

6 自由度の力覚フィードバックを有する 空中マニピュレーションのための遠隔操作システム

○ 奥 朋哉 (東京大学), 金子 輝太郎 (東京大学), 趙 漠居 (東京大学)

Teleoperation system with 6-DoF haptic feedback for aerial manipulation

○ Tomoya OKU (The University of Tokyo), Kotaro KANEKO (The University of Tokyo),
Moju ZHAO (The University of Tokyo)

Abstract : Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aequale doleamus animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et.

1. 緒言

近年, 空中マニピュレーション (aerial manipulation) が注目を集めている. ドローンをはじめとする空中ロボット (aerial robot) は高い機動性と広い作業空間を持ち, 遠隔地や人間の立ち入りが困難な場所での作業が可能になる. また, 高所や有害物質が漂う環境など, 人間にとって危険な場所での接触作業も可能にする. 作業はロボットが完全自律で行なうことが理想であり, 自律制御の研究は大きく進展している¹⁾. しかし, 空中作業環境は複雑で外乱も多いため, 人間による操縦は現在のところ必要不可欠である²⁾. 人間の判断能力を活用することで, 未知の環境や作業対象に対してもリアルタイムに最適対応が可能となる. この理由から, 空中ロボットの遠隔操作 (teleoperation) の研究が進められてきた.

従来の研究の多くは, 3つの並進運動自由度と1つの回転運動自由度の4自由度を持つ不足駆動型マルチロータを対象としており³⁾⁻⁶⁾, 一般的なジョイスティック型デバイスで操作可能であった.

一方で, より複雑な空中作業のために, 3つの並進運動自由度と3つの回転運動自由度の6自由度を持つ完全駆動型マルチロータの研究も進められており, この操作には新しいデバイスを必要とする.⁷⁾では地面に固定されたロボットアームを操作デバイスとする方法が提案されている. このデバイスは6自由度の独立入力を可能とするが, 基部が固定されているため移動が困難であるという欠点がある. 一方, 人間の手の位置と姿勢を感知して操作入力を得る浮遊型操作デバイス⁸⁾が提案されている. この方法ではデバイスの一部を固定する必要がないため, 操作者の手の動きを妨げず, 完全駆動型空中ロボットの遠隔操作に適している.

遠隔操作ではロボットから操縦者へのフィードバックが不可欠であり, 特に外部環境との接触を伴う作業では円滑な操作のために力覚フィードバックが重要である. 多くの研究で用いられる力覚フィードバックは振動など単純なものが多い. しかし, 作業を円滑に行うためには, デバイスに加わる力を力として表現することが望ましい. 例えば, 6つのプロペラを用いてハンドルに3次元力を加えるデバイス⁹⁾や, 長い棒の両端に2つ

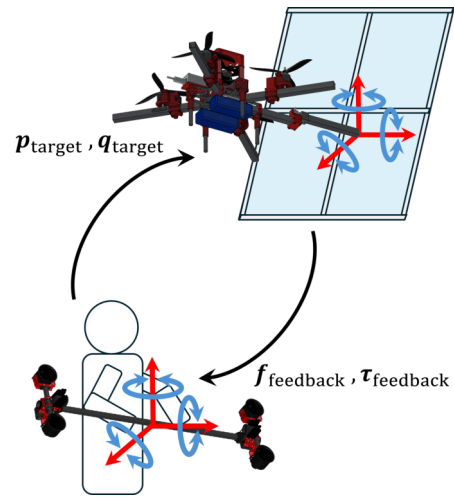


Fig. 1 Diagram of our proposed teleoperation system. p_{target} and q_{target} are target position and quaternion of the aerial robot, f_{feedback} and τ_{feedback} are feedback forces and torques.

のクアッドロータを取り付けることで, 1方向の力と2方向のトルクを提供するデバイス¹⁰⁾が提案されている. これらの研究は, 基部を固定せずに操作者に力とトルクを提示することに成功しているが, 6次元の力とトルクを独立して提示することはできない. したがって, 本研究では, 3次元の力と3次元のトルクで垂直に配置された6次元ベクトルである全レンチを独立して提示できる浮遊型デバイスを提案する. 遠隔操作システムの全体図を Fig. 1 に示す. 本研究の貢献は以下の通りである.

