

新しいエアモビリティに対するストレス評価技術の研究

国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

原 進

1. はじめに

ドローンが大衆化し、物流における産業用ドローンや移動インフラとして「空飛ぶクルマ」が実用化されようとしている。それら機体に関する安全性や性能の研究開発が盛んなのに対し、空の移動革命¹⁾の社会受容性に関する研究はあまり行われていない。一般的に社会受容性とは、技術的・制度的・市場的側面²⁾で考えられるが、本研究では我々市民が騒音や心理的恐怖をどの程度受け入れられるのかという心理的な側面を意味する。過去の新インフラ導入に際し、こうした社会受容性を軽んじた結果、空港設置や新幹線の敷設後に住民運動が生じてしまった。この反省を活かさなければならぬが、社会受容性評価のための具体的な評価軸は著者らの知る限り現在見当たらない。よって、空飛ぶクルマのスムーズな市場導入を可能にするためには、社会受容性の客観評価手法を確立させ、受容基準を設定し、それをもとに開発する必要がある。Hara らは、簡易脳波計測にもとづくアナライザを用いて一種のストレス度を計測することで、客観的な社会受容性の評価を試みた³⁾。

また、山内らの騒音に対する心理社会調査によると、同じ Mobility でも用途やステークホルダーが違えばストレス耐性も変わるという仮説が示されている⁴⁾。さらに、ドローンの騒音から計測した主観ストレスをドローン飛行運用条件の策定に還元する先行研究は見られる⁵⁾。しかしながら、一律に騒音レベルを定め、技術者がそれに合わせて開発を行っても、市民や利用者の社会受容性向上には必ずしもつながらない。ゆえに用途やステークホルダーごとに受容できる騒音レベルを探索する必要があるが、そのような研究はまだ見られない⁶⁾。そこで Takahara らは、場面想定法を用いて用途ごとに受容できる騒音レベルを解明することを目的とする便益効果評価実験を行った⁷⁾。実験では空飛ぶクルマの場面想定を行った結果、社会的影響力の大きい用途において、通勤などの日常的な用途と比べて受容できる騒音レベルが高くなる可能性が示された。しかしながら、得られたデータの信頼性が十分でなかったため、実験環境の改善とストレスの要因を調べる必要があった。また、被験者がいくら場面想定を十分にできたとしても、本物の空飛ぶクルマと CG 間における乖離は無視し難い。そのため、実験環境を整えて本物の空飛ぶクルマと CG 間におけるディスクレパンシー(乖離)を小さくする必要がある。

本研究では、実際の空飛ぶクルマを用いて実験を行うことは難しいため、ドローンを用いてこの種の検討を行う。すなわち、簡易脳波計測にもとづくアナライザを用いて、実機ドローンと CG ドローンにおけるストレス度のディスクレパンシーについて評価することを通し、対象を空飛ぶクルマとする場合に必要の実験環境構築の基礎的な考察を行う。将来的には、本研究は空飛ぶクルマのスムーズな社会実装に資することを目指している。本報告では、一般の参加者を対象にするのではなく、著者が所属する研究グループの学生を対象に実施された予備的な実験について述べる。また、今回の予備的な実験に関して、4-3 節で説明している重み付けをせずに、より簡単な解析による結果をまとめたものもある⁸⁾。

2. 簡易脳波計による客観評価手法

社会受容性の評価において、感情の変化を評価するために社会心理学的なアンケート手法が採用されることが多い。しかし、アンケートでは主観的なプロセスが介入するため、リアルタイムで正確な感情変化を表現しているとは言い難い。本研究で使用した感性アナライザ（図1、2）とは、ストレス度、好き度、集中度、沈静度、興味度、集中度の5つの感情をリアルタイムで計測可能な簡易脳波計測にもとづくアナライザである⁹⁾。このリアルタイム性は時系列的な感性評価を行う際には非常に便利である。原理としては、脳波形状にもとづく特徴量と生体ホルモン量由来の感性指標値が1対1に対応付けられたものに当てはめるように、長年にわたって取得されたデータベースとパターンマッチングすることで、リアルタイムに脳波から感性指標値を推定している。これは感情に起因する生体ホルモン量と脳波の特徴量パターンを「ホルモン量→脳波パターン、脳波パターン→ホルモン量」の双方からエビデンスが取られたものとなっている。

