

移動体・インタフェースの知的統合化研究所

研究代表者 宮下 朋之
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

インフラ維持管理において、遠隔操作ロボットの需要が高まっている。阪神淡路大震災からの復旧を契機に、配管等を開けずに作業することが必須となった。このためにはロボットとオペレーターを一つのシステムとした見た際の状況認識、知能化、自動化の研究開発が求められることとなった。似たような事例としては、廃炉の点検などにおいても管内を走破し変形するロボットなどが IRID によって開発されており、プレイステーションコントローラなどによって動かされており、直感的に操作可能なインタフェースが求められている。

さらに、ドローンを用いた橋梁の点検なども重視されることとなった。現在は橋梁まで作業員が登るか吊るされて点検しているが、作業点検時の長時間の交通停止など非効率な点検を実施している。ドローン操作によって近接目視、打音検査を用いて橋梁を検査する手法が求められている。一方で、ドローンは政府機関や秘密機関への墜落、事故などによりドローン操作による規定が 2015 年より厳密化された。オペレーターは相応の訓練を必要と求められたが、現代のドローンニーズに反するものであり、より短期間での熟練が求められている。

これらの問題はいずれも、操作者の熟練度、能力に依存してしまうという共通課題がある。この課題は身体とかけ離れた構造をロボットはしており、直感的な操作が困難であるためである。従って、エンジニアはトライ・アンド・エラーによる非効率な開発をしている。

上記の課題から、「状況認識・知能化・自動化等の要素技術」を利用するための直感的に操作可能なマンマシンインターフェースのコア技術とそれらを設計開発する手法の構築が必須である。この手法を構築するために、操作者の人体特性に合わせた構造や制御設計をする。熟練者の標準的・共通的な人体特性モデルを抽出し、状況認知、操作の直感性が高いインタフェースを開発する。

2. 主な研究成果

当研究では、人間の身体とは構造の異なるロボットを直感的に操作する手法およびそれを用いた操縦環境の実現である。本年度は、アプリケーションとして、ドローンによる橋梁点検を対象として研究を進めた。ドローンを含めた人間が操縦する機械は、操作者の熟練度や能力に依存しがちである。この問題は多くのロボットは人間の身体とは異なる構造をしているために操作しにくいのであると考えられる。そこで、ロボットと人間との間の構造上の違いを補完するようなインタフェースを開発した。

インタフェースは特定のロボットに向けたものではなく、標準的で共通的な基盤技術となることをめざした。一般にクローラ型や水中探索型、配管点検、ドローンなど自由度は多様であるが、各自由度の組み合わせで成り立っている。また、人の腕は 7 自由度であり、これらの自由度を満たすためにインタフェースは XYZ、ピッチ、ヨー、ロールの 6 自由度を満たすものを開発した。

開発したインタフェースを図 1 に示す。当インタフェースは誰でも直感的に XYZ、ピッチ、ヨー、ロールの入力が可能となることを目指した。各軸にバネを入れてニュートラル位置に復元可能であり、バ

ネの反力によって操作量をユーザーが知覚しやすい。このインタフェースの利点は、ユーザーの身体をあえてロボットの直交座標系に合わせて拘束して操作させることで、操作量の知覚や制御をしやすくさせている点である。当インタフェースから、直交座標系で規定されたロボットの動きと、極座標系や筋骨格系などが複雑に混じった人間の身体との間の「身体性の違い」を補完している。

