

F-REI 世界および日本における 最先端のドローン研究開発調査 報告書について

日本機械学会分科会主査
九州大学大学院 航空宇宙工学部門
東野伸一郎

世界および日本における 最先端のドローン研究開発調査報告書

- F-REI(福島国際研究教育機構)より日本機械学会が受託
(令和5年度新産業創出等研究開発事業に係る調査事業)
- 過酷環境に耐えうる最新ドローン開発の現状と課題・方向性
- ドローン(UAV)開発経験者中心に16名の研究者が調査・執筆
- 5つのカテゴリーの最新研究開発状況をサーベイ(344ページ)
 - **回転翼ドローン**
 - **固定翼ドローン**
 - **VTOLドローン**
 - **水中・水上ドローン**
 - **極限環境・特殊環境におけるドローン**

ドローン研究の現状と課題

- 先端ドローン研究がどこまでできているか？
- その中で日本の立ち位置はどうか？
- 課題は何か？

ドローン研究がどこまでできているか？

- マルチコプタ
 - **形態可変ドローン**, エアリアルマニピュレーション
 - **SLAM技術**(ミリ波レーダ, イベントカメラ併用)の進歩
 - **群制御**(センサフュージョン, SNN(Spiking Neural NetworkによるGNC(Guidance, Navigation, Control))
 - **AIによるGNC**
- VTOL
 - **V-bat** が秀逸(AIによるGNC, 非GPS環境対応)
 - 商用化されたチルトロータは少ない(WingCopter)
- 固定翼
 - 民生用はほぼ成熟→**VTOL**へ, 軍用は戦闘機との群飛行

機体形態等に関する研究の最新動向

テイルテイング型マルチロータ

- ・ 6自由度の位置・姿勢を独立に制御可能
- ・ 俊敏な動作



Yi Lu, Zefeng Chang, Yang Lu, Ling Ding, Nijia Ye, Design and dynamics of a novel parallel coaxial twin rotor of helicopter, *Aerospace Science and Technology*, Volume 127, (2022)

Foldable ドローン

- ・ 狭隘部の通り抜け, 壁面の近接検査, 物体の把持・運搬に適した形に形態を変化



(a) H morphology.



(b) O morphology.



(c) T morphology.

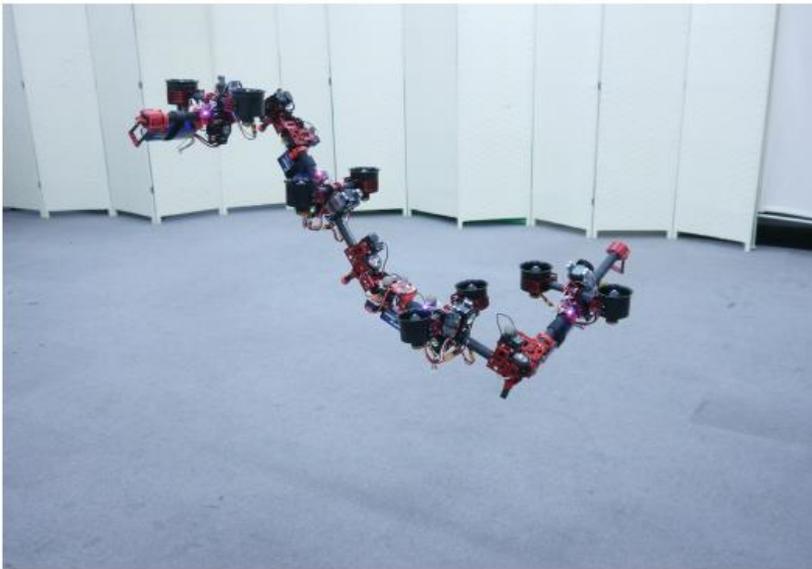


Falanga, D., Kleber, K., Mintchev, S., Floreano, D. and Scaramuzza, D., The Foldable Drone: A Morphing Quadrotor That Can Squeeze and Fly, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, (2019), pp. 209-216.

機体形態等に関する研究の最新動向

DRAGON

- ・多自由度の空中変形が可能
- ・デュアルロータマルチリンク
- ・推力制御とジンバル制御を独立制御，飛行実証



Zhao, M., Anzai, T., Shi, F., Chen, X., Okada, K. and Inaba, M., 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, (2018), pp. 1176-1183.