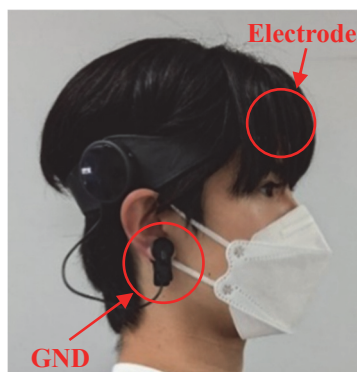


図1. 装着方法



図2. 感性アナライザ

3. ドローンが与えるストレスの要因

実機ドローンとCGドローンにおけるストレス度のディスクレパンシーについて評価するにあたり、ドローンが人々に与えるストレスの要因をもとにCGを制作する必要がある。ここでは、ドローンが人々に与えるストレスの要因について関連研究をもとに説明する。第一に、ドローンの騒音である。騒音はドローンが引き起こすストレスの中で最も強い要因だとされている。ドローンは他の環境音（例えば交通騒音や航空機騒音）とは異なり、高周波成分や純音を多く含む騒音を発生する⁶⁾。この特性により、ドローンの音は通常的环境音よりも不快と感じられることが多く、特にプロペラの回転による急速な音の変調がこの不快感を増大させる。第二に、ドローンのサイズである。ドローンのサイズが大きいほど視覚的な存在感が増し、威圧感や危険感が強くなることが報告されている¹⁰⁾。第三に、飛行高度である。低い高度で飛行するドローンは、騒音、安全性、プライバシーの侵害への不安が大きくなると報告されている¹⁰⁾。最後に、ドローンの飛行速度である。急な方向転換や高速度での飛行がストレスの要因となるとされている。具体的に、速度が上がるほどドローンの飛行予測が難しく、衝突の恐れを感じさせる⁶⁾。

以上のドローンが与えるストレスの要因をもとに、今回はストレスの要因として多く報告されていたドローンのサイズに着目し、実機ドローンとCGドローン間におけるストレス度のディスクレパンシーを評価する。

4. 実験方法

今回は予備的な実験として一般の参加者を対象にするのではなく、著者らが所属する研究グループの学生（20歳代6名）に十分な実施内容の説明を行い、了解の上で実験に協力していただいた。

4-1 実験環境およびドローンの飛行経路

使用した実機ドローンとCGドローンを図3、4に、実験環境およびドローンの飛行経路を図5、6に示す。実機ドローンの重量は249 g、サイズは298×373×101 mm、最大飛行時間は30 min、最接近時（被験者から0.8 m手前）の騒音レベルは70 dBである。

次に、ドローンの飛行経路について説明する。ドローンは、地上0.4 mの台から1.2 mの高さまで5 sかけて上昇し、被験者に向かって15 sかけて接近後、被験者から0.8 m手前で停止する。ここまでの20 s間の被験者の脳波データを感性アナライザにより計測する。停止後、被験者から0.8 m手前で 2 s間ホバリングしたのち、被験者の視界から消えるまで被験者から見て右方向に飛行する。CGドローンは実機ドローンのサイズ、騒音レベルおよび飛行経路にもとづいて制作された。



図3. 実機ドローン



図4. (左)CG1 ドローン(Small) (右)CG2 ドローン(Large)

