



# 回転球殻内に配したカメラ姿勢安定化と 振動計測による評価

Stabilization of camera position in a rotating spherical shell and evaluation by vibration measurement

田邊匠<sup>1)</sup>, 岡凌平<sup>1)</sup>, 森下仁<sup>2)</sup>, 永谷直久<sup>1)</sup>

Takumi Tanabe, Oka Ryohei, Morishita Jin, and Naohisa Nagaya

1) 京都産業大学大学院 先端情報学研究科

(〒603-8555 京都市北区上賀茂本山, {i2286095, i2186032, nagaya}@cc.kyoto-su.ac.jp)

2) 京都産業大学 情報理工学部

(〒603-8555 京都市北区上賀茂本山, g1954688@cc.kyoto-su.ac.jp)

**概要:** 腹側からの行動観察を可能にする装置の開発において, 問題であった振動の抑制を行うために, 回転球体内に配したカメラの姿勢を安定化させる機構の提案を行う. 球体内に搭載する機体を, 磁石を使用して外側 4 点から固定し, 手ぶれ補正機能の付いたカメラを搭載することで映像のブレを抑制する. 加速度センサを使用した球体内の機体本体振動と, 球体内のカメラで撮影したマーカの重心座標の変化から振動の評価を行った.

**キーワード:** 行動計測, 移動軌跡計測, 腹側計測, 運動補償機構

## 1. はじめに

動物の行動実験において, 2000 年代初頭からバーチャル環境での刺激提示と行動計測を行う実験装置の利用が盛んに行われてきている[1]. 我々が開発に携わってきた昆虫行動計測用の全方向運動補償装置 ANTAM[2]も, バーチャル環境下での刺激提示と行動計測を可能とした実験装置の一つである. 全方向の運動補償により, 観察対象を実世界座標上に固定することでバーチャルな無限平面を構築し, 刺激の再現性を確保しながらの長時間の定点観測ができ, 動画データ解析を行うことができる. しかしながら, これまでの運動補償機構を有した行動計測装置において, 腹側からの動画計測が行われた例は少ない. 先行事例として Pun らの開発した実験装置は, アクリル球体の周囲に配置された近赤外光 (NIR) LED をミバエに対して下から斜めに照射し, 屈折光を NIR カメラで取り込むことで腹側からの行動計測を実現している[3]が, カメラと観察対象の距離が遠く鮮明な映像を取得できないため, 腹側からの動画解析から新たに得られる情報は少ない. 鮮明な腹側動画の解析により, 従来では考えられなかった分解能で動作の定量化を行うことができると考えている. また, 観察対象により近い位置で NIR カメラでの近撮影ができると, 腹側の体組織が薄い生物種の体液循環などの計測が可能となることが期待される.

このような行動計測装置の技術的な発展と並行して, 動画解析からの行動の定量化手法としては, 深層学習を中核技術とした computational ethology 分野が大きな注目を集めており, DeepLabCut[4] (DLC) などのトラッキングツールが登場している. したがって, 鮮明な腹側動画に対しての DLC などを用いた行動の定量化により, 付属肢と体節の連動性や, 身体の変化に伴う歩様変化, 身体部位のダイナミクスをこれまで以上に詳細に解析できる技術的な基盤も整いつつある.

以上の背景から, 我々は小型の節足動物を主な観察対象に, 観察対象の運動補償を実現しながら, 腹側からの高解像度動画データを撮像可能な行動計測装置の開発を行っている. 昨年報告した提案システム QuANTAM[5]は, 透明球体内にモータとカメラを搭載し, 観察対象の腹側を撮影しながら, ホイールを回転させて運動補償を行っている. しかし, 運動補償時のカメラの揺動などで観察対象が画角から外れるなどの問題があり, 安定的な動画取得のために駆動機構などの改善が必要であった.

そこで, 本研究では球体内に搭載したカメラの映像のブレや機体そのものの振動を抑制するために, カメラの姿勢を安定化させる機構の提案を行う. また, 作成した機構の振動の定量的評価として, 加速度センサの値と球体内のカメラで撮影したマーカの重心座標の変化を計測した.

