

# ドローン聴覚のための計測機器搭載用治具の 実飛行条件下での評価

## Evaluation of Developed Structures for Drone Audition-purposed Measurement Equipment in Actual Flight Conditions

塚本悠太<sup>1\*</sup> 干場功太郎<sup>1</sup>  
Yuta Tsukamoto<sup>1</sup> Kotaro Hoshiba<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京科学大学  
<sup>1</sup> Institute of Science Tokyo

**Abstract:** ドローンを用いた音情報による情景分析技術はドローン聴覚と呼ばれ、災害地における要救助者の探索手法として期待されている。この技術では、ドローンに計測機器を搭載するための治具が必要となる。以前の研究では、ドローンのランディングギアに取り付けることができる汎用性の高い治具を提案し、質量、耐荷重、振動特性、調整の容易さの4つの指標について評価した。ここで振動特性の評価は理論的な評価に限られており、実際のドローンの飛行中の評価が必要である。そこで本研究では従来の治具と提案する治具について、ドローンの飛行中の数箇所での加速度応答を比較し、治具の振動特性を評価する。その結果提案する治具は、従来の治具に比べてドローンの飛行中に計測機器に作用する振動を抑制できることが明らかになった。さらに提案する治具では、従来の治具に比べてドローンの着陸時に大きな振動が生じることが確認されたが、着陸時には音情報を収録しないため、着陸時の衝撃による収録音への影響は限定的であると考えられる。一方で提案する治具は、着陸時の衝撃に耐えるよう十分な強度を有する必要があることも明らかになった。

### 1 緒言

ドローンは迅速性と機動性を有しており、災害地における要救助者の探索・救助活動への適用が期待されている。そこでドローンに搭載したカメラで得られた視覚情報を利用した手法が多く検討されてきた[1-5]。しかしながら、このような視覚情報に基づく手法は、対象とする環境が暗い場合や瓦礫に埋もれた被災者を探索する場合には効果的でないという課題がある。この課題を解決するため、ドローンに搭載したマイクロホンアレイで収録した音情報を利用した探索手法についての研究が行われてきた[6-11]。このような手法はドローン聴覚と呼ばれ、ドローンに搭載したマイクロホンアレイを用いて収録した人由來の音源に基づいた音源定位による、要救助者の探索活動への応用が検討されてきた。このようなドローン聴覚の実装には、マイクロホンアレイや小型処理ユニットといった必須機器をドローンに搭載するための治具が必要となる。このような治具はドローンのペイロードを満たすよう、特定のドローン本体に直接固定するような最小限の設計となっており、各ドローン専用に開発してきた。し

たがって治具を個々のドローンの形状や寸法に合わせて再設計する必要があり、汎用性が低い。そのためドローン聴覚の導入において、治具の設計コストと製造コストが必要となるという課題がある。

著者らは以前の研究において、多くの産業用ドローンに一般的な逆T字型のランディングギアに着目し、様々なサイズのドローンに容易に取り付けることができる治具を提案した[12]。具体的には、提案した治具はドローン本体ではなくランディングギアに取り付けるよう、最小限の調整で異なるサイズのドローンに設置することができる設計とした。この治具について次の4つの指標に基づいて設計し、評価した。第一に製作した治具の質量を計測し、複数のドローンのペイロードと比較することで質量を評価した。第二に有限要素法(FEM)に基づいた静荷重解析により耐荷重を評価した。第三にFEMを用いた固有値解析により振動特性を評価した。第四に実際に製作した治具を複数のドローンに取り付けて調整の容易さを評価した。しかしながら、これらの評価のうち耐荷重と振動特性の評価はFEMによる数値解析に限られているという課題がある。耐荷重の評価は、搭載する計測機器の質量に基づいて静荷重を設定し、十分な安全率を考慮した静荷重解析により適切に評価することができると考えら

\*連絡先：東京科学大学工学院機械系  
〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1  
E-mail: tsukamoto.y.ak@m.titech.ac.jp

れる。一方振動特性は、実際に製作した治具の寸法や組み立て誤差、さらには締結部による影響があると考えられる。したがって、治具単体での固有値解析に加え、実際の飛行条件下での振動特性の評価が必要であると考える。

したがって本研究では、ドローン単体の場合、ドローン本体底部に従来の治具を直接取り付けた場合、ドローンのランディングギアに提案する治具を取り付けた場合の3種類の条件について、屋外でのドローンの飛行中と離着陸時の加速度応答を計測した。そして従来の治具と提案する治具の各点における加速度応答を比較し、実際の飛行条件下での治具の振動特性を評価した。

