

ドローン搭載型光源を用いた大気蛍光望遠鏡の視野方向解析

日比 亮佑¹, 富田 孝幸¹, 多米田 裕一郎², 佐野 賢吾³, 中澤 新³

¹信州大学工学部 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

²大阪電通大学 (〒572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8)

³信州大学大学院 理工学系研究科 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

Field of View Direction Analysis of Telescope Using a Drone-mounted Light Source

Ryosuke HIBI¹, Takayuki TOMIDA¹, Yuichiro TAMEDA², Kengo SANO³, and Arata NAKAZAWA³

¹Faculty of Engineering, Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano, Nagano 380-8553

³Osaka Electro-Comm. Univ., 18-8 Hatsutyo, Neyagawa, Osaka 572-8530

²Graduate School of Science and Technology, Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano, Nagano 380-8553

Abstract: The Telescope Array experiment has been conducting observations of ultra-high energy cosmic ray using the Atmospheric Fluorescence Detector (FD) as telescopes. The viewing direction of FD is expected to affect the results of cosmic ray analysis, and we need to calibrate the direction. Therefore, we developed an Opt-copter as a flying light source. Today, we have updated the view direction of the FD with an accuracy of 0.03 deg. by the analysis using the Opt-copter.

Key Words: Ultra-high energy cosmic ray, Calibration, Telescope, Drone

1. はじめに

Telescope Array (TA) 実験では、 10^{18}eV を超える超高エネルギー宇宙線の起源解明のために大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector : FD) を用いている。FD は宇宙線によって生じる大気蛍光を捉えることで間接的に宇宙線観測を行う検出器である。現在、宇宙線の理解が深まるにつれ、宇宙線をより正確に求める必要がある。FD では、実際の視野方向が想定と 0.1deg. 異なる場合、宇宙線の解析結果にエネルギーで 4%程度、質量組成で 9g/cm^2 程度の影響があると推定されている。¹⁾ すなわち、正確に宇宙線を決定するためには FD の視野方向を正しく補正する必要がある。ここで、我々はドローンに光源と RTK-GPS モジュールを搭載した Opt-copter (Fig.1) という較正装置を開発した。Opt-copter は任意の場所に正確な位置情報を持った光源を飛行できるという特性を利用して、視野方向をはじめとした望遠鏡の光学的特徴を仔細に測定可能である。本講演では、Opt-copter を用いて FD の視野方向を 0.1deg. 以下の精度で算出、評価する。

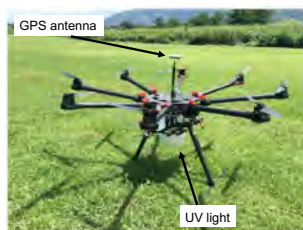


Fig.1 Opt-copter Image. Automatic flight and stable observation are possible even at night by the control system of UAV

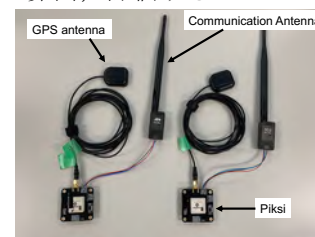


Fig.2 Two GPS units communicate with each other and make corrections to record the high accuracy light position.



Fig.3 UV LEDs on a dodecahedron to achieve isotropy of light. Covering LED with the Diffuser creates a pseudo light ball.



Fig.4 Light source circuit to control light intensity, pulse width, and frequency.

2. Opt-copter システム

Opt-copter はドローンに RTK-GPS と光源、光源を制御するための回路を搭載した装置である。ドローンには DJI 社の S1000+ を用いており、光源などを積載し安定したフライトをさせるのに十分な性能を持つ。また、専用のアプリを用いることでフライトコースや速度などを詳細に設定した自動飛行も可能で安定した観測ができる。RTK-GPS とは GPS モジュール間で通信を行い、数 cm 程度の誤差で GPS アンテナ間の相対距離を測定可能にしたものである。今回は Swift Navigation 社製の Piksi (Fig. 2) というモジュールを搭載しており、±10cm 以内の位置決定精度である。光源は FD で観測するために大気蛍光と同じ波長域である必要があり、Roithner Laser Technik 社の H2A1-H375 という波長が 375nm の LED を採用している。また、FD 視野内における光源の位置や角度によって光の強さが変わると解析に影響を与えてしまうため光源は一様な光であることが求められる。そのため、正十二面体の上に LED を載せて更にディフューザーで覆うことで光の一様性を高めている (Fig. 3)。光源の制御回路では、発光タイミングを GPS の記録タイミングと同期させており、10 μ s のパルス幅で発光させている (Fig. 4)。²⁾



Fig.5 The telescope bases in TA experiment site, and installed telescope.

