

〔論 文〕

適切な画像特徴量配置と剛体運動モデルに基づく 超小型飛翔体（MAV）姿勢運動計測

藤田 浩輝*, 永井 弘人*², 長崎 秀司*³, 金城 寛*⁴

*日本文理大学工学部航空宇宙工学科

*²長崎大学大学院総合生産科学域（工学系）

*³九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門

*⁴九州大学工学部

A Micro Aerial Vehicle's Attitude Motion Estimation Using Properly Configured Image Characteristics and a Rigid-Body Model

Koki FUJITA*, Hiroto NAGAI*², Shuji NAGASAKI*³, Yutaka KINJYO*⁴

*Department of Aerospace Engineering, School of Engineering, Nippon Bunri University

*²Institute of Integrated Science and Technology (Engineering),
Nagasaki University

*³Department of Aeronautics and Astronautics, Faculty of Engineering,
Kyushu University

*⁴School 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 high-speed cameras in certain positions and some properly configured markers in image sequences capturing a target vehicle are utilized to estimate the attitude angles and their rates during the vehicle's motion. This study finally verifies that the vehicle's motion can be efficiently estimated by selecting appropriate locations of the markers set 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，剛体モデル

Keywords : micro aerial vehicle (MAV), attitudes and motion estimation,
image characteristics, rigid-body model

1. 研究背景および目的

大規模災害の現場における状況把握や地球外惑星における無人探査等、小型の無人飛翔体（特に超小型飛翔体＝Micro Aerial Vehicle; MAV）の有用性は非常に高いと考えられ、回転翼型ドローンを始め様々な形態の小型ドローンの開発や関連する研究が進められている^{1)–3)}。

昆虫や鳥のように羽ばたき翼を有する、いわゆる羽ばたき翼型のドローンは、人間を含めた一般的な動物の生活環境における親和性や安全性が高く、回転翼型ドローンに比べて様々な利点があり、現在も安定した飛行を実現するための研究開発が鋭意続けられている。

そのようなドローンを開発するに当たり、試験飛行中の機体の運動を解析するために、特に小さなサイズの機体では搭載が困難な INS（慣性航法システム）を用いずに、複数台の高速度カメラにより遠隔で運動状況を把握できるような計測システムを構築することは意義が大きい。また、そのような画像計測システムを適用する上で、機体上に取り付けられる画像特徴マーカーについて、効率性の高い数や配置方法を検討し、実際の飛行試験による実証ができれば、今後の試験機開発に大きく役立つことが期待される。

過去に発表を行った論文⁴⁾では、極力少ない数の画像特徴マーカーを適当に配置することで、クアッドローター型の小型ドローンのホバリング中の姿勢やその時間変化を2台の高速度カメラから推定できることを実験結果から示した。しかしながら、回転翼型に限らず一般的な機体形状を想定したマーカー配置や、それに基づく機体姿勢（角度・角速度）の推定方法について十分検討できていなかった。

そこで、改めて、汎用性が高い機体の3次元的な剛体モデルを想定したマーカーの数や配置の仮定と、そのような剛体モデルに基づく姿勢運動推定方法の導出を行い、実機および複数台の高速度カメラを用いた飛行試験による実証を行った。

特に、過去の研究と同じ機体に対して、異なる画像特徴量マーカーの数や配置を設定し、飛行試験や画像キャリブレーション手法の見直しとともに、3台の高速度カメラを用いることで、実験結果の信頼性を向上させた。

2. 限られた画像特徴量と剛体モデルに基づく小型飛翔体姿勢・運動推定手法

2-1 画像特徴量および剛体モデルの仮定

本研究では、図1に示されるような2種類の座標系（慣性座標系および機体固定座標系）の定義に基づき、機体固定座標系において数と配置が決められた画像特徴マーカーを仮定し、機体の実装されたそれらのマーカーの複数台カメラによる動画像上の位置から、機体の3次元的な姿勢やその時間変化の推定を行う。

