



# QuANTAM : 球殻外転方式による 小型生物用行動計測装置の開発

QuANTAM: Omnidirectional locomotion compensator using outer-rotor-type servo sphere

永谷直久<sup>1)</sup>, 奥田健嗣<sup>2)</sup>, 岡凌平<sup>1)</sup>

Naohisa NAGAYA, Kenji OKUDA, and Ryohei OKA

1) 京都産業大学 (〒603-8555 京都市北区上賀茂本山, nagaya@cc.kyoto-su.ac.jp)

2) 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, okuda@vogue.is.uec.ac.jp)

**概要:** 我々は、節足動物を主な対象とした小型生物の行動計測において、これまで着目されてこなかった腹側からの行動観察を可能とする装置の開発を行なっている。腹側からの計測により、背側からでは詳細な観察が難しい口唇部や脚部、生殖器などの動きに加えて、行動の予備動作などを含む豊かな情報の取得が期待される。本発表では、球殻内に撮像素子およびアクチュエータを配した全方向運動補償機構を有した行動計測装置 QuANTAM の試作機のシステム構成と、試作機の開発を通して得た改善点を紹介する。

**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

これまでに、主に動物行動学分野や行動生態学分野において、節足動物の行動様式を観察報告した研究が行われており、長らく目視による観察と評価が行われてきた。カメラなどの撮像デバイスを用いた画像解析による行動解析が可能となつてからは、観察対象の身体動作に関するより詳細かつ正確な行動パターンの定量的評価が行われてきている。しかし、画像解析による行動解析手法は計測範囲がカメラの視野角内に限定されるため、観察対象を拘束具により拘束するか、行動範囲をシャーレ内などに限定するといった制約条件を設ける必要があった。拘束具による身体拘束や行動範囲の制限は、様々な行動を阻害してしまうという問題があり、環境の再現性という観点からも特に非拘束の条件では、光や音などの逆 2 乗則により強度が変化する物理刺激や、ニオイなどの伝搬において流体特性をもつ化学刺激の再現性を確保した実験が困難であった。

そのため、2000 年代初頭からバーチャルリアリティ (VR) 技術を用いて、対象の生物に対して様々な刺激提示をしながら行動計測が可能となる実験装置の開発が進められている[1]。我々が開発に携わってきている昆虫行動計測用の全方向運動補償装置 ANTAM[2]も、VR 技術を用いた行動計測装置の一つである。全方向の運動補償装置を備えた計測システムでは、運動補償により観察対象を実世界

座標上に固定できるため、刺激の再現性を確保しながら長時間の定点観測による動画データ解析が可能である。しかし、これまでの運動補償機構の実装方式としては、球体の外側にモータなどのアクチュエータを用いて回転させる方式 (サーボスフィア方式) か、球体をポリスチレンなどの軽量な材料で製作した上で観察対象の生物をピンなどで固定し、その脚力で球体を回転させる方式 (テザー方式) のどちらかであり[3]、腹側からの動画計測は試みられていない。

腹側からの動画計測により、生体の歩行中の脚部の詳細な動きが計測可能となるため、刺激に対して体軸を変える際の脚部と体節の連動性や、脱皮による身体の変化に伴う歩様の変化、行動軌跡の変化などを定量的に評価できるようになる。加えて、腹側には背側の外骨格に比べると比較的柔らかい組織や色素が薄い組織が散在しているため、体液循環の脈動や近赤外領域の光源などを用いた体表付近の体液循環の計測が可能となることが期待される。

そこで、本研究では球殻内にモータやカメラを内蔵した球殻外転方式による小型生物用行動計測装置 QuANTAM の試作を行った。試作した QuANTAM の運動補償性能の評価と、取得した腹側からの動画データから、今後重点的に改善すべき要素を明らかにした。

## 2. 提案システム：QuANTAM の構成

### 2.1 システムの要求項目

我々が目指すシステムは、(1)小型生物の運動補償機能、(2)小型生物の腹側からの動画データ取得機能、の2つの機能が最低限必要となる。(1)についてはこれまでのサーボスフィア方式と同じく、アクチュエータを用いて球体を回転させる手法を採用するが、(2)の仕様を実現するためにはシャーレのような透明な素材の上に対象を配置し、下側から各種センサで情報を取得できるようにする必要がある。本研究では、球体の素材として透明なアクリルドームを組み合わせた球殻を採用し、球体の内部にカメラとアクチュエータを配置する設計とした。

### 2.2 試作したシステムの概要

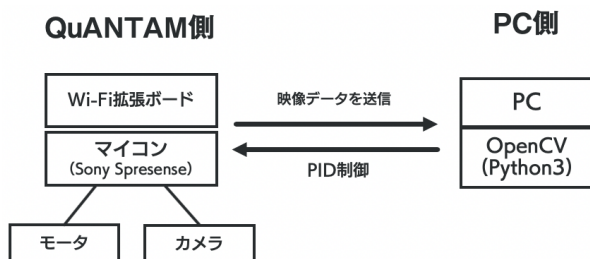


図 1：QuANTAM のシステム構成

図 1 に QuANTAM のシステム全体の概要図を示す。球体内に配置したマイコンボード (Spresense, SONY) により、同じく球体内のカメラからの映像を取得し、その映像をまずは WiFi を通じて PC 側に無線で転送する。

