超高速アクティブカメラを用いた飛翔ドローンのボリュメトリック振動解析

○王 飛躍（広島大学）　緒方 琢人（広島大学）　島崎 航平（広島大学）　石井 抱（広島大学）

This study proposes a non-contact, high-precision method for measuring 3D motion of flying drones using a galvanometric mirror-based high-speed stereo vision system. By introducing 3D model for establishing 2D-3D spatial correspondences, 3D model-based matching and tracking are realized for full-field 3D velocity field estimation. Furthermore, frequency-domain analysis is conducted using Fourier transformation. Experiments with 500 fps stereo images at 1920×1080 resolution captured the motion of a flying drone, visualizing vibration distributions at 3,518 points and revealing 0–250 Hz components related to structural features.

1. はじめに

近年, 無人航空機（ドローン）は, 物流, 監視, 災害対応, 農業, 測量など多様な分野において急速に活用の幅を広げ, その重要性が高まっている [1]. 特に都市環境や人が集まる場所での運用においては, 安全性と信頼性の確保が不可欠である. しかし, ドローンは飛行中に様々な外乱や制御誤差の影響を受けやすく, 異常振動や姿勢の不安定化が生じることがあり, 重大な事故につながる可能性がある [2]. そのため, 飛行中のドローンの動的挙動を高精度に把握し, 評価する手法の確立が求められている.

従来, ドローンの動的挙動の計測には, 接触式のひずみゲージや加速度計, あるいは非接触式のレーザー変位計 [3] などが主に用いられている. しかし, これらの手法はセンサの搭載による重量・空力特性の変化, 計測範囲や分解能の制約, ならびに全体的な振動分布の可視化の困難さといった課題を抱えている. 一方, 有限要素法（FEM）を用いた構造解析手法 [4] では, ドローン全体の構造的挙動を模擬することが可能であるが, 解析可能な条件は理想化された単純な境界条件に限られており, 実際の飛行環境における複雑な外力や運動条件を正確に再現することは困難である. このような課題に対し, 我々は, ホバリング中のマルチコプターに対して固定ステレオ高速カメラを用いたモデルベース 3 次元 DIC（デジタル画像相関）計測を行い, 機体の三次元振動分布を可視化できることを確認している [5]. 一方で, カメラが固定されていたため, 飛翔による空間移動を伴う計測には対応できず, 静止状態でのホバリングに限定されていた.

そこで本研究では, ガルバノミラー型の超高速アクティブカメラシステムを用いて, 飛行中のドローンの 3 次元振動を非接触かつ高精度に解析する新たな手法を提案する. 本手法により, 実環境下において飛行中のドローンの 3 次元振動挙動およびモーダル特性を時空間的に可視化し, 従来手法では困難であったリアルな挙動の把握を実現する.

2. コンセプト

ドローンの飛行中における位置変化が振動解析に与える影響に対応するため, 本研究ではアクティブステレオカメラを用いた振動計測手法を提案する. 本手法では, 視野角を能動的に制御可能な 2 台の高速カメラによって飛行中のドローンをトラッキング撮影し, 機体に対して相対的に静止した視点に近い高フレームレートのステレオ映像を取得する.