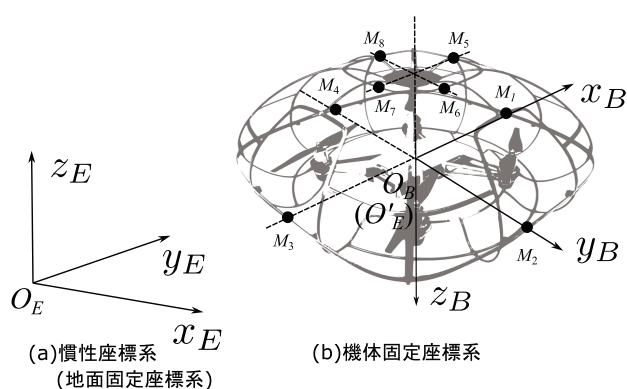


図1. 座標系の定義

ここで、剛体と仮定できる飛翔体上に8個（ $M_1, M_2, \dots, M_8$ ）のマーカーを配置する。ただし、機体固定座標系（ O_B - $x_B y_B z_B$ ）における位置が明確になるように、機体固定座標系原点（機体重心に近い O_B ）から見て等方的かつマーカーからこの原点位置が明確に推定できるように配置する。たとえば、本稿で示される実験では、8点中4点を x_B - y_B 平面に平行な面内に、残り4個を x_B - y_B 平面と平行な別の平面内に、さらに4点のマーカーの重心（図心）位置が O_B もしくは O_B を通り平面に垂直な軸上にあるよう設けている。なお図1には、ドローン機体を囲むような形状の樹脂製の緩衝フレーム上のマーカー位置を示している（図2参照）。

また、マーカーの慣性座標系位置から直接機体の姿勢が計算可能のように機体固定座標系原点に並進移動した慣性座標系原点位置（ O'_E ）を図中に示している。

2-2 画像解析および剛体モデルに基づく姿勢角（オイラー角）・姿勢角速度推定方法

画像解析による3次元の剛体運動（位置および姿勢とその時間変化）推定では、理論上、動画像の各フレーム上の複数の特徴点（マーカー）位置と、（1台もしくは複数台の）カメラ撮像系に関する各種パラメータ（内部・

外部パラメータ) から、特徴点位置によって構成される剛体モデルを経由して、撮影対象となる剛体の位置および姿勢 (さらにその時間変化) を推定することが可能^{5) 6)} であるが、本研究では、画像上の異なる複数のマーカーの慣性座標系 (地面固定座標系) 位置が正確に計測できることを前提として、マーカー配置の工夫により、直接機体の3次元運動を計測できるような手法を導く。

まず、ある画像フレーム上1つのマーカーの慣性座標系 ($O_E - x_E y_E z_E$) の位置 $[x_E, y_E, z_E]^T$ が得られた場合に、慣性座標系原点を機体固定座標系 ($O_B - x_B y_B z_B$) 原点に並進移動した ($O'_E - x'_E y'_E z'_E$ とする) 後の、それぞれの座標系での位置 $[x'_E, y'_E, z'_E]^T$, $[x_B, y_B, z_B]^T$ の間には、次の関係式が成り立つ^{5) 7)}。

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\Phi, \theta, \Psi) \begin{bmatrix} x'_E \\ y'_E \\ z'_E \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{R}(\Phi, \theta, \Psi)$ は、2つの座標系の座標軸を一致させるために必要なオイラー角 (Φ, θ, Ψ) に関する回転行列であり、いわゆる Z-Y-X オイラー角を採用する場合、(2)式のように表すことができる。

マーカーが N 個 ($N \geq 3$) 存在する場合、各マーカーの位置座標を行列形式で

$$\mathbf{X}_E = \begin{bmatrix} x'_{E1} & \cdots & x'_{EN} \\ y'_{E1} & \cdots & y'_{EN} \\ z'_{E1} & \cdots & z'_{EN} \end{bmatrix}, \mathbf{X}_B = \begin{bmatrix} x_{B1} & \cdots & x_{BN} \\ y_{B1} & \cdots & y_{BN} \\ z_{B1} & \cdots & z_{BN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

のように表すと、(1)式より、

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{R}(\Phi, \theta, \Psi) \mathbf{X}_E \quad (4)$$

$$\mathbf{R}(\Phi, \theta, \Psi) = \mathbf{X}_B \mathbf{X}_E^+ \quad (5)$$

ただし、 $\mathbf{X}_E^+$ は $\mathbf{X}_E$ の疑似逆行列である。 $\mathbf{X}_E$ の特異値分解によって、

$$\mathbf{X}_E = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^* \quad (6)$$