Cyclotech CCY-01

- ・垂直軸風車的プロペラを利用した新しいeVTOL
- ・ブレード角の変更により，推力方向を偏向
- ・ヤマトホールディングスと共同開発

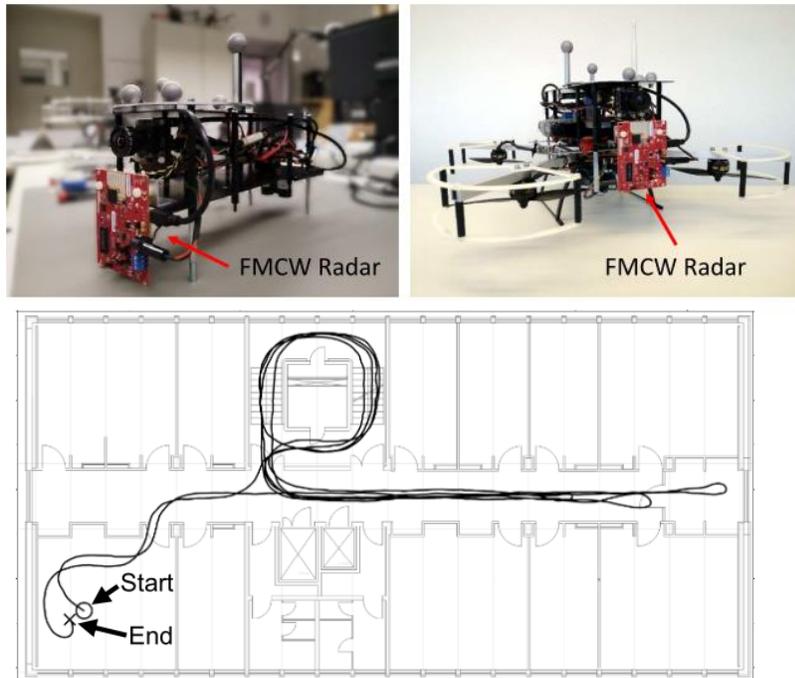


Cyclotech GmbH , <https://www.cyclotech.at/>

GNC(誘導・航法・制御)技術の最新動向

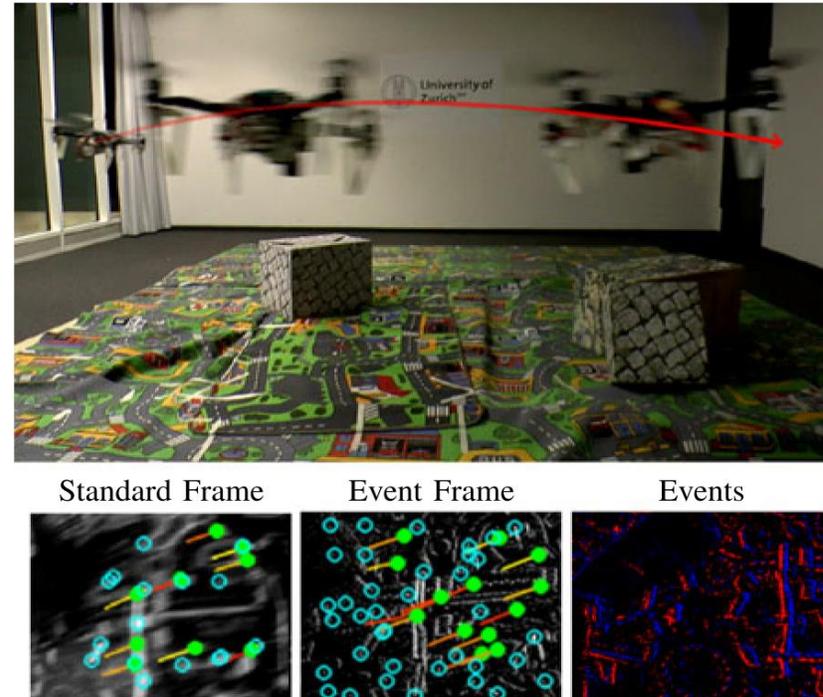
ミリ波レーダ利用のSLAM技術

- ・ミリ波レーダとIMUを併用(Radar Inertial Odometry, RIO)
- ・200mの移動において位置誤差0.6%未満



イベントカメラ併用のSLAM技術

- ・イベントカメラ(DVS)+通常カメラ+IMUを利用
- ・低速域(通常カメラ)~高速域(イベントカメラ)で有効



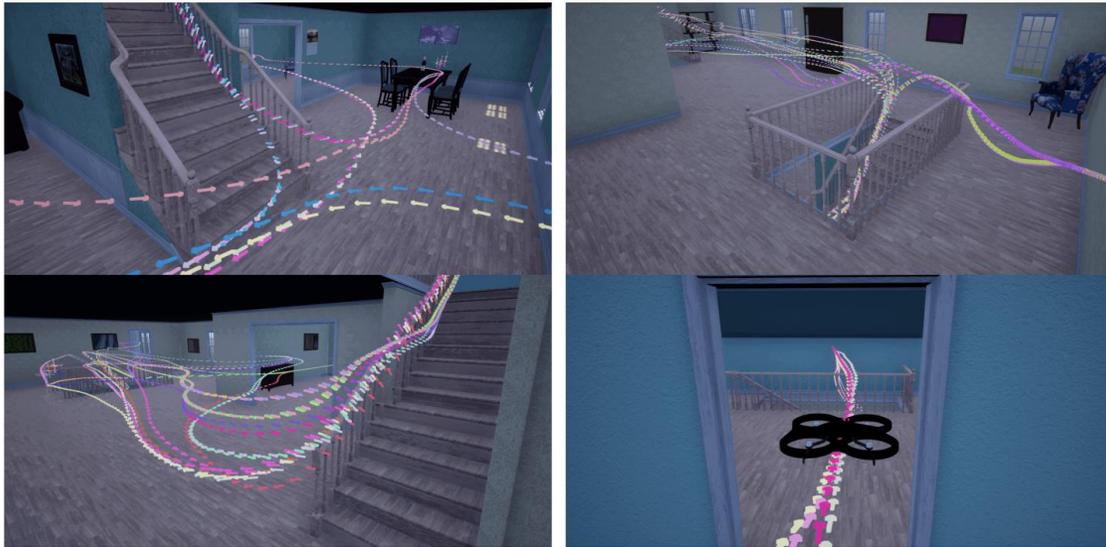
Doer, C. and Trommer, G. F., An EKF Based Approach to Radar Inertial Odometry, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI) 2020, (2020), pp. 152-159.