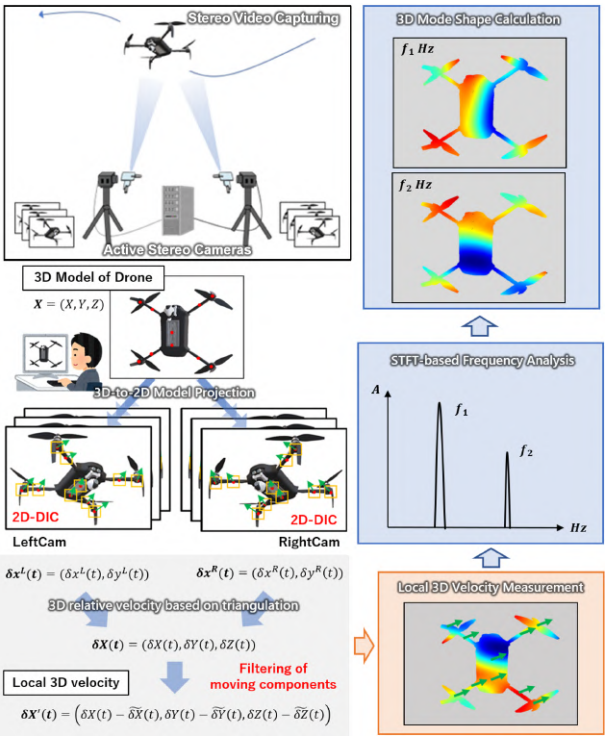


図 1: Model-tracking-based 3D Vibration Analysis.

以上により得られたドローンのステレオ高速度映像に基づき, 図 1に示すように, 本手法に基づくドローンの振動計測プロセスは, 以下の 4 つのステップに分けられる. それぞれ 3 次元モデルを用いた計測点の追跡, モデルベース 3 次元 DIC による速度計測, 3 次元速度の分解, 三次元振動解析である.

2.1 3 次元モデルを用いた計測点の追跡

左右の高速ステレオ映像はそれぞれ $I^L(x, y, t)$ および $I^R(x, y, t)$ と記述する. ドローンの 3 次元点群は事前にスキャンされており, N 個の 3D 点 $\mathbf{X}_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$ $(i = 1, \ldots, N)$ を含む. その中から N_0 個の特徴点 $\mathbf{X}_{p_j} = [X_{p_j}, Y_{p_j}, Z_{p_j}]^T$ $(j = 1, \ldots, N_0)$ が選定され, トラッキングに用いられる. 各特徴点に対応する左右視点の画像上における 2 次元投影点は, 時間 t において $\mathbf{x}^q_{p_j}(t) = [x^q_{p_j}(t),\ y^q_{p_j}(t)]^T$ $(j = 1, \ldots, N_0,\ q \in \{L, R\})$ と定義される.

2.1.1 3D-2D 射影行列の推定

3 次元点から 2 次元点への射影を実現するための 3×4 の射影変換行列 $\mathbf{H}^q(t)$ は, 逐次フレームにおけるテンプレートマッチングに基づく 2 次元トラッキングにより得られた N_0 個の特徴点の画像座標 $\mathbf{x}^q_{p_j}(t)$ と, それに対応する 3 次元点 $\mathbf{X}_{p_j}$ を用いて, PnP（Perspective-n-Point）法により推定される. 射影行列 $\mathbf{H}^q(t)$ は以下のように表される.

$$\mathbf{H}^q(t) = \mathbf{K}^q \left[\mathbf{R}^q(t) \,\middle|\, \mathbf{t}^q(t)\right], \quad (q = L, R) \tag{1}$$

ここで,$\mathbf{R}^q(t)$ は 3×3 の回転行列,$\mathbf{t}^q(t)$ は平行移動ベクトルを表す.

2.1.2 計測点の 2 次元 HFR 画像への射影

キャリブレーションされた変換行列 $\mathbf{H}^q(t)$ を用いることで, 3 次元点群上の N 個の 3D 計測点 $\mathbf{X}_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$ $(i = 1, \ldots, N)$ は, 2 次元画像上の対応する計測点 $\mathbf{x}^q_i(t)[x^q_i(t), y^q_i(t)]$ に射影される. 射影関係は以下のように表される.

$$s^q_i(t) \begin{bmatrix} x^q_i(t) \\ y^q_i(t) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}^q(t) \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (q = L, R) \tag{2}$$

スカラー量 $s^q_i(t)$ はスケールファクタである.