($\mathbf{\Sigma}$: $\mathbf{X}_E$ の特異値を対角要素に持つ $3 \times N$ 行列, $\mathbf{U}$, $\mathbf{V}^*$: それぞれ 3×3 , $N \times N$ のユニタリ行列) が成立すれば、この疑似逆行列は次式のように求められる⁸⁾。

$$\mathbf{X}_E^+ = \mathbf{V} \mathbf{\Sigma}^+ \mathbf{U}^* \quad (7)$$

($\mathbf{\Sigma}^+$: $\mathbf{X}_E$ の特異値の逆数を対角要素に持つ $N \times 3$ 行列)

したがって、(5)式より回転行列 $\mathbf{R}(\Phi, \theta, \Psi)$ が得

られれば、マーカーの取り付けられた機体の姿勢角として、(Φ, θ, Ψ) がそれぞれ以下のように計算できる。

まず、(5)式で推定された回転行列の各要素を次のように表す。

$$\mathbf{R}(\Phi, \theta, \Psi) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

このとき、

$$\theta = \sin^{-1} r_{13} \quad (9)$$

また、 $\cos \theta \neq 0$ のとき、

$$\Phi = \tan^{-1} \left(-\frac{r_{23}}{r_{33}} \right) \quad (10)$$

さらに、

$$\Psi = \tan^{-1} \left(-\frac{r_{12}}{r_{11}} \right) \quad (11)$$

なお、(1)式のようなオイラー角を用いた回転行列に基づいて姿勢角を計算する際、両座標系の z 軸の方向を踏まえて、(1)式右辺の $[x'_E, y'_E, z'_E]^T$ もしくは(4)式右辺の $\mathbf{X}_E$ に回転行列 $\mathbf{R}(\pi, 0, 0)$ を左からかけた上で、機体固定座標系の初期位置に対する姿勢角を求めなければならないことと、 $\cos \theta = 0$ に等しくなる条件 (例えば、ピッチ角 $\theta = \pi/2$ [rad]) では、いわゆる「ジンバルロック」の状態となり、正しい姿勢角を計算できないことに注意されたい。

また、姿勢角速度 ($\dot{\Phi}, \dot{\theta}, \dot{\Psi}$) については、画像フレームから得られるフレーム毎の姿勢角の変化量 ($\Delta\Phi, \Delta\theta, \Delta\Psi$) とフレーム間の時間差 Δt に基づき、近似的に

$$\dot{\Phi} \cong \Delta\Phi/\Delta t, \dot{\theta} \cong \Delta\theta/\Delta t, \dot{\Psi} \cong \Delta\Psi/\Delta t \quad (12)$$

のように求めることができる。

ここで、 N 個のマーカー慣性座標位置 $\mathbf{X}_E$ が、実空間上 (地面) に固定された3軸直交座標系に基づいて、画像フレーム毎に正確に得られたとする。前節に述べた仮定により、この座標系における機体固定座標系原点位置 (O_B) が計算で容易に求められれば、その位置を並進移動後の慣性座標系原点 (O'_E) として各マーカーの (並進移動後の) 慣性座標位置 $[x'_E, y'_E, z'_E]^T$ を得ることができ、さらに、機体固定座標系上での位置が明確なマーカーの仮定により $[x_B, y_B, z_B]^T$ も得られるため、最終的に(5)式や(9)–(12)式を用いた姿勢角・姿勢角速度推定が行える。

$$\begin{aligned} & \mathbf{R}(\Phi, \theta, \Psi) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \Psi & -\cos \theta \sin \Psi & \sin \theta \\ \sin \Phi \sin \theta \sin \Psi + \cos \Phi \sin \Psi & -\sin \Phi \sin \theta \cos \Psi + \cos \Phi \cos \Psi & -\sin \Phi \cos \theta \\ -\cos \Phi \sin \theta \cos \Psi + \sin \Phi \sin \Psi & \cos \Phi \sin \theta \sin \Psi + \sin \Phi \cos \Psi & \cos \Phi \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