Vidal, A. R., Rebecq, H., Horstschaef, T. and Scaramuzza, D., Ultimate SLAM? Combining Events, Images, and IMU for Robust Visual SLAM in HDR and High-Speed Scenarios, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 2, (2018), pp. 994-1001.

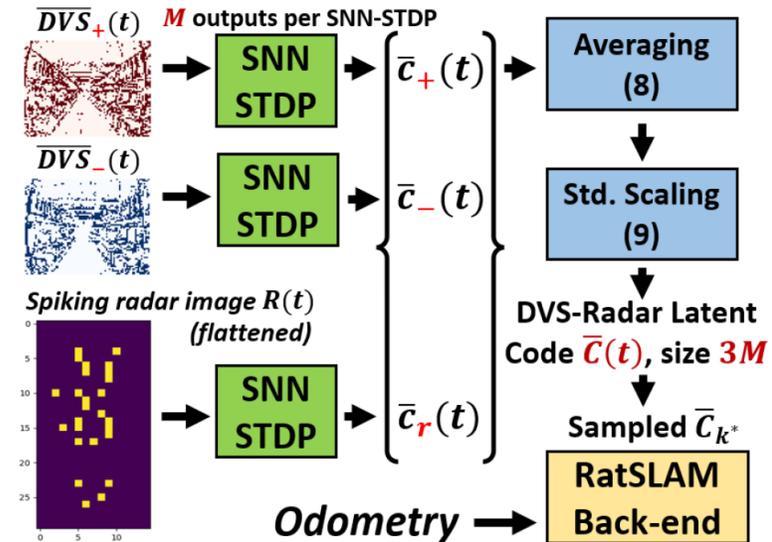
GNC(誘導・航法・制御)技術の最新動向

・ 生物規範航法技術-**Bat-SLAM**・**DVS-Radar SLAM**

- ・ **SNN**(Spiking Neural Network)利用
- ・ 位置同定, 航法, 制御をすべてSNNでこなす.
- ・ 未知の屋内ターゲット到達率97%(シミュレーション)
- ・ イベントカメラ(DVS)+FMCWレーダー+SNN
- ・ オフライン学習データ不要
- ・ 大きな証明変動を伴う環境下でもロバスト



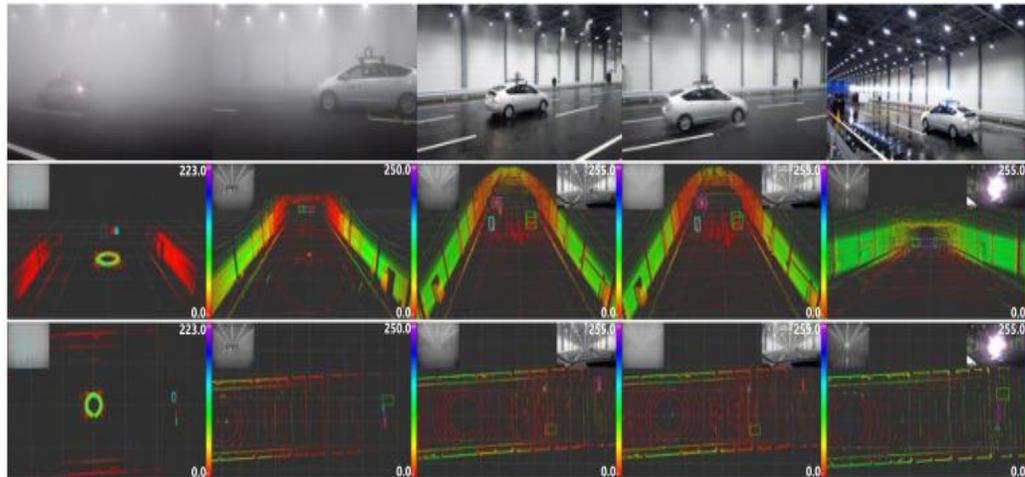
Komer, B., Jaworski, P., Harbour, S., Eliasmith, C. and DeWolf, T., BatSLAM: Neuromorphic Spatial Reasoning in 3D Environments, IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference, (2022), pp. 1-8.



Safa, A. et al., Fusing Event-based Camera and Radar for SLAM Using Spiking Neural Networks with Continual STDP Learning, IEEE International Conference on Robotics and Automation 2023, (2023), pp. 2782-2788.

過酷環境におけるセンサ・自己位置同定技術

Super Odometry(IMU+VIO+LIO)