2. システムの構成

2.1 QuANTAM システムからの改良点

我々が試作した QuANTAM は球殻内にモータやカメラを内蔵した球殻外転方式を採用している[5]。球体内部にモータと球殻を回転させるホイールが搭載されるため、組み付けのあまきによるホイールの空転や接触部分の凹凸などによる振動でカメラ映像のブレが生じるという問題があった。そこで、球体の内部にアクチュエータを配置する設計から、ANTAM のシステムを流用し、球体の外側に配置したアクチュエータで球体を回転させるように変更した。また、カメラの姿勢安定化のために、ボールベアリングを周囲に配置した。さらに、カメラには標準で手ぶれ補正機能が搭載されており、高解像度の映像を取得できるアクションカメラを使用した。

2.2 システムの概要

図 1 にシステム全体の概要図を示す。ANTAM システム内にある背側撮影用のカメラから取得できる映像の各フレームに対して、二値化処理を行い、計測対象の重心座標の取得を行う。取得した重心座標が背側撮影用のカメラ映像の画角の中心となるように、外側に配置されたサーボモータの回転速度を PID 制御で制御する。

球体内に配置したアクションカメラで腹側からの映像を取得し内蔵のストレージに保存する。また、アクションカメラを固定する機体にはマイコンボード(Raspberry Pi Zero, M5Atom Matrix)を搭載し、球体内から光量の調整や加速度のデータが取得できるようにしている。

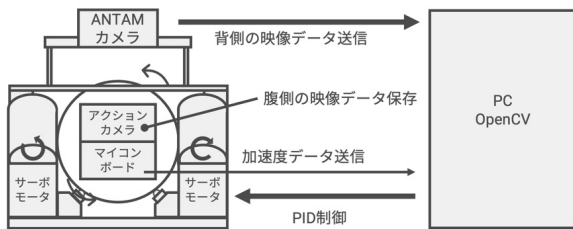


図 1：システム全体の概要図

2.3 ハードウェア構成

図 2-(a)にカメラ姿勢を安定化させる機構の模式図を示す。外径 170mm の透明なアクリル球殻の内部に、アクションカメラ(DJI Action2)、アクションカメラ用のバッテリー(DJI Action2 電源モジュール)、マイコン(Raspberry Pi Zero, M5Atom Matrix)、マイコン用のバッテリー(cheero Canvas 3200mAh, CHE-061, cheero)、面発光 LED、DC-DC コンバータ(リニアテクノロジー社製 LTC3111)、ハーフミラーから構成されるパーツを搭載している。また、鉛プレートを重りとして、機体の重心が左右方向にずれないように配置している。機体上部には可動式の機構を有したパーツにボールベアリングを搭載することで、上下方向の揺れの軽減を図っている。

図 2-(b)は実際に制作したカメラ姿勢を安定化させる機構の外観であり、図 2-(c)は装置全体の外観である。光量を確保するために、背側撮影用のカメラを固定しているアクリル面の LED を配置している。また、透明なアクリル球からの反射によるノイズを抑えるために円偏光フィルタを背側撮影用のカメラのレンズ前に設置している。

リル面の LED を配置している。また、透明なアクリル球からの反射によるノイズを抑えるために円偏光フィルタを背側撮影用のカメラのレンズ前に設置している。

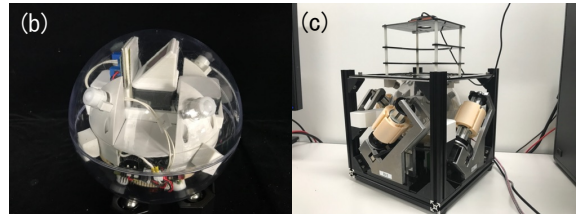
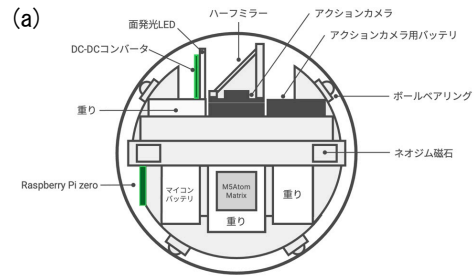


図 2：カメラ姿勢を安定化させる機構の構成図と外観

2.4 腹側と背側の映像

流用している ANTAM のシステムは運動補償を行うために背側から取得した映像を二値化処理する必要がある。図 3-(a)に示すとおり、計測対象が黒い場合、球体内に搭載したカメラのレンズ部分も黒いため、計測対象の重心座標を正確に算出することができない。