2.2 モデルベース 3 次元 DIC による速度計測

2.2.1 左／右画像における 2 次元 DIC 速度

各 2 次元計測点 $\mathbf{x}^q_i(t)$ に対して, そのサブピクセル精度の 2 次元速度 $\mathbf{u}^q_i(t) = [u^q_i(t),\ v^q_i(t)]^T$ は, 隣接する 2 フレームの画像を用いた DIC によって推定される.

$$\mathbf{u}^q_i(t) = \frac{1}{\tau}\mathrm{DIC}(\mathcal{A}^q_i(t),\ \mathcal{A}^q_i(t-\tau)) \quad (q = L, R) \tag{3}$$

ここで,$\mathcal{A}^q_i(t)$ は, 時刻 t における 2 次元画像 $I^q(x, y, t)$ 上で, 計測点 $\mathbf{x}^q_i(t)$ を中心とした ROI を表す.

2.2.2 モデルベース三角測量による 3 次元速度推定

i 番目の点における相対 3 次元速度 $\mathbf{U}_i(t) = [U_i(t), V_i(t), W_i(t)]^T$ $(i = 1, \ldots, N)$ は, 射影行列 $\mathbf{H}^q(t)$ およびスケールファクタ $s^q_i(t)$ $(q = L, R)$ を用いた三角測量により, 以下のように算出される.

$$\mathbf{U}_i(t) = \mathbf{H}(t)^T\left(\mathbf{H}(t)\mathbf{H}(t)^T\right)^{-1} \left[s^L_i(t)u^L_i(t), s^L_i(t)v^L_i(t), s^R_i(t)u^R_i(t), s^R_i(t)v^R_i(t), 0, 0\right]^T \tag{4}$$

ここで,$\mathbf{H}(t) = \left[\mathbf{H}^L(t)\ \mathbf{H}^R(t)\right]$ は三角測量に用いる 6×4 の行列を表す. $\mathbf{U}_i(t)$ は, 3 次元モデルに基づいたターゲット座標系に対する相対速度であり, ターゲットの剛体運動と, カメラに対する座標系の移動の両方を考慮している.

2.3 3 次元速度の分解

以上のようにして DIC によって得られた 3 次元相対速度 $\mathbf{U}_i(t)$ には, 対象の剛体運動成分と自身の局所的な変形成分の両方が含まれる.

2.3.1 剛体運動成分の分離と軌跡の算出

3 次元相対速度分布 $\mathbf{U}_i(t)$ を取得した後, 重心の並進量 $\bar{\mathbf{U}}(t)$ を計算し, その並進量を除去した後の回転量 $\mathbf{\Omega}(t)$ を求めることによって, 4×4 の空間速度行列 $\Xi(t)$ を導出することができる.

$$\mathbf{\Xi}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{\Omega}(t) & \bar{\mathbf{U}}(t) \\ \mathbf{0}^T & 0 \end{bmatrix} = 6\mathrm{DoF_MOT}(\mathbf{U}_i(t), \mathbf{X}_i) \tag{4}$$

ここで,6DoF_MOT は重心の並進量を計算し, さらに姿勢推定に基づいて回転行列を推定する一連の処理を表す.

剛体速度行列 $\mathbf{\Xi}(t)$ に基づき, 指数写像を用いることで, 時刻 $t = n\tau$ における剛体変換行列 $\mathbf{T}(t)$ を計算することができる.

$$\mathbf{T}(t) = \prod_{k=0}^{n-1} \exp\left(\mathbf{\Xi}(t_k)\,\tau\right) \tag{5}$$

ここで, $\exp\left(\mathbf{\Xi}(t), \tau\right)$ は行列指数関数であるが, 時間刻み幅 τ が十分に小さい場合, その一次近似として以下のように表すことができる.

$$\exp\left(\mathbf{\Xi}(t)\,\tau\right) \approx \mathbf{I} + \mathbf{\Xi}(t)\,\tau \tag{6}$$

$\mathbf{I}$ は単位行列を表す. この剛体変換行列に基づき, 対象物体の 3 次元空間における軌跡を取得することができる.

