以下の式(3)のように探索範囲が限定される。

$$u_L - \frac{fd}{h_{\min}} \leq u \leq u_L - \frac{fd}{h_{\max}}. \quad (3)$$

式(3)を用いて評価領域の探索範囲を制限することにより、誤対応の減少、探索時間の削減が可能となる。

**3.4 3次元可視化** 検出した対応点を用いてオーロラの3次元形状を可視化する手法について述べる。上記の地磁気情報を用いた対応点検出手法により、密な対応点群が取得できる。全ての対応点に対し、三角測量の原理を用いて3次元座標を算出する。算出した3次元座標に対応点をプロットし、対応点群にNURBS曲面をフィッティングさせることでオーロラの3次元形状を可視化する。NURBS曲面の点群へのフィッティング手法はBalzerらの手法<sup>(13)</sup>を使用する。

## 4. 実験結果

本研究では、2台の魚眼カメラを地上から天頂方向に向けて設置し、取得した画像を用いた。2台のカメラはいずれもアメリカ合衆国アラスカ州フェアバンクスに設置し、時刻の同期をとり10秒間隔で同時に撮影し続けた。使用したカメラの外観と、設置場所を図

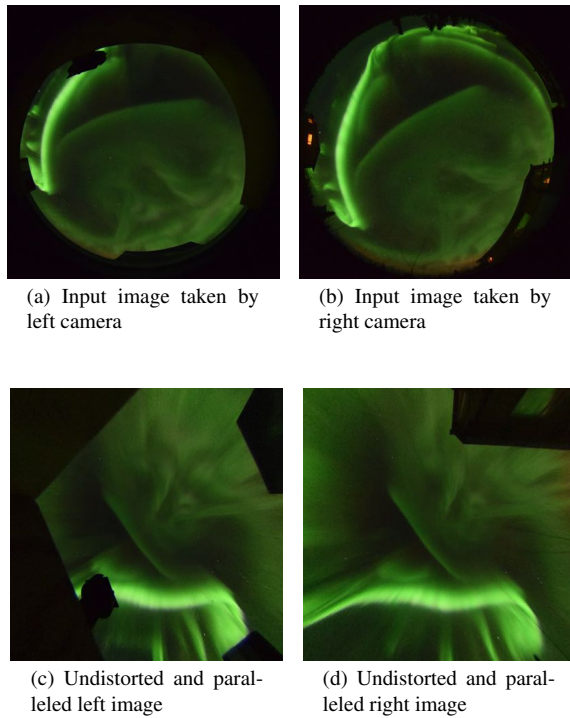


Fig. 10 A pair of input images and a pair of parallel undistorted images

Table 1 Information of the camera position

Camera	Latitude	Longitude	Height
Left	N 65.12°	W 147.43°	489 m
Right	N 65.05°	W 147.45°	662 m

9(a), 図 9(b) にそれぞれ示す。図 9(c) 中に示すように、2 台のカメラのうち北側に設置したものを左カメラ、南側に設置したものを右カメラと呼ぶこととする。

カメラには GPS モジュールを取り付けてあり、設置場所の緯度・経度・高度の位置情報を取得することができる。2 台のカメラの位置情報を表 1 に示す。表 1 の位置情報から、カメラ間距離は 8.1 km と算出された。

**4.1 入力画像の平行化** 本研究では 2 台の魚眼カメラで同時に撮影した画像対を入力とする。入力画像対を図 10(a), 図 10(b) に示す。図 10(a), 図 10(b) はそれぞれ左カメラ, 右カメラによって撮影したオーロラ画像を示す。

本研究では等立体角射影方式のレンズを使用したため、等立体角射影方式のレンズ式に基づいて入力画像から魚眼レンズによる歪みを除去し、左カメラ画像と右カメラ画像が平行ステレオ画像対となるよう画像を変換した。このとき、画像中心からの距離が大きい領域は特に歪みが大きく、レンズのモデル式から十分に歪みを除去できないため、画角 140° の範囲のみを使用した。歪みを除去し、平行ステレオ画像対へと変換し