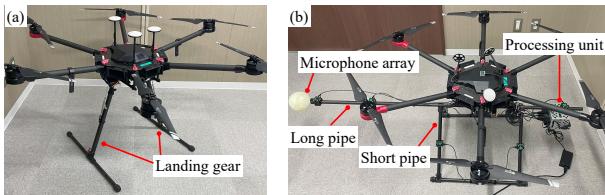


図 1: ドローンと治具の外観：(a) ドローン単体、(b) 提案する治具を取り付けた状態。

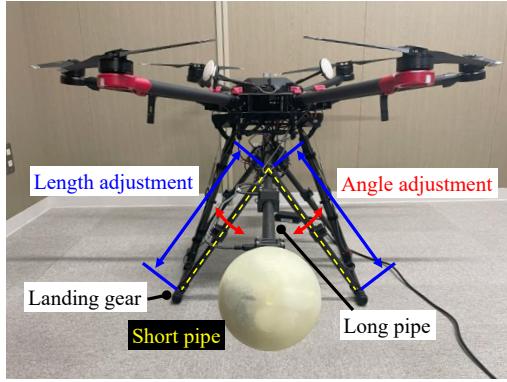


図 2: 提案する治具を取り付けた状態の正面図。

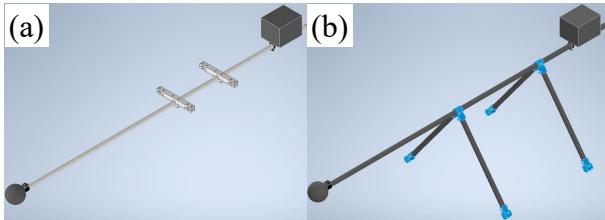


図 3: 固有値解析に用いたモデル：(a) 従来の治具、(b) 提案する治具。

## 2 治具の設計

多くの産業用ドローンは、図 1(a)に示すような逆 T 字型のランディングギアを有している。そのため図 1(b)に示すようにランディングギアに取り付けることができ、計測機器を搭載することができる治具を設計することで、汎用性の高い治具を実現することができる。そこで図 2に示すように、トラス状に配置した短いパイプの一端をランディングギアと接続し、もう一端で計測機器を搭載するための長いパイプと接続するような治具を提案した。この設計の特徴は、短いパイプと長いパイプを接続するための部品の取り付け角度を調整し、短いパイプの長さを調整することで、様々なサイズのドローンに適用することができるという調整可能性である。

このような治具を実現するためには、質量、耐荷重、振動特性、調整の容易さの4つの設計指標を満たす必要がある。

### 1. 質量

治具と計測機器の質量が、ドローンのペイロードを満たす必要がある。

表 1: 数値解析に使用した機械的特性。

	CFRP パイプ	Onyx
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	1550	1139
縦弾性係数 ( $E_x$ ) [GPa]	113.6	1.20
縦弾性係数 ( $E_y, E_z$ ) [GPa]	113.6	0.85
ポアソン比 ( $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}$ )	0.3	0.35
横弾性係数 ( $G_{xy}$ ) [GPa]	43.7	0.67
横弾性係数 ( $G_{yz}$ ) [GPa]	43.7	0.47
横弾性係数 ( $G_{zx}$ ) [GPa]	43.7	0.39

表 2: 従来の治具と提案する治具の固有振動数。

	Matrice M600 Pro		Matrice 210 RTK V2
	従来手法	提案手法	提案手法
1次	14.3	17.3	21.9
2次	15.5	17.5	22.4
3次	24.3	32.7	70.7
4次	27.4	37.9	82.9
5次	109.5	48.9	134.4
6次	131.7	118.8	199.9
7次	165.0	215.0	269.3
8次	182.8	218.0	277.1
9次	275.0	281.6	301.1
10次	280.2	309.0	476.7

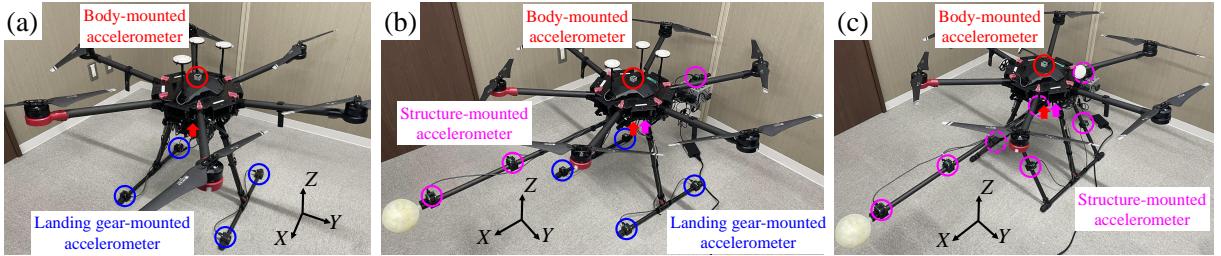


図 4: 加速度センサの配置: (a) ドローン単体, (b) 従来の治具を搭載した場合, (c) 提案する治具を搭載した場合. 赤色, 青色, マゼンタ色の円は, ドローン本体, ランディングギア, 治具に取り付けた加速度センサを示す.