2020 年度は、本インタフェースによる操作時に人間動作の非線形性を取り扱った。ニューラルネットワークを使用し、操作軸の相互干渉を検知し、操作者が意図している操作入力に変換するものである。6 自由度インタフェースによる UAV の操作について、インタフェースを最適化し意図しない誤入力の発生や操作性の低下を解決するため(1)ニューラルネットワークを用いたインタフェースの入力識別の開発、(2)UAV の視野外飛行における、ニューラルネットワークによるインタフェースの最適化の有無による飛行への影響についての考察を研究目的と定め一連の研究を実施した。すなわち、(1)では、本研究で UAV の操縦に用いる X, Y, Z, Z 軸回りの回転(Yaw)の 4 軸について、入力状態と無入力状態を分類する LSTM モデルを開発し、それぞれの軸ごとの入力識別の検討を行い、X 軸で 99.0%, Y 軸で 96.5%, Z 軸で 97.0%, Yaw 軸で 96.0%の F1 スコア（適合率と再現率の調和平均）を得た。(2)では UAV の飛行制御プログラムに(1)で構築した LSTM モデルを用いた入力識別プログラムを開発し、LSTM を用いた入力識別を用いた場合と閾値による入力識別を用いた場合で飛行実験を実施し、比較検討を行った。特に飛行時間において 2 条件間で大きな差異が確認でき、飛行コース一周分の飛行時間が平均して (閾値, LSTM) = (143.0[s], 104.2[s]) となり、倍率にして、(閾値/LSTM) = 0.73 倍となった。よって、目的とした(1)(2)に対して、提案した LSTM を用いた入力識別が UAV の視野外飛行での操縦において操作性の向上に効果的であることを明らかにした。6 自由度インタフェースによる UAV の操作において発生する、意図しない誤入力や操作性の低下といった課題に対して、提案した手法によりそれらの発生の抑制を可能とすることが見込まれる。

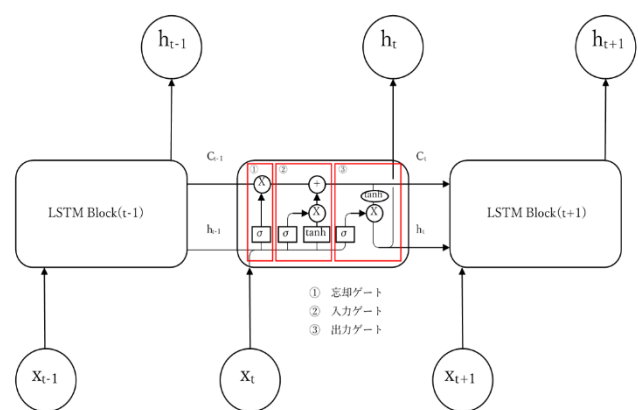
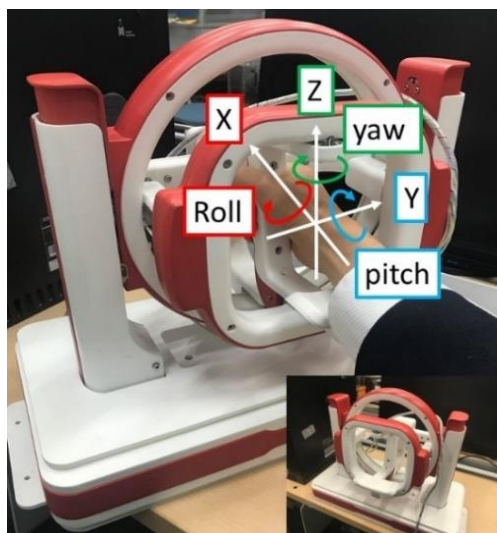
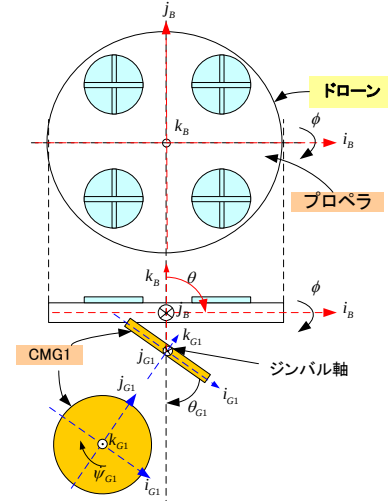