PC 側で受信した映像の各フレームに対して、Python と OpenCV ライブラリで作成した運動補償制御プログラムでモータの PID 制御用の信号をマイコンボード側に送信する。制御信号を受け取ったマイコンボードは信号に基づいてモータの動作を制御する。

### 2.3 ハードウェア構成

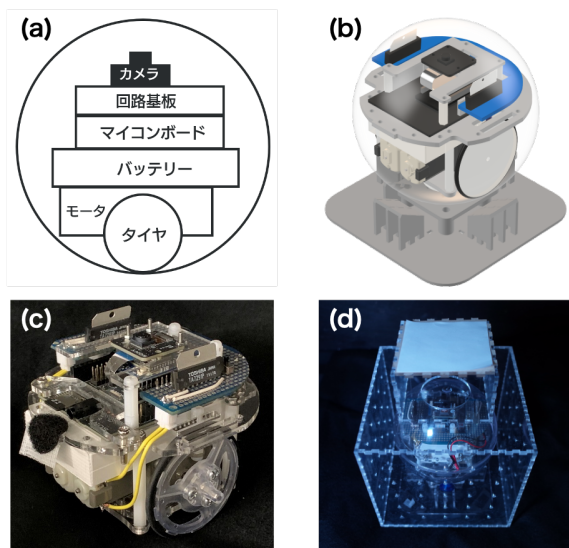


図 2：ハードウェアの構成図と外観

図 2-(a)に QuANTAM のハードウェアシステムの模式図を示す。透明なアクリル球体の内部にカメラ (Spresense カメラボード, CXD5602PWBCAM1, SONY)、マイコン

(Spresense メインボード, CXD5602PWBMAIN1, SONY) およびマイコンの拡張ボード (Spresense 拡張ボード, CXD5602PWBEXT1, SONY)、5V 出力が可能なモバイルバッテリー (cheero Canvas 3200mAh, CHE-061, cheero)、タイヤ (タミヤ スリムタイヤ 55mm, TAMIYA)、ギアボックス (タミヤ ダブルギアボックス, TAMIYA)、DC モータ (FA-130, TAMIYA)、モータドライバ (TA7291P, TOSHIBA) などを含む回路基板を組み合わせた構成となっている。球殻は外径が 120mm のものを使用した。

図 2-(b)はハードウェアの各構成要素を組み合わせた CAD 図であり、図 2-(c)は実際に制作した球体内の装置外観である。最終的な装置全体の外観は図 2-(d)に示すように、ボールキャスターで構成される土台に球体を配置し、球体を実世界座標系に固定されたまま回転運動ができるようにした。また、球体の鉛直上方には白色のプレートを設置することで、カメラからの取得映像の背景が白色となるようにした。背景色は観察対象の生物の体色に合わせて変更可能である。

### 2.4 ソフトウェア構成

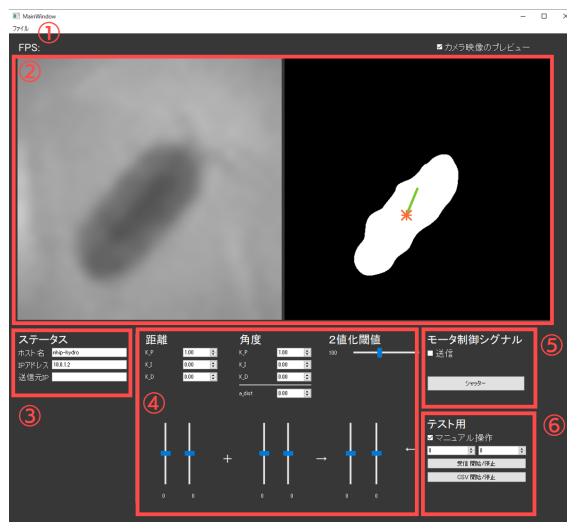


図 3：実装したソフトウェアの UI 構成

PC 側で動作するソフトウェアで実装した主な機能は、カメラ映像のプレビュー機能、観察対象生物の重心位置計測のための OpenCV を用いた画像処理機能、PID 制御の各ゲイン値調節機能および出力信号の計算・送信機能である。画像処理には OpenCV-Python、GUI の制作には PyQt モジュールを用いた。開発したソフトウェアは Windows10 上の Python3.6.5 環境で動作確認を行なった。

実際のソフトウェアの画面構成を図 3 に示す。ユーザインタフェース (UI) の構成を以下に説明する。

- ① FPS (frames per second) の表示
- ② QuANTAM から転送された映像の表示 (左:グレースケール, 右:2 値化と重心情報)
- ③ ソフトウェア実行 PC のホスト名と IP アドレス, QuANTAM の IP アドレスの表示
- ④ PID 制御用各種パラメータの変更と表示
- ⑤ モータ制御シグナルのオンオフ切り替え, 写真撮影

