

# 未知な屋内環境における自律飛行型 UAV の設計と実装

大坪 洋人<sup>1,a)</sup> 武田 圭史<sup>2,b)</sup>

受付日 2021年12月22日, 採録日 2022年6月14日

**概要:** 近年, 人間が行う業務をロボットに置き換える機械化が進められている。ロボットによる機械化では単純作業の効率化や人件費削減だけでなく, 人間が行うにはリスクの高い作業などを代替することも可能である。その例として, 災害現場の調査やガスが充満している恐れのある洞窟など未知環境の探索があげられる。そこで, このような作業を行うロボットとして, 本研究では屋内環境で自律飛行する UAV システムを提案する。一般に UAV を屋外で利用する場合は, GPS など外部センサによって自己位置を推定する。推定した自己位置を利用することで, 決められた経路の移動など自動飛行が可能となる。しかし, 屋内では電波が届かないため GPS を用いた自動飛行は不可能である。また, 災害現場や洞窟などの未知環境では, あらかじめ GPS 以外の外部センサを用意することや外部機器と無線通信を行うことは困難である。よって, 本研究では外部信号を用いた測位システムおよび無線通信環境を必要としない自律飛行型 UAV を提案する。様々な環境で自律飛行を行うことを想定して, 複数のセンサを搭載したシステムを設計した。汎用的に利用できるシステムとして提案することで, 屋内環境における自律飛行 UAV の今後の可能性を示す。

**キーワード:** UAV, 屋内環境, 自律飛行, 組み込みシステム

## Design and Implementation of an Autonomous Flying UAV in an Unknown Indoor Environment

HIROTO OTSUBO<sup>1,a)</sup> KEIJI TAKEDA<sup>2,b)</sup>

Received: December 22, 2021, Accepted: June 14, 2022

**Abstract:** We have mechanized the tasks that humans work. It can improve the efficiency of tasks and reduce costs. Also, robots can replace tasks that are risky to work by humans. For example, investigating disaster sites and exploring unknown indoor environments. In this study, we propose a UAV system that can fly autonomously in indoor environments. Generally, automatic or autonomous flight need UAV's position data. When using UAV at outdoor, UAV's position data is estimated using external sensors or signals such as GPS. However, GPS can't use at indoor due to the lack of radio waves. In addition, it is difficult to prepare external sensors and external wirelessly devices in unknown environments. Therefore, we propose that UAV does not require external devices. The UAV has multiple sensors for autonomous flight in variety environments. Finally, we show the future potential of autonomous UAVs in indoor environments by using our study.

**Keywords:** UAV, indoor environment, autonomous flight, embedded system

### 1. はじめに

近年, 日本では人口減少にともない, 労働力の確保が困難なことや人件費が高騰していることから, 作業を UAV (Unmanned Aerial Vehicle) によって行う取り組みが活発になっている [1]. 業務の機械化として, 人間に代わり口

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科  
Keio University, Fujisawa, Kanagawa 252-0882, Japan

<sup>2</sup> 慶應義塾大学環境情報学部  
Keio University, Fujisawa, Kanagawa 252-0882, Japan

a) otb1610@keio.jp

b) keiji@sfc.keio.ac.jp

ロボットが作業を行うことや、その状況を人間がモニタリングすることなどがあげられる。これにより、業務に必要な人員を減らすことが可能となる。また、業務の機械化によって人身事故のリスクを軽減することも可能である。たとえば、災害現場の調査やガスが充満している洞窟の探索などがあげられる。また、災害時には無線通信環境が用意できないことや未知な洞窟では電波が届かないことが考えられる。このような場所でロボットを使用するには外部機器と接続することなく、ロボットの内部で処理を完結させなければならない。また、周辺環境が未知であるため、障害物などを回避しながら移動する必要がある。よって、このような環境でロボットを利用する場合、周囲のオブジェクトを認識して回避するようなシステムが求められる。

