

ドローン聴覚のための計測機器搭載用治具の 開発における強度・振動解析

Development of a Versatile Structure for Mounting Drone Audition-purposed Measurement Equipment

塚本悠太^{1*} 干場功太郎¹ 岩附信行¹
Yuta Tsukamoto¹ Kotaro Hoshiba¹ Nobuyuki Iwatsuki¹

¹ 東京科学大学

¹ Institute of Science Tokyo

Abstract: ドローンにマイクロホンを搭載し、音環境を計測するドローン聴覚と呼ばれる技術は、災害地における要救助者の探索活動などへの適用が期待されている。しかし、このような技術の実現には、ドローンに様々な計測機器を搭載する必要がある。従来は様々なドローンそれぞれに対応した機器搭載用治具を設計していたため、導入にコストを要していた。そこで本研究では、一般的な形状を持つ、任意の産業用ドローンに対して適用可能な機器搭載用治具を提案する。CFRP パイプと 3D プリント部品を用いて設計、製作し、実際のドローンに取り付けることで提案する治具の汎用性の高さを検証した。実際の計測で使用する機器を搭載した治具のモデルについて、2 種類の 3D プリント部品の 3 点曲げ試験結果を使用した有限要素法による静荷重解析と固有値解析を実施した。その結果、提案する治具が十分な強度と適切な振動特性を有し、従来の治具を代替できることを確認した。

1 緒言

ドローンは地面条件に関係なく高速に移動することができるため、災害地における要救助者の探索や救助活動への適用が期待されている。このような探索手法の一つとして、ドローンに搭載したカメラの画像を用いた探索について多くの研究が行われてきた [1, 2]。しかし、画像を用いた探索手法は、暗い環境での探索や、瓦礫等に埋もれた要救助者の探索が困難である。この課題を解決するため、音響情報を用いた探索手法についての研究が行われている [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]。これらの研究では、ドローンに搭載したマイクロホンアレイを用いて人由来の音源を定位しており、このようなドローン搭載マイクロホンを用いた音環境の計測技術をドローン聴覚という。ドローン聴覚では、マイクロホンアレイを含むセンサーや小型コンピュータ、通信機器などの音源定位に用いる計測機器を、ドローンのペイロードを超えないように搭載する必要がある。さらに、マイクロホンアレイにて収録される音響信号に含まれるドローンのロータや風によるノイズを低減するため、それら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 [5, 7]。これまでに、ドローンに

搭載した計測機器を活用する研究が多く行われてきているが [10, 11]、ドローン聴覚で要求されるような、ドローン本体から離れた位置に搭載した計測機器を活用する研究は少ない。

これまでのドローン聴覚に関する研究では、使用するドローンの本体に直接取り付ける専用の治具を設計し、その治具に計測機器を搭載してきた [5, 6, 7, 9]。そのため、使用するドローンに対応した形状と寸法、取り付け方法の治具をドローン毎に設計する必要がある、導入にコストを要するという課題がある。

そこで本研究では、ランディングギアを有する中型や大型の産業用ドローンに汎用的に適用でき、計測機器を搭載することのできる治具を提案する。多くの中型や大型の産業用ドローンは、逆 T 字型のランディングギア [12, 13] や O 型のランディングギア [14] を有している。そのため、このようなランディングギアに対して取り付けることのできる治具を設計することで、簡易な調整のみで異なる大きさのドローンに適用することができる。この治具は、質量制限、荷重制限、振動特性、調整の容易さの 4 つの指標に基づき設計した。治具は CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) パイプと 3D プリント部品を組み合わせることで軽量化を実現した。そのため、治具の特性はこれらの材料の特性に大きく依存する。

本稿では 3D プリント部品に着目し、FFF (Fused Fil-

*連絡先：東京科学大学 工学院機械系
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 11-27
E-mail: tsukamoto.y.ak@m.titech.ac.jp

ament Fabrication) 方式と SLA (Stereo Lithography Apparatus) 方式の 2 種類の材料について、3 点曲げ試験により機械的特性を計測した。そしてマイクロホンアレイと小型コンピュータ等の機器を含む処理ユニットを搭載した治具について、得られた機械的特性を用いた静荷重解析と固有値解析を実施し、治具の耐荷重および振動特性を評価した。また実際に治具を製作し、治具の汎用性と重量を評価した。