2.3.2 3 次元局所速度の計算

剛体速度変換行列を用いることで, 時刻 t における剛体運動由来の速度成分 $\mathbf{U}'_i(t)$ が得られる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}'_i(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{\Xi}(t) \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i \\ 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

このようにして, 対象点における 3 次元局所速度は, 相対速度 $\mathbf{U}_i(t)$ から剛体運動成分 $\mathbf{U}'_i(t)$ を除去することにより導出される.

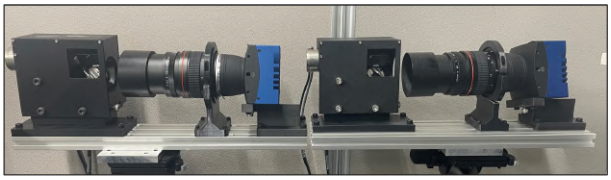
$$\Delta\mathbf{U}_i(t) = \mathbf{U}_i(t) - \mathbf{U}'_i(t) \tag{8}$$

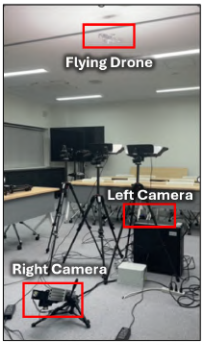
2.4 周波数領域における三次元振動解析

各計測点 $i\,(i = 1, 2, \ldots, N)$ における, 時間長 K フレームの三次元速度信号 $S_i(t)$ に対して短時間フーリエ変換（STFT）を適用することにより, 周波数領域における解析を行う.

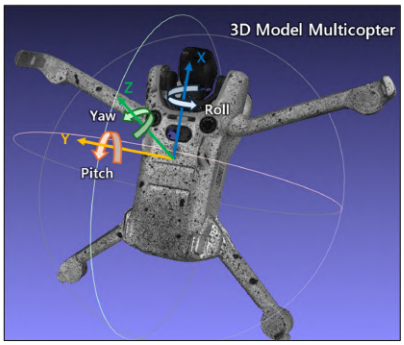
$$\mathbf{F}_i(f; t) = \left[F_i(f_1), \ldots, F_i\left(f_{\lfloor K/2 \rfloor}\right)\right] = \mathrm{STFT}\left(S_i(t), S_i(t+\tau), \ldots, S_i(t+(K-1)\tau)\right) \tag{9}$$

ここで,$S_i(t)$ は任意の方向における速度ベクトルの集合を表す. STFT は短時間フーリエ変換を意味する. 周波数分解能 Δf は $\Delta f = \frac{1}{K\cdot\tau}$ で与えられる. 対応する各周波数成分 f_k は,$f_k = k\cdot\Delta f \quad (k = 1, 2, \ldots, K/2)$ として定義され, それぞれの成分に対応するスペクトルが $F_i(f_k)$ として表記される.


(a) Active stereo high-speed camera



(b) Experimental setup



(c) 3D model

図 2: Configuration of experiment.

3. 往復飛行するドローンの三次元振動解析

3.1 システムおよび実験構成

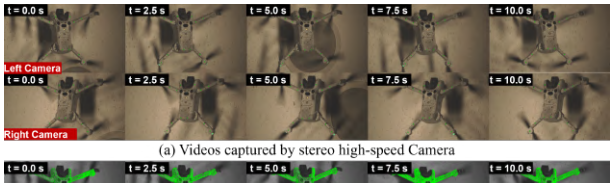
モデル追跡に基づく 3 次元振動測定アルゴリズムの有効性を検証するため，6 自由度の飛行軌跡とロータ回転を伴うマルチコプタの往復飛行時における局所的な 3 次元振動分布を可視化した．撮影には，図 2(a) に示すステレオミラー駆動型高速アクティブビジョンを用い，10 秒間・500 fps で取得した．実験には DJI 製クアッドコプター（Mini 4 Pro）を使用し，図 2(b) 示すように約 3 m の高さで往復飛行を実施した．ロータの回転速度は約 100 rps である．

