

〔論 文〕

限られた画像特徴量に基づく MAV 姿勢運動計測*

藤田 浩輝^{*2}, 衛藤 蒼^{*3}, 永井 弘人^{*4}, 長崎 秀司^{*5}, 金城 寛^{*6}

An Estimation Method of Micro Aerial Vehicle's Attitude Motions Using a Limited Number of Image Characteristics*

Koki FUJITA^{*2}, Aoi ETO^{*3}, Hiroto NAGAI^{*4}, Shuji NAGASAKI^{*5}, Yutaka KINJYO^{*6}

^{*2}Department of Aerospace Engineering, School of Engineering, Nippon Bunri University

^{*3}Department of Aerospace Engineering, School of Engineering, Nippon Bunri University (Graduate, AY2021)

^{*4}Graduate School of Engineering, Nagasaki University

^{*5}Faculty of Engineering, Kyushu University

^{*6}School of Engineering, Kyushu University

Abstract

This paper proposes a method to estimate attitude motions of a micro aerial vehicle (MAV) during a specific flight phase such as a hovering or a reciprocating motion. Instead of a six-axis motion sensor (with a three-axis gyroscope and a three-axis accelerometer), a few fixed high-speed cameras and a limited number of markers in image sequences capturing a target vehicle are utilized to estimate the attitude angles and their rates during the vehicle's motion. Through a flight experiment tracked by two high-speed video cameras, this study ultimately verifies that a vehicle's motion can be efficiently measured by selecting appropriate locations of the markers corresponding to the points on the vehicle's body surface.

キーワード：超小型飛翔体 (MAV), 運動推定, 画像特徴量

Keywords : micro aerial vehicle (MAV), attitudes and motion estimation, image characteristics

*2022年6月15日受理

*2 日本文理大学工学部航空宇宙工学科 教授

*3 日本文理大学工学部航空宇宙工学科 (2021年度卒業)

*4 長崎大学大学院工学研究科 准教授

*5 九州大学大学院工学研究院 助教

*6 九州大学工学部 技術員

1. 研究背景および目的

現在世界中に広く普及する回転翼型ドローンと異なり、人間に対する親和性・安全性がより高い小型飛翔体 (Micro Air Vehicle = MAV) として、羽ばたき型ドローンの開発が国内にて進められている^{[1]–[3]}。

現在開発中のドローンについては、羽ばたき翼によって自重を支える揚力発生メカニズムの解明や、それを実現する翼構造についての先行研究を経て、プロトタイプ機によるフリーフライトが成功しているが、長時間にわたる安定したフライトの実現には未だ課題が残されている。

一般に、内界センサの搭載が困難なほど小型の飛翔体の運動を計測するには、機体の外部から非接触で運動計測を行えるような画像計測の手法が望ましい。しかし、任意の機体形状や運動状態に対応するには、多数の高速度カメラから成る大規模な計測システムが必要と考えられる。一方で、動画像データから機体の姿勢運動を計測するために機体上に設けられる画像特徴点 (画像フレーム間で追尾を行うための剛体に貼られたマーカー) の配置や個数の最適化を施すことにより極力少ない台数のカメラで動態を計測できれば、同様の MAV を開発する上での有用性は高い。

本研究では、限られた画像特徴量に基づく MAV の運動推定を行うことを目的とする。

3次元空間中の物体の運動データを計測することを目的として、慣性センサ (3軸加速度計・3軸ジャイロスコープを組み合わせた計測器) が利用されるが、ペイロードの制限により MAV への搭載が不可能な場合がある。また、フライト中の墜落による破損の可能性を考慮した場合、機体外部から遠隔で運動状況を計測できるセンサが望ましい。

ここでは、特に、機体の周囲に配置された複数台の高速度カメラと、機体表面に貼られた限られた数のマーカーを用いて、MAV の 3次元姿勢運動を計測する手法の導出を行い、実機を用いた検証を行う。一般的に、このような画像解析に基づく 3次元運動推定手法は、極力多くの点数の画像特徴量に基づき精度を担保することになるが、特にここでは特徴点の選択を工夫することで、比較的少数の特徴点であっても良好な姿勢運動推定が実現できることを示す。