2 提案する治具

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するため、このようなランディングギアに取り付けることができるように治具を設計することで、同様のランディングギアを有するドローンに対して治具を適用することができる。したがって本研究では図 1(b) に示すように、ランディングギアと長いパイプが短いパイプと他の部品を用いてトラス状に配置される形状の治具を設計した。マイクロホンアレイは長いパイプの前方、小型コンピュータやセンサ、通信機器を含む処理ユニットは長いパイプの後方に配置した。図 1(c) に示す箇所について中央の部品の取付角度と短いパイプの長さを変えることで、図 1(a) に示す形状を有する様々な大きさのドローンに対して汎用的に取り付けることができる。

2.1 治具の設計要件

質量制限、荷重制限、振動特性と調整の容易さを治具の設計条件として設定した。

1. 質量制限

ドローンのペイロードの制約下で計測機器をドローンに搭載するため、治具を軽量化する必要がある。そのため部品点数を削減するよう治具を設計した。

2. 荷重制限

治具は計測機器の自重により生じる荷重に対して、十分な強度を有する必要がある。そのため、材料の強度に対して機器の自重により生じる応力が十分に小さくなるように治具を設計した。

3. 振動特性

ドローンは、飛行中にロータによる振動 (40 - 70 Hz, 165 - 182 Hz) と風 (0 - 10 Hz) による振動が発生すると報告されている [15]。よって、治具は共振による干渉や破損を防ぐために適切な振動特性を有するよう設計する必要があるため、治具の

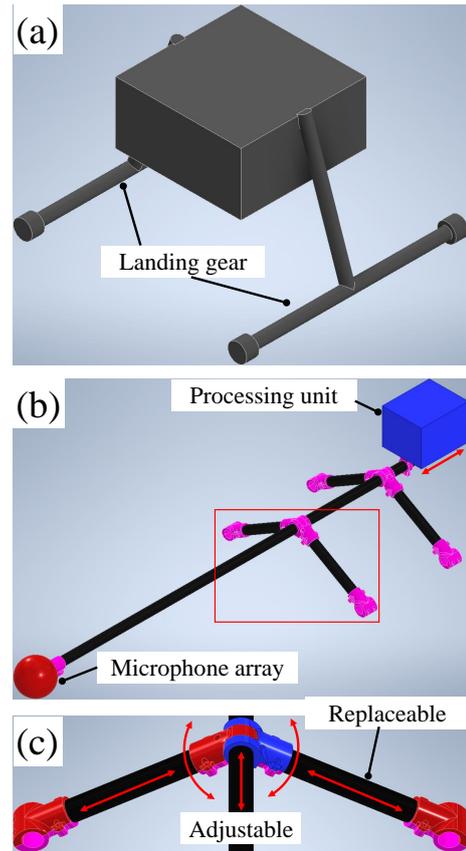


図 1: (a) 一般的な産業用ドローンの形状, (b) マイクロホンアレイと処理ユニットをドローンに取り付けるための治具の形状, (c) (b) の赤線で示した領域の詳細。

固有振動数が上記の 3 つの周波数帯 (0 - 10 Hz, 40 - 70 Hz, 165 - 182 Hz) を避けるよう治具を設計した。

4. 調整の容易さ

マイクロホンアレイを用いた計測では、ドローンのエゴノイズによる影響を低減することができるよう、ドローンに対するマイクロホンアレイの位置調整を行えるようにする必要がある。さらに、搭載するマイクロホンアレイと処理ユニットの自重を考慮した重心の調整を行う必要があるため、処理ユニットの位置調整も行えるようにする必要がある。その結果、治具は機器の搭載位置を容易に調整可能となるよう設計した。

2.2 治具の製作条件

提案する治具は様々なドローンに適用することができるよう複雑な形状を有する。そこで、CFRP パイプを主な構造部品として使用し、これらのパイプを接続する部

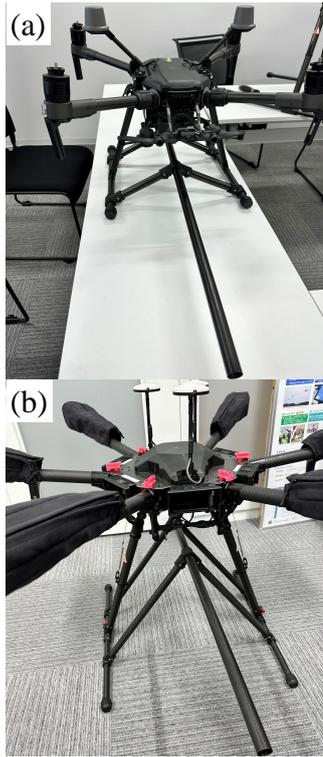


図 2: 提案する治具をドローンに搭載した様子. (a) DJI Matrice 210 RTK V2, (b) DJI Matrice 600 Pro.