ところで、(5)式の疑似逆行列による求解は、いわゆる最小二乗法による最適化計算⁸⁾を行うことに他ならず、マーカーの数は3個以上でかつ極力多い方が、推定誤差の少ない最適解が得られることになる。実際にマーカーの数によって推定結果がどのように変わるかについては、後ほど考察する。

3. 小型トイドローンと高速度カメラを用いた実験

本研究では、図2および表1に示されるようなトイドローンと、トイドローンを覆う緩衝フレーム上に配置されたマーカーを用いて、前節に述べた姿勢運動計測の有用性を実証する。図2において実際のドローン上のマーカーの位置を示す。ただし、今回の研究では実際に使用していないマーカーも示されていることに注意されたい。

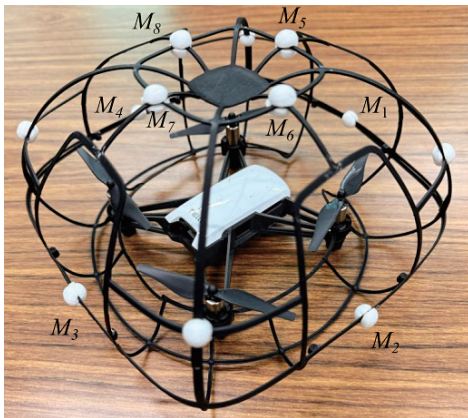


図2. RyzeTech 社製 Tello およびマーカー配置

表1. 小型飛翔体 (Tello) の仕様

重量	91.5g (バッテリーおよび緩衝フレーム含)
本体サイズ	92.5mm×98mm×41mm
ローター(4基)サイズ	直径 76mm
緩衝フレームサイズ	180mm×180mm×110mm

続いて、実験に使用した機材および実験条件について述べる。

まず、ドローン飛行中の動画像取得のために、Photron 製高速度カメラ FASTCAM Mini UX50 3台を使用した。また、動画像計測結果の妥当性や精度を判断するために、ドローン (Tello) に WitMotion 製運動セ

ンサ WT901BLECL を搭載し、ドローン機体固定座標系3軸 (x_B, y_B, z_B) 周りの角度および角速度を同時に計測した。表2に、これら高速度カメラおよび運動センサの仕様を示す。

続いて、図3に高速度カメラの配置条件とドローンの飛行条件(各シナリオにおける離陸位置および飛行方向)を示す。ここで2台の高速度カメラは、光軸が互いに平行に近い向きで設置し、残り1台に関しては、他の2台の光軸方向に対してほぼ90deg 傾けた光軸方向になるように配置し、飛行中のドローンのマーカーに対して極力死角が生じないように、床面に垂直な高さ方向を含めて設置を行った。

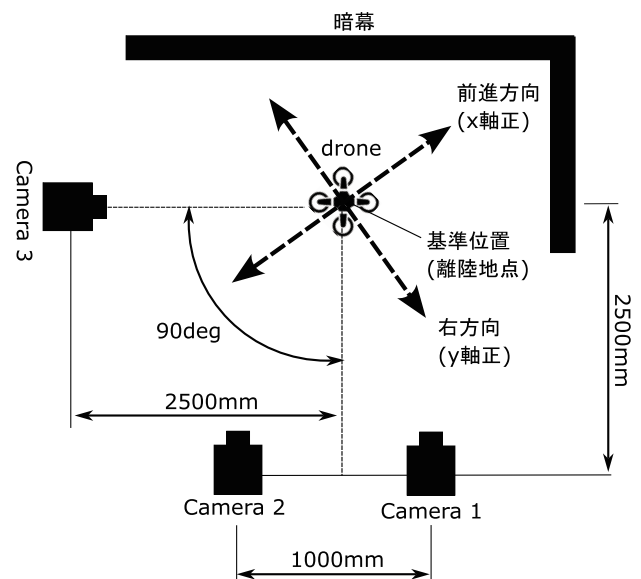


図3. 高速度カメラ3台の配置およびドローン飛行条件

表2. 高速度カメラ, 運動センサの仕様

高速度カメラ: Photron FASTCAM Mini UX50, 3台	
画像解像度 [pixels]	1080×1024
フレームレート [fps]	500
運動センサ: WitMotion WT901BLECL	
計測精度(角度) [deg]	0.05 (X, Y 軸), 1 (Z 軸)
計測精度(角速度) [deg/s]	0.05 (X, Y, Z 軸)
計測精度(加速度) [G]	0.01 (X, Y, Z 軸)

