

### 背景

高度を計測する手段としてGPS・高度センサー・画像解析があるが、宇宙や高層の上空での条件下ではGPSや高度センサーが使えない場合がある。その場合、画像解析であれば安定して高度が計測されるのではないか？と疑問に思いエピポラ幾何に着目。そこで2021年9月20日、自作した観測機(データロガー)を搭載した高高度気球を沖縄県宮古島から高度3万メートル上空に打ち上げて成層圏観測する「Space Balloon Project 2021」へ参加し、エピポラ幾何で計測した高度の正確性を調べてみることにした。

成層圏より上層で高度を計測する手段

- GPS** → × LoRaWANなどアマチュア無線の場合、高度1万メートル以上で計測不可。
- 高度センサー** → △ BME280センサーの場合、環境によって計測不可。(分解能/温度-40~+85°C、気圧300~1100 hPa)
- 画像解析** → ? **バッテリーが続く限り録画可能。**

**エピポラ幾何※で高度を計れないか？**

※『エピポラ幾何』とはステレオカメラでの距離計測法の一つ。両目のように、固定された左右のカメラで撮影した2次元の画像間の「ずれ」から、三角測量法を用いて3次元的に位置を計測する方法。

### MATLABを活用した分析

(Space Balloon Project 2021で観測したデータを使用)

- 左右のカメラ動画の時刻をそろえる**  
打ち上げ開始30秒後からスタート。 ※カメラの条件は枠外左図参照
- キャリブレーション**  
チェッカーボードが写っているキャリブレーション用画像 × 20枚  
カメラのパラメーターを算出
- プログラム**  
動画の読み込み  
Fフレーム目の画像の読み込み  
グレースケール化  
特徴点のマッチング  
距離の算出  
F = F + 150
- それぞれの高度の誤差を出す** GPS 高度センサー 画像解析

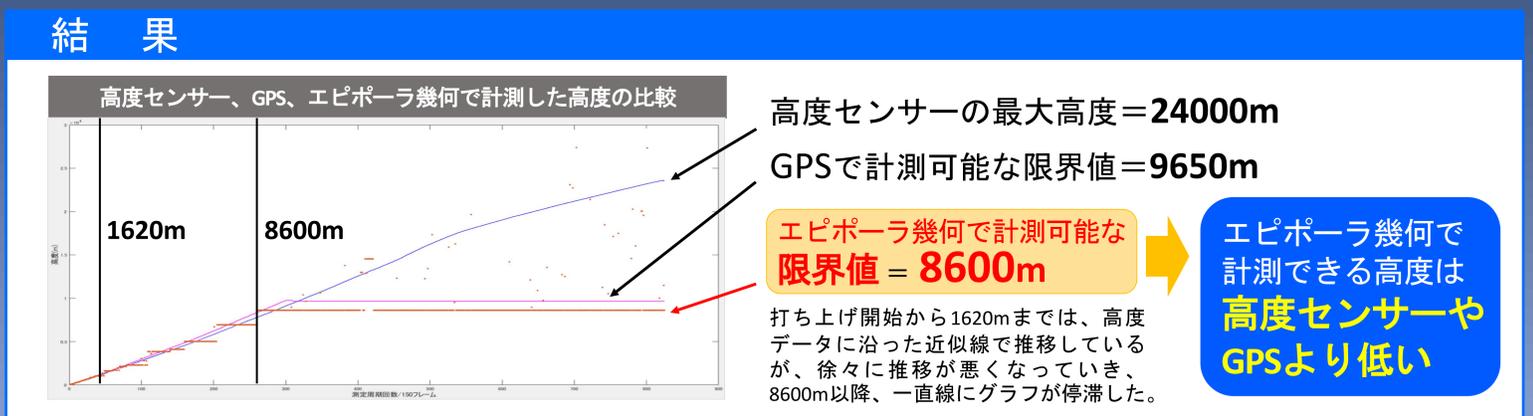
BMEを利用した距離の算出手法

- 全特徴点までの距離計算
- 高度データと最も近い値を選択

高度 (BME)

14.14
38.29
65.45
90.89
115.07
142.25
169.97
195.72
222.95

高度センサーデータの測定周期1回/5秒なので、カメラ動画から30fps × 5秒 = 150フレームごとに画像を読み込む



### 考察

エピポラ幾何で計測可能な限界値が8600mになる理由 ※視差とは…見る場所による特徴点までの角度差のことで高度を計算する上で重要な値である。

1. カメラ間の距離が近い → 視差※が小さくなる → 視差が小さいと正確性が下がってしまう → 視差を大きくすればより正確な値が計算でき、上限がより高くなるという言える

2. 解像度が足りていない

カメラのスペックから最小視差を求め、計測可能な高度とカメラ間距離の理論値を割り出すと...

- 今回のカメラの条件下で計測可能な高度の理論値は  

$$\frac{\text{焦点距離} \times \text{カメラ間距離}}{\text{最小視差のピクセルサイズ}} = \frac{0.015\text{m} \times 0.33\text{m}}{0.000003\text{m}} = 1650\text{m}$$
 である  
 GoProのイメージセンサーサイズ = 5.9 × 4.4mm  
 動画の解像度 = 1920 × 1440ピクセル  

$$5.9 \div 1920 = 0.003 \quad 4.4 \div 1440 = 0.003 \approx 3\mu$$
- 最大高度を計測するために必要なカメラ間距離の理論値は  

$$\frac{\text{高度センサーの最大高度} \times \text{焦点距離}}{\text{最小視差のピクセルサイズ}} = \frac{24000\text{m} \times 0.015\text{m}}{0.000003\text{m}} = 4.8\text{m}$$
 以上である

高度センサーとエピポラ幾何で計測した高度の誤差

理論値 1650m  
限界値 8600m  
約51m 6.2%の誤差  
約339m 7.4%の誤差  
約7693m 44.1%の誤差

理論値の観点からみて、MATLABによる分析は精度が高いと言える。

### 結論

今回打ち上げたカメラの条件下では、エピポラ幾何を用いた高度の算出はほかの計測法に比べて正確性が低かったが、今回の実験は理論値より大きく上回る高度を計測できていた事がわかった。

**エピポラ幾何・・・理論値 1650m < 実験での計測限界値 8600m**

カメラの解像度やカメラ間距離を見直せば、正確に高度が測れる上限が上がると言える。

### 展望

- 今回の分析では、エピポラ幾何を用いた高度の計測はほかの高度計測法に比べて宇宙での実用性が低い、カメラ間距離や解像度を変えれば、宇宙でも実用性のあるものになるかもしれない。
- 水中ドローンなどに活用できるかについても実験してみたい。

参考文献

- 兵庫県立大学 理学部・大学院理学研究科「地表付近の温度(気温)と圧力の変化」  
[https://www.sci.u-hyogo.ac.jp/life/earth/geo/ogv\\_01d/lecture\\_files/res2a.html](https://www.sci.u-hyogo.ac.jp/life/earth/geo/ogv_01d/lecture_files/res2a.html)
- ロボット技術の整理「ステレオカメラ」  
[https://study-robot.jp/sensor/stereo\\_camera/](https://study-robot.jp/sensor/stereo_camera/)
- カメラの幾何学 画像処理 <https://vislab.jp/hiura/lec/iip/geometry.pdf>
- 大人になってからの再学習「エピポラ幾何」  
<https://zellij.hatenablog.com/entry/20120824/p1>
- 株式会社マクニカ「ステレオカメラの測距原理」  
<https://www.macnica.co.jp/business/maas/columns/134429/>

e-kagakuアカデミー ©2022 e-kagaku Academy All Rights Reserved.