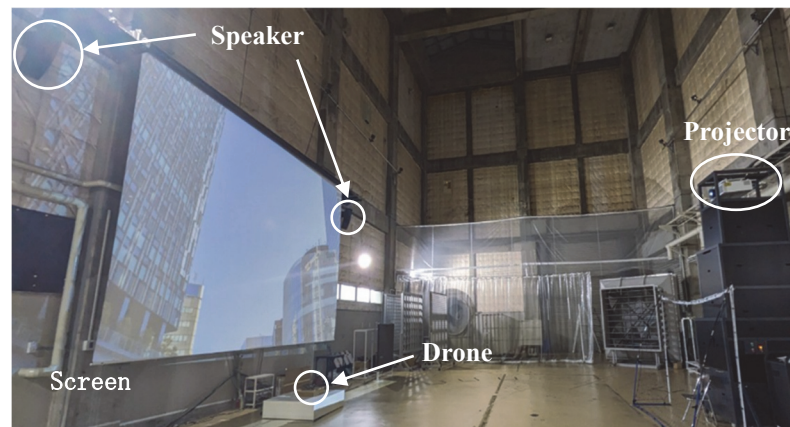


図5. 実験環境

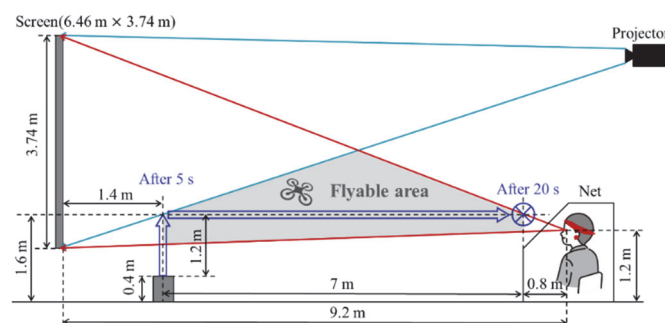


図6. 飛行経路

4-2 実験プロトコル

実験の流れを図7に示す。被験者は、実機ドローン、CG1ドローン、CG2ドローンの3種類のドローンを視聴してもらい、間にアンケートと安静な時間を確保するためのインターバルを取る。順序効果を考慮するため、被験者は一人ひとりが異なる順番で3種類のドローンを視聴する。

次にCGドローンについて説明する。CG1は実機ドローンの2/3スケールのCGドローンであり、CG2は実機ドローンの3/2スケールのCGドローンである。CGドローンの音は、実機ドローンの飛行音を録音し、加工・編集して使用した。また、騒音レベルは、音の大きさと周波数が小さいほど人の感覚が鈍くなるという人の耳の特性（A特性）¹¹⁾に従って測定されている。

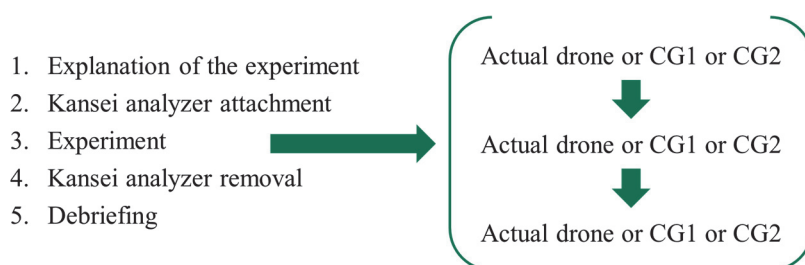


図7. 実験の流れ

4-3 解析方法

感性アナライザにより計測されたストレス度を用いた解析方法を説明する。これによって、CGドローンのサイズおよび騒音レベルを変えた時の、実機ドローンとのディスクレパンシーを評価できると考える。実機ドローンが飛行を始めた時点、またはCGドローンの映像を流した時点を開始に、前後20 s間のストレス度を計測する。計測された前後20 s間のデータは、それぞれのデータの平均値と標準偏差をもとに重み付けされる。重み付けをする理由としては、ストレス度が50 %から60 %に変化するの容易であるが、90 %から100 %に変化するの困難なことであり、その変化しにくさをデータに反映させるためである。 a_t を時刻 t [s] におけるストレス度、 μ を平均値、 σ を標準偏差とし、次のルールに従って、重み w_t を決定した。

- $|a_t - \mu| \leq \sigma$ のとき $w_t = 1$
 - $a_t \rightarrow a_t$
- $\sigma < |a_t - \mu| \leq 2\sigma$ のとき $w_t = 1.5$
 - $a_t \rightarrow 1.5a_t$
- $2\sigma \leq |a_t - \mu| < 3\sigma$ のとき $w_t = 2$
 - $a_t \rightarrow 2a_t$
- $3\sigma \leq |a_t - \mu|$ のとき $w_t = 2.5$
 - $a_t \rightarrow 2.5a_t$