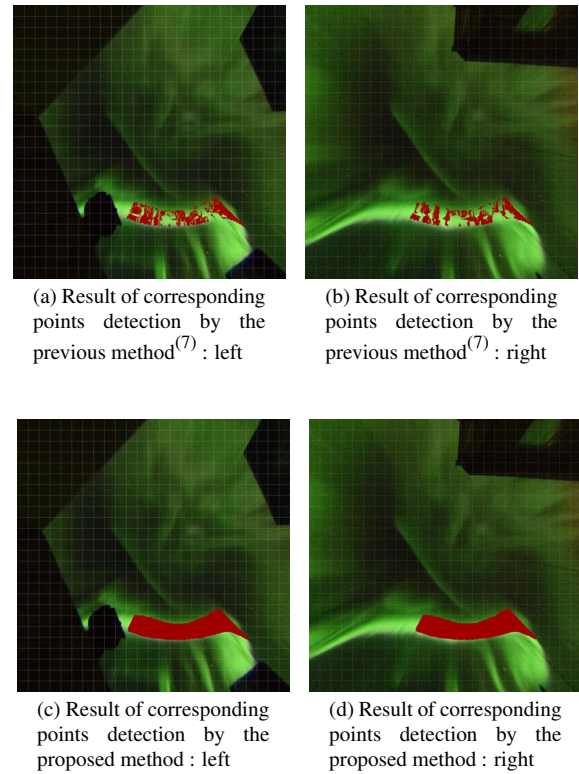


Fig. 11 Results of corresponding points detection by the previous<sup>(7)</sup> and proposed method

Table 2 Geomagnetism information at the camera position

Camera	Declination	Inclination
Left	19.39°	77.49°
Right	19.37°	77.44°

た画像を図 10(c), 図 10(d) に示す。図 10(c), 図 10(d) はそれぞれ左カメラ, 右カメラの画像であり、いずれも画像の横軸と縦軸がそれぞれ図 9(c) 中 X 軸と Y 軸に平行となっている。

**4.2 地磁気情報を用いた対応点検出** 表 1 に示すカメラの位置情報と IGRF モデルから、各カメラの位置における地磁気の偏角と伏角を算出した。各カメラ位置における地磁気情報を表 2 に示す。表 2 に示す通り、各カメラ位置における地磁気はほぼ平行であるため、座標系の原点である左カメラの地磁気情報を使用した。

従来手法<sup>(7)</sup>による対応点検出の結果を図 11(a) と図 11(b) に、地磁気情報を用いた提案手法による対応点検出の結果を図 11(c) と図 11(d) に示す。検出した対応点を図 11 中に赤い点でプロットした。なお本実験では緑色のオーロラ最輝部高度に関する物理的な知見<sup>(12)</sup>に基づき、最輝部の高度を 105 ~ 115 km として探索範囲を制限した。

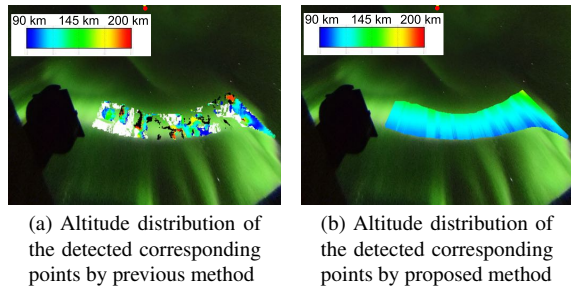


Fig. 12 Altitude distribution of the detected corresponding points by previous and proposed method

画像間から従来手法によって検出された対応点は7,937個であったのに対し、提案手法によって検出された対応点は129,981個であった。図11(a)、図11(b)から、従来手法ではオーロラの存在する領域から疎に对应点検出されており、特にテクスチャの変化の少ない領域において对应点検出することは困難であることが確認できる。一方で、図11(c)、図11(d)から、提案手法ではオーロラ領域の全域から密に对应点検出可能であることが確認できた。