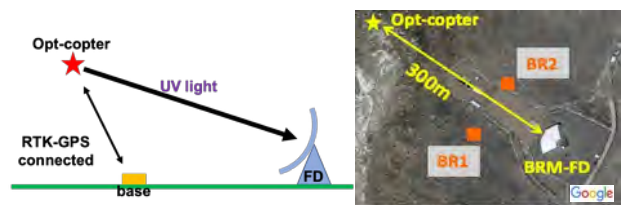


Fig.6 Observation concept

Fly Opt-copter 300 meter away from the telescope to receive light without atmospheric attenuation.

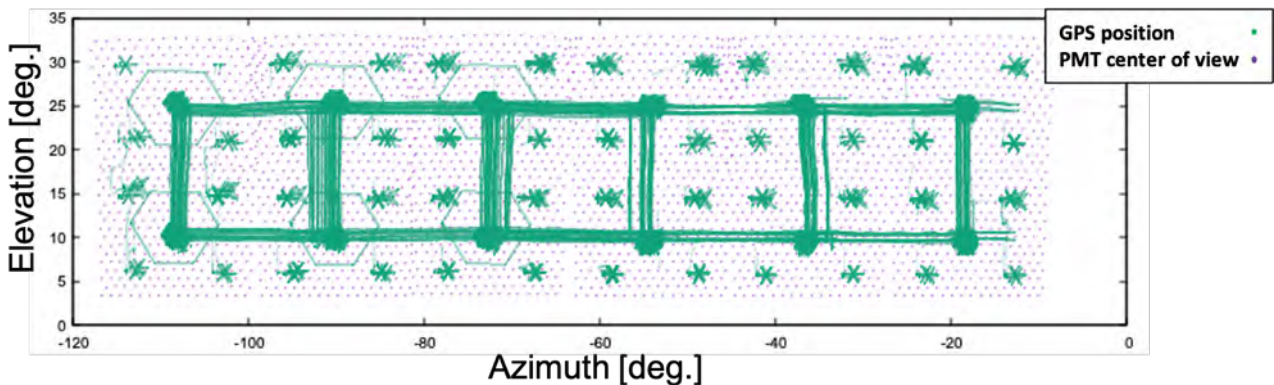


Fig.7 Light source trajectory with angle in the field of view of the telescope, calculated from GPS.

FD は大気蛍光を複合球面鏡により 16×16 に並んだ計 256 本の PMT カメラに集光することで観測を行っている。FD1 台は方位角に 18.0deg. 仰角に 15.5deg. の視野を持ち、これを複数台並べた FD ステーション (Fig.5) で観測を行う。今回解析を行なった BRM ステーションには上下 2 台×左右 6 台の計 12 台が並べられている。上下の FD は 1deg. 重なるように配置しており、全体の視野は方位角 108deg. 仰角 3~33deg. である。

Fig.6 に観測概念を示す。BRM ステーションにて Opt-copter を各 FD 視野内かつ 300m 離れた距離で飛ばし、観測を行う。絶対位置がわかる離着陸地点 (BR1, BR2) と光源の相対位置を RTK-GPS による測定で求める。Fig.7 は実際に Opt-copter を飛ばしたときに GPS データから光源の飛跡を算出し、さらに FD からの視野角で表した図である。

3. 視野方向解析

3.1 受光量重心と光源位置の比較による視野方向解析手法

まず FD の見かけ上の光源位置を求めるために、光を受光した各 PMT の中心座標と受光量を用いて受光量重心を算出した。ここで、高い位置決定精度を持った光源位置と受光量重心の差を取れば実際と想定との FD 視野方向のずれを求めることができると考えられる。

Fig.8 はある Opt-copter のフライトに対して算出された光源の位置と受光量重心を示す。この図から、光源位置と比較して受光量重心は PMT の中心座標を使って算出されるため、その結果も PMT の中心座標に偏ることがわかる。そのため、ある一点でのみ差を求めるのではなく、統計的な差の平均の値を求めることでこの偏りを軽減している。また、望遠鏡のコマ収差による影響が少ない FD 視野中心のデータで解析を行なった。