- 操縦者に6次元のレンチをすべて独立して提示できる浮遊型遠隔操作デバイスを提案する.
- 完全駆動型空中ロボットの全自由度を同時に制御可能な6次元レンチフィードバックを備えた遠隔操作システムを提案する. これにより精密かつ長距離操作を実現する.
- 障害物回避や傾斜壁の清掃を含む実験を通じて, 提案システムの有効性を検証した.

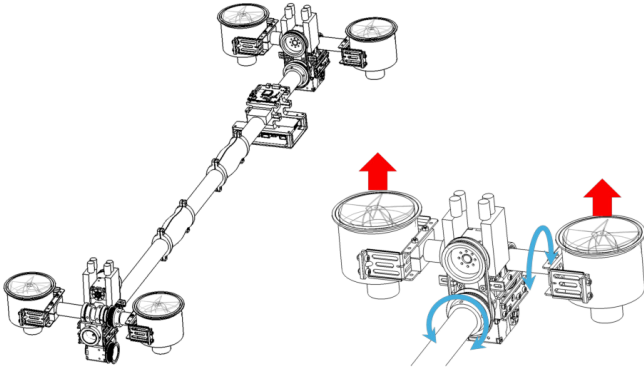


Fig. 2 Hardware design of proposed teleoperation device. Left: Whole view. Right: Thrust vectoring mechanism. The red arrows mean the thrust, and blue arrows is the rotational direction.

2. Twin-Hammer

2.1. デザイン

本研究で用いた遠隔操作デバイス「Twin-Hammer」は空中ロボットのタスク実行を容易に実行することを可能にする。人間が行なう多くのタスクは様々なツールを必要とし、これらのツールの操作を通して外界と相互作用し、反力に関する情報を得る。したがって、遠隔操作によりタスクを実行する場合には、ロボットのツールが操縦者の手元に物理的に存在しているかのようにデバイスを握り、操縦できることが直観的である。1章で述べたように、空中ロボットに対する遠隔操作では、デバイスは空中に浮遊しており、6次元のレンチを独立に提示できる必要がある。これらの機能を実現するために、我々は推力と推力偏向機能を用いた。

推力偏向機能はZhaoら¹¹⁾によって提示されたものの修正版である。Fig. 2の右側に示すように、この推力偏向機能は2方向に回転させることができる。両端部に推力を生むロータを2つ取り付けることにより、合計で4自由度を持つ。ツールのように設計された長い棒の両端部にこのモジュールを取り付けることで、全体としてこのデバイスは8自由度の操作自由度を得る。この自由度は我々が望むレンチの6自由度よりも多いため、すべてのレンチを冗長性を持って扱うことを可能にする。

2.2. 制御

本デバイスの制御自由度はFig. 3の上側に示す通りであるが、下側に示す仮想推力で考える。まず、仮想推力ベクトルを次のように定義する。

$$\mathbf{f}_{v1} = (f_{v1x} \ f_{v1y} \ f_{v1z})^T \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_{v2} = (f_{v2x} \ f_{v2y} \ f_{v2z})^T \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_v = (f_{v1x} \ f_{v1y} \ f_{v1z} \ f_{v2x} \ f_{v2y} \ f_{v2z})^T \quad (3)$$

仮想推力 \mathbf{f}_v から所望のトルクへの割当行列 (allocation matrix) を式 (4) のように表せる。

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \text{skew}(\mathbf{p}_{v1}) & \text{skew}(\mathbf{p}_{v2}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{I}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は単位行列、 $\mathbf{p}_{vi} \in \mathbb{R}^3$ は仮想推力 $\mathbf{f}_{vi} \in \mathbb{R}^3$ の点の位置ベクトル、 $\text{skew}(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ の交代行列であり、式 (5) のように外積を行列で表現できる。

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \text{skew}(\mathbf{a})\mathbf{b} \quad (5)$$