(a) Dense fog (b) Light fog (c) Rain 30 mm/hr (d) Rain 80 mm/hr (e) Strong light

上段:計測の状況

中下段は3D LiDARによって取得された点群、

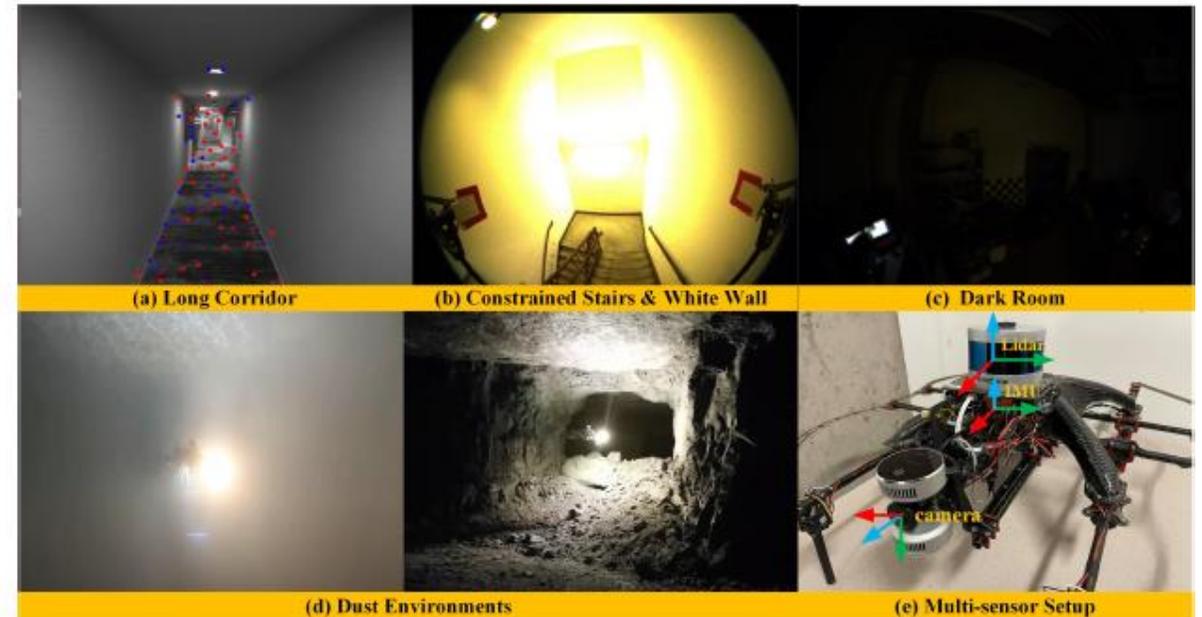
左上:サーモグラフィ画像、右上に可視カメラ画像をインポーズ:

(a)濃霧(視界17m)、(b)薄い霧(視界162m)、(c)降雨(30 mm/h)、
(d)降雨(80 mm/h)、(e)強い光(200 kルクス)

Xu, W., & Zhang, F., Fast-lio: A fast, robust lidar-inertial odometry package by tightly-coupled iterated kalman filter. IEEE Robotics and Automation Letters, 6(2), 3317-3324 (2021).

LOCUS (Lidar Odometry for Consistent Operation Settings)

・複数の高精度LiDARと他のセンサを結合

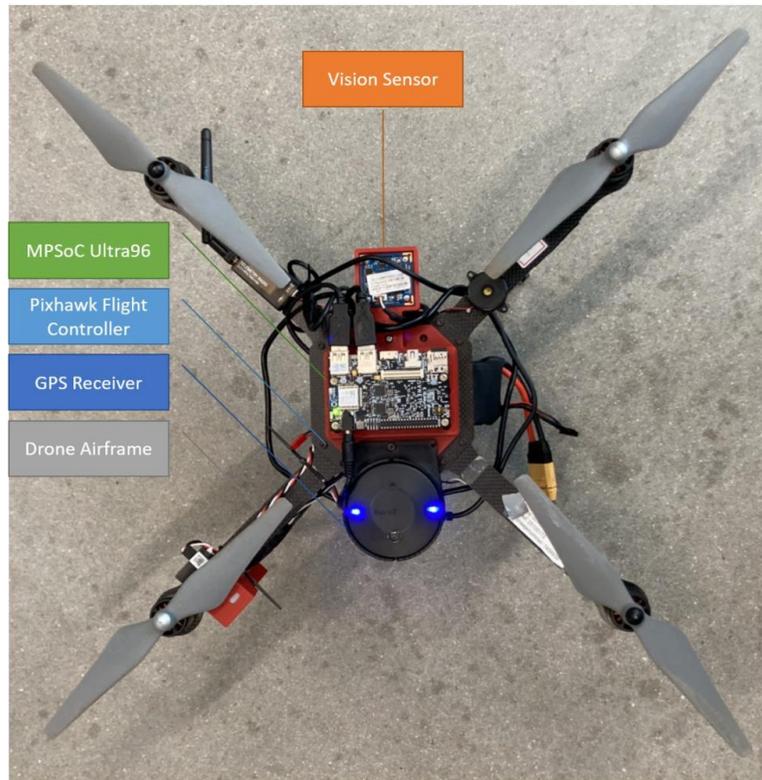


Palieri, M., Morrell, B., Thakur, A., Ebadi, K., Nash, J., Chatterjee, A., ... & Agha-Mohammadi, A. A. (2020). Locus: A multi-sensor lidar-centric solution for high-precision odometry and 3d mapping in real-time. IEEE Robotics and Automation Letters, 6(2), 421-428.

過酷環境におけるGNC技術

MPドローン

- ・ **FPGAベース**のドローンプラットフォーム



LNN(Liquid Neural Network)

- ・ 連続時間のRNN(Recurrent Neural Network)
- ・ 線虫の神経系にヒントを得て開発
- ・ 計算負荷が軽い
- ・ 入力のノイズや外乱に強い
- ・ これまでに遭遇したことのない劇的な景色の変化を伴う環境にも適応可能な新たな視覚ナビゲーション手法を提案