感性アナライザによるストレス度計測をもとに、 i 人目参加者における飛行開始（または映像開始）前後20 s間のストレス度の加重平均はそれぞれ式（1）、（2）で表される。ただし、ドローンの飛行開始（または映像開始）時刻を t_s [s]とする。

$$\bar{a}_{i,1} = \frac{\sum_{t=t_s-20}^{t_s} w_t a_t}{\sum_{t=t_s-20}^{t_s} w_t} \quad (1)$$

$$\bar{a}_{i,2} = \frac{\sum_{t=t_s}^{t_s+20} w_t a_t}{\sum_{t=t_s}^{t_s+20} w_t} \quad (2)$$

式 (1) 、 (2) を用いて、 i 人目参加者のドローンタイプ j におけるストレス変化値は、式 (3) で表される。ただし、 $j = 0$ を実機ドローン、 $j = 1$ を CG1、 $j = 2$ を CG2 とする。

$$x_i^j = \bar{a}_{i,2} - \bar{a}_{i,1} \quad (j = 0, 1, 2) \quad (3)$$

式 (4) を用いて、実験グループ k のドローンタイプ j における平均変化値は式 (4) で表される。ただし、 N_k は各実験グループ (A または B) における参加者人数とする。

$$y_k^j = \frac{1}{N_k} \sum_i x_i^j \quad (j = 0, 1, 2, k = A, B) \quad (4)$$

式 (4) を用いて、実験グループ k における実機ドローンと CG ドローンの乖離値は式 (5) で表される。

$$D_k^j = |y_k^j - y_k^0| \quad (j = 1, 2, k = A, B) \quad (5)$$

式 (5) において、より小さい値を取ったドローンタイプが、より実機ドローンとのディスクレパンシーが小さいという解釈である。そして、式 (5) の値が 0 に近づくように CG を改良することで、適切なストレス度を評価できる社会受容性シミュレータを開発できると考える。

5. 実験結果と考察

5-1 実験結果

本報告の実際の実験では、参加者が少数であったため実験グループは A のみとした。各ドローンタイプのストレス平均変化値を図 8 に、各ドローンタイプのストレス変化値の分布を図 9 に示す。

図 8 より乖離値を計算すると、 $D_A^1 = 3.18$ 、 $D_A^2 = 1.04$ となり、実機ドローンよりも大きいサイズの CG ドローンの方が小さいサイズの CG ドローンと比べて乖離値が小さいことがわかる。しかしながら、 y_A^1 (CG1) と y_A^2 (CG2) の間に y_A^0 (実機) がいないことから、CG ドローンのサイズを変えて実機ドローンとの乖離値を 0 にすることは困難であると考ええる。

図 9 に示す CG1 のストレス変化値の分布において、実験参加者の一人が非常に大きな値 (16.7%) を取っており、この参加者のストレス変化値が CG1 のストレス平均変化値に大きく影響している。また、アンケート結果から、この参加者は他の実験参加者と比べて、より普段からドローンと関わっており、視聴してもらった 3 種類すべてのドローンに対してストレスを感じていないと回答して

いる。よって、CG1を視聴した際に、周囲の人や実験の緊張感など、ドローン以外の何かに対するストレスを強く感じたと考ええる。

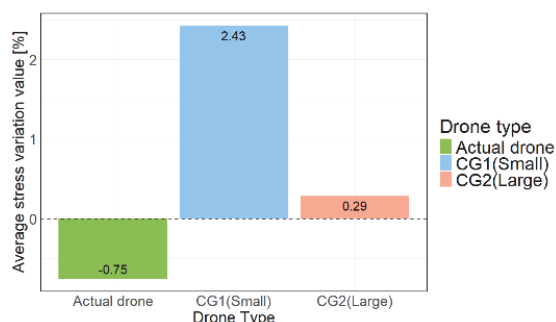


図 8. ストレス平均変化値 (N=6)

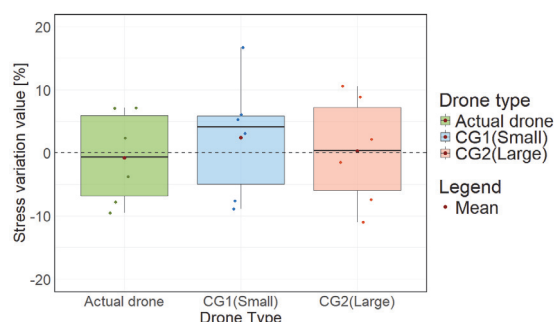


図 9. ストレス変化値の分布 (N=6)