品は、短繊維強化ナイロン樹脂のフィラメント (Onyx, Markforged), 3D プリント (Onyx One, Markforged) を使用して製作した。

製作した治具は図 2 に示す 2 種類のドローン (DJI Matrice 210 RTK V2[12], DJI Matrice 600 Pro[13]) に取り付けた。この治具では、CFRP パイプを 3D プリント部品とねじを用いて締結しており、ランディングギアに接続される短い CFRP の取付角度の調整と交換が可能な形状となっている。そのため、治具は短いパイプの取付角度と長さを調整することで、ランディングギアを有する様々な大きさのドローンに対して汎用的に取り付けることができる。さらに、中央に配置した長い CFRP パイプと処理ユニットの取付位置を、長い CFRP パイプの軸方向に調整可能であるため、マイクロホンアレイと処理ユニット、ドローンの位置関係を調整することができる。以上のように、異なるサイズのドローンに対して取り付けることで、汎用性および調整の容易さについて確認できた。さらに、表 1 に示す治具と機器の重量を、DJI Matrice 600 Pro より小さい DJI Matrice 210 RTK V2 の最大ペイロードと比較することで、治具の質量を評価した。その結果、治具と機器の総質量は、最大ペイロードの 88 % 程度であり、条件に適していることが確認できた。

表 1: 治具と機器の質量とドローンの最大ペイロードの例。

	質量 [kg]
(a) 提案する治具	0.32
(b) マイクロホンアレイ	0.19
(c) 処理ユニット	0.57
(a)+(b)+(c)	1.08
(d) ドローンの最大ペイロード	1.23

表 2: CFRP パイプの機械的特性。

	CFRP パイプ
密度 [kg/m ³]	1550
ヤング率 [GPa]	113.6
引張強度 [MPa]	1860
ポアソン比	0.3

3 数値解析に用いる材料の機械的特性

提案する治具の強度と振動特性を評価するため、数値解析を実施した。提案する治具は CFRP パイプと 3D プリント部品により構成されるため、解析には CFRP パイプと 3D プリント部品の機械的特性を設定する必要がある。そこで、CFRP パイプは表 2 に示す公称値 [18] を用い、等方性を仮定して機械的特性を設定した。3D プリント部品の材料は、治具の製作に使用した Onyx に加え、SLA 方式の 3D プリント材料であるガラス繊維強化レジン (Rigid 10K, formlabs) について検討した。これらの材料について、2 種類の試験片を作成し、3 点曲げ試験によりヤング率を計測した。ポアソン比は一般的な樹脂材料の文献値 [16] を使用し、横弾性係数は直交する 2 方向のヤング率と直交する 2 方向を法線とする 2 つの面に対して 45 度方向のヤング率、ポアソン比を用いた式 [17] に基づき設定した。

3.1 3 点曲げ試験

3 点曲げ試験は、図 3 に示すように、荷重試験機 (AGX-20kNVD, Shimadzu) を用い、幅 10 mm、厚さ 10 mm、長さ 80 mm の試験片について実施した。試験条件は、支点間距離を 64 mm、圧子と支持台の先端半径を 5 mm、試験速度を 2 mm/min と設定した。

試験片は図 4 に示すように、造形方向を (a) 試験片の長手方向に対して平行な方向 (X 軸方向), (b) 試験片の長手方向に対して直交する方向 (Y 軸方向, Z 軸方向), (c) XY 平面, YZ 平面に対して 45 度方向, YZ 平