## 2. 耐荷重

計測機器の自重に相当する静荷重を治具が支えることができる.

## 3. 振動特性

飛行中のロータの振動に由来する共振や疲労破壊を防ぐため, 治具が適切な振動特性を有している.

## 4. 調整の容易さ

ロータのエゴノイズを低減するため, ドローン本体から離れた位置にマイクロホンアレイを配置する必要がある. さらにドローン全体の重心を調整するため, 処理ユニットを長いパイプに沿って調整できる必要がある. そのためこのような計測機器の位置調整を容易に実施できる必要がある.

本研究では, 主な構造部品を断面が外径 20 mm, 肉厚 1mm の CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)パイプとした. さらにこれらのパイプを組み合わせる部品を短纖維の炭素繊維強化ナイロンフィラメント(Onyx, Markforged) [13] を用いた中実の 3D プリント部品とした.

## 3 数値解析による評価

以前の研究では, 前章で示した治具の設計指標の評価は, Matrice 210 RTK V2 (DJI) [14] に取り付けるという条件の下で実施した. 本章では, よりサイズの大きいドローンである Matrice M600 Pro (DJI) [15] に取り付けるという条件の下で再度評価した. 4つの設計指標のうち, 質量, 耐荷重, 調整の容易さの 3 つの設計指標は, 以前の研究で十分に評価できていると考える.

まず質量は, 以前検討した DJI Matrice 210 RTK V2 のペイロードが 1.23 kg であるのに対し, DJI Matrice M600 Pro のペイロードが 5.50 kg であり, 治具の質量は大きく変化しないため, 質量の設計指標を満たすと考える. 次に耐荷重は, 同一の計測機器を搭載するため, 以前の研究と同様に FEM に基づく静荷重解析に

より評価できると考える. そして調整の容易さも, 以前の研究と同様の構造であるため, 適切に評価できていると考える.

一方振動特性は, 適用するドローンのサイズに応じて短いパイプの長さと取り付け角度が異なるため, 適用対象のドローンに対応した条件で評価する必要があると考える. そのため, 適用対象のドローンに対応した形状と寸法の治具について評価する必要があると考える. そこで設計した治具について, FEM 解析ソフト (Inventor Nastran, Autodesk) を用いた固有値解析により振動特性を評価した.

### 3.1 固有値解析の条件

図 3 に示すように, ランディングギアに取り付けるような提案する治具に加え, 比較対象としてドローン本体の底面に直接取り付けるような従来の治具について, マイクロホンアレイと処理ユニットを含む 2 種類の有限要素モデルを作成した. これらのモデルで CFRP パイプはシェル要素, 3D プリント部品はソリッド要素と仮定した. 従来の治具はドローン本体底面の部品との接触箇所, 提案する治具はランディングギアとの接触箇所での固定を拘束条件とした. 表 1 に示すように, 以前の研究で実施した固有値解析と同様の機械的特性を使用した [12, 16, 17].

### 3.2 固有値解析の結果

表 2 は, 従来の治具と提案する治具を Matrice M600 Pro に適用した場合, 提案する治具を Matrice 210 RTK V2 に適用した場合の 3 種類の条件の, 1 次から 10 次までの固有振動数を示す. これらの結果から, Matrice 210 RTK V2 に適用した場合の固有振動数は, Matrice M600 Pro に適用した場合の固有振動数と大きく異なり, 適用対象のドローンに対応したモデルを用いて評価する必要があることがわかる.