市販されている UAV は、操縦者が操作する端末と UAV が無線で接続して、端末から経路設定や操作することで自動飛行を行う [2]。また、屋内環境での自律飛行を想定した関連研究の多くでは、無線接続で外部機器にセンサデータなどを送信して数値処理や経路計画が行われている [3]。しかし、無線通信設備や外部機器を用意できない環境においては、これらの UAV は利用できない。このような環境でも利用できる UAV を実現することで、災害現場で倒壊した建物の搜索や調査などを行うことが可能となる。よって、本研究により外部機器と接続を必要としない自律飛行のための UAV システムを提案する。

近年ではセンサや演算処理装置の小型化や高性能化が進んでいる。そのため、屋内で自律飛行を行うために必要なデバイスを搭載した小型な UAV の開発が可能となった。様々な環境で自律飛行を行うことを想定して、複数のセンサを搭載したシステムを設計する。実際に本研究によって実装したシステムによる自律飛行の検証を行い、無線通信環境を必要としない屋内環境における自律飛行 UAV の今後の可能性を示す。

以下、2 章では UAV の自律飛行システムについて述べた後、3 章において障害物回避システムについて説明する。4 章では本研究で提案する屋内型 UAV の設計と実装について説明し、5 章で実装した UAV による屋内での自律飛行や障害物回避の評価結果と考察を示す。最後に 6 章で本論文のまとめを行う。

## 2. 自律飛行と自動飛行

決められた地点に物資を運搬することや設定した経路を飛行して撮影することなど、人間が与えた手順に基づいて飛行することを自動飛行と呼ぶ。自動飛行では、どのような状態においても与えられた手順を実行するのみとなるため、例外の事態が発生した際には人間が判断する必要がある。そのため、未知な環境では利用できない。

一方で、自らで判断して経路計画や障害物回避などを行いながら飛行することを自律飛行と呼ぶ。飛行中に人間に

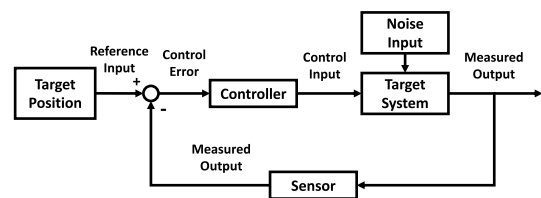


図 1 自動飛行のためのフィードバック制御

Fig. 1 Feedback control for autonomous flight.

よる操作や判断が不要であることから未知な環境や時々刻々と変化する状況にも UAV のみで対応可能となる。自律飛行には、周囲の状況を認知するためのセンサを搭載することや、状況判断のためのプログラムを実装することが必要となる。本章では自動飛行システムおよびこれに必要な不可欠な自己位置推定についての概要を説明する。

### 2.1 自動飛行システムの仕組み

UAV を自動で飛行させるためには、座標系を定めることや機体の位置情報を取得することが必要となる。自動飛行では目標となる座標を決め、その地点に UAV を飛行させる。センサによって取得した現在位置と目標位置の差分を算出して、制御対象に適切な入力を与える。風や上昇気流などの外乱によって、UAV はつねに移動し続ける。そのため、図 1 に示した現在位置と目標位置の差分を算出して、制御対象に入力を与えるフィードバック制御がつねに行われている。このようにして、その場でとどまるホバリングや指定した座標へ移動する P to P 飛行を実現している。一般的に屋外で自動飛行する場合は、Global Positioning System (GPS) が利用されている。GPS の場合は座標系に WGS84 (World Geodetic System 1984) が用いられる。これは右手系の直交座標となっており、WGS84 準拠楕円体を用いることで、受信モジュールを搭載した UAV の位置を経度、緯度、楕円体高で表すことができる [4]。UAV の目標位置としてこれらのパラメータを入力することで、GPS によって取得した位置情報をもとに飛行する。

一方、屋内を自動飛行する場合には電波が十分に届かないため GPS を利用することは困難である。そのため、GPS の代わりとなる外部センサを設置して、そのセンサで UAV の位置を推定する。この場合は、センサを設置するため測定範囲が限られる [5]。

屋内で自動飛行を実現する手法として、外部センサを利用することのほかに搭載センサを利用する手法もある。UAV に搭載したセンサによって周辺環境を認識して自己位置の推定を行う。この場合は、ローカル座標系を使用する。ローカル座標系は搭載センサが周辺環境の測位を始めた地点を原点とする。よって、自動飛行時には原点を中心とした目標位置を指定する必要がある。