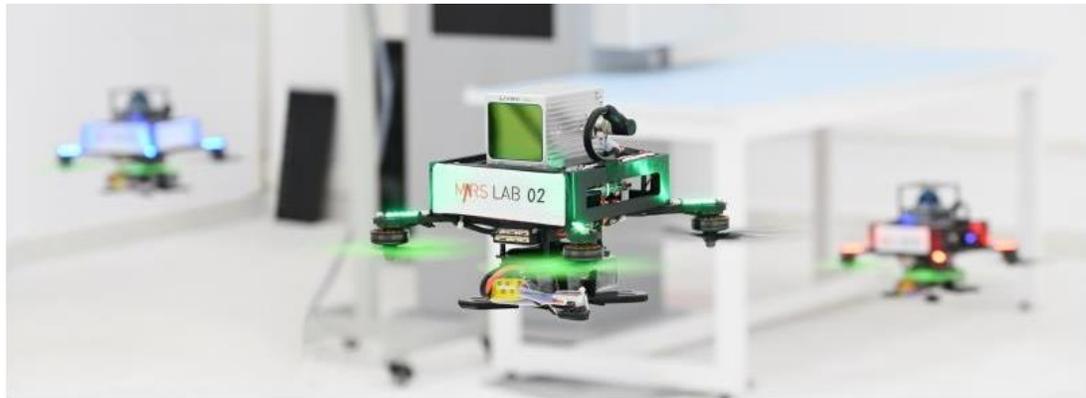
Kövari, B.B. and Ebeid, E., MPDrone: FPGA-based Platform for Intelligent Real-time Autonomous Drone Operations, IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics 2021, (2021), pp. 71-76.

Hasani, Ramin, et al. "Liquid time-constant networks." Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vol. 35. No. 9. (2021)

複数機のGNC(誘導・航法・制御)技術

複数機の**Swarm-LIO** (LiDAR-Inertial Odometry)

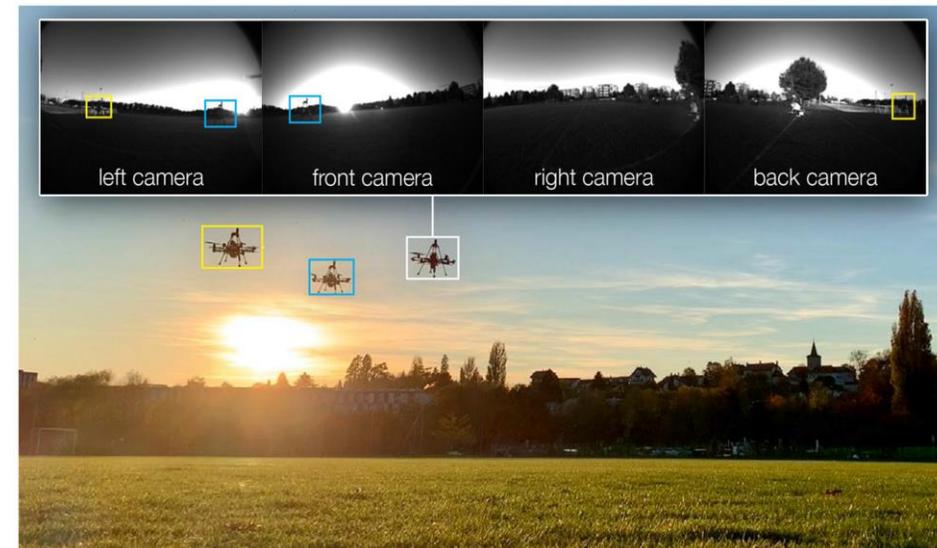
- ・ 3DLiDARとIMUによるSLAM



Zhu, F. et al., Swarm-LIO: Decentralized Swarm LiDAR-Inertial Odometry, IEEE International Conference on Robotics and Automation 2023, (2023), pp. 3254-3260.