この問題に対して、ハーフミラーを使用することで解決を行った。使用したハーフミラー(アズワン、30×30×2.0mm)は入ってくる光を 50%で透過し、50%で反射させる特性を持っており、図 4 に示すようにハーフミラーを球体内のカメラレンズ前に 45 度で取り付け、横から面発光 LED で白色光を当てることで、球体内のカメラレンズ上部に白色像を投影する。ハーフミラーを搭載し、運動補償に影響が出ない程度に周りをマスクすることで、図 3-(b)にあるとおり計測対象だけを写すことができ、腹側からの映像を取得しながら、運動補償を実現した。

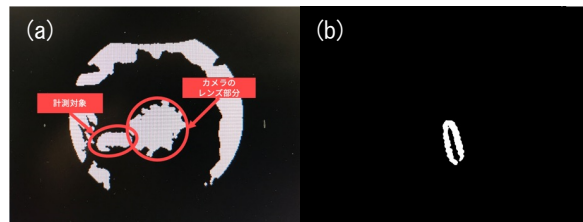


図 3：背側から撮影した映像を二値化処理した映像 (a：ハーフミラーなし、b：ハーフミラーあり)

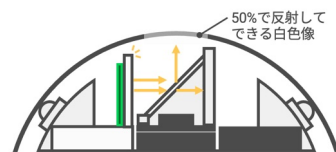


図 4：ハーフミラーの役割

ハーフミラーは上から入ってくる光に対しても 50%で透過, 50%で反射させるため, 球体内に搭載されたカメラの映像にも影響する. 図 5-(a)はハーフミラーを使用しない場合に取得できる腹側からの映像であり, 図 5-(b)はハーフミラーを使用した場合に取得できる腹側からの映像である. ハーフミラーを使用した場合, 腹側から取得できる映像が少しぼやけてしまう.

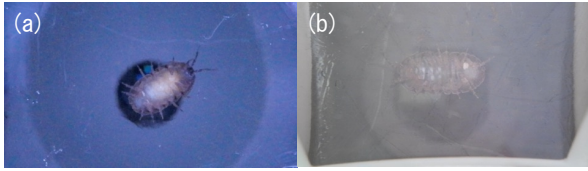


図 5 : 腹側から取得できる映像  
(a : ハーフミラーなし, b : ハーフミラーあり)

### 3. 評価実験

制作したカメラ姿勢を安定化させる機構の有効性を検証するために, 加速度センサを使用して球体内の機体本体の振動と, 球体内のアクションカメラで撮影したマーカの重心座標の変化から振動の評価を行った.

#### 3.1 実験条件

実験を行うにあたり, 球体内に配置した機体の軸は図 6 のように定義する. マーカーは A4 のコピー用紙に印刷した 100px×100px(直径 8mm)の黒点を使用する. アクションカメラで撮影する映像は 4K(3840×2160px)であり, デジタルズームで 2 倍に拡大している. 加速度センサのサンプリング周波数は 100Hz であり, 計測の開始前に 100 サンプル分でキャリブレーションを行い, 取得されるデータとの差分で加速度を取得している. また, サーボモータの回転速度は 29.18rpm であり, 球体の回転速度は 30~40mm/s である. 球殻の内側にはボールベアリングの滑りを良くするためにシリコンオイルを塗布し, 球殻の接合部分はセロハンテープで固定している. 計測は 20 秒間行い, 回転が定常化しているとみなせる 5~15 秒の間のデータを使用した. M5Atom Matrix から加速度センサの計測開始のタイミングで LED を光らせ, アクションカメラと計測開始のタイミングを合わせている.

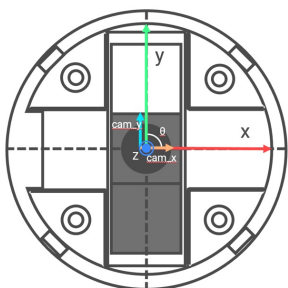


図 6 : 球体内機体の軸定義

#### 3.2 予備実験

8 方向に球殻を回転させたときの加速度の変化と球体内のカメラから撮影した黒点の重心座標のばらつきの変化を測定した. 図 7 に各回転方向の加速度の値に対して二乗

平均平方根を取り, プロットした結果を示す. また, 図 8 に各回転方向に回転させたときの球体内のアクションカメラで撮影した黒点のばらつきの変化の結果を示す. 回転方向によって加速度が大きくなる軸が異なることがわかるが, いずれの場合でも, 大きくても 0.04G 程度に収まっている. また, 重心座標のばらつきは回転方向により方向性はあるが, 大きくても 300px 程度, 長さにすると約 4.2mm に収まっていることがわかる.