さらに、実機として比較的安定した飛行実現が可能な小型の回転翼型ドローンを用い、上記画像計測と同時に機体に直接搭載された運動センサ (慣性計測ユニット)

による運動計測を行い、両者の結果を比較することで、動画像からの運動計測結果の妥当性が高いことを示す。

2. 画像特徴量を用いた小型飛翔体運動推定手法

2-1 3次元空間座標系の定義

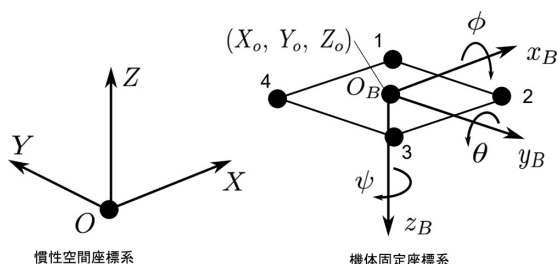


図1. 機体位置・姿勢を計測するための座標系

フライト中の機体の位置や姿勢を表現するために、図1に示されるような座標系を定義する。図1左側の慣性空間座標系は、機体外部の地表面上に原点がある、いわゆる慣性空間に固定された座標系であり、重心位置のような機体の代表点や動画像解析の際に機体上に仮定した特徴点の位置を表すために用いられる。また、図1右側の機体固定座標系は、剛体と仮定された機体上の複数の点 (1, 2, 3, 4) に基づいて決められた、機体に固定された座標系であり、機体の姿勢や姿勢変化を表すために用いられる。

ここで、機体の占める空間内に原点 (O_B) をとり、機体軸上進行方向に x 軸 (x_B)、それと直交下向きに z 軸 (z_B)、さらに、この2つの軸と直交し右手系を成すように y 軸 (y_B) を仮定する。原点 O_B が機体重心近くであれば、これは一般的な航空機の機体固定座標系^[4] とほぼ等価とみなすことができる。また、 x , y , z 各軸周りの回転角度 (姿勢角度) を φ (ロール角), θ (ピッチ角), ψ (ヨー角) とする。

このような座標系の仮定に基づき、今後、機体表面に設けられた4つの特徴点の画像上の位置に基づく 3次元空間座標の復元と、3つの姿勢角およびそれらに対応する角速度の推定を行う。

2-2 画像特徴量に基づく姿勢および姿勢変化推定

画像特徴量として、機体 (剛体) 上にマーカー (周囲と色・明るさの異なる点状の模様) を設け、画像上で認識できるようにする。一般には、機体上の広い領域にわたるそのような特徴点を多く設定し、多数のカメラの視点から得られた動画像を解析することにより、撮影対象

の機体の姿勢やその変動をより正確に推定することが可能であると考えられる^{[5][6]}。

しかし、ここでは、特徴点の位置や特徴点同士の位置関係を工夫することにより、極力少ない数の特徴点を用いて機体の姿勢運動推定を試みる。図1右側の機体固定座標系の図に示される4つの点(1, 2, 3, 4)は、本研究で用いられた特徴点とその位置関係を示しており、これらを頂点とする矩形領域が機体固定座標系の $x_B - y_B$ 平面と平行で、かつ、矩形の各辺の方向が x_B 軸もしくは y_B 軸に平行になるように位置が決められている。なお、これは一般的なクワッドロータ型ドローン回転翼の回転軸頂点部分に相当する点とみなすことができる。

そこで、実際にこれら特徴点の慣性空間における位置座標が得られたと仮定して、機体の代表点(機体固定座標系原点 O_B)位置や、姿勢角および姿勢角速度を計算する方法を以下に導く。