撮影システムは，焦点距離 150 mm のレンズ付き HFR カメラ（1920×1080, 8bit, RGB, EoSens 2.0CXP2, Mikrotron, Germany），2 自由度ガルバノミラー（16240H Cambridge Technology）を含み，リアルタイムの視線追従制御を行った．画像データは，露光時間 1.0 ms, 10 秒間 500 fps で PC に記録された．PC 構成は Intel Core i9-13900K,64GB RAM,NVIDIA RTX 2080 Ti を搭載している．

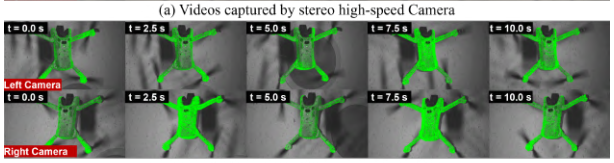
図 2(c) は，ブレードを除いたクアッドコプターの 3 次元モデルを示しており，ATOS スキャナにより取得した 953,038 点から，$N = 3{,}518$ 点にサンプリングされた．機体には，モデル追跡のための明示的マーカ（N_0=12）を事前に配置した．

左右の HFR 画像に対しては,DIC 法により 128×128 領域の 2 次元速度を計算し，3 次元速度，6 自由度の軌跡，およびロータの回転振動については，$K = 256$ フレームの STFT に基づく周波数解析（分解能 1.95 Hz）を行った．

図 3(a) に 10 秒間の左右画像に対する 12 点の特徴点追跡を，2.5 秒間隔で示している．特徴点を緑のクロスで示している．追跡した 12 点の特徴点と 3 次元モデルの 12 点に基づくキャリブレーションを行い，3 次元モデルの点 (3,518 点) を左右画像に投影した投影計測点における 2 次元 DIC の結果を図 3(b) に示している．緑の矢印はフレーム間の変化量を 40 倍に拡大した速度を表している．12 点のキャリブレーションによって，位置姿勢

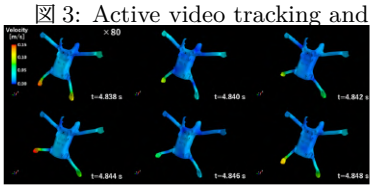


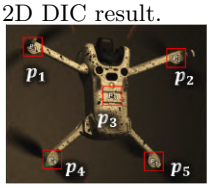
(a) Videos captured by stereo high-speed Camera



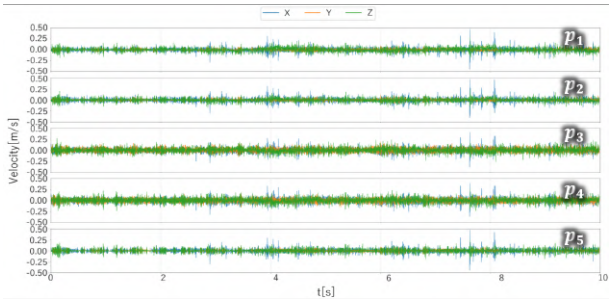
(b) 2D DIC results of all measurement points

図 3: Active video tracking and 2D DIC result.