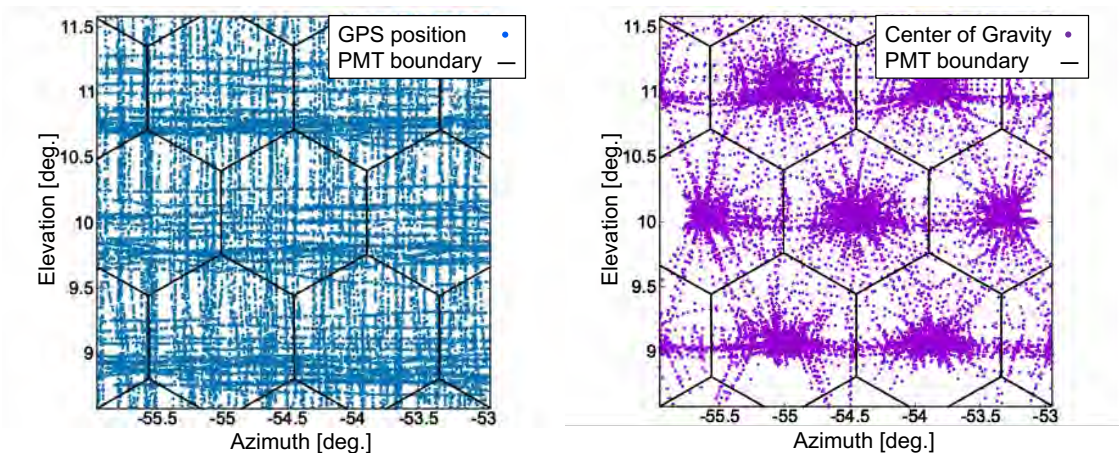


Fig.8 Left: Light source trajectory with angle in the field of view of the telescope, calculated from GPS, Right: Virtual light position calculated from light reception records.

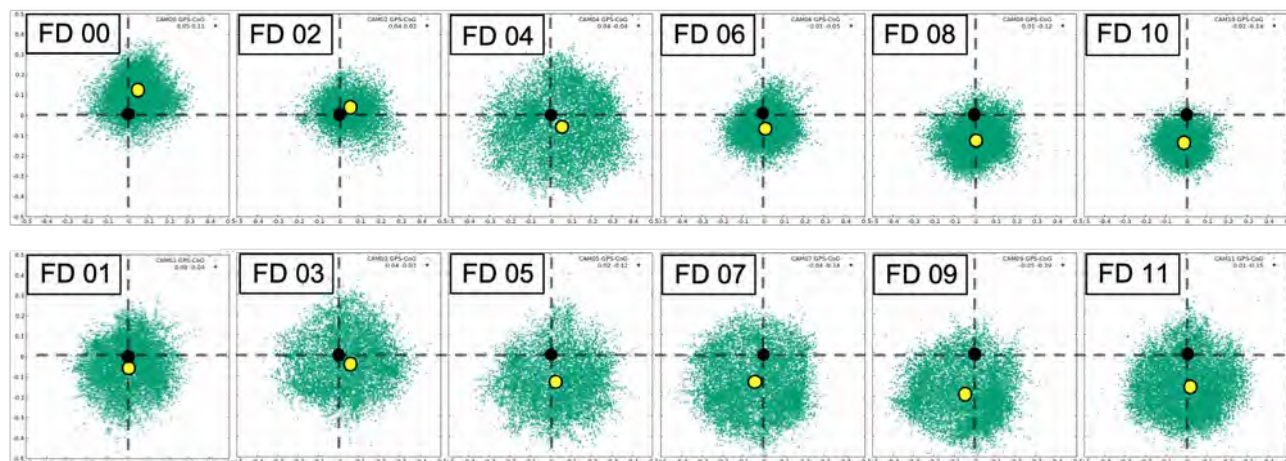


Fig.9 Difference between the light position and Center of Gravity of light intensity.