次に、検出した对应点の高度分布を確認し、計測結果と物理的な知見を比較、評価した。従来手法により検出した对应点の高度分布を図12(a)に、提案手法により検出した对应点の高度分布を図12(b)に示す。図はいずれも図11(a)と図11(c)において对应点検出されているオーロラ領域を切り出したものである。図12中にプロットしてある对应点の色は高度によって変化させた。物理的な知見では、本実験で使用した画像中のオーロラは高度100 km ~ 180 kmの範囲に存在すると考えられている<sup>(12)</sup>。そこで90 kmを青、200 kmを赤としてその間の高度の色を連続的に変化させ、存在高度範囲外である90 km未満の点を白、200 kmより高い点を黒で表示した。また、地磁気情報から算出される消失点を図12(a)、図12(b)の上部に赤くプロットした。

オーロラ形状が正確に計測された場合、对应点の高度はオーロラ領域の全域において存在高度の範囲で滑らかに変化し、下端部から地磁気の消失点へ向かう方向にかけて高度が高くなると予想される。しかし図12(a)に示す通り、従来手法の結果には存在高度外の对应点が非常に多く、高度の滑らかな変化や下端から地磁気の消失点に向かって高度が増加する傾向も確認できない。一方、提案手法の結果は、上記の物理的な知見に基づく予想を満たしていることが確認できる。以上から、より密で正確な对应点検出が実現されたと考えられる。

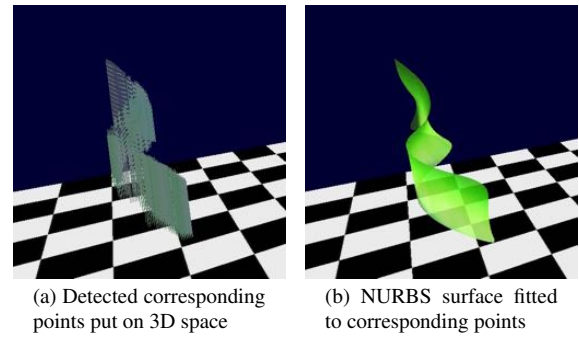


Fig. 13 3D visualization results of the aurora's shape by fitting NURBS surface to the detected corresponding points

**4.3 3次元可視化** 検出した全ての对应点を3次元空間中にプロットし、对应点群に対してNURBS曲面をフィッティングさせることで3次元形状を可視化した。对应点を3次元空間中にプロットした結果を図13(a)に、NURBS曲面をフィッティングした結果を図13(b)に示す。オーロラ特有の薄いカーテン形状を表現が表現されていることが確認できる。

また、時間方向に連続する3フレームの画像対に提案手法を適用し、3次元可視化した結果を図14に示す。可視化したオーロラの3次元形状を地上から見上げた結果を図14の上段に、オーロラの上空から見た結果を図14の下段に示す。時間の経過に伴って形状が滑らかに変化していることが確認できる。

図13、図14から、提案手法によるオーロラの3次元形状計測結果はオーロラの物理的な性質や外観との齟齬がなく、正確な3次元計測がなされたことが確認できた。

## 5. 結 言

本研究では、オーロラ画像対から对应点検出の際に画像情報に加えて、地磁気情報やオーロラの存在高度範囲などの物理的な知見を利用した3次元計測手法を提案した。本手法を用いることで、従来手法では検出困難であったテクスチャの変化が少ないオーロラ領域からも密に对应点検出することが可能となった。さらに、検出の際に物理的な知見を考慮することによって、オーロラの物理的な性質に則した密な对应点検出結果を得ることが可能となった。これによって、より正確なオーロラの3次元計測と可視化が可能となった。

今後の展望としては本手法の定量的な評価があげられる。本研究はオーロラという再現不可能で真値を得ることが困難な自然現象を対象としているため、定量的な評価が行えていない。オーロラの発生メカニズムに則ったシミュレーションによって取得した画像を真