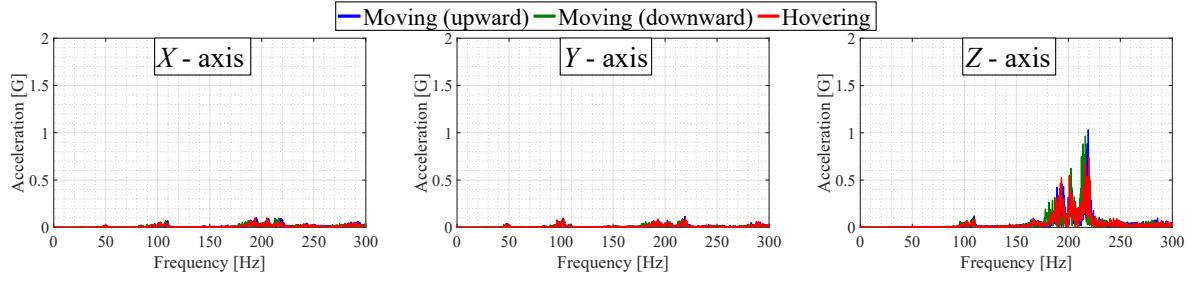


図 5: 上昇, 下降, ホバリング時のドローン単体で計測した, ドローン本体上面の加速度応答の周波数スペクトル.

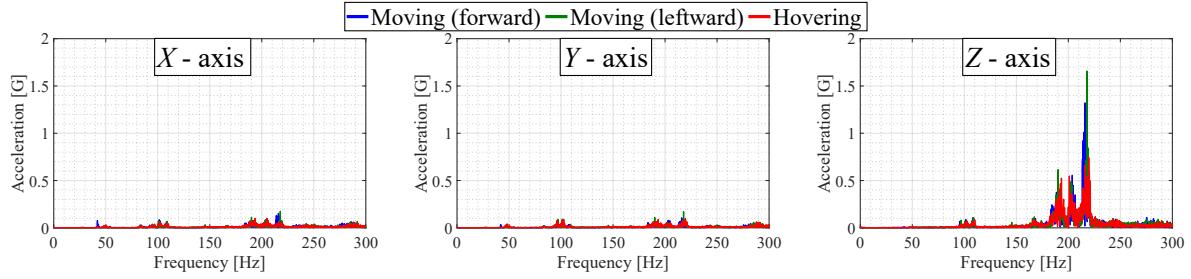


図 6: 前方への移動, 左方への移動, ホバリング時のドローン単体で計測した, ドローン本体上面の加速度応答の周波数スペクトル.

## 4 実飛行条件下での振動特性の評価

本章では, 屋外でのドローンの飛行中の治具の振動特性を評価する. この評価では, 計測機器を搭載した治具をドローンに取り付け, ドローン本体, ランディングギア, 治具上の数か所での加速度応答を計測し, 比較することで評価した.

### 4.1 計測条件

図 4 に示すように, ドローン単体の場合, 従来の治具をドローン本体の底面に取り付けた場合, 提案する治具をランディングギアに取り付けた場合の 3 種類の条件について振動特性を評価した. 各条件について, 加速度センサをドローン本体, ランディングギア, 治具に配置し, ドローンの対称性を考慮して, 上昇, 下降, 前方への移動, 左方への移動, ホバリング, 離陸, 着陸の 7 種類の飛行条件について加速度応答を計測した. ただし座標軸は, ドローンの進行方向を  $X$  軸, 左方を  $Y$  軸, 鉛直方向を  $Z$  軸とした. 加速度応答の計測条件は, M5Stack ATOM Matrix に搭載されている MPU 6886 を加速度センサとして使用し, サンプリング周波数を 1 kHz, 計測時間を 5 秒間として計測したため, 周波数分解能は 0.2 Hz として解析した.

### 4.2 計測結果

得られた加速度応答のうち特徴的な加速度応答について, 6 つの観点から比較し, 実際の飛行条件下での治具の振動特性を評価する.

#### 4.2.1 ドローンの飛行条件による振動への影響

今回の振動特性の評価で検討するべき飛行条件を明らかにするため, ドローン単体で 5 種類の飛行条件(上昇, 下降, 前方への移動, 左方への移動, ホバリング)で飛行した際に計測した, ドローン本体上面での加速度応答を比較した. 図 5 では, 青線, 緑線, 赤線が上昇, 下降, ホバリング時, 図 6 では, 青線, 緑線, 赤線が前方への移動, 左方への移動, ホバリング時の加速度応答の周波数スペクトルを示す.  $X$  軸と  $Y$  軸方向では, どの飛行条件でも振動特性の差異が小さいことがわかる.  $Z$  軸方向でも類似した振動特性を示すものの, 220 Hz 付近では飛行条件に応じて加速度応答が異なることがわかる. しかしながら, いずれの方向でも同一のピーク周波数を示しており, 飛行条件による振動特性への影響は小さいと考えられる. したがって以降の比較では, ホバリング時の振動特性を代表例として取り上げ, 評価を実施する.