複数機の画像による位置同定

- ・ 画像から**CNN**(Convolution Neural Network)により相対位置・速度を推定
- ・ 完全分散システム

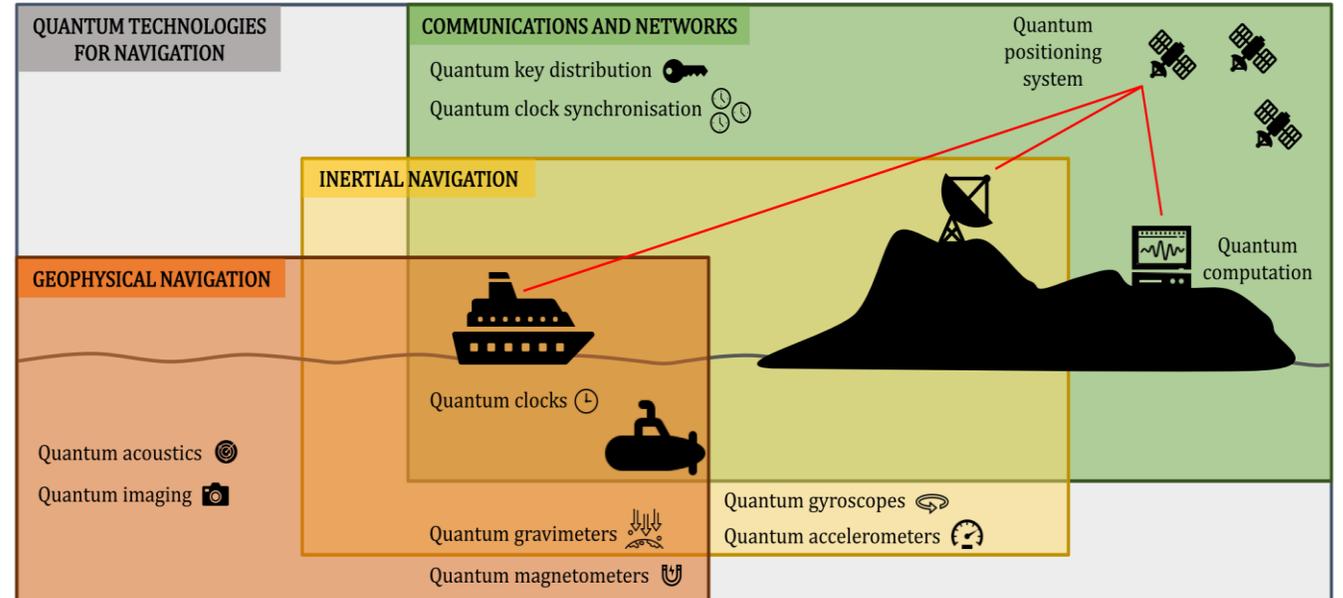
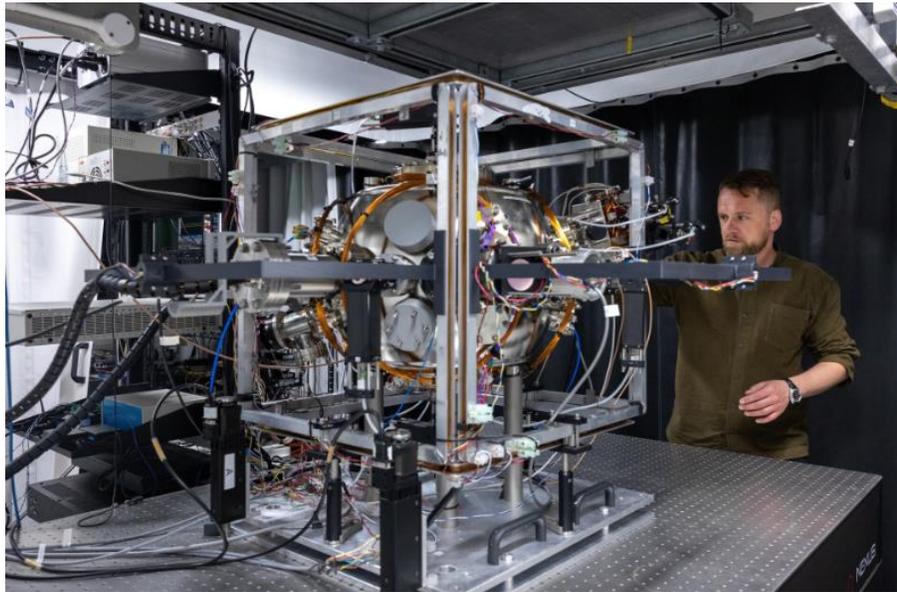


Schilling, F., Schiano, F. and Floreano, D., Vision-Based Drone Flocking in Outdoor Environments, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, (2021), pp. 2954-2961.

GNC(誘導・航法・制御)技術の最新動向

・量子航法(量子技術を用いた超高精度航法)

- ・量子加速度計のプロトタイプ(インペリアルカレッジ) ・海洋ナビゲーションへの応用



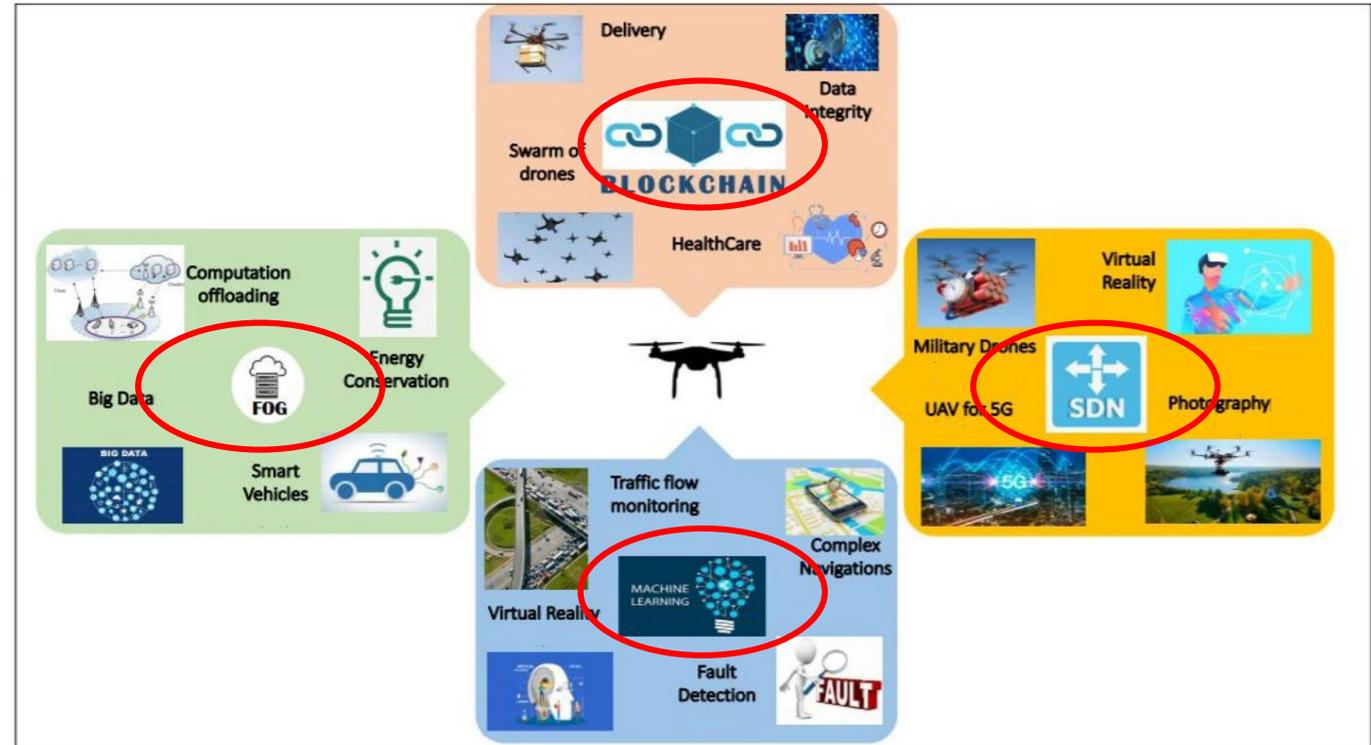
<https://www.imperial.ac.uk/news/245114/quantum-sensor-future-navigation-system-tested/>