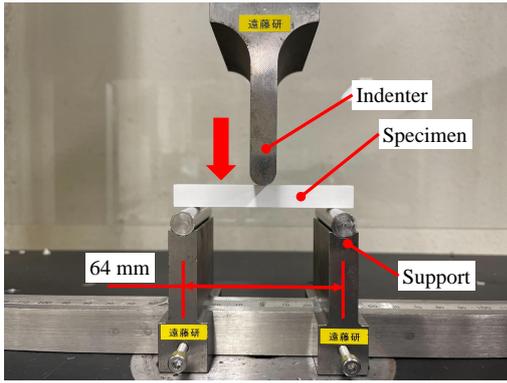


図 3: 3点曲げ試験の様子。

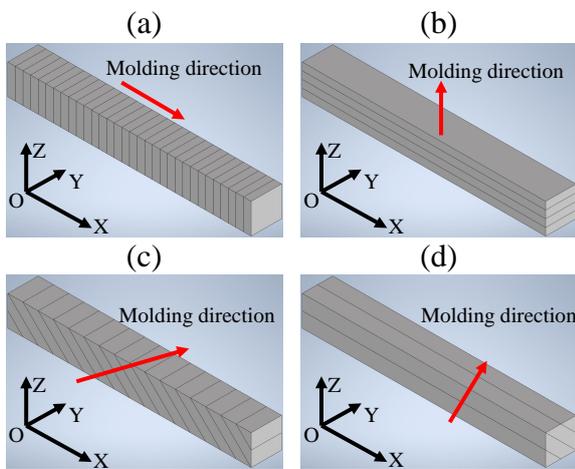


図 4: 試験片の造形方向：(a) 試験片の長手方向に対して平行な方向 (X 軸方向), (b) 試験片の長手方向に対して直交する方向 (Y 軸方向, Z 軸方向), (c) XY 平面, YZ 平面に対して 45 度方向, YZ 平面, ZX 平面に対して 45 度方向, (d) XY 平面, ZX 平面に対して 45 度方向。

面, ZX 平面に対して 45 度方向, (d) XY 平面, ZX 平面に対して 45 度方向の 4 つの異なる造形条件で製作した。Onyx の試験片は, 充填率を 100 %, ウォール数を 15 として Onyx One を用いて造形した。一方, Rigid 10K の試験片は, 充填率を 100 % として Form3 を用いて造形した。Rigid 10K の試験片は造形後に洗浄・硬化機 (Mercury Plus 2.0, ELEGOO) を用いて洗浄し, 二次硬化機 (Form Cure, formlabs) を用いて庫内温度 70 度, 硬化時間 60 分で二次硬化を実施した。これら 2 種類の材料それぞれについて, 4 種類の造形条件の試験片を作成し, 試験を実施した。

試験により, 図 5 に示す応力ひずみ線図を得ることができた。Onyx の試験は, ひずみが 0.04 に到達した段階で停止した。曲げ弾性率 E_x , E_y and E_z は図 5 の結果から算出し, 表 3 に示す通りとなった。Onyx の

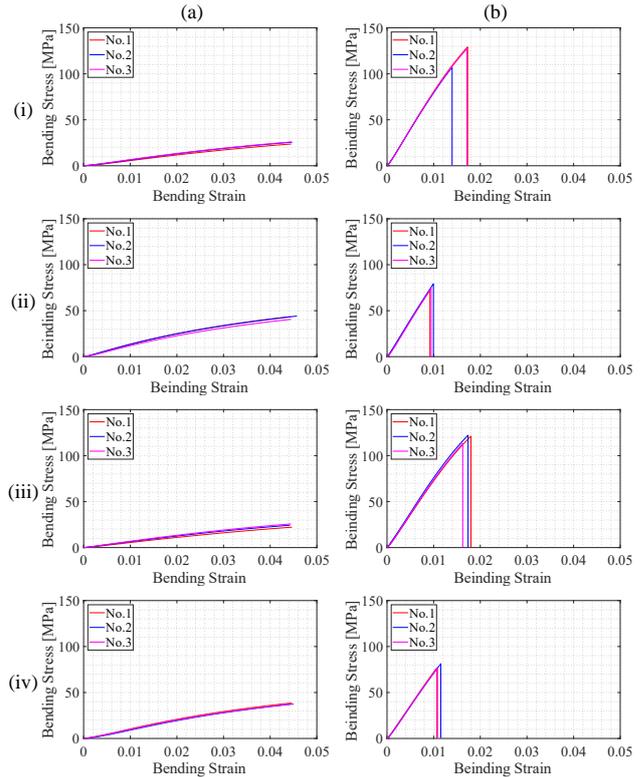


図 5: 応力ひずみ線図。3D プリント部品の材質：(a) Onyx, (b) Rigid 10K. 造形方向：(i) 試験片の長手方向に対して平行な方向 (X 軸方向), (ii) 試験片の長手方向に対して直交する方向 (Y 軸方向, Z 軸方向), (iii) XY 平面, YZ 平面に対して 45 度方向, YZ 平面, ZX 平面に対して 45 度方向, (iv) XY 平面, ZX 平面に対して 45 度方向。