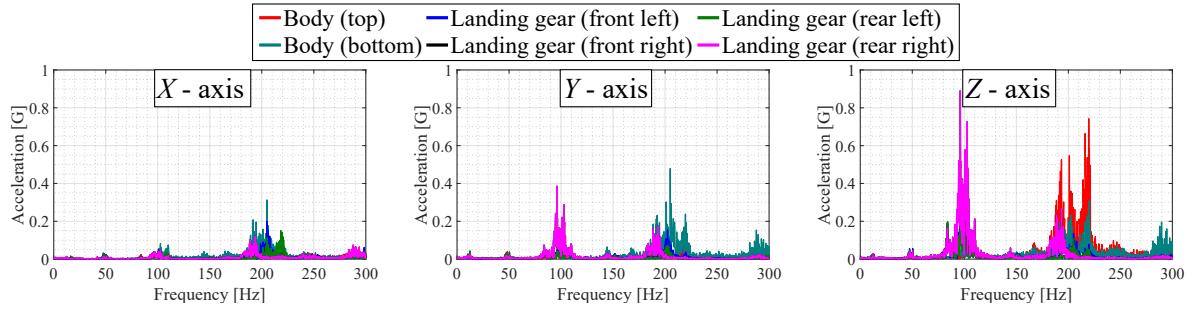


図 7: ドローン単体で計測したドローン本体上面及び底面、ランディングギアの端部における加速度応答の周波数スペクトル.

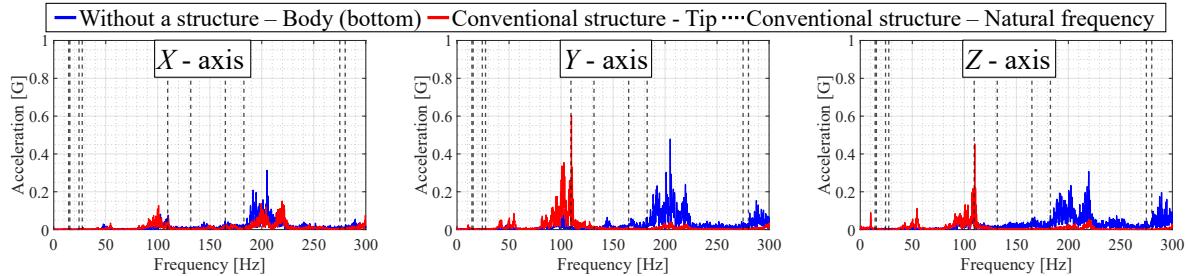


図 8: ドローン単体で計測したドローン本体底面及び従来の治具を取り付けて計測した治具の端部における加速度応答の周波数スペクトル.

#### 4.2.2 ドローン本体の振動とランディングギアの端部における振動の比較

ドローン単体のホバリング時に得られたドローン本体上面及び底面、ランディングギアの端部における加速度応答を比較する。図 7 に、赤線と明るい青線がドローン本体の上面及び底面、青線、緑線、黒線、マゼンタ線がランディングギアの端部における加速度応答の周波数スペクトルを示す。いずれの方向でも、ドローン本体に比べてランディングギアの端部では大きな振動が生じ、Y 軸と Z 軸方向では 100 Hz 付近で大きな振動が生じることがわかる。これはドローンのランディングギアが自由端となり、ロータの振動が増幅されたことが原因であると考えられる。ただし、Z 軸方向では 220 Hz 付近でドローン本体の上面と底面で大きな振動が生じており、ロータの振動による影響であると考えられる。

#### 4.2.3 ドローン本体の振動と従来の治具の端部における振動の関係

ドローン単体で計測したドローン本体底面での振動と、従来の治具をドローンに取り付けて計測した治具の端部での振動との関係を評価した。図 8 に、青線がドローン単体でのドローン本体底面、赤線が従来の治具をドローンに取り付けた際の治具の端部における加

速度応答の周波数スペクトルを示す。さらに数値解析により得られた、従来の治具の固有振動数を黒色の点線で示す。いずれの方向でも治具の端部では、ドローン本体の振動を抑制している一方で、Y 軸と Z 軸方向では、110 Hz 付近の大きな振動が生じることが確認できる。

この 110 Hz 付近の振動は、治具の固有振動数と一致しており、共振により生じたと考えることができる。さらに今回の比較では、ドローン本体底面で計測した加速度応答を用いており、従来の治具を取り付けた位置で生じる振動とは異なる可能性がある。したがって、治具の振動特性による影響と加速度応答の計測位置の違いにより、ドローン単体で計測したドローン本体底面における加速度応答と従来の治具を取り付けて計測した治具の端部における加速度応答に大きな差異が生じたと考える。