ドローンの飛行条件に関しては、図3に示す基準位置から垂直に離陸し、その後、表3に示す3種類の運動シナリオを実現するよう飛行させた。

表3. ドローン飛行条件（シナリオ）

Scenario 1	特定高度におけるホバリング (空中静止)
Scenario 2	周期的ピッチングによる 前後方向並進飛行
Scenario 3	周期的ローリングによる 左右方向並進飛行

なお、この3つの運動シナリオにおいて、それぞれの運動（ホバリング、および、前後方向もしくは左右方向の周期的並進運動）を実現するために、このドローン専用のプログラミングツール（MATLAB Support Package for Ryze Tello Drones）を用い、Wi-Fiによる無線通信可能なPCにインストールされた科学計算ソフトウェアMATLABによって、約8.0s（Scenario 2, 3については周期的運動のちょうど1周期分）の自動飛行を行った。これにより、人間の手動操縦による不均一性が極力生じないような運動を実現させた。

また、高速度カメラ3台を同期させた各シナリオでの運動撮影中、ドローン本体下部に固定した運動センサ（WT901BLECL）による計測を同時に実行した。

カメラで得られた動画像からマーカー位置の3次元座標値を推定するために、DITECT社製3次元画像解析ソフトDIPP-Motion V/3Dを使用した。ここで、ドローンの飛行撮影に先立ち、アクリル製の立方体を利用したカメラキャリブレーション（DLT法）を実施し、地面固定座標系（図1(a)の慣性座標系）を定義するとともに、各シナリオにおける8個のマーカーの画像フレーム毎の3次元位置座標算出を行った（図4参照）。

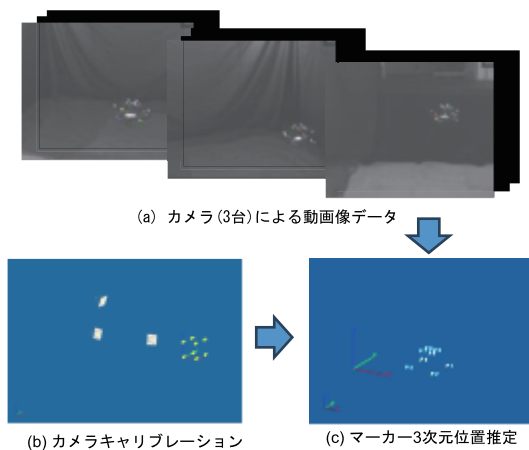


図4. 3次元動画画像解析

4. 実験結果および考察

まず、前節で述べた実験で得られた、3台のカメラからの動画像を用いて計測された8つのマーカーの3次元座標値の結果の例を図5に示す。8種類の図それぞれに慣性座標系（図1(a)の地面固定座標系）での x , y , z 成分それぞれの時系列変化が示されており、運動シナリオ（図5のScenario 2の場合、前後の周期的並進運動により、 x , y 成分が周期的に変動する）から見て妥当な結果が得られていることがわかる。

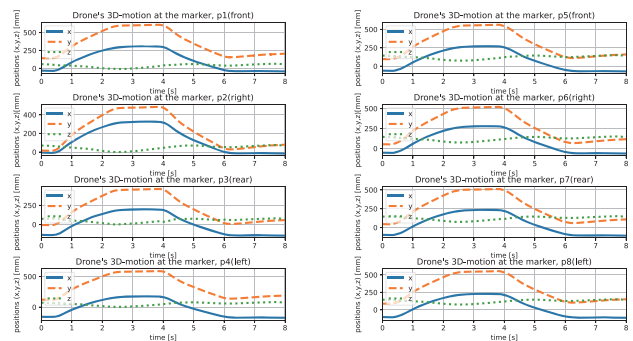


図5. マーカー8点の慣性座標値の画像計測結果（Scenario 2の実験結果の例）

続いて、各シナリオに対するドローン姿勢角および姿勢角速度の推定結果を図6～図8に示す。ここで、上から3段ある各図は、それぞれ、オリジナルの姿勢角推定結果（上）、各姿勢角推定値の時間平均（バイアス）を除去した姿勢角推定結果（中）、姿勢角速度推定結果（下）が示されている。