5-2 考察

5-1節で述べた通り、CG1のストレス変化値において非常に大きな値を取った参加者はドローン以外の何かに対してストレスを強く感じたと考えられる。本来、3種類のドローンに対するストレス度から実機とCGのディスクレパンシーを評価することを目的としているため、CG1において非常に大きなストレス変化値を取った参加者のデータは、十分に信頼できるデータであると確言することはできない。そこで、CG1において非常に大きなストレス変化値を取った参加者を除いたストレス平均変化値とストレス変化値の分布をそれぞれ図10、11に示す。図10より乖離値を計算すると、 $D_A^1 = 0.27$, $D_A^2 = 0.81$ となり、実機ドローンよりも小さいサイズのCGドローンの方が大きいサイズのCGドローンと比べて乖離値が小さいことがわかる。さらに、 y_A^1 (CG1) と y_A^2 (CG2) の間に y_A^0 (実機) があることから、CGドローンのサイズを変えて実機ドローンとの乖離値を0に近づけることは可能であると考えられる。ただし、CGドローンのサイズの変化とストレス度の変化との間に線形的な関係性があるとは限らないため、図10からは実機ドローンに対するストレス平均変化値がCG1とCG2の間に存在するという事実までしか言えない。よって、サイズを変えたCGドローンの種類を増やして実験することで、乖離値を小さくする方法を探っていく必要がある。

今回の実験ではサンプルサイズが小さいため、参加者一人ひとりのデータが全体の結果に大きく影響してしまう。つまり、図8と図10を比べてわかるように、現状はサンプルサイズが違えば結果が大きく変わってしまうレベルである。よって、サンプルサイズを大きくして今後の本実験を行うことで、参加者一人ひとりのデータに大きく左右されない信頼できる結果を得ることができると考える。サンプルサイズを大きくして図10のような結果を得ることができれば、CGドローンのサイズを変えて実機ドローンとの乖離値を0に近づけることが可能である。さらに、乖離値を0に近づけることができれば、ドローンに対するストレス度を適切に評価できるシミュレータを開発することができると考える。

また、実機ドローンに対するストレス平均変化値が正の値を取るという仮説に反して、今回の実験では負の値を取った。これは、今回の参加者が研究室内で募集され、普段からドローンに慣れ親しんでいる人が多かったため、ドローンに対するストレスをあまり感じなかった可能性が考えられる。加えて、実験開始前の緊張によるストレスが、ドローンの飛行によるストレスよりも大きかった可能性も考えられる。

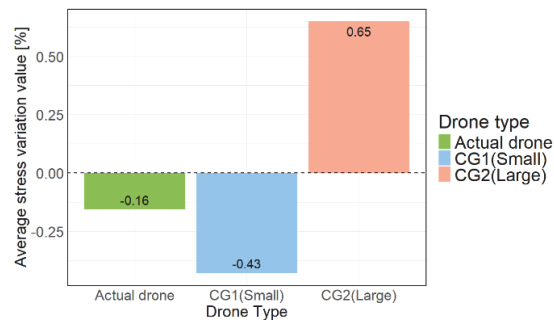


図 10 ストレス平均変化値 (N=5)

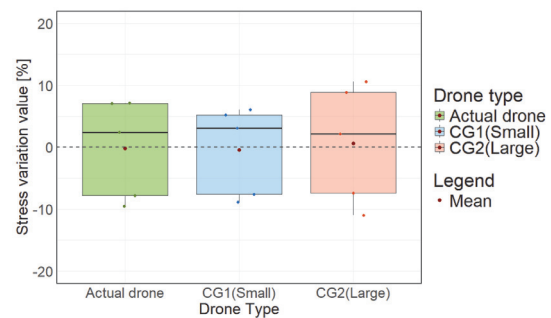


図 11 ストレス変化値の分布 (N=5)