図1右側に示される特徴点(1, 2, 3, 4)の慣性空間座標系(図1左側)における位置座標 (X_i, Y_i, Z_i) ($i = 1, 2, 3, 4$) が得られたとする。このとき、機体固定座標系原点 O_B の慣性空間座標系における位置座標 (X_o, Y_o, Z_o) と、機体固定座標系に基づいて定義された姿勢角 (ϕ, θ, ψ) が、以下のように求められる。

$$\begin{aligned} X_o &= \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4}{4}, \\ Y_o &= \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4}, \\ Z_o &= \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}{4}, \end{aligned} \quad (1)$$

表1. 小型ドローン (Tello) 諸元

重量	91.5g (含衝撃緩和用フレーム)
全長	92.5mm
全幅	98.0mm
高さ	41.0mm
プロペラ直径	76.0mm(3.0inch)

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1} \frac{\bar{z}_2}{\sqrt{\bar{x}_2^2 + \bar{y}_2^2}} \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{-\bar{z}_1}{\sqrt{\bar{x}_1^2 + \bar{y}_1^2}} \\ \psi &= \tan^{-1} \frac{-\bar{y}_1}{\bar{x}_1} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、

$$\bar{x}_j = x_j / \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2}, \quad \bar{y}_j = y_j / \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2},$$

$$\bar{z}_j = z_j / \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2}, \quad (j = 1 \text{ or } 2)$$

また、

$$\begin{aligned} x_1 &= 0.5 \times (X_3 + X_4 - X_1 - X_2), y_1 = \\ &0.5 \times (Y_3 + Y_4 - Y_1 - Y_2), z_1 = 0.5 \times (Z_3 + Z_4 - \\ &Z_1 - Z_2), x_2 = 0.5 \times (X_1 + X_4 - X_2 - X_3), y_2 = \\ &0.5 \times (Y_1 + Y_4 - Y_2 - Y_3), z_2 = 0.5 \times (Z_1 + Z_4 - \\ &Z_2 - Z_3) \end{aligned}$$

である。

一方、上記姿勢角に対応する角速度 $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ については、高速度カメラにより高いサンプリングレート(後述の実験条件では、2msのサンプリングレートに相当)でデータ取得が可能であることを利用し、各角度推定値の差分より近似的に角速度を求める。

3. 回転翼型小型ドローンを用いた飛行・撮影実験

前節で述べた画像運動解析手法を検証するため、図2に示す小型ドローン(Ryze Technology 製 Tello)を用いたフライト撮影実験を行った。

ここでは特に表2に示されるようなシナリオに基づき、機体固定座標系 x_B 軸方向と y_B 軸方向にそれぞれ正弦波状の周期的な変位をドローンのコントローラ(スマートフォンによる操縦アプリケーション)に与え、その様子を2台の高速度カメラ(Photron 製 FASTCAM MINI UX50)にて1080×1024[pixels], 500[fps]の動画画像データを約8.7[s](4350[frames])取得した。続けて3次元運動解析ソフトDIPP-MOTION V/3D(DITECT 製)を用いて特徴点の3次元位置計測を行った。なお、表2における3つめのシナリオ(c)は、他のシナリオとの比較のためにデータ取得した、ホバリング(空中静止)のみのフライト条件である。



図2. RyzeTech 製小型ドローン Tello および特徴点位置

表2. フライト撮影実験時における運動シナリオ

	運動方向 (回転軸)	運動パターン
a. シナリオ1	y軸 (ピッチ軸)	正弦波状
b. シナリオ2	x軸 (ロール軸)	正弦波状
c. シナリオ3	なし (空中静止)	なし (空中静止)



図3. 高速度カメラによるドローン撮影画像例 (シナリオ1の運動パターン時)

2台の高速度カメラでフライト時のドローンを撮影した画像 (フレーム) の例を図3に示す。また、高速度カメラで撮影されたマーカー (4点) の画像から計測された3次元位置 (各マーカー位置の慣性空間座標系におけるX(青), Y(橙), Z(緑) 座標成分の時間履歴で、シナリオ1の実験結果) を図4に示す。