また、姿勢角の推定結果に関しては、マーカーの取付位置（特に下側 $M_1 \cdots M_4$ ）に起因すると思われるピッチ角（ θ ）およびロール角（ ϕ ）の時間平均誤差が見られたことや、ヨー角（ ψ ）に関しては機体固定座標系の x_B 軸を慣性座標系 x'_E 軸に一致させるような事前の調整が難しいことから、敢えて中段に示すような3軸それぞれの姿勢角度についての時間平均除去後の結果を表示している。また、姿勢角速度に関しては、(12)式で示した近似値に対して、さらに前後の離散時間100点を利用した移動平均値を計算し、グラフにプロットしている。

これらの結果から、ホバリングのシナリオ（Scenario 1）の結果については、ほぼ理想どおりの結果が得られており、一方で、他のシナリオ（Scenario 2, 3）については、各シナリオで変化すべき姿勢角（ピッチ角およびロール角）が予想どおり得られていることが分かる。ただし、Scenario 2, 3ともに、目的とする並進運動と

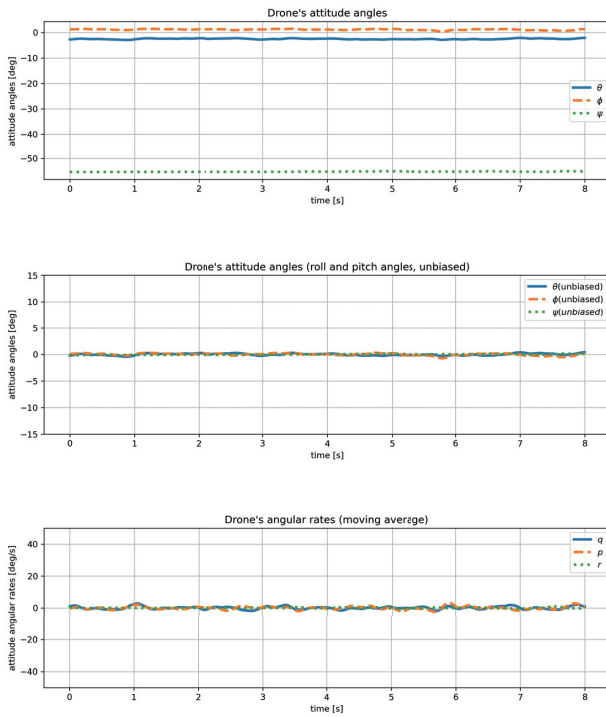


図6. 姿勢角および姿勢角速度推定結果：Scenario 1
(上：姿勢角ーオリジナル，
中：姿勢角ーバイアス除去，下：姿勢角速度)

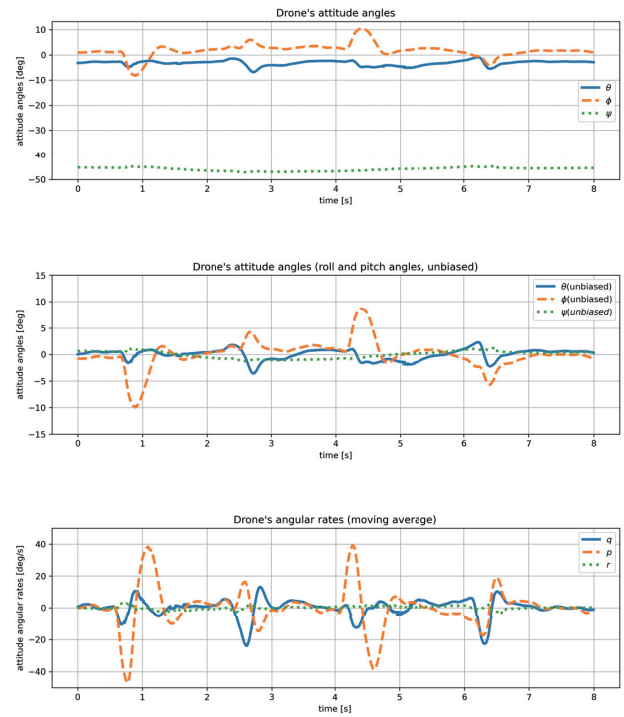


図8. 姿勢角および姿勢角速度推定結果：Scenario 3
(上：姿勢角ーオリジナル，
中：姿勢角ーバイアス除去，下：姿勢角速度)