これらのように UAV を自動飛行させるために使用する自己位置推定の手法は様々である。よって、UAV を使用す

る環境に応じて、適切なシステムを構築する必要がある。

## 2.2 外部センサによる自己位置推定

屋外で飛行する場合の多くは、外部センサを用いた手法である GPS が採用されている。UAV に搭載した受信モジュールによって、地球の上空から電波を発信している衛星の信号を受信する。衛星から受信機まで電波が到達する時間を計測することにより、受信モジュールの位置を算出している [6]。測量や点検など、高精度な自動飛行が求められる際には、GPS と同様に外部センサを用いた自己位置推定である Real-time kinematic (RTK) が用いられる。RTK では、衛星に加えて地上に設置した基地局からも信号を受信することで、GPS よりも高精度な自己位置推定を実現している。しかし、GPS や RTK による自己位置推定では、室内や洞窟など電波の受信状況が悪い場所で適切に動作しなくなる。

また、赤外線カメラを用いた三次元位置計測システムを用いる手法もある。赤外線を受けた方向と同じ方向に跳ね返す再起反射性マーカを UAV に取り付ける。設置した複数台の赤外線カメラによって、再起反射性マーカを付けた対象を計測することで、その位置を推定する [7]。これ以外にも外部センサから電波を発射して、受信モジュールが電波強度を測ることで自己位置推定する手法などもある [8]。

## 2.3 搭載センサによる自己位置推定

外部センサによって UAV の位置を計測する以外に、UAV に搭載したセンサのみで位置を推定することも可能である。その手法として、搭載センサから取得した情報とあらかじめ用意した環境地図の特徴をマッチングさせることで、自己位置を推定する手法がある [9]。しかし、災害現場など環境が時々刻々と変化する場合、あらかじめ環境地図を用意することは困難である。そのような問題点を解決するための手法の 1 つに、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) がある。SLAM とは搭載センサによって取得した情報から環境地図の生成と自己位置推定を並列して行う手法である。環境地図生成では搭載センサによって取得した複数のデータを結合していくことにより 1 つの環境地図を作り上げる。そして、構築した環境地図の特徴から自己位置推定を行う。これにより、あらかじめ環境地図がない未知環境においても自己位置推定を実現する。

SLAM は光センサである LiDAR を用いた LiDAR SLAM や RGB カメラを用いたビジュアル SLAM などがある [10]。LiDAR センサは他のセンサと比較して、小型で長距離のデータを取得可能である。暗所でも利用可能であるが、ガラスや水など光を拡散する物体を認識が困難である [11]。また、形状の特徴を判断して自己位置情報を推定する手法である。そのため、廊下や配管内など形状に特徴の少ない環境では利用が困難となる。

ビジュアル SLAM は RGB カメラを用いる LSD-SLAM や ORB-SLAM などがある [12], [13]。RGB カメラで取得した色特徴量の移り変わりから移動量の算出を行うため、環境の形状に左右されにくい。しかし、視界が色の均一な壁面などは推定が困難となる。

SLAM 以外にもあらかじめマーカを設置できる環境であれば、搭載センサによってマーカを読み取り、自己位置を推定することも可能である。しかし、その場合はあらかじめ UAV が飛行する環境にマーカを設置する必要がある。このように自己位置推定の手法や採用するセンサは様々であり、使用環境と用途に応じて選定が必要である。

## 3. 障害物回避システム

### 3.1 障害物回避システムの仕組み

自動飛行を計画する際、計画時には設定した経路に障害物がなかったとしても、飛行時には障害物が発生する可能性がある。屋外飛行時の障害物として、経路上を飛行する鳥や工事のクレーンなどが考えられる。また、屋内飛行の場合は飛行経路に人が歩いていることや一時的に物が置かれることなどが想定される。このような不測の事態が自動飛行時に発生した際は人間が状況を判断して対応しなければならない。そこで、UAV に障害物を回避するシステムを導入することで、不測な状況にも対応可能となる。障害物を回避するためには、UAV に搭載したセンサによって障害物までの距離を把握する必要がある。これにより、障害物から一定の距離を保ち続けながら目標地まで向かう回避行動や緊急時にはモータの回転を止めて緊急着陸を行うことが可能となる。