Sambataro, O., Current Trends and Advances in Quantum Navigation for Maritime Applications: A Comprehensive Review, arXiv, (2023), doi:10.48550/arXiv.2310.04729.

通信技術

通信セキュリティの新技术

- ブロックチェーン技術
- Software Defined Network(SDN)
- 機械学習によるセキュリティ強化
- フォグコンピューティング



特色あるeVTOL

- Wingcopter

- 商業運航中の数少ないティルトローター機
- 日本でも運航中
- ペイロード:4.7kg
- 航続距離:90km



<https://wingcopter.com/wingcopter-198>

- Amazon Prime Air MK30

- ペイロード:5ポンド
- 航続時間:2時間以上
- 障害物検知・回避



<https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-prime-air-drone-delivery-mk30-photos>

テイルシッター

V-bat(MQ-35A)

- ・全備重量:56kg
- ・PL重量:11kg
- ・航続時間:10hrs
- ・AIによるGNC
(Hivemind)
- ・非GPS環境可
- ・群飛行
- ・戦闘機との協調



<https://shield.ai/v-bat/>

Flexrotor

- ・開発:Aerovel社, Airbusが買収(2024)
- ・最大離陸重量:25kg
- ・PL重量:8kg
- ・航続時間 > **30hrs**
- ・航行中の船舶甲板上から自動離着陸



<https://aerovel.com/flexrotor/>

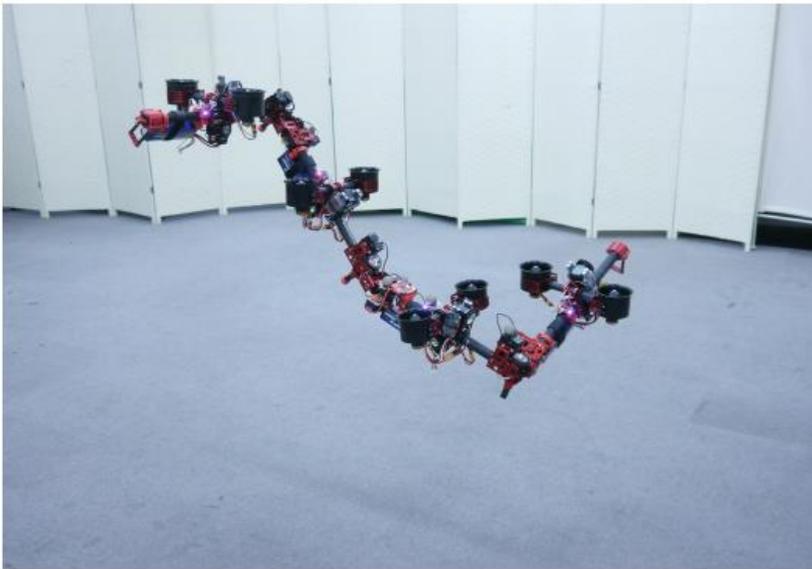
日本の立ち位置はどうか？

- マルチコプタ
 - 変形マルチコプタは独創的なものあり
- VTOL
 - 固定翼+マルチの普通のものが多く，特筆すべきものは少ない
- AI応用
 - かなり遅れている
- 過酷環境対応
 - ほぼ皆無

機体形態等に関する研究の最新動向

DRAGON

- ・多自由度の空中変形が可能
- ・デュアルロータマルチリンク
- ・推力制御とジンバル制御を独立制御，飛行実証



Zhao, M., Anzai, T., Shi, F., Chen, X., Okada, K. and Inaba, M., 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, (2018), pp. 1176-1183.

Cyclotech CCY-01

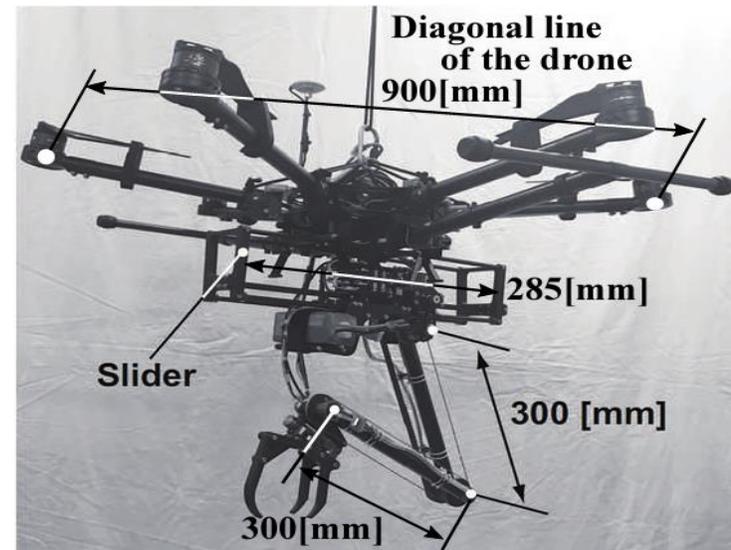
- ・垂直軸風車的プロペラを利用した新しいeVTOL
- ・ブレード角の変更により，推力方向を偏向
- ・ヤマトホールディングスと共同開発