このとき、所望のレンチである式 (6) を用いて式 (7) のように書ける。

$$\mathbf{W}_{\text{des}} = (F_{\text{des}x} \ F_{\text{des}y} \ F_{\text{des}z} \ T_{\text{des}x} \ T_{\text{des}y} \ T_{\text{des}z})^T \quad (6)$$

$$\mathbf{Q}_1 \mathbf{f}_v = \mathbf{W}_{\text{des}} + \mathbf{g} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{g} = (0 \ 0 \ Mg \ 0 \ 0 \ 0)^T$ は重力項である。ただし、 M はデバイスの質量であり、 g は重力加速度である。

x 軸まわりのトルクを除いた所望のレンチである式 (8) を用いて、式 (9) のように書ける。

$$\mathbf{W}'_{\text{des}} = (F_{\text{des}x} \ F_{\text{des}y} \ F_{\text{des}z} \ T_{\text{des}y} \ T_{\text{des}z})^T \quad (8)$$

$$\mathbf{Q}'_1 \mathbf{f}_v = \mathbf{W}'_{\text{des}} + \mathbf{g}' \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{g}' = (0 \ 0 \ Mg \ 0 \ 0)^T$ は重力項である。また、仮想推力 \mathbf{f}_v は式 (10) のように求められる。

$$\mathbf{f}_v = \mathbf{Q}_1^{\#} (\mathbf{W}'_{\text{des}} + \mathbf{g}') \quad (10)$$

また、 $\mathbf{Q}_1^{\#} \in \mathbb{R}^{6 \times 5}$ は x まわりのトルクと一致する第4成分を持った \mathbf{Q}'_1 の疑似逆行列である。

また、ベクトル角は以下のように計算される。このマイナスはなぜ? $\rightarrow \theta$ の決め方

$$\theta_i = \arctan\left(-\frac{f_{v1y}}{f_{v1z}}\right), \quad (11)$$

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{f_{v1x}}{-f_{v1y} \sin \theta_i + f_{v1z} \cos \theta_i}\right) \quad (12)$$

x 軸回りに生じる counter トルクは次のように表される。ここで、 I_i は x 軸回りの慣性モーメントである。

$$\tau_{\text{counter}} = \sum I_i \ddot{\theta}_i \quad (13)$$

仮想推力と x 軸回りのトルクから実際の推力への割当行列は以下のように表現される。

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ d_1 \cos \varphi_1 & d_2 \cos \varphi_1 & -d_3 \cos \varphi_2 & -d_4 \cos \varphi_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

ここで、 d_1, d_2, d_3, d_4 は各ローターからデバイスの縦方向までの長さである。

また、実際の推力 $\mathbf{f} = (f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4)^T$ は以下のように計算される。

$$\mathbf{f} = \mathbf{Q}_2^{\#} \begin{pmatrix} |f_{v1}| \\ |f_{v1}| \\ T_{\text{des}x} + \tau_{\text{counter}} \end{pmatrix} \quad (15)$$

ここで、 $\mathbf{Q}_2^{\#} \in \mathbb{R}^{4 \times 3}$ は \mathbf{Q}_2 の疑似逆行列である。

ローターによって生じる力の範囲には限りがあるため、ここで得られた計算は常に実行可能である訳ではない。もし、実行可能範囲の外にある場合、実行可能な値の中で最も近い値で再計算することとなる。

3. システム

本章では、完全駆動型空中ロボットを用いて作業を実行する遠隔操作システムについて述べる。このシス

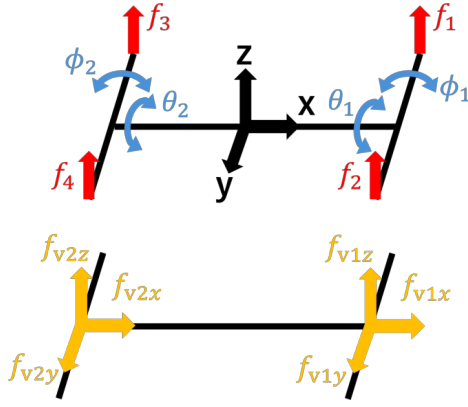


Fig. 3 Top: Control DoF of the proposed device. The black allows shows the handle coordinate system fixed on the device. Bottom: Virtual thrust considered on a control model.