曲げ弾性率は, 文献値 3.0 GPa[19] よりも小さく, 造形方向に大きく依存する。一方 Rigid 10K の曲げ弾性率は, 文献値 9 GPa[20] より小さいが, 造形方向による影響は小さい。したがって, SLA 方式の 3D プリント部品が等方性に近い特性を有するのに対し, FFF 方式の 3D プリント部品は直交異方性の機械的特性を有していることがわかった。

3.2 材料の機械的特性

材料の機械的特性については, 3点曲げ試験により得られた曲げ弾性率をヤング率として設定した。ポアソン比 ν_{xy} , ν_{yz} and ν_{zx} は, 一般的な樹脂材料の文献値 [16] に基づき 0.35 とした。横弾性係数は以下の式に基づいて算出した。

$$\frac{1}{G_{ij}} = \frac{4}{E_{ij,45^\circ}} - \left(\frac{1}{E_i} + \frac{1}{E_j} - \frac{2\nu_{ij}}{E_i} \right) \quad (1)$$

表 3: 数値解析に使用する 3D プリント部品の機械的特性.

	Onyx	Rigid 10K
密度 [kg/m ³]	1139	1709
ヤング率 (E_x) [GPa]	0.52	7.96
ヤング率 (E_y, E_z) [GPa]	1.20	7.99
ポアソン比 ($\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}$)	0.35	0.35
横弾性係数 (G_{xy}) [GPa]	0.18	2.60
横弾性係数 (G_{yz}) [GPa]	0.25	2.49
横弾性係数 (G_{zx}) [GPa]	0.21	2.60

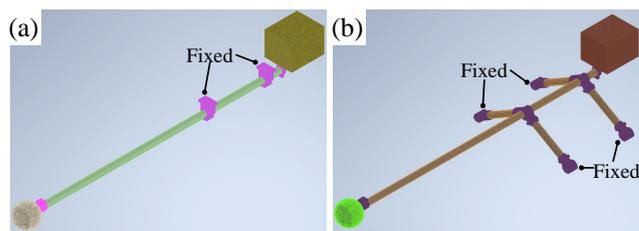


図 7: 固有値解析に使用したモデル. (a) 従来の治具, (b) 提案する治具.

した.

- 長い CFRP パイプの先端に配置したマイクロホンアレイにより生じる力 F1 (1.3 N).
- 長い CFRP パイプのもう一端に配置した処理ユニットにより生じる力 F2 (5.3 N).

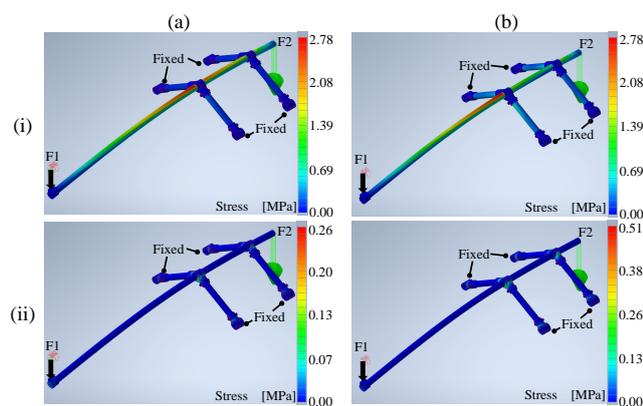


図 6: 静荷重解析の結果. 3D プリント部品の材質: (a) Onyx, (b) Rigid 10K. 各部品における応力分布: (i) シェル要素 (CFRP パイプ), (ii) ソリッド要素 (3D プリント部品).

それぞれの材料の機械的特性は表 3 に示すとおりである.

4 数値解析

提案する治具について, 3章で得られた CFRP パイプと 3D プリント部品の機械的特性を使用し, FEM (有限要素法) により強度, 振動特性を評価した. 解析では, CFRP パイプをシェル要素, 3D プリント部品をソリッド要素としてメッシュを作成した. この条件下で, 治具単体について機器の自重を考慮した静荷重解析, 固有値解析を実施した. 固有値解析については, 提案する治具と従来の研究で用いていた治具との比較により評価した.