これらの計測結果は、実験時の飛行高度や各シナリオに沿った運動における水平面内の変位を考えると妥当な結果と思われたため、この座標計測値を用いて、続けて (1), (2) 式に基づく撮像フレーム毎の機体姿勢角 ϕ, θ, ψ および、それぞれの時間差分から計算された角速度 $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ を求めた。その結果を図5に示す。

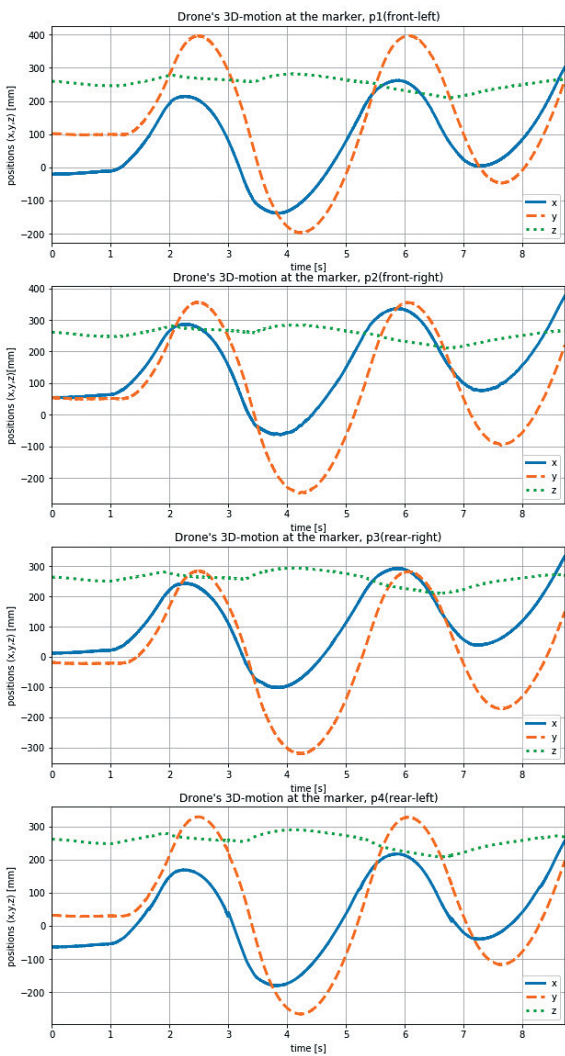


図4. マーカー (4点) 位置推定結果 (シナリオ1の実験結果)

これらの図から、シナリオ1および2の結果では、それぞれの運動パターンに応じて、特定の機体固定座標軸周りの姿勢角度や角速度 (シナリオ1: 青で表される $\theta, \dot{\theta}$, シナリオ2: 橙で示される $\phi, \dot{\phi}$) が周期的に変化する様子が得られていることや、図4に示されるマーカーの位置座標の結果と異なり、必ずしも理想的な正弦波状の変化となっていないことが分かる。