Cyclotech GmbH , <https://www.cyclotech.at/>

エアリアルマニピュレーション

- ドローンにロボットアームやグリッパを搭載して操作
- インフラ点検，物体搬送等の応用
- ドローンの上方，側面，下方のマニピュレータで各種作業，Dragon(既出)もこの一種



Takahiro Ikeda, Satoshi Minamiyama, Shogo Yasui, Kencihi Ohara, Akihiko Ichikawa, Satoshi Ashizawa, Akihisa Okino, Takeo Oomichi, Toshio Fukuda, "Stable camera position control of unmanned aerial vehicle with three - degree - of - freedom manipulator for visual test of bridge inspection", Journal of Field Robotics, Vol. 36, issue 7(2019), pp. 1212-1221.

松永 望, 吉田 大哲, 島崎航平, 妹尾拓, 高木健, "重心位置調節機能を持つドローン用アームの キャリブレーション方法と空中での動作の評価", 日本機械学会論文集 Vol.87, No.901(2021), p. 21-00016.

高放射線環境を飛行可能なドローン

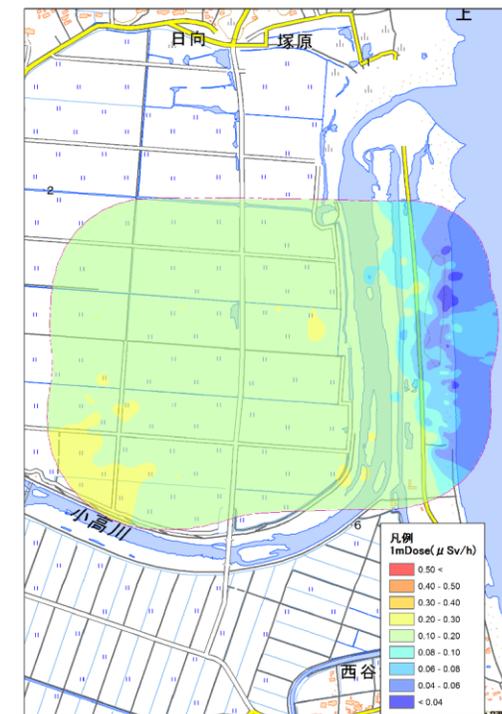
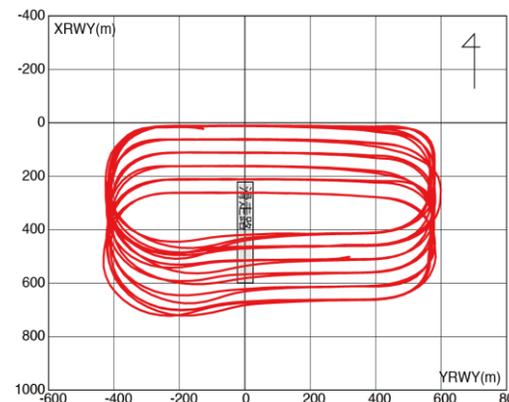
- **現在ではまだ存在しない**

- T-Hawk(RQ-16)が飛行したが故障

- **克服すべき課題**

- 飛行時に舞い上がる放射性物質の塵の問題
- 半導体損傷の防止
- 構造部材の放射線耐性(防振用ゴム)
- 通信障害への耐性

放射線モニタリング用ドローン (JAXA, 2015)



村岡浩治, 穂積弘毅, 佐藤昌之 (JAXA), 眞田幸尚, 山田 勉, 伊村光生 (JAEA), 放射線モニタリング無人飛行機の研究開発における飛行試験, 第54回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2016-5172 (2016).

課題は何か？(1/2)

- 要素技術

- ハードウェア

- 過酷環境と一口に言ってもさまざま。定義とカテゴリーわけが必要か？
 - 放射線・電磁場，粉塵，降水，定常風，下降風，突風，気温，気圧
 - 高放射線下で飛行可能なドローンは存在せず，研究もほぼ皆無。
 - バッテリ，燃料電池のブレークスルーが鍵だが，特化した研究は無い(他分野も同様か)。エンジンは利用は？
 - マルチコプタ，VTOLの空力(機体，プロペラ)に関する研究が少ない。
 - 機体設計法，機器の寿命，劣化，整備法等に関する研究が少ない。

- ソフトウェア

- 実証を伴った群制御の国内研究が少ない。
 - AI応用の国内研究が少ない。

課題は何か？(2/2)

- システム技術
 - 情報統合等のシステムに関する研究が無い。
 - 地震，大雨等実際の災害を想定した研究が無い。
- 法律の問題
 - 航空法
 - 米国(FAR Part107)準拋風だが，かなり不完全。
 - 強力な規制のため，事実上，日本国内ではホバリング関連の研究しかできない。
 - 災害時，空域がブロックされるため，活躍の機会がない。→改善しつつあるか？
 - 電波法
 - 出力を過剰に規制→広域飛行ができない。各種手続きが煩雑かつアナログ。
 - 災害時等の過密状態における使用可能周波数割り当て等のシステムがない。