#### 4.2.4 ランディングギアの端部と提案する治具の端部における振動の関係

ドローン単体で計測したランディングギアの端部における振動と提案する治具をドローンに取り付けて計測した治具の端部における振動との関係を評価した。図 9 に、青線、緑線、黒線、マゼンタ線がドローン単体で計測したランディングギアの端部、赤線が提案する

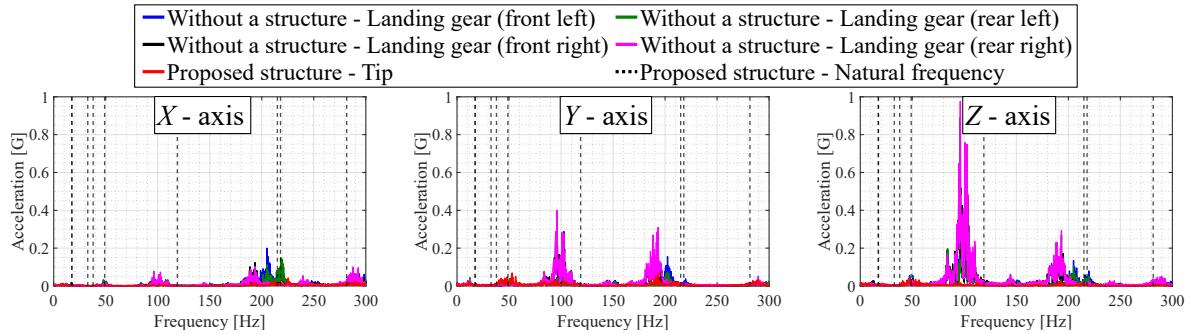


図 9: ドローン単体で計測したランディングギアの端部及び提案する治具を取り付けて計測した治具の端部における加速度応答の周波数スペクトル.

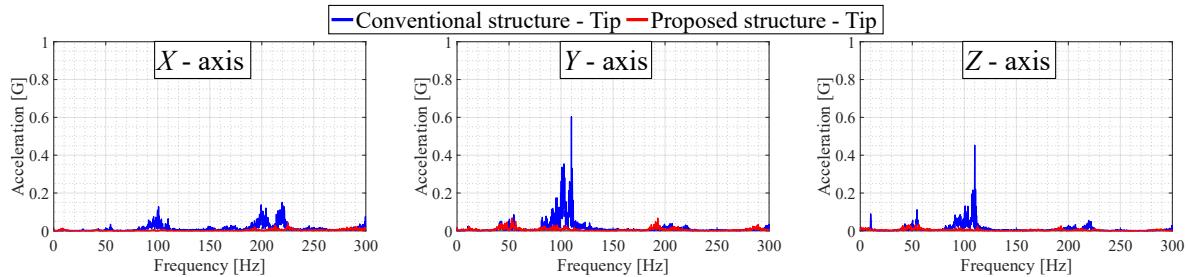


図 10: 従来の治具と提案する治具を取り付けて計測した治具の端部における加速度応答の周波数スペクトル.

治具を取り付けて計測した治具の端部における加速度応答の周波数スペクトルを示す. さらに数値解析により得られた, 提案する治具単体での固有振動数を黒色の点線で示す. いずれの方向でも治具の端部では, 振動をよく抑制できることがわかる. これはドローン単体でのランディングギアの端部で生じる振動の周波数と提案する治具単体での固有振動数が一致しないことが主な理由であると考える. さらに提案する治具をドローンに搭載することで, ランディングギアと治具がトラス状の構造を構成するため, 振動を効果的に抑制できていると考える.

#### 4.2.5 従来の治具の端部と提案する治具の端部における振動の比較

従来の治具と提案する治具をドローンに取り付けて計測した際の, ドローンの飛行中の治具の端部における振動特性を評価する. 図 10 に, 青線が従来の治具, 赤線が提案する治具をドローンに取り付けて計測した, 治具の端部における加速度応答の周波数スペクトルを示す. いずれの方向でも, 提案する治具は治具の端部における振動を抑制している. このような結果は, 次の 3 つの要因により生じたと考えられる. 第一にランディングギアで生じる振動が, 提案する治具単体での固有振動数と一致しないこと. 第二に提案する治具が, 振動をより効果的に抑制することができ

る構造となること. そして第三に振動源であるロータからランディングギアまでの距離が遠く, 振動の伝播過程で振動が減衰したと考えられる.