4.1 静荷重解析

治具がランディングギアと接触する箇所を固定し, 以下の 2 種類の力が作用するという条件の下解析を実施

した. 静荷重解析の結果を図 6 に示す. CFRP パイプの引張強度が 1860 MPa であるのに対し, シェル要素の最大応力は 2.8 MPa 程度となる. 一方, 3D プリント部品については図 5 に示す通り, Onyx の曲げ強度が 20 MPa, Rigid 10K の曲げ強度が 70 MPa を超えるのに対し, ソリッド要素の最大応力は 0.6 MPa 程度となる. したがって, 考慮している荷重に対して治具の強度が十分であることを確認した.

4.2 固有値解析

固有値解析で使用する, マイクロホンアレイと処理ユニットを含む従来の治具と提案する治具のモデルを図 7 に示す. 従来の治具は, ドローンの本体底面に取り付けられるため, この箇所での固定を拘束条件として解析を実施した. 提案する治具は静荷重解析と同様の拘束条件で解析を実施した.

従来の治具と提案する治具の振動モード形状を図 8 に示し, 固有振動数を図 9 に示す. 従来の治具は実験により得られた Onyx の機械的特性を使用して解析を実施した. また, Onyx の文献値を用いた提案する治具の解析結果も図 9 (Proposed (theoretical)) に示す.

従来の治具, 提案する治具の両方において, 3 次を除く 1 次から 6 次の固有振動数はドローンの飛行中に生じる振動 (0 - 10 Hz, 40 - 70 Hz, 165 - 182 Hz) を避けることができている. しかし, Onyx を用いた提案する治具は 3 次の固有振動数が 40 - 70 Hz の周波数帯に近い結果となった. Rigid 10K を用いた治具はいずれの固有振動数でもドローンの飛行中の振動周波数帯を避けることができおり, 適切な材料を使用する必要性が明らかになった.