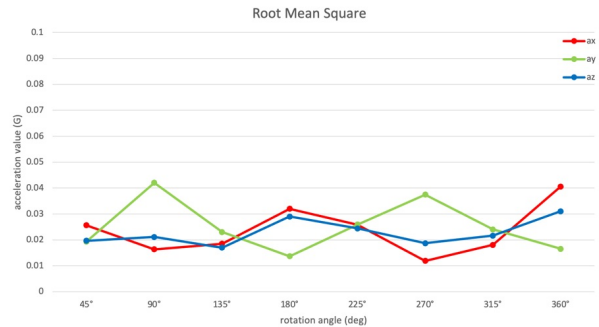


図 7 : 各回転方向の加速度の値の二乗平均平方根

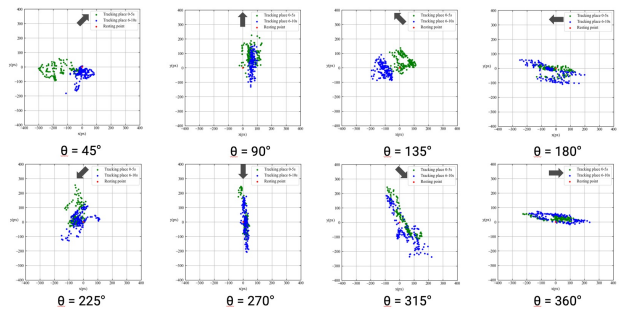


図 8 : 各回転方向における重心座標のばらつきの変化

#### 3.3 実験

予備実験より各回転方向に対して大きさの差があまりないことがわかったため,  $\theta = 90^\circ$  の方向に球体を回転させたときの条件による違いを確認する. 条件は以下の 3 条件である.

- ① 固定用の磁石がない場合
- ② 手ぶれ補正を行わない場合
- ③ 上部のボールベアリングがない場合

手ぶれ補正を行わない場合において, 手ぶれ補正を行う場合に比べて画角が広がるため, 空間解像度を合わせるために, デジタルズームで 2.4 倍に拡大している.

図 9 に各条件での加速度の値に対して二乗平均平方根を取り, プロットした結果を示す. また, 図 10 に各条件での球体内のアクションカメラで撮影した黒点のばらつきの変化の結果を示す. ①の条件においては, 球体内で機体が一緒に回転していたため, 加速度は大きく変化し, 重心座標のばらつきに関しては, カメラがマーカを捉え続けることができなかった. また, ②, ③の条件では, 運用を想定している場合と比較しても, 加速度と重心座標のばらつきの両方で大きな差はないことがわかる.