### 3.2 搭載センサの検討

障害物回避のために用いる距離センサは種類が様々であり、それぞれ一長一短な特徴がある。よって使用する環境や要件に応じて検討を行い、適切なセンサを選定する必要がある。本研究では屋内で飛行させることを前提にセンサの選定を行った。検討したセンサについての特徴や使用用途を説明する。

#### 3.2.1 LiDAR

LiDAR センサは光を発射して、反射して返ってくる光を受信素子によって受信することで距離を測定する。測定方式は主に 2 つである。1 つ目は発した光が対象物に反射して返ってくるまでの時間をもとに距離を測定する Time of Flight (ToF) である。もう一方は反射して返ってきた光の周波数変化から算出する FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 方式である。ToF は FMCW に比べて太陽光や水分など反射波への干渉に弱い。しかし、FMCW は ToF よりシステムが複雑になることや計算コストがかかるといったデメリットがある。対象物に当たる光の測定範囲が小さいため、センサを高速で回転させるなど向きを

変えながら複数個所までの距離を測定することで周辺の形状を把握することも可能である。これにより、部屋や廊下のドアの位置や障害物の位置などの検知に用いることが可能となる。

### 3.2.2 ミリ波レーダ

高周波の電波を発信して対象物からの反射波を計測する。広範囲に発射して、対象物までの角度や距離、対象物の速度などを算出可能である。また、電気の消えた部屋などの暗所や火災時にスプリンクラや不活化ガスが使用されている環境でも利用できる。しかし、波長が高いため段ボールなど反射率の低い対象物は計測が困難となる。

### 3.2.3 超音波センサ

センサから超音波を発信して対象物から反射してきた超音波を受信し、その時間から距離を算出する。超音波は発射口から拡散する性質があるため測定範囲が広い。そのため、対象物の形状を把握することが難しい。屋内環境にはガラス製の窓や透明なプラスチック製の仕切りなど光を透過する対象物が存在する。LiDAR センサでは光を透過する対象物を測定することは困難であり、このような対象物の測定に誤検知が生じる恐れがある。一方で、超音波センサは音波の跳ね返りまでの時間から対象物までの距離を推定しているため、光を透過するような対象物に対しても使用可能である。

### 3.2.4 ビジョンセンサ

画像処理によって、物の識別や移動方向の推定を行う。これによって、屋内環境においても要救助者の発見や飛行可能領域の算出などを行うことができる。2つのビジョンセンサを用いたステレオカメラでは視差から深度情報や自己位置情報を算出する。外部機器による自己位置推定を行うことのできない屋内環境では、代わりにビジョンセンサとIMUなどを組み合わせて自己位置推定を行うことが可能である。

## 4. 屋内環境で自律飛行する UAV の設計と実装

### 4.1 要求仕様

本研究では、災害によって倒壊した建物内の探索活動などで利用することを想定している。非GPS環境でのUAV活用を想定された先行研究では、搭載機器の数が多く、重量が重い場合、機体の幅が1,000 mmを超えている [5], [14]。しかし、UAVを屋内で飛行させる際には部屋のドアや窓を通り抜けられる大きさである必要がある。建物に使用されるドアで小さなものであると600 mm程度であるため、通り抜け時に100 mmの余裕を持たせるとして幅は400 mm程度が上限と考えられる。飛行時間は利用する場所の規模に応じて異なる。ペイロードの上限までバッテリーの容量を増やすことにより飛行時間を増やすことが可能であるが、UAVの機動力とのトレードオフとなる。よって、使用場所に応じて積載するバッテリーのサイズや本数を変更可能な仕