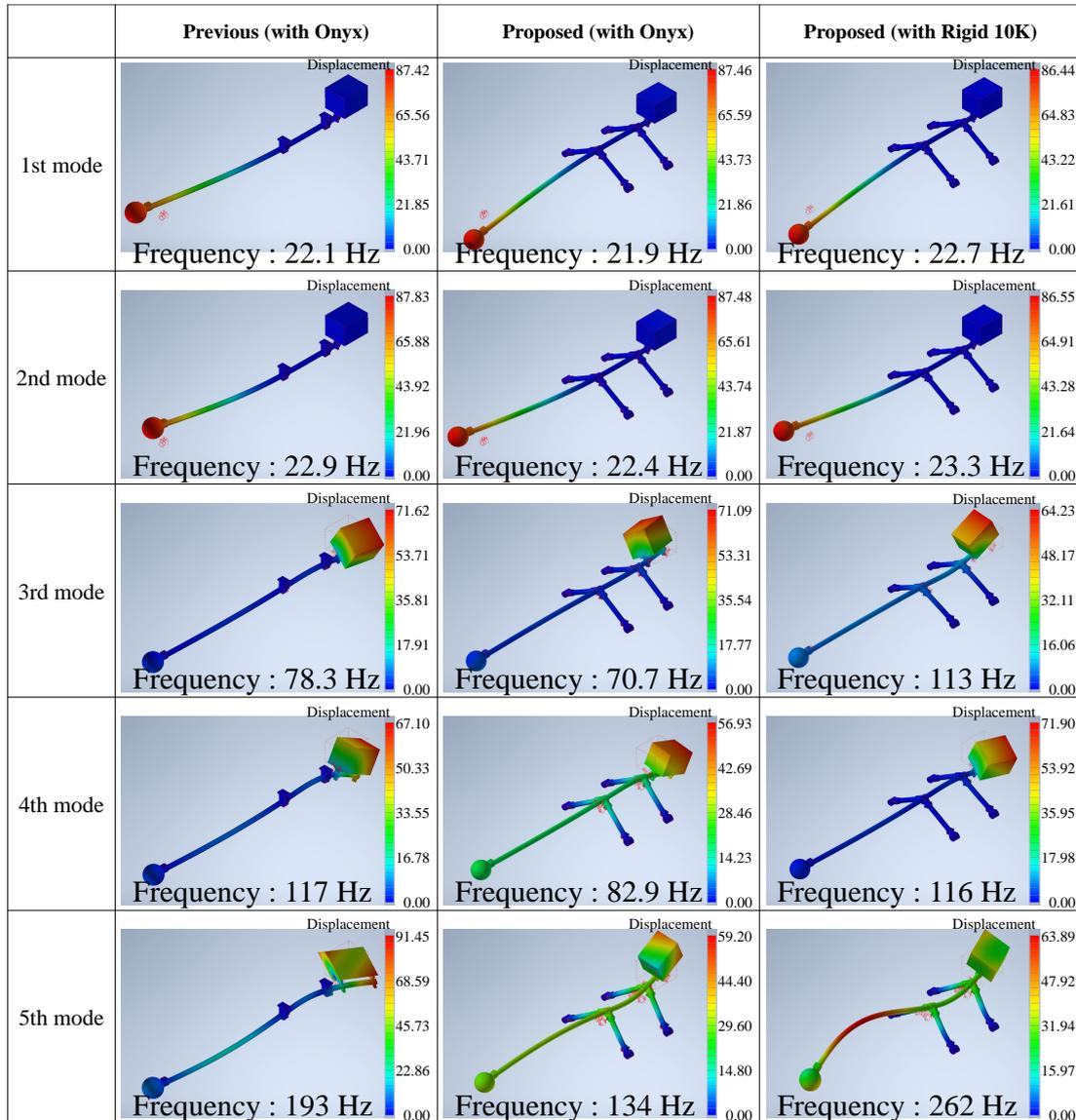


図 8: 固有値解析で得られたモード形状.

Onyx の文献値と実験値を使用した解析においては、固有振動数の差異が大きく、FFF 方式の 3D プリント部品では充填率が 100 % の場合でも異方性による影響が大きいことが明らかになった。Rigid 10K を使用した治具は 5 次の固有振動数が 250 Hz を超え、全ての固有振動数がドローンの飛行中に生じる振動周波数帯を避けることができているため、Onyx を使用した治具より適している。1 次と 2 次の固有振動数は従来の治具と提案する治具、使用する 3D プリント部品の材料により差異が小さく、振動モード形状は長い CFRP パイプの変形が大きいため、治具の振動特性において長い CFRP パイプの剛性による影響が大きい。一方、3 次から 5 次においては、従来の治具と提案する治具で固有振動数の差が大きい。特に 5 次の振動モード形状は

治具全体が変形しているため、治具の振動特性において長い CFRP パイプよりも 3D プリント部品による影響が大きいことが明らかになった。このような治具全体の変形を避けるため、治具の部品の形状や材質を考慮した治具の改良を行う必要がある。

以上から、提案する治具が搭載機器により生じる荷重に対して十分な強度を有することが明らかになった。さらに、提案する治具は 3 次を除いた固有振動数がドローンの飛行中に生じる振動周波数帯を避けることができおり、従来の治具と類似した固有振動数を有しているため、代替に適した治具であることが明らかになった。

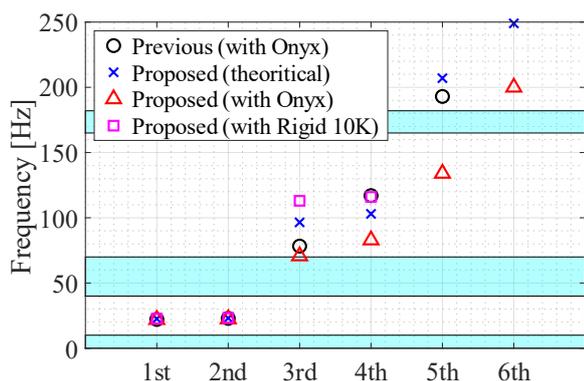


図 9: 固有値解析で得られた固有振動数. シアンで示した領域はドローンの飛行中に生じる振動周波数帯を示す.