は無関係で変化がないはずの姿勢角（Scenario 2におけるロール角や，Scenario 3におけるピッチ角）にも微小な変動が見られる。

これらについては，他の姿勢角と連動した周期性が見られることや，後述の姿勢センサの計測結果にも同様の傾向が見られることから，カメラキャリブレーションや運動センサの取付方向に起因する誤差，もしくは，ドローンが製品的な仕様として有する姿勢安定化制御系の介入の影響などが考えられる。

続いて，飛行実験の際に同時に行った運動センサによる計測結果の例を図9に示す。この図は，Scenario 3の左右方向の並進運動の測定結果で，動画画像解析結果と同様，上段にオリジナルの姿勢角測定結果を，中段に各測定値の時間平均除去処理を行った結果を示している。また，下段には運動センサ（角速度ジャイロセンサ）で直接測定された姿勢角速度を示している。いずれも動画画像解析よりも信頼性の高い測定結果が得られていることが期待されるが，サンプリング時間が約0.1sで高速度カメラのフレーム処理時間0.002sに比べて時間解像度が低いため，姿勢角および姿勢角速度の時間変化の特徴は必ずしも明確ではない。

しかしながら，ロール角(ϕ)およびロール角速度($\dot{\phi}$)の変化の周期やピーク値の特徴は，ほぼ同じように表れ

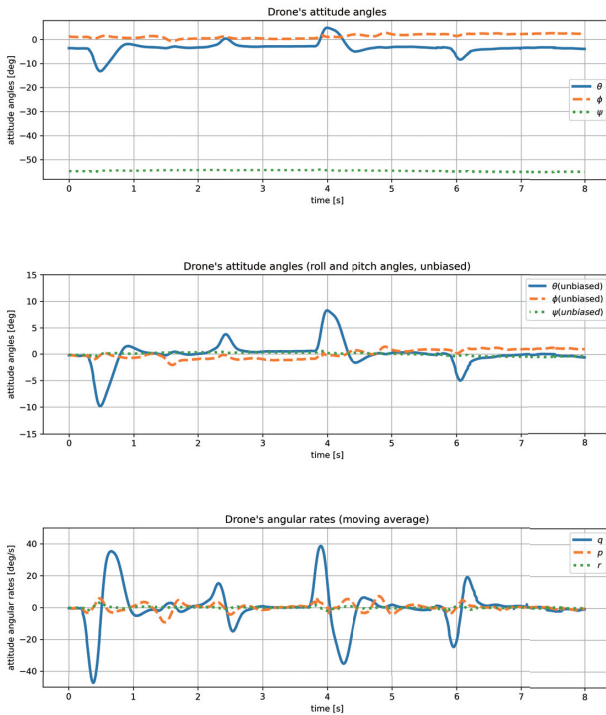


図7. 姿勢角および姿勢角速度推定結果：Scenario 2
(上：姿勢角ーオリジナル，
中：姿勢角ーバイアス除去，下：姿勢角速度)

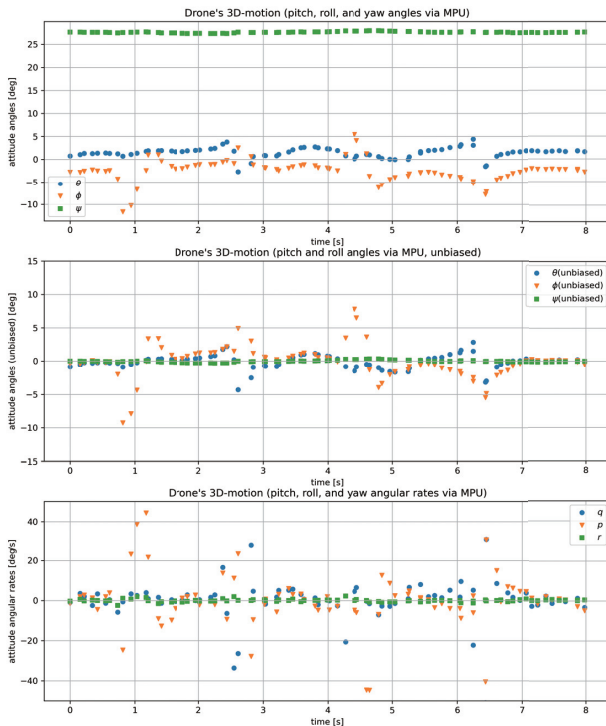


図9. 姿勢角および姿勢角速度運動センサ計測結果：Scenario 3
(上：角度一元結果，中：角度バイアス除去，下：角速度)