#### 4.2.6 ドローンの離着陸による治具の端部の振動への影響

従来の治具と提案する治具をドローンに取り付けて計測した, ドローンの離着陸時の治具の端部における加速度応答を比較, 評価した. 図 11, 図 12 に離陸時と着陸時の結果を示しております, いずれの図においても, 青線が従来の治具, 赤線が提案する治具を取り付けた場合の加速度応答の結果を示す. 異なる結果は, 提案する治具では, 従来の治具に比べて一定で小さな加速度応答が得られた. これは離陸時のロータの回転が上昇時の回転と類似しており, ドローンの飛行中と同様にロータの振動が減衰して伝播したことが原因であると考えられる. 一方着陸時は, 提案する治具では, 治具の端部に比べ大きな振動が生じることが確認された. これは提案する治具がランディングギアに直接取り付けられるため, ドローンの着陸時の衝撃が治具の端部にほぼ直接的に作用することが原因であると考えられる.

これらの結果は提案する治具が従来の治具に比べ, ドローンの飛行中は有効であることを示している. さらに図 11 及び図 12 に示すように, 提案する治具の端部の飛行中の加速度応答は, いずれの方向でも 1 G 以下

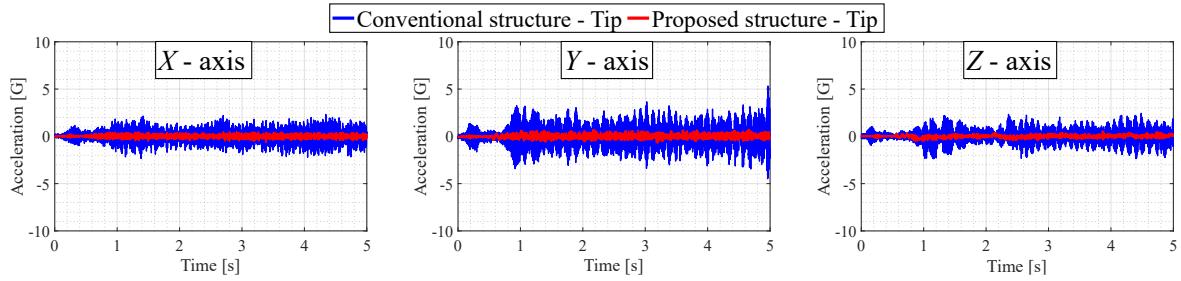


図 11: 従来の治具と提案する治具を取り付けて計測した、ドローンの離陸時の治具の端部における加速度応答。

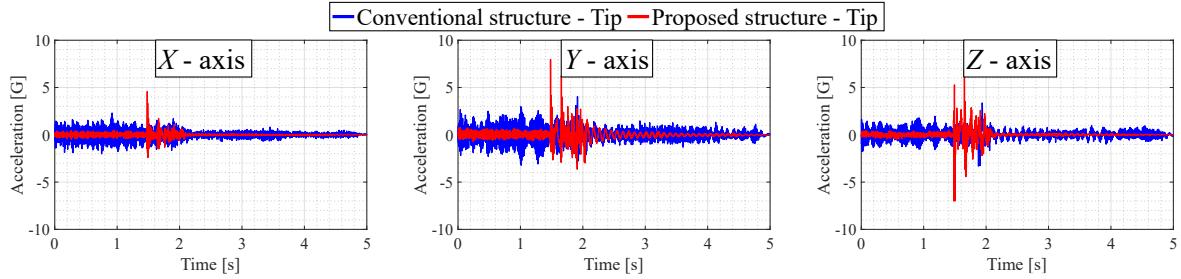


図 12: 従来の治具と提案する治具を取り付けて計測した、ドローンの着陸時の治具の端部における加速度応答。

に抑制することができておらず、計測機器への影響を最小限にとどめられることが明らかになった。一方で着陸時には、提案する治具の端部では、従来の治具の端部に比べ大きな振動が生じることがわかる。着陸時に音響計測を行わないと、収録音への影響は限定的であるため、構造が十分な強度を有していれば問題ないと考えられる。

## 5 結言

本研究ではドローン聴覚に用いる計測機器を搭載するための治具のうち、以前の研究で提案した、ドローンのランディングギアに取り付けることができる汎用性の高い治具について、実際の飛行条件下での振動特性を評価した。ドローン単体の場合、従来の治具をドローン本体底面に取り付けた場合、提案する治具をドローンのランディングギアに取り付けた場合の 3 種類の条件について、それぞれ 7 種類の飛行条件で加速度応答を計測した。これらの結果を比較することで、提案する治具の振動特性が従来の治具より優れており、ドローンの飛行中の計測機器への影響を抑制できることが明らかになった。さらに提案する治具は、従来の治具に比べ、着陸時に大きな振動が生じることが明らかになった。このような振動は、着陸時に音響計測を実施しないため、ドローン聴覚による音源定位に与える影響は限定的であるものの、着陸時の衝撃力に耐えることができるよう、十分な強度を有する治具を設計する必要があることが明らかになった。