5 結言

本稿では、導入における設計コストを削減するため、一般的な形状を有する中型や大型のドローンに計測機器を汎用的に取り付けることのできる治具を提案した. CFRP パイプと 3D プリント部品を用いて製作した治具を 2 種類のドローンに取り付け、治具の汎用性を確認した. また、計測した治具と計測機器の質量と、ドローンの最大ペイロードを比較することで質量条件を評価した. さらに、CFRP パイプの公称値と 3 点曲げ試験により計測した 3D プリント部品の機械的特性を使用した、治具の静荷重解析と固有値解析を実施した. その結果、提案する治具は十分な強度と適切な振動特性を有し、従来の治具を代替できることが明らかになった. 本稿ではドローンの飛行中の振動に対する治具単体の振動特性について評価したが、今後は離陸、着陸時も含めた、ドローンと治具全体の振動特性について評価を行う必要がある.

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 22K14218 および F-REI 委託事業 JPFR23010102 の助成を受けた.

参考文献

- [1] A. Quan, C. Herrmann and H. Soliman, “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.
- [2] S. Sambolek and M. Ivacic-Kos, “Automatic Person Detection in Search and Rescue Operations Using Deep CNN Detectors”, IEEE Access, vol. 9, pp. 37905–37922, 2021.
- [3] K. Okutani, T. Yoshida, K. Nakamura and K. Nakadai: “Outdoor auditory scene analysis using a moving microphone array embedded in a quadcopter”, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Robots and Intelligent Systems (IROS), pp. 3288–3293, 2012.
- [4] T. Ohata, K. Nakamura, T. Mizumoto, T. Tezuka, K. Nakadai: “Improvement in outdoor sound source detection using a quadrotor-embedded microphone array”, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Robots and Intelligent Systems (IROS), pp. 1902–1907, 2014.
- [5] K. Hoshiba, K. Washizaki, M. Wakabayashi, T. Ishiki, M. Kumon, Y. Bando, D. Gabriel, K. Nakadai, H. G. Okuno: “Design of UAV-Embedded Microphone Array System for Sound Source Localization in Outdoor Environments”, Sensors, vol. 17, no. 11, pp. 1–16, 2017.
- [6] K. Hoshiba, K. Nakadai, M. Kumon, H. G. Okuno: “Assessment of MUSIC-Based Noise-Robust Sound Source Localization with Active Frequency Range Filtering”, J. of Robotics and Mechatronics, vol. 30, no. 3, pp. 426–435, 2018.
- [7] K. Hoshiba, I. Komatsuzaki and N. Iwatsuki, “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.
- [8] W. Manamperi, T. D. Abhayapala, J. Zhang and P. N. Samarasinghe, “Drone Audition: Sound Source Localization Using On-Board Microphones”, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 30, pp. 508–519, 2022.
- [9] G. Yeong-Ju and J-S. Choi, “An Acoustic Source Localization Method Using a Drone-Mounted Phased Microphone Array”, Drones, vol. 5, no. 3, 75, 2021.
- [10] Y. Karaca, M. Cicek, O. Tatli, A. Sahin, S. Pasli, M. F. Baser and S. Turedi, “The potential use

of unmanned aircraft systems (drones) in mountain search and rescue operations”, *The American Journal of Emergency Medicine*, vol. 36, no. 4, pp. 583–588, 2018.

- [11] M. Silvagni, A. Tonoli, E. Zenerino and M. Chiaberge, “Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events”, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 8, no. 1, pp. 18–33, 2017.
- [12] DJI, “Support for Matrice 200 Series V2”, <https://www.dji.com/support/product/matrice-200-series-v2>
- [13] DJI, “Support for Matrice 600 Pro”, <https://www.dji.com/support/product/matrice600-pro>
- [14] DJI, “Phantom 4 Pro V2.0”, <https://www.dji.com/en/phantom-4-pro-v2>
- [15] C. Ge, K. Dunno, M.A. Singh, L. Yuan and L.-X Lu, “Development of a Drone’s Vibration, Shock and Atmospheric Profiles”, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, 5176, 2021.
- [16] TORAY, “Mechanical properties”, <https://www.toplaseiko.com/oshidashi/data/>
- [17] 裕 伸夫, 川端 季雄, 河合 弘迪, “FRP 板の直交異方性弾性定数の解析法”, *材料*, vol. 16, No. 170, pp. 910–917, 1967.
- [18] HOPEC, “Technology”, <https://www.hopec.jp/technology/>
- [19] Markforged, “Onyx” , <https://markforged.com/jp/materials/plastics/onyx>
- [20] formlabs, “Formlabs Stereolithography 3D Printers Tech Specs” , <https://formlabs.com/3d-printers/resin/tech-specs/>