一方で、比較のために撮影を行ったホバリング時 (シナリオ3) の動画像から、撮影時間を通していずれも殆ど変化がない結果となることが分かった。

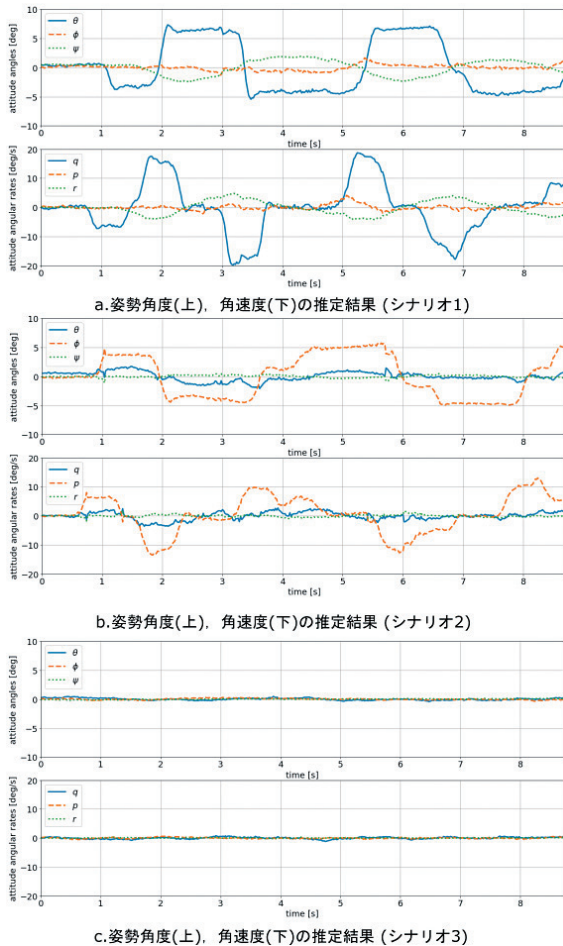


図5. 動画画像解析による姿勢角度・角速度推定結果

続いて、これらの推定結果の妥当性や精度を検証するため、別の運動センサから取得した計測結果を図5に示す。ここで、運動センサとして WitMotion 製の慣性計測ユニット (IMU), WT901BLECL を使用し、ドローン本体下部に固定した状態で、表2の各シナリオでの実験時に高速度カメラ撮影と同時に計測を実施した。なお、姿勢角速度の計測値はいずれも高周波あるいはスパイク状のノイズが顕著であったため、各計測時刻直前の5点分を用いた移動平均値により結果を示している。

図4および図5の結果の比較から、まず、ホバリング時 (シナリオ3) に関しては、運動センサによる計測結果は、画像計測の結果と大きな違いは見られず、いずれの軸周りの姿勢角度・角速度もほぼゼロに近い状態で時間的に推移していく様子が見て取れる。一方、ピッチ軸 (シナリオ1) もしくはロール軸 (シナリオ2) 周りに