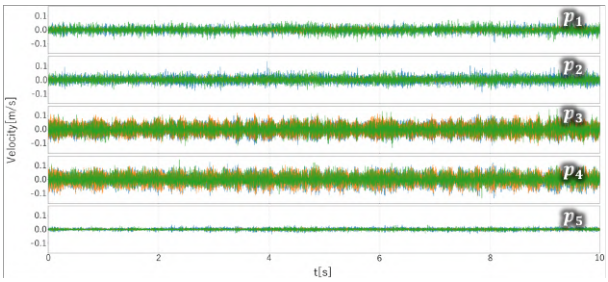

(a) 3D local velocity distribution



(b) Selected 5 Points



(c) 3D relative velocity



(d) 3D local velocity

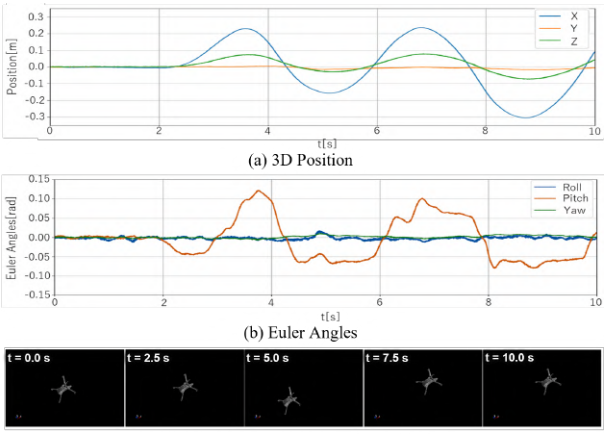
図 4: 3D Velocity.

が変化するマルチコプタをトラッキングした計測点投影と 2 次元 DIC 計測が可能となる．

3.2 3 次元速度分布

図 4(a) には，$t = 4.838$–4.848 s における局所的な 3 次元速度分布を示している．3 次元速度は 80 倍に拡大され，青から赤へのグラデーションによって表示される．2 本の後方アームが関節部を中心に大きな円弧上の変化をしている．後方アームに限り大きな変化が確認されるのは，ドローンの折り畳み構造の違いによると考えられる．

図 4(b) に示す選択した計測点 5 点 (P1–P5) における 10 秒間の 3 次元相対速度を図 4(c) に示す．3 次元相対速度は，図 3(b) の 2 次元 DIC 結果の三角測量に基づき計算された．青，黄，緑の線は，それぞれ x, y, z の速度を表している．図 4(d) には，式 (8) によって計算される 10 秒間の局所的な 3 次元速度を示している．差分計算によって，マルチコプタ全体の位置姿勢変化を成分分離し，トラッキングした 3 次元モデルを基準とした局所的な 3 次元速度が計測される．後方アームである計測点



(a) 3D Position

(b) Euler Angles

(c) 3D Model Presentation of 6-DOF Motion.

図 5: 6-DOF Position and Orientation.

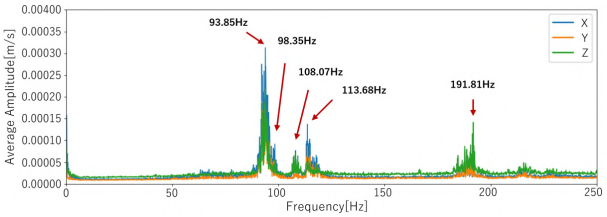


図 6: Frequency Spectrum of Local 3D Velocity.

P3, P4 では, 他の計測点と比較して -0.1–0.1 m/s の大きな速度成分が確認される.

3.3 6 自由度の飛行軌跡

図 5 に, ミラー角度を考慮し推定されたマルチコプタの位置姿勢の 6 自由度パラメータを示している. 図 5(a) は, 初期位置 $(X, Y, Z) = (0, 0, 0)$ とした時のマルチコプタの位置を示している. 青, 黄, 緑の線は, それぞれ X, Y, Z の位置を表している. X 方向の約 0.5 m の往復飛行が確認できる. 図 5(b) は, 初期姿勢 $(Roll, Pitch, Yaw) = (0, 0, 0)$ とした時のマルチコプタの姿勢をオイラー角で示している. 赤, 紫, 茶の線は, それぞれ Roll, Pitch, Yaw のオイラー角を表している. 図 5(c) では, マルチコプタの 10 秒間の位置姿勢を 2.5 秒間隔でモデル表示をしている. 図 5(a), (b) で推定された 6-DOF に基づく 3 次元モデルの剛体変換により計算される. 測定結果は実験環境と整合しており, システムによる計測の有効性と精度の高さを示している.

3.4 3 次元振動解析

図 6 には, ドローン全体 (3,518 点) の局所的な 3 次元速度の平均周波数スペクトルを示している. ミラーの角度変化に基づく 69.4 Hz をはじめとした成分がフィルタリングされていることが確認される. また, 93.8 Hz, 98.3 Hz, 108.0 Hz, 113.6 Hz のピーク周波数が確認でき, それぞれドローンの 4 つのロータの回転周波数に対応している.