本研究では、5 m/s 程度の風があるような屋外環境での、実際の飛行中の治具の振動特性を評価した。これらの結果から今後の研究では、同様の屋外環境において飛行中に音を収録し、収録音への飛行中の振動による影響を評価する。さらに同様の評価をより風速の早い環境や騒音が大きい環境で実施し、収録音への影響を評価する。そしてこれらの収録音について、同様の計測地点に配置し、ドローンの飛行による影響がないように地面に対して固定されたマイクロホンアレイで収録した音と比較し、S/N 比といった評価指標を用いて評価する。さらに、今回の結果から着陸時の衝撃への対策が必要であることが明らかになったが、このような着陸時の衝撃を吸収するような機構要素についても検討する必要があると考える。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 22K14218 および NEXCO 関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Urbanová, P., Jurda, M., Vojtíšek, T., Krajsa, J.: Using drone-mounted cameras for on-site body documentation: 3D mapping and active survey,

- Forensic Science International*, vol. 281, pp. 52–62 (2017)
- [2] Quan, A., Herrmann, C., Soliman, H.: Project Vulture: A Prototype for Using Drones in Search and Rescue Operations, *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pp. 619–624 (2019)
- [3] Sambolek, S., Ivasic-Kos, M.: Automatic Person Detection in Search and Rescue Operations Using Deep CNN Detectors, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37905–37922 (2021)
- [4] Mishra, B., Garg, D., Narang, P., Mishra, V.: Drone-surveillance for search and rescue in natural disaster, *Computer Communications*, vol. 156, pp. 1–10 (2020)
- [5] Tuan Do, T., Nguyen, D. D., Ho, X. H., Nguyen, V. D.: Leveraging Deep Learning Technique with Meta-Data-Featured Images Captured by Drone for Real-Time Victim Positioning in Flood-Affected Areas, *2025 19th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, pp. 1–8 (2025)
- [6] Yamamoto, Y., Tang, Z. C., Taguchi, K., Tsuchiya, H.: Drone with Multiple Sensors for Night-time Search Missions of Disaster Victims, *2024 IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 1–6 (2024)
- [7] Wang, L., Cavallaro, A.: Deep-Learning-Assisted Sound Source Localization From a Flying Drone, *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 21, pp. 20828–20838 (2022)
- [8] Clayton, M., Wang, L., McPherson, A., Cavallaro, A.: An Embedded Multichannel Sound Acquisition System for Drone Audition, *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 12, pp. 13377–13386 (2023)
- [9] Hoshiba, K., Washizaki, K., Wakabayashi, M., Ishiki, T., Kumon, M., Bando, Y., Gabriel, D., Nakadai, K., Okuno, H. G.: Design of UAV-Embedded Microphone Array System for Sound Source Localization in Outdoor Environments, *Sensors*, vol. 17, no. 11, pp. 1–16 (2017)
- [10] Hoshiba, K., Nakadai, K., Kumon, M., Okuno, H. G.: Assessment of MUSIC-Based Noise-Robust Sound Source Localization with Active Frequency Range Filtering, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 30, no. 3, pp. 426–435 (2018)
- [11] Hoshiba, K., Komatsuzaki, I., Iwatsuki, N.: Proposal of Practical Sound Source Localization Method Using Histogram and Frequency Information of Spatial Spectrum for Drone Audition, *Drones*, vol. 8, no. 4, 159 (2024)
- [12] Tsukamoto, Y., Hoshiba, K., Iwatsuki, N.: Development of a Versatile Structure for Mounting Drone Audition-purposed Measurement Equipment, *2025 IEEE/SICE International Symposium on System Interigation (SII)*, pp. 1028–1033 (2025)
- [13] Markforged, "Onyx" , <https://markforged.com/jp/materials/plastics/onyx> (accessed on November 11, 2025)
- [14] DJI, "Support for Matrice 200 Series V2", <https://www.dji.com/support/product/matrice-200-series-v2> (accessed on November 11, 2025)
- [15] DJI, "Support for Matrice 600 Pro", <https://www.dji.com/support/product/matrice600-pro> (accessed on November 11, 2025)
- [16] HOPEC, "Technology", <https://www.hopec.jp/technology/> (accessed on November 11, 2025)
- [17] TORAY, "Mechanical properties", <https://www.toplaseiko.com/oshidashi/data/> (accessed on November 11, 2025)