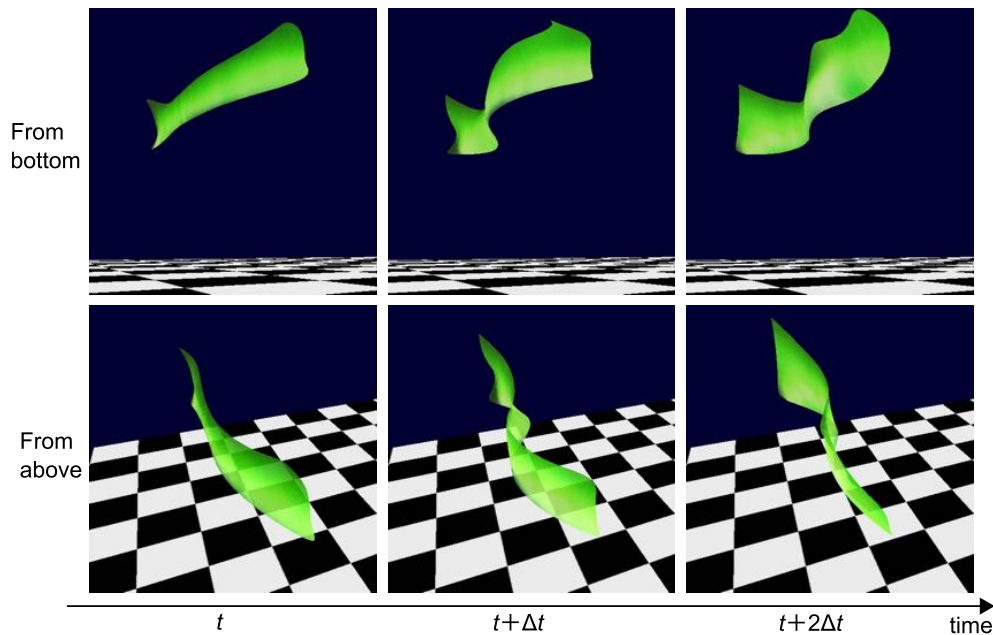


Fig. 14 Change of aurora's 3D shape with time progress

値とし本手法を適用することで、計測の精度や有用性を定量的に評価可能であると考えられる。

#### 参考文献

- (1) 上出 洋介, “オーロラ太陽からのメッセージ”, 山と溪谷社, (1999).
- (2) Ken'ichi Fujiki, Haruichi Washimi, Keiji Hayashi, Gary P. Zank, Munetoshi Tokumaru, Takashi Tanaka, Vladimir Florinski and Yuki Kubo, “MHD Analysis of the Velocity Oscillations in the Outer Heliosphere”, *Geophysical Research Letter*, Vol. 41(2014), No. 5, pp. 1420–1424.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Yukitoshi Nishimura, Jacob Bortnik, Wen Li, Richard Thome, Larry Lyons, Vassilis Angelopoulos, Stephen Mende, John Bonnell, Olivier Le Contel, Christopher Cully, Robert Ergun and Hans-Ulrich Auster: “Identifying the Driver of Pulsating Aurora”, *Science*, Vol. 330 (2010), pp. 81–84.
- (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, “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”, 日本機械学会論文集, (2015), Vol. 82, No. 834, pp. 18–24.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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, “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”, 第21回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, (2016), pp. 332–337.
- (11) Erwan Thébault et al., “International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation.”, *Earth, Planets and Space 2015*, Vol. 67 (2015), issue 79.
- (12) Alister Vallance Jones, “Auroral Spectroscopy”, *Space Science Reviews*, Vol. 11 (1971), Issue. 6, pp. 776–826.
- (13) Jonathan Balzer and Thomas Mørwald, “Isogeometric Finite-Elements Methods and Variational Reconstruction Tasks in Vision – A Perfect Match”, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (2012), pp. 1624–1631.