6. 今後の展望

今回の実験結果から、次世代空中ビークルの社会受容性研究に向けて、適切な実験環境を構築するための調整が可能であることが推測された。すなわち、ドローンが空飛ぶクルマに置き換わってもストレスへの影響を調査するための実験環境整備が可能になるかもしれないことが示唆された。しかしながら、今回の実験はサンプルサイズが違くと結果が大きく変わってしまうレベルであり、かつ普段からドローンに慣れ親しんでいる人を対象に実験を行ったため、確証の得られる結果ではなかった。よって、今後の本実験ではサンプルサイズを増やし、かつ普段からドローンに慣れ親しんでいない人を対象にすることで、今回とは異なる信頼できる結果が得られると考える。また、今回は実機よりも小さいサイズのCG1と実機よりも大きいサイズのCG2を用いて実機ドローンとの比較を行ったが、今後は実機ドローンと同じサイズのCGドローンも取り入れることで、そもそも実機とCGとの間にストレス度の乖離があるのかも調べる必要がある。同じサイズのCGドローンを取り入れることで、実機とCG間の乖離の有無に加え、実機ドローンとの乖離値を小さくするために、どのようにCGドローンのサイズを変化させるべきかを調べることもできると考える。さらに、CGドローンのサイズを変化させてディスクレパンシーを評価するだけでなく、CGドローンの騒音レベルを変えてディスクレパンシーを評価することで、新たな発見が得られると考える。

まとめ

近年、UAMの研究が進む一方、社会受容性の検討が不足しており、本研究グループでは簡易脳波計を用いて社会受容性評価の研究に取り組んでいる。しかし、実際のUAMとCGの乖離は無視し難い問題であり、その乖離を小さくしなければ適切にUAMの社会受容性は評価できない。本研究では実際のUAMを使用することはできないため、ドローンを用いて実機とCGの乖離について評価することを通し、対象をUAMとする場合に必要な実験環境構築の基礎的な考察を行った。

謝辞

本研究は公益財団法人天野工業技術研究所2023年度（特別募集）研究助成金の支援を受けて実施されたことを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 空の移動革命に向けた官民協議会：“空の移動革命に向けたロードマップ(案)”，経済産業省，2023.

- 2) 松岡俊二：“社会イノベーションと地域の持続性-場の形成と社会的受容性の醸成”，有斐閣，2018.
- 3) Hara, S., Mitsukura, Y., and Kamide, H.：“Noise-Induced Stress Assessment —On the Difference Between Questionnaire-Based and EEG Measurement-Based Evaluations—”, *Technical Journal of Advanced Mobility*, Vol. 3-6, pp. 81-90, 2022.
- 4) 山内宏太朗, 久田満, 山本和郎：“近隣騒音の心理社会的構造に関する研究”，*総合都市研究*, Vol. 18, pp. 65-87, 1983.
- 5) Torija, A. J. and Nicholls, R. K.：“Investigation of Metrics for Assessing Human Response to Drone Noise”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 19-6, 3152, 2022.
- 6) Shaffer, B., Pieren, R., Heutschi, K., Wunderli, J., and Becker, S.：“Drone Noise Emission Characteristics and Noise Effects on Humans—A Systematic Review”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol.18-11, 5940, 2021.
- 7) Takahara, K., Kusano, S., Hara, S., Mitsukura, Y., and Kamide, H.：“Development of Benefit-Effect Assessment Method Using EEG Measurement for Improving Social Acceptance of Urban Air Mobilities”, *Proceedings of the International Council on Electrical Engineering Conference 2024*, O-129, 2024.
- 8) 福原悠介, 草野智, 原進, 満倉靖恵. 上出寛子：“ドローン飛行環境における脳波計測を用いたストレス解析のための実飛行と CG のディスクレパンシーの評価”，第 61 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会予稿集, C2, 2024.
- 9) Mitsukura, Y., “How Brain Waves Hint at Early Signs of Dementia”, *Nature Portfolio*, 2024.
- 10) Bretin, R., Khamis, M., and Cross, E., ““Do I Run Away?”: Proximity, Stress and Discomfort in Human-Drone Interaction in Real and Virtual Environments”, *Human-Computer Interaction -- INTERACT 2023*, Springer, pp. 525–551, 2023.
- 11) NTi Audio, “Frequency Weightings for Sound Level Measurements,”
<https://www.ntiaudio.com/en/support/knowhow/frequency-weightings-for-sound-level-measurements>, (Accessed: Jul. 9, 2024).