図 7 には, (1) $t = 1.024$–1.536 s, (2) $t = 4.096$–4.608 s, (3) $t = 6.144$–6.656 s, (4) $t = 8.192$–8.704 s における局所的な 3 次元速度の STFT(256 フレーム) の周波数スペクトルと, ロータ回転数 (100 Hz) 周辺のピーク周波数におけるモード形状を示している. 周波数スペクトルに示す青, 黄, 緑, 赤の周波数は, それぞれ左前方, 右前方, 右後方, 左後方のロータ回転数を示している. ロータ回転数における周波数の平均強度が大きくなっており, 対応したアーム部位が振動していることが確認できる. 往復飛行時のロータ回転数の時間変化に伴うドローンフレームの振動分布を可視化した.

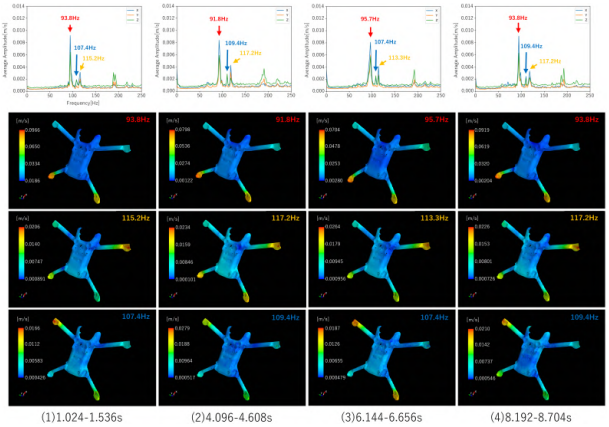


図 7: 6-DOF Position and Orientation.

4. おわりに

本研究では, 地上に設置されたステレオ高速アクティブビジョンシステムを活用し, 3 次元モデルと 2 次元画像を一致させ, 事前に割り当てられた数千点の測定点をフレームごとに精密に追跡することで, 動的な運動の影響を最小限に抑えることに成功した. これにより, 飛行中のマルチコプタをはじめとした動的物体の次元振動を測定するシステムを開発した. 実験では, 往復飛行中のマルチコプタを対象としたステレオ高速アクティブビジョンを使用した実験を実施し, 数百 Hz の全体振動解析に加え, 6 自由度の飛行軌跡を同時に高精度で推定することに成功した. この結果, 本システムの実用性と有効性を実証した.

今後の展望としては, マルチコプタを取り囲むように複数台の高速カメラまたは高速アクティブビジョンシステムを配置し, より高密度で詳細な空間解析を可能にするボリュメトリック挙動計測システムの高度化を目指す. これにより, さらに精緻な 3 次元振動測定が可能となり, 実際の飛行環境でのダイナミクスの解析精度向上が期待される.

参 考 文 献

[1] J. Jońca, M. Pawnuk, Y. Bezyk, et al, ”Drone-assisted monitoring of atmospheric pollution—A comprehensive review,” Sustainability, vol. 14, no. 18, pp. 11516, 2022.

[2] G. Wild, J. Murray, and G.Baxter, ”Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters,” Aerospace, vol. 3, no. 3, pp. 22, 2016.

[3] Y. Changshuai, L. Haitao, and G. Siwei, ”Vibration test and vibration reduction design of UAV load radar,” Proc. 2019 4th Int. Conf. Autom., Control Robot. Eng., pp. 1-6, 2019.

[4] M. Urdea, ”Stress and vibration analysis of a drone,” IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing, vol. 1099, no. 1, pp. 012059, 2021.

[5] 緒方 琢人, 王 飛躍, 島崎 航平, 石井 抱:” ステレオ高速ビジョンを用いた飛翔ドローンのボリュメトリック挙動計測”, Robomech 2025.