テムは、操縦者からロボットへの位置指令の生成と、ロボットから操縦者への力フィードバックの生成から構成される。

3.1. 位置操縦コマンド

空中ロボットの位置操作については主に2つの機能が要求される。1つは長距離の移動であり、実質的に無限の広さを持つ空間を移動するために高速な移動が必要である。もう1つは精密な操作であり、正確に細かい作業を行うための機能である。これら2つの機能を達成するため、我々は位置マッピングモードと速度マッピングモードを提案した。

3.1.1. 位置マッピングモード

位置マッピングモードは正確なタスク実行のために用いる。このモードにおいて目標位置 $\mathbf{p}_{\text{target}}$ と目標四元数 $\mathbf{q}_{\text{target}}$ は以下のように計算される。

$$\mathbf{p}_{\text{target}} = \mathbf{p}_{\text{robot}}(t_0) + \mathbf{k}_1 \odot (\mathbf{p}_{\text{device}}(t) - \mathbf{p}_{\text{device}}(t_0)) \quad (16)$$

$$\mathbf{q}_{\text{target}} = \mathbf{q}_{\text{device}}(t) \quad (17)$$

ここで、 t_0 はこのモードに入った初期時刻、 \odot はHadamard積であり、ベクトルの各成分の積を表す。 \mathbf{k}_1 はタスクのタイプに応じて調整されるスケーリングパラメータである。

3.1.2. 速度マッピングモード

一方、速度マッピングモードは広域移動のために用いる。このモードにおいて目標位置 $\mathbf{p}_{\text{target}}$ と目標四元数 $\mathbf{q}_{\text{target}}$ は以下のように計算される。

$$\mathbf{p}_{\text{target}} = \mathbf{p}_{\text{robot}}(t) + \mathbf{k}_2 \odot (\mathbf{p}_{\text{device}}(t) - \mathbf{p}_{\text{device}}(t_0)) \quad (18)$$

$$\mathbf{q}_{\text{target}} = \mathbf{q}_{\text{robot}}(t) + \mathbf{k}_3 \odot (\mathbf{q}_{\text{device}}(t) - \mathbf{q}_{\text{device}}(t_0)) \quad (19)$$

ここで、 $\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$ はスケーリングパラメータである。各時刻においてロボットの位置と四元数にデバイスの変位量を加えることはロボットの速度を変化させることに等しい。

このモードでは、操作者が装置の原点を認識することが重要であり、ジョイスティック操作時にも同様である。本研究で提案する装置は、装置の原点からの移

動量に対応する反力を提供することで、操作者が原点を認識できるようにする。コマンドや制御と同様に、フィードバック力の大きさを装置の移動量に比例させると、原点付近の力が小さくなり、原点を視認しにくくなる。そこで、以下のように対数変換を用いる。

$$\mathbf{f}_{\text{feedback}} = \log[\mathbf{k}_4 \odot (\mathbf{p}_{\text{device}}(t) - \mathbf{p}_{\text{device}}(t_0))] \quad (20)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{feedback}} = \log[\mathbf{k}_5 \odot (\mathbf{q}_{\text{device}}(t) - \mathbf{q}_{\text{device}}(t_0))] \quad (21)$$

ここで、 $\mathbf{k}_4, \mathbf{k}_5$ はスケーリングパラメータである。この変換により原点付近のフィードバック力が大きくなり、原点の認識が容易になる。さらに操作の難易度を低減するため、原点付近にはロボットに指令を送らない停止ゾーンを設定している。これら二つのモードを適切に活用することで、広い作業空間において迅速かつ精密な作業が可能となる。

3.2. カとトルクのフィードバック

空中ロボットの作業用エンドエフェクタには6自由度の力とトルクが作用する。作業を円滑に遂行するためには、操作者がこれら6次元の力とトルクを正確に認識しなければならない。Stevensら¹²⁾の研究により、人間の知覚における変化の大きさと実際の物理的刺激の大きさの間には、以下に示すような関係があることが示されている。

$$\Phi(I) = kI^\alpha \quad (22)$$

ここで、 $\Phi(I)$ は知覚される刺激の大きさ、 I は実際の物理的刺激の大きさ、 k は比例定数、 α は刺激の種類に依存する指数である。腕全体で重力を認識する際の α は1.45であるとされる。本研究で提案した装置は操作者の腕全体に力覚フィードバックを提供するため、物理的刺激は同一であるとみなす。

操作者がレンチの変化を正しく認識できるようにするためには、この指数関数的な関係を打ち消し、知覚を直線的にすることが重要である。したがって、操作者に提示されるレンチは、ロボットマニピュレータに適用されるレンチから以下のように生成される。

$$\mathbf{w}_{\text{feedback}} = \log_\alpha(\mathbf{k}_7 \odot \mathbf{w}_{\text{measured}}) \quad (23)$$