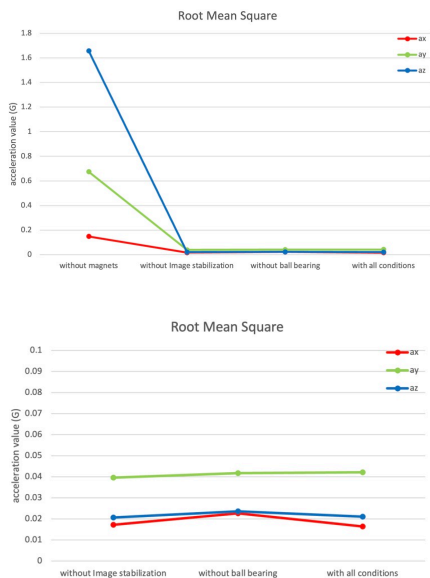


図 9：各条件における加速度の値の二乗平均平方根

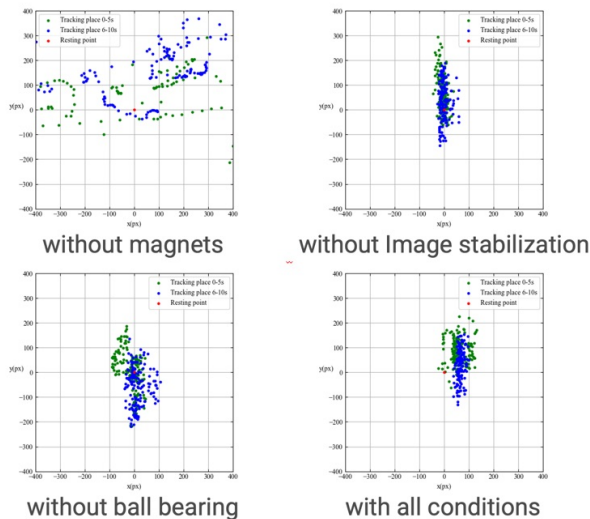


図 10：各条件における重心座標のばらつきの変化

4. 考察

図 9、図 10 の結果から、手ぶれ補正の有無と上部のボールベアリングの有無は機体本体の振動およびカメラの映像のブレに対して、あまり効果的でないことがわかる。このことは、球体内の機体の重心のバランスと外側から磁石で固定することが、振動を抑える上で重要であることを示唆しており、実際に固定用の磁石を無くした場合、球体内の機体が一緒に回転する場合があるなど、正しく計測が行えない状態となる。また、機体を偏重心にした場合も計測に支障が出るほど、カメラの映像がブレと考えられる。

試作した機体で実際にオカダンゴムシを腹側から撮影しながら運動補償を行なったが、取得できる映像にあまりブレはなかった。オカダンゴムシの歩行速度が約 10mm/s であることから、球体の回転速度によっては本研究のシステムでも十分であると考えられる。しかし、ハーフミラーを使用した影響で鮮明な映像の取得を行うことができなかった。これに関しては、手ぶれ補正の有無でカメラ映像

のブレにあまり差がなかったことから、アクションカメラを使用せずに、機体内部のマイコンに接続できるカメラで映像を取得し、重心座標を PC に送ることでハーフミラーを使用せずに腹側からの映像の取得と運動補償の両立が実現されると考えられる。また、重心のバランスを考慮し、外側から磁石で固定することで、映像のブレを本システム程度に抑えることができれば、QuANTAM のようなモータやカメラを内蔵した球殻外転方式でも腹側からの映像取得と運動補償の実現が可能となると考えられる。

5. まとめ

本研究では、球体内に搭載したカメラの映像のブレや機体そのものの振動を抑制するために、カメラの姿勢を安定化させる機構を提案し、加速度センサの値と球体内のカメラで撮影したマーカの重心座標の変化から振動の評価を行なった。評価の結果、各回転方向に対しては、回転方向による違いはあるものの、振動の大きさにあまり差がないことがわかった。また、手ぶれ補正と上部のボールベアリングはなくても大きな差がないが、固定用の磁石がない場合、球体内の機体も一緒に回転することがあり、計測に支障が出るということがわかった。

今後の展望として、腹側からの鮮明な映像の取得と運動補償の両立を実現するための改良を行う。また、オカダンゴムシを計測対象とした行動計測実験を行う予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21H01295 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] H. Naik, R. Bastien, N. Navab and I. D. Couzin, “Animals in Virtual Environments,” in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 26, no. 5, pp. 2073-2083, May 2020, doi: 10.1109/TVCG.2020.2973063.

[2] Naohisa Nagaya, Nobuaki Mizumoto, Masato S. Abe, Shigeto Dobata, Ryota Sato and Ryusuke Fujisawa, Anomalous diffusion on the servosphere: a potential tool for detecting inherent organismal movement patterns, PLoS ONE, DOI: 10.1371/journal.pone.0177480, 2017.

[3] Pikam Pun, Jacobs Brown, Tyler Cobb, Robert J. Wessells, and Dal Hyung Kim, Navigation of a Freely Walking Fruit Fly in Infinite Space Using a Transparent Omnidirectional Locomotion Compensator (TOLC), Sensors 21(5), 1651, February, 2021.

[4] Alexander Mathis, Pranav Mamidanna, Kevin M. Cury, Taiga Abe, Venkatesh N. Murthy, Mackenzie Weygandt Mathis, and Matthias Bethge, DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning, Nature Neuroscience, vol.21, pp.1281-1289, September 2018.

[5] 永谷直久, 奥田健嗣, 岡凌平, “QuANTAM:球殻外転方式による小型生物用行動計測装置の開発”, 日本バーチャルリアリティ学会 2021.