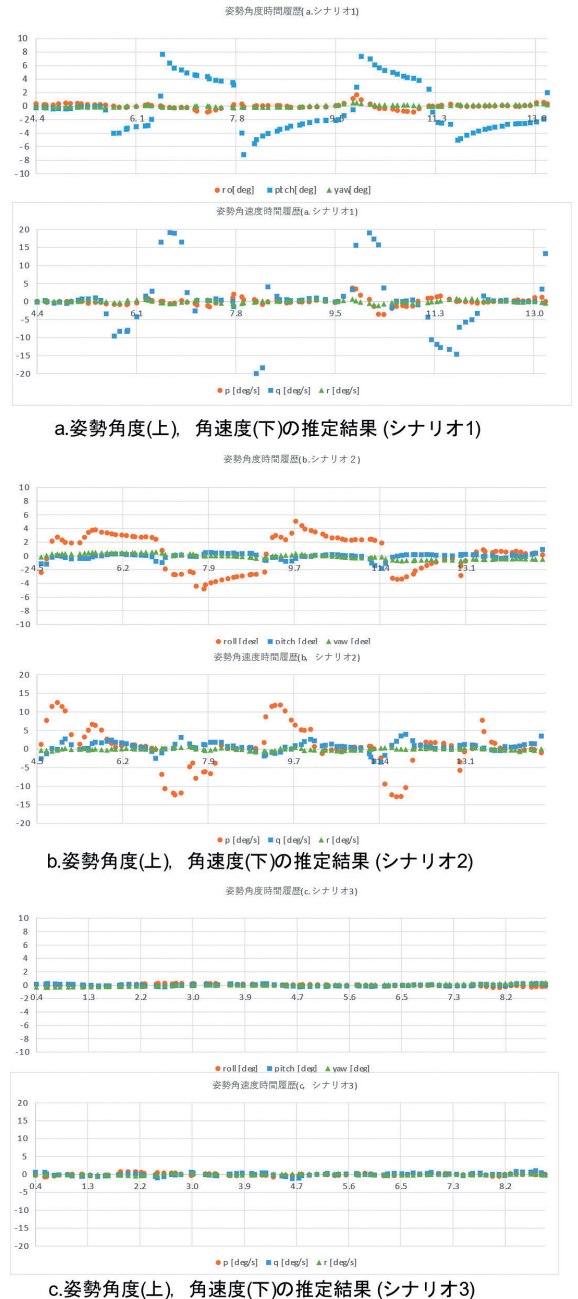


図6. 運動センサによる姿勢角度・角速度計測結果

周期的な運動パターンを与える場合の結果については、特に姿勢角 (青で示される θ , もしくは橙で示される ϕ) に関して、画像計測値が周期運動のピークが一定値に持続される矩形波に近い形で推定されるのに対し、IMU

によって計測された結果は各姿勢角のピーク値が時間経過と共に低減する、鋸波に近い形で得られていることが分かる。

このような両者の波形の違いが生じる原因としては、画像計測では、最初に姿勢角の推定値を求め、その後姿勢角速度を微分（差分）により計算しているのに対し、IMUによる計測では、センサの計測原理上、まず姿勢角速度が計測され、それを時間積分することで姿勢角度が算出されるといった計測（計算）手法の違いが大きいと考えられる。

特に、図6の姿勢角速度の計測結果は、移動平均値を求める前の比較的高い周期成分（急速な変動）のデータが実際には含まれていると考えられ、そのような急激な運動変化が姿勢角の結果に表れていると考え、本画像計測では推定が難しい運動状態があることが予測される。

しかしながら、周期的な姿勢変化のタイミング(周期)やピーク時の姿勢角および姿勢角速度の値について、両者はかなり近い値となっており、画像計測の結果は、精度的な面からも信頼性が高いと言える。

4. 結論および今後の課題

本研究では、小型羽ばたき機のような MAV の運動安定性を解析することを目的として、限られた数の高速度カメラと画像特徴点（マーカー）の配置による動画像運動計測の手法を提案し、小型ドローンを用いた実験による検証を行った。

その結果、機体表面上適切な配置により、高々4点分のマーカーで、飛翔体の特定の（パターン化された）運

動時における3次元姿勢角度・角速度の推定が行えることが分かった。

一方で、実際の小型羽ばたき機の形状や運動状態を考慮した場合、今回と全く同じマーカー配置や比較的安定した運動条件を想定することは困難であり、今後、より汎用性の高いマーカーの配置や個数や計測可能な運動条件をより詳細に調べる必要がある。

参考文献

- [1] Hiroto Nagai, Kazutaka Nakamura, Koki Fujita, Issei Tanaka, Shuji Nagasaki, Yutaka Kinjo, Shintaro Kuwazono, and Masahiko Murozono, "Development of Tailless Two-winged Flapping Drone with Gravity Center Position Control", *Sensors and Materials*, Vol. 33, No. 3, pp. 859–872, 2021.
- [2] 永井弘人, 中村和敬, 藤田浩輝, 長崎秀司, 金城寛, "生物を規範とした羽ばたき型ドローンの開発", *昆虫と自然*56 (14), pp. 41–44, 2021.
- [3] 桑園慎太郎, 永井弘人, 藤田浩輝, 長崎秀司, 有蘭仁, "羽ばたき翼型ドローンのホバリング時の固有安定性に関する研究", 第59回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2019-5017, 2021.
- [4] 加藤寛一郎, 大屋昭男, 柄沢研治, "航空機力学入門", 東京大学出版会, 1982.
- [5] 佐藤敦, "コンピュータビジョンー視覚の幾何学ー", コロナ社, 1999.
- [6] 出口光一郎, "ロボットビジョンの基礎", コロナ社, 2000.