ここで、 $\mathbf{w}_{\text{feedback}}$ は操縦者にフィードバックされるレンチであり、 $\mathbf{w}_{\text{measured}}$ はロボットのエンドエフェクタで計測されるレンチである。 \mathbf{k}_7 は大きさを調節するパラメータである。

4. 実験

吾輩は猫である。名前はまだ無い。どこで生れたかとんと見当がつかぬ。何でも薄暗いじめじめした所でニャーニャー泣いていた事だけは記憶している。吾輩はここで始めて人間というものを見た。しかもあとで聞くとそれは書生という人間中で一番穢悪な種族であったそうだ。この書生というのは時々我々を捕えて煮て食うという話である。しかしその当時は何という考もなかったから別段恐いとも思わなかった。ただ彼の掌に載せられてスーと持ち上げられた時何だかフワフワした感じがあったばかりである。掌の上で少し落ちついて書生の顔を見たのがいわゆる人間というものを見始であろう。この時妙なものだと思った感じが今でも残っている。第一毛をもって装飾されべきはずの顔がつ

るつるしてまるで薬缶だ。その後猫にもだいぶ逢ったがこんな片輪には一度も出会わした事がない。のみならず顔の真中があまりに突起している。そうしてその穴の中から時々ふうふうと煙を吹く。どうも咽せぼくて実に弱った。これが人間の飲む煙草というものである事はようやくこの頃知った。この書生の掌の裏でしばらくはよい心持に坐っておったが、しばらくすると非常な速力で運転し始めた。書生が動くのか自分だけが動くのか分らないが無暗に眼が廻る。胸が悪くなる。到底助からないと思っていると、どさりと音がして眼から火が出た。それまでは記憶しているがあとは何の事やらいくら考え出そうとしても分らない。ふと気が付いて見ると書生はいない。たくさんおった兄弟が一疋も見えぬ。肝心の母親さえ姿を隠してしまった。その上今までの所とは違って無暗に明るい。眼を明いていられぬくらいだ。はてな何でも容子がおかしいと、のそのそ這い出して見ると非常に痛い。吾輩は藁の上から急に笹原の中へ棄てられたのである。ようやくの思いで笹原を這い出すと向うに大きな池がある。吾輩は池の前に坐ってどうしたらよかろうと考えて見た。別にこれという分別も出ない。しばらくして泣いたら書生がまた迎に来てくれるかと考え付いた。ニャー、ニャーと試みにやって見たが誰も来ない。そのうち池の上をさらさらと風が渡って日が暮れかかる。腹が非常に減って来た。泣きたくても声が出ない。仕方がない、何でもよいから食物のある所まであるこうと決心をしてそろりそろりと池を左りに廻り始めた。どうも非常に苦しい。そこを我慢して無理やりに這って行くとようやくの事で何となく人間臭い所へ出た。ここへ這入ったら、どうにかなると

5. 結言

吾輩は猫である。名前はまだ無い。どこで生れたかほとんど見当がつかぬ。何でも薄暗いじめじめした所でニャーニャー泣いていた事だけは記憶している。吾輩はここで始めて人間というものを見た。しかもあとで聞くとそれは書生という人間中で一番憐悪な種族であったそうだ。この書生というのは時々我々を捕えて煮て食うという話である。しかしその当時は何という考もなかったから別段恐いとも思わなかった。ただ彼の掌に載せられてスーと持ち上げられた時何だかフワフワした感じがあったばかりである。掌の上で少し落ちついて書生の顔を見たのがいわゆる人間というものの見始であろう。この時妙なものだと思った感じが今でも残っている。第一毛をもって装飾されべきはずの顔がつるつるしてまるで薬缶だ。その後猫にもだいぶ逢ったがこんな片輪には一度も出会わした事がない。のみならず顔の真中があまりに突起している。そうしてその穴の中から時々ふうふうと煙を吹く。どうも咽せぼくて実に弱った。これが人間の飲む煙草というものである事はようやくこの頃知った。この書生の掌の裏でしばらくはよい心持に坐っておったが、しばらくすると非常な速力で運転し始めた。書生が動くのか自分だけが動くのか分らないが無暗に眼が廻る。胸が悪くなる。到底助からないと思っていると、どさりと音がして眼から火が出た。それまでは記憶しているがあとは何の事やらいくら考え出そうとしても分らない。ふと気が付いて見ると書