Table 1 The table shows the difference between the actual and assumed viewing directions based on the analysis. Upper: 2018 data, Lower: 2019 data

FD	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Azimuth misalignment [deg.]	0.03	0.01	0.01	0.04	0.06	0.04	0.01	-0.02	0.01	-0.04	-0.01	0.01
Elevation misalignment [deg.]	0.08	-0.04	-0.05	-0.03	-0.04	-0.11	-0.06	-0.14	-0.12	-0.19	-0.15	-0.15
FD	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Azimuth misalignment [deg.]	-	-	-	-	0.06	0.04	0.02	-0.04	-	-	-	-
Elevation misalignment [deg.]	-	-	-	-	-0.06	-0.12	-0.06	-0.14	-	-	-	-

3.2 視野方向解析結果

FD 毎に視野中心の PMT 付近からデータを抽出し差の計算を行った結果を Fig.9 に示す。また、Table 1 に 2018 年と 2019 年の異なるフライトデータに対してそれぞれ差の平均を示す。得られた差の平均値は FD が実際の視野方向に対してどのくらい想定と間違えているかを示している。FD04~FD07 の 2018 年と 2019 年の解析結果から、観測データにより解析結果が大きく変わることはなく、正しく視野方向が解析できているこ

とがわかる。

ここで、この解析結果には光源の位置決定精度や解析そのものが持つ誤差、望遠鏡のコマ収差やフライトの偏りによる誤差幅を持つことが考えられる。まず光源の位置決定精度は±10cm以内であるが、これをFDから見た時の視野角に変換すると300m先では±0.02deg. 以内の精度を持つ。解析の持つ標準誤差はどのFDでも0.001deg. 以下である。望遠鏡のコマ収差やフライトの偏りによる誤差は解析データを抽出する中心PMTを変えることで求めた。具体的にはFD視野中心のPMT119と隣接する周囲の6本のPMTを中心にデータを抽出して比較を行なった。Fig.10は基準PMTを変えた時の受光量重心を表す。また、それぞれの解析結果をTable 2に示す。この結果より、データ抽出の中心PMTによって差の平均は±0.02deg.の変化があり、これをコマ収差やフライトの偏りによる誤差とした。これら三つの誤差より全体の誤差は $0.028 \approx 0.03 \text{deg.}$ である。

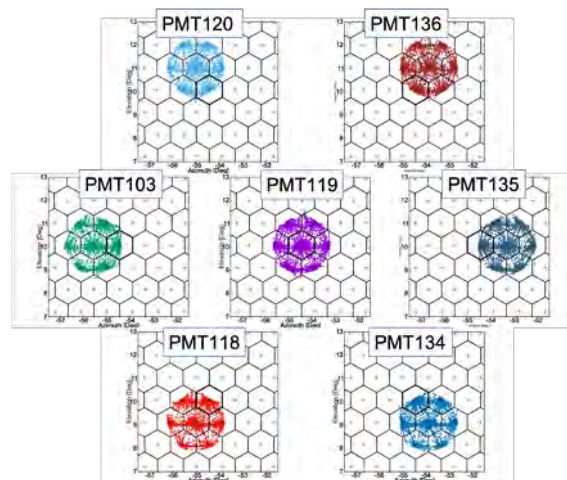


Fig.10 Center of Gravity of light intensity for different central PMTs to extract data.

Table 2 Status of result changing target PMT to investigate the effects of coma aberration and flight bias.

Target PMT	103	118	119	120	134	135	136
Azimuth misalignment [deg.]	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05	-0.04
Elevation misalignment [deg.]	-0.13	-0.12	-0.14	-0.15	-0.13	-0.14	-0.15

4. まとめ・今後の展望

FDの正しい視野方向を求めるため、Opt-copterを用いた視野方向解析を行なった。本解析では、FDが向いている視野方向を±0.03deg. 以内の精度で求めることができ、目標である0.1deg. 以内の精度を達成できた。今後、実際に求められた正しい視野方向により宇宙線解析を行うことで宇宙線のパラメータにどの程度の影響があるのかを確認する必要がある。また、TA実験サイトには他にもFDステーションが存在し、新たなFDの開発も進められている。これらに対してもOpt-copterによる視野方向の較正を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) H. Tokuno et al., “New air fluorescence detectors employed in the Telescope Array experiment, Nucl. Instrum. Meth. A676 (2012) 54-65.
- 2) T. Tomida, “Development of the calibration device using UAV mount UV-LED light source for the fluorescence detector”, University of Shinshu, 2018.