図 1 開発したインタフェース

点検作業では、一定時間での静止姿勢の実現が検査対象を精密に測定することができる。ドローンに CMG ジャイロを搭載し静止姿勢の実現を実現した。



• 運動方程式(角運動量保存則)

$$\begin{cases} J_{B1}\ddot{\phi} = -k_{\phi1}\dot{\phi} - k_{\phi2}(\phi - \phi_r) - J_{G3}\dot{\psi}_{G1}(\dot{\theta} + \dot{\theta}_{G1})\cos\theta_{G1} - 4J_{P3}\dot{\psi}_R\dot{\theta} - K_p(u_{G1} - \dot{\phi}_{G2}) \\ J_{B1}\ddot{\theta} = -k_{\theta1}\dot{\theta} - k_{\theta2}(\theta - \theta_r) - J_{G3}\dot{\psi}_{G2}(-\dot{\phi} + \dot{\phi}_{G2})\cos\phi_{G2} + 4J_{P3}\dot{\psi}_R\dot{\phi} - K_p(u_{G2} - \dot{\theta}_{G1}) \\ J_{G1}\ddot{\theta}_{G1} = J_{G3}\dot{\psi}_{G1}\dot{\phi}\cos\theta_{G1} - K_p(u_{G1} - \dot{\theta}_{G1}) \\ J_{G1}\ddot{\phi}_{G2} = -J_{G3}\dot{\psi}_{G2}\dot{\theta}\cos\phi_{G2} - K_p(u_{G2} - \dot{\phi}_{G2}) \end{cases}$$

- ドローンのピッチ角 ϕ , ロール角 θ , CMG のジンバル角 θ_{G1}, ϕ_{G2}

• 状態方程式(運動方程式を線形近似化)

$$\begin{aligned} \cdot \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u, \quad u = \begin{bmatrix} u_{G1} \\ u_{G2} \end{bmatrix} = -F \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \\ \cdot \quad \text{状態変数 } x &= [\phi - \phi_r \quad \theta - \theta_r \quad \theta_{G1} \quad \phi_{G2}]^T, \quad z = \begin{bmatrix} \theta_{G1r} - \theta_{G1} \\ \phi_{G2r} - \phi_{G2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

• 制御則(最適レギュレータ法)

- 制御入力とフィードバックゲイン
- $u_{G1} = -f_1 \times \phi - f_2 \times \dot{\phi} - f_3 \times \theta_{G1} - f_4 \times \int \theta_{G1} dt - f_5 \times \dot{\theta}_{G1}$
- $F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4 \quad f_5] = [-7 \quad 0 \quad 1.5 \quad 0.01 \quad 0]$

3. 共同研究者

菅野 重樹 (創造理工学部・総合機械工学科・教授)

上杉 繁 (創造理工学部・総合機械工学科・教授)

三浦 智 (創造理工学部・助教)

石田 健蔵 (客員上級研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) Brain-Machine Interface Using Functional Electrical Stimulation and Motion-Related Cortical Potentials Identified by a Support Vector Machine, S Miura, J Takazawa, Y Kobayashi, MG Fujie, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 26 (2), 1013-1021
- (2) Small-scale Human Impact Anthropomorphic Test Device Using the Similarity Rule, S Miura, S Takahashi, V Parque, T Miyashita, IEEE Transactions on Industrial Electronics
- (3) Bi-rigid guide wire enables endoscope insertion into winding small gas pipelines, S MIURA,

T NAKAGAMI, V PARQUE, T MIYASHITA 、Mechanical Engineering Journal 7 (4), 20-00088-20-00088

(4) CMG(コントロール・モーメント・ジャイロ)によるドローンの姿勢制御、大内 茂人, 小谷 齊之, 井上 健人, 稲葉 毅, 宮下 朋之, 野口 宏実、電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌)、2021 年 141 巻 3 号 p.436-445

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

5. 研究活動の課題と展望

開発したインターフェースは 6 自由度である。上下左右前後の並進移動に 3 自由度があり、手首の屈曲に合わせて回転に 3 自由度がある。人の意図した方向への正確な入力を実現するために機械学習等を用い操作性能を向上し操作者の負担を軽減した操作インターフェースを開発することができた。