ボタン

- ⑥ モータのマニュアル操作, 映像の受信開始/停止ボタン, CSV ファイルへの書き出し開始/停止

## 2.5 ネットワーク構成 : WiFi ボードを用いた映像転送

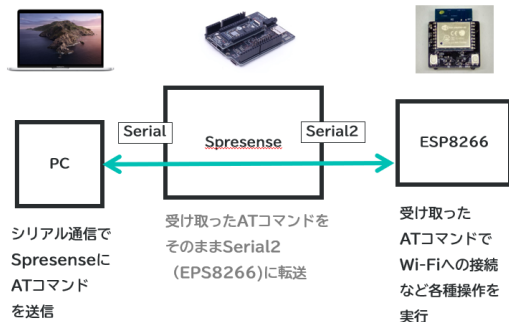


図 4 : WiFi ボードを用いた映像データの転送

試作した QuANTAM のシステムでは, カメラで取得した画像の画像処理を WiFi で PC に送信し, PC 側で行なっている. これはマイコンで画像処理を行うことも可能ではあるが, マイコン側で画像処理を行うことによるハードウェアの発熱, 処理可能な解像度が限定的であったことから, PC 上で画像処理を行うこととした. マイコンから WiFi ボードを用いた映像転送の仕組みを図 4 に示す. ESP8266 は TCP もしくは UDP でのデータ転送が可能であり, 今回は遅延を考慮し UDP で送信している.

AT コマンドは Arduino IDE のシリアルモニタ経由で送信することで実行できるが, 実際に使用する際には ESP8266 からの応答を待ってから, 次の AT コマンドを送信する必要があるなど, 待機時間の制御が必要となる. そのため, 基本的にはライブラリを用いてデータの転送を行うが, Spresense 用の ESP8266 ライブラリとして公開されている「ESP8266ATLib-for-Spresense」では TCP での送信を行う関数しか用意されていなかったため, UDP 通信用の関数を自作し, ライブラリに追加して使用した.

## 3. 評価実験

制作したシステムの評価を行った. 結果は以下の通りである.

- 前後方向の最大追従可能速度 : 17.8 mm/s
- 最大回転角速度 : 211 deg/s (3.69 rad/s)
- 運動補償が可能な範囲 : 16 x 16 mm
- 対象の移動から移動量算出までの遅延 : 90ms から 100ms 程度
- 運動補償用映像データの取得頻度 : 約 45FPS

また, 実際に平均の移動速度が 15mm/s 程度であるオカダンゴムシ[2]を乗せてシステムを動作させてみたところ, 2 輪あるタイヤの前後 (プレビュー画における上下) の方向に対しての運動補償は概ね正常に行えた. しかし, 斜め方向の移動に関して, すなわち角度補償も必要な制御に対しての運動補償は, カメラの視野範囲から外れることに繋がりやすく, 運動補償が正常に行えない場合もあることが確認できた.

## 4. 考察 : 重点的に改善すべき項目

今回製作したシステムでは, 運動補償機能と腹側からの動画データ取得機能を統合させることを優先した. システムを構成する個々の要素の要求仕様は, 観察対象となる生物によって異なるが, 今後は体長が 3-10mm 程度, 移動速度は 50mm/s 以下である生物を観察対象とした装置の改良を行う. この条件には, ダンゴムシやアリ, シロアリなどの多くの節足動物が適合する.

重点的に改善すべき項目は, まずは運動補償を行うアクチュエータと駆動機構の再検討であり, 駆動機構としては今回用いた形式のホイールではなく, オムニホイールなどの全方向駆動が可能なホイールでの運動補償機構の実装を行う必要がある. 次に, 腹側からの取得画像の高精細化が必要である. 実現方法の一つは, カメラと画像処理プロセッサが一体となっている構造のカメラを用いることである. 画像処理プロセッサが一体となっていることにより, PC またはマイコンで行う処理負荷の軽減にも寄与できる. また, カメラ画像の高解像度化に伴い, 節足動物の付属肢の特徴点抽出が容易になることが期待される.

## 5. まとめ

本研究では, 従来のサーボスフィア方式を改良した手法として球殻外転方式を提案し, この方式を用いた腹側からの行動計測装置 QuANTAM の開発と評価を行った. 評価実験により, 開発した QuANTAM での運動補償が, 最大で 17.8 mm/s まで可能であることが確認できた. また, 実際に生体のオカダンゴムシを用いて試験的に運動補償テストを行い, 運動補償が可能な位置と困難な位置があることを確認した. 一方で, カメラの映像は運動補償に使用したのみで, 本研究の目的の一つである腹側データの取得が可能かどうかの性能評価は行えなかった.

今後の展望として, 運動補償精度の向上や, 無線通信の安定化, 振動の軽減, 腹側の鮮明な映像の録画機能の追加などの改良を行う.

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] 永谷直久, 藤澤隆介, 昆虫行動計測のためのパーティキュラリティ装置, 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 6, pp. 436-439, 2017.