生はいない。たくさんおった兄弟が一疋も見えぬ。肝心の母親さえ姿を隠してしまった。その上今までの所とは違って無暗に明るい。眼を明いていられぬくらいだ。はてな何でも容子がおかしいと、のそのそ這い出して見ると非常に痛い。吾輩は藁の上から急に笹原の中へ棄てられたのである。ようやくの思いで笹原を這い出すと向うに大きな池がある。吾輩は池の前に坐ってどうしたらよかろうと考えて見た。別にこれという分別も出ない。しばらくして泣いたら書生がまた迎に来てくれるかと考え付いた。ニャー、ニャーと試みにやって見たが誰も来ない。そのうち池の上をさらさらと風が渡って日が暮れかかる。腹が非常に減って来た。泣きたくても声が出ない。仕方がない、何でもよいから食物のある所まであるこうと決心をしてそろりそろりと池を左りに廻り始めた。どうも非常に苦しい。そこを我慢して無理やりに這って行くとようやくの事で何となく人間臭い所へ出た。ここへ這入ったら、どうにかなると

参考文献

- 1) L. Shi, N. J. H. Marcano, と R. H. Jacobsen, A Survey on Multi-unmanned Aerial Vehicle Communications for Autonomous Inspections, 2019 22nd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), **0-**, 580–587 (2019).
- 2) K. Darvish, L. Penco, J. Ramos, R. Cisneros, J. Pratt, E. Yoshida, S. Ivaldi, と D. Pucci, Teleoperation of Humanoid Robots: A Survey, *IEEE Transactions on Robotics*, **39-3**, 1706–1727 (2023).
- 3) A. Nourmohammadi, M. Jafari, と T. Zander, A Survey on Unmanned Aerial Vehicle Remote Control Using Brain–Computer Interface, *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 1–12 (2018).
- 4) M. Aggravi, C. Pacchierotti, と P. R. Giordano, Connectivity-Maintenance Teleoperation of a UAV Fleet With Wearable Haptic Feedback, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **18-3**, 1243–1262 (2021).
- 5) G. A. Yashin, D. Trinitatova, R. T. Agishev, R. Ibrahimov, と D. Tsetserukou, AeroVr: Virtual Reality-based Teleoperation with Tactile Feedback for Aerial Manipulation, 2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), **0-**, 767–772 (2019).
- 6) D. Kim と P. Y. Oh, Testing-and-Evaluation Platform for Haptics-based Aerial Manipulation with Drones, 2020 American Control Conference (ACC), **0-**, 1453–1458 (2020).
- 7) M. Allenspach, N. Lawrance, M. Tognon, と R. Siegwart, Towards 6DoF Bilateral Teleoperation of an Omnidirectional Aerial Vehicle for Aerial Physical Interaction, 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), **0-**, 9302–9308 (2022).
- 8) M. Macchini, T. Havy, A. Weber, F. Schiano, と D. Floreano, Hand-worn Haptic Interface for Drone Teleoperation, *CoRR* (2020).
- 9) S. Heo, C. Chung, G. Lee, と D. Wigdor, Thor's Hammer: An Ungrounded Force Feedback Device Utilizing

Propeller-Induced Propulsive Force, Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1–11 (2018).

- 10) T. Sasaki, R. S. Hartanto, K.-H. Liu, K. Tsuchiya, A. Hiyama, と M. Inami, Leviopole: mid-air haptic interactions using multirotor, ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies (2018).
- 11) M. Zhao, T. Anzai, F. Shi, X. Chen, K. Okada, と M. Inaba, Design, Modeling, and Control of an Aerial Robot DRAGON: A Dual-Rotor-Embedded Multilink Robot With the Ability of Multi-Degree-of-Freedom Aerial Transformation, *IEEE Robotics and Automation Letters*, **3**-2, 1176–1183 (2018).
- 12) S. S. Stevens, The Psychophysics of Sensory Function., *American Scientist*, **48**, 226–389 (1960).