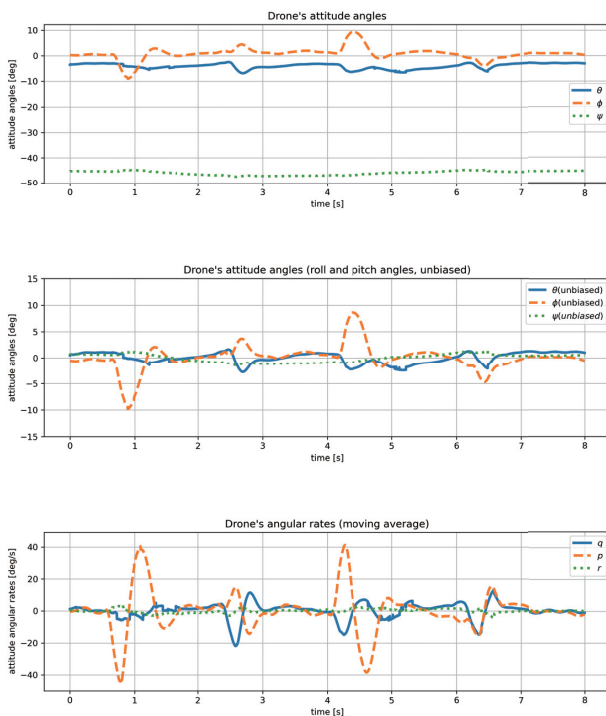


図10. 姿勢角および姿勢角速度推定結果（マーカー数4点のみ）：Scenario 3
(上：角度一元結果，中：角度バイアス除去，下：角速度)

ていることが分かる。

最後に、マーカーの数を8点から4点（ $M_1 \cdots M_4$ ）に減らして推定を行った結果の例（Scenario 3）を図10に示す。図8と比較して大きな違いはないものの、たとえばピッチ角（ θ ）およびピッチ角速度（ $\dot{\theta}$ ）の結果について、1.0s前後や5.2s付近に図8には見られない不連続な変動が表れている。これは、この4つのマーカーのみを用いた場合の画像追尾誤差の影響が考えられる。この結果から、マーカーの数を増やすことで推定結果の時間的不連続性や推定値そのものの最適性が改善することが示されている。

5. 結論と今後の課題

本研究では、剛体とみなせる小型飛翔体上に設けられた画像特徴点（マーカー）位置を適切に配置することで、容易かつ正確に、動画データからその姿勢角度および姿勢角速度の時間変化を推定可能であることをトイドローンを用いた飛行実験、および、複数台のカメラを用いた撮影実験の結果から示した。

姿勢角度および角速度の推定値そのものの精度に関しては、より時間解像度や計測精度の高い運動センサを用いた計測値との比較によりさらなる議論が可能と思われる。また、推定精度が十分高いことが確認できれば、飛翔体運動の時間特性を踏まえた上で、より廉価な（また、可能な限り多数の）カメラを用いた画像計測手法として応用できると考えられる。

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, Vo. 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) 藤田浩輝, 衛藤蒼, 永井弘人, 長崎秀司, 金城寛, "限られた画像特徴量に基づくMAV姿勢運動計測",

- 日本文理大学紀要, 50 (2), pp. 37-42, 2022.
- 5) Yi Ma, Stefano Soatto, Jana Kosecka, S. Shankar Sastry, "An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models", Corr. 2nd Edition, Springer, 2004.
- 6) 佐藤敦, "コンピュータビジョン-視覚の幾何学-", コロナ社, 1999.
- 7) 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.
- 8) 辻弘行, 金谷健一, "3次元回転行列の最良推定とその応用", 電子情報通信学会技術研究報告, 91, pp. 101-108, 1992.

(2024年10月9日受理)