6 自由度の力覚フィードバック搭載デバイスを用いた空中マニピュレーションのためのジェスチャー認識 (仮)

◯ 奥　朋哉 (東京大学)，金子　輝太朗 (東京大学)，趙　漠居 (東京大学)

Gesture Recognition system with the 6-DoF haptic feedback device 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 aeque 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 distinguique 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，遠隔地に加えて高所や有害物質が浮遊する環境など, 人間にとって危険な場所での接触作業を可能にする．そこで，ロボットが完全自律で作業することが理想であるが，自律制御の研究は大きく進展しているものの，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．人間の判断能力を利用することで, 未知の環境や対象物に対してもリアルタイムに最適な対応が可能となる．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アンダーアクチュエート型マルチロータ(4 DoF: 3 平行移動+1 回転) を対象としており，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フルアクチュエート型マルチロータ(6 DoF: 3 平行移動+3 回転) の研究も進められている．これらは新しい操作デバイスを必要とし，既存研究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[1] や，手の位置・姿勢を検出するフローティング型デバイスが提案されている．後者は操縦者の手の動きを妨げず，フルアクチュエート型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オペレータへのフィードバックが不可欠であり，特に環境との接触を伴う作業では力覚フィードバックが重要である．従来の研究では6次元の力・トルクを独立して提示することはできなかったが，本研究で用いるフローティング型デバイスは次元の力と3次元のトルクを独立に提示できる．これにより，フルアクチュエート型空中ロボットの全自由度を直感的に操作でき，さらに6次元の力覚フィードバックを得ながら精密作業と広域移動を両立できる．

しかし，現在は空中ロボットの飛行までの起動シーケンスおよび飛行中のモード切り替えを Twin-Hammer 単体で行うことはできない．Twin-Hammer に対して複数のボタンを取り付けるなどの方法も考えられるが，

そこで本研究では，このデバイスのさらなる機能として, デバイスを用いたジェスチャーによるコマンドを用いて空中ロボットのアーミング, モード切り替えなどの機能を可能にし，

2. Twin-Hammer

2.1. デザイン

本研究で用いた遠隔操作デバイス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, そして反力に関する情報を獲得する．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らによって提示されたものの修正版である[2] ．Fig. 1 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獲得する. 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

以下は全てデバイスに固定された慣性系で考える．Fig. 2 に仮想推力を示す.

$$Q_1 = \begin{pmatrix} I_3 & I_3 \\ skew(\boldsymbol{p}_{v1}) & skew(\boldsymbol{p}_{v2}) \end{pmatrix} \tag{1}$$

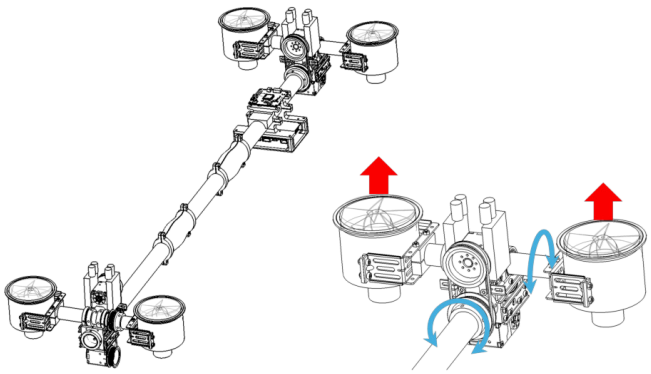

Fig. 1 Hardware design of proposed teleoperation device. Left:Whole view. Right:Thrust vectoring mechanism. The red arrows mean the thrust, and blue arrows is the rotational direction.

ただし，$I_3 \in \mathbb{R}^{3\times3}$は identity matrix，$\boldsymbol{p}_{vi}$ は仮想推力$\boldsymbol{f}_{vi}$の点での位置ベクトル，$skew(\boldsymbol{p})$ は $\boldsymbol{p}$の skew-symmetric matrix である．

仮想推力$\boldsymbol{f}_v = (f_{v1}\ \ f_{v2})^\top$ はx軸まわりのトルクを除いた所望のレンチ(2) から

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{des}} = \begin{pmatrix} F_{\mathrm{des}x} & F_{\mathrm{des}y} & F_{\mathrm{des}z} & F_{\mathrm{des}y} & F_{\mathrm{des}z} \end{pmatrix}^\top \tag{2}$$

から(3) のように求められる．

$$\boldsymbol{f}_v = Q_1^{\#}(\boldsymbol{W}_{\mathrm{des}} + \boldsymbol{g}) \tag{3}$$

ただし，$\boldsymbol{g} = (0\ \ 0\ \ Mg\ \ 0\ \ 0\ \ 0)^\top$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．また，$Q_1^{\#} \in \mathbb{R}^{6\times5}$は$x$まわりのトルクと一致する第 4 成分を持った$Q_1$の pseudo-inverse である．

また，ベクトル角は以下のように計算される．

$$\begin{aligned} \theta_i &= \arctan\left(-\frac{f_{viy}}{f_{viz}}\right), \\ \varphi_i &= \arctan\left(\frac{f_{vix}}{-f_{viy}\sin\theta_i + f_{viz}\cos\theta_i}\right) \end{aligned} \tag{4}$$

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．

$$\tau_{\mathrm{counter}} = \sum\left(I_i\ddot{\theta}_i\right) \tag{5}$$

仮想推力とx軸回りのトルクから実際の推力への allocation-matrix は以下のように表現される．

$$Q_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ d_1\cos\varphi_1 & d_2\cos\varphi_2 & -d_3\cos\varphi_1 & -d_4\cos\varphi_2 \end{pmatrix} \tag{6}$$

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$\boldsymbol{f} = (f_1\ \ f_2\ \ f_3\ \ f_4)^\top$は以下のように計算される．

$$\boldsymbol{f} = Q_2^{\#}\begin{pmatrix} |\boldsymbol{f}_{v1}| \\ |\boldsymbol{f}_{v1}| \\ T_{\mathrm{des}x} + \tau_{\mathrm{counter}} \end{pmatrix} \tag{7}$$

ここで，$Q_2^{\#} \in \mathbb{R}^{4\times3}$は$Q_2$の pseuso-inverse 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．

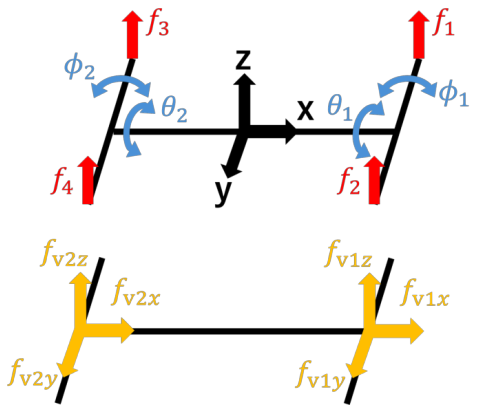

Fig. 2 Device

3. システム

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．

現在，

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獰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し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ぷうぷうと煙を吹く。どうも咽せぽくて実に弱った。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獰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し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ぷうぷうと煙を吹く。どうも咽せぽくて実に弱った。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] M. Allenspach, N. Lawrance, M. Tognon, and R. Siegwart, “Towards 6DoF Bilateral Teleoperation of an Omnidirectional Aerial Vehicle for Aerial Physical Interaction,” in *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2022, pp. 9302–9308. doi: 10.1109/ICRA46639.2022.9812346.

[2] M. Zhao, T. Anzai, F. Shi, X. Chen, K. Okada, and 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*, vol. 3, no. 2, pp. 1176–1183, 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2793344.