様が求められる。また、壁面や障害物を回避するため、センサは50 mm程度の誤差精度で対象物の位置やサイズを把握する必要がある。屋内環境には窓ガラスや透明な仕切り板など光を透過する壁面や障害物も存在する。よって、LiDARのみによるシステムでは検知が困難な対象物が存在する。屋内飛行を可能としている製品として、ビジュアルセンサから得られるデータのみで飛行しているUAVがある [2]。しかし、屋内の災害現場では防火装置によって霧が発生していることや電気が通らずに暗所となっている可能性がある。このような環境ではビジョンセンサのみでデータを取得しているようなUAVでは、レンズに水滴が付着することや、カメラがRGB情報を取得できず飛行できない。よって、1種類のセンサから得られた情報によって飛行するシステムではなく、複数のセンサを用いた冗長性のあるシステムが求められる。災害時には移動通信システムが使用できないことや、あらかじめ通信ネットワークを用意できないことが想定される。コンクリート壁や地下室などの環境では極超短波やマイクロ波を用いた通信装置では十分な通信を行うことが困難である。そのため、建物外に大容量のデータを高速で伝送することは難しく、搭載した機器によって飛行経路や自己位置推定の算出を行う必要がある。要救助者が建物内にいるため、移動体が存在することも考慮する。探索活動を行う際には、カメラを搭載して建物内の映像を取得する必要がある。小型カメラや有害物質等の発生を検知するセンサ類を搭載することを想定してペイロードは200 gとする。

### 4.2 システム概要

要求仕様を達成するために設計したシステムの概要を説明する。一般に屋外でUAVの自動飛行や自律飛行を行う際にはGPSなど外部センサによってUAVの位置を推定している。しかし、本研究では屋内での利用を想定しているため、これを採用することはできない。屋内ではUAVにマーカや受信機を取り付け、外部センサによって機体情報を取得して位置推定を行う手法がある。しかし、UAVを使用する場所に外部センサを設置する必要があり、飛行可能範囲が限られるため未知環境では利用できない。また、マーカが人や物に隠れて外部センサがとらえられなくなると、自己位置の推定が不可能になる。そこで、そのような場所で自己位置を推定する手法として、搭載センサによる自己位置推定を採用する。これにより、外部センサを設置する必要がなく、様々な環境で運用可能となる。

障害物回避システムには、LiDARセンサを用いて周辺に存在するオブジェクトの位置を推定する。しかし、LiDARセンサはガラスのような光を透過や反射する対象物の検出が困難である。そこで、光の屈折や透過に左右されず、対象物までの距離情報を取得できるセンサとして超音波センサも採用する。超音波センサをUAVの進行方向に向けて

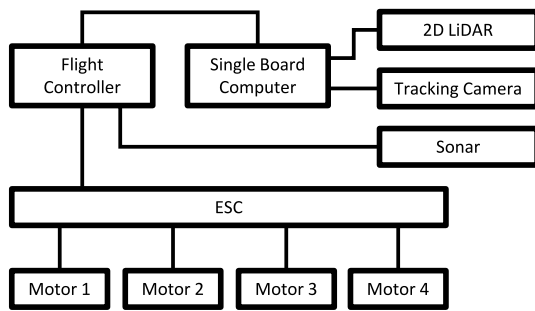


図 2 ハードウェアのシステム図  
Fig. 2 Hardware system diagram.

搭載することで、LiDAR では誤認識する対象物の検知を行う。UAV は超音波センサか LiDAR センサで障害物を検知した際には経路を再計算する。このように複数のセンサ情報を合わせるにより、様々な環境において周囲の情報を取得し飛行経路の算出を行う。

本研究によって提案する UAV は外部との通信が不可能な環境での使用を想定する。そのため、外部機器と接続することなく、ロボットの内部で処理を完結させる必要がある。その手法として、UAV にシングルボードコンピュータを搭載する。外部と通信せずに機体のセンサ情報のみを用いて経路計画などの処理を行う。

このように、人が端末から飛行経路を設定する自動飛行や外部センサや外部機器を必要とする自律飛行ではなく、UAV のみで屋内を飛行可能なシステムを検討した。

### 4.3 ハードウェア構成

各ハードウェアを図 2 のように構築した。フライトコントローラとシングルボードコンピュータは有線で通信をするため接続されている。二次元 LiDAR とトラッキングカメラはシングルボードコンピュータに接続され直接情報を受け渡している。超音波センサはフライトコントローラに接続されている。シングルボードコンピュータで算出された飛行経路はフライトコントローラに送られる。フライトコントローラによって算出された各モータの制御入力は ESC に送られ、適切な電流がモータに流れる。

### 4.4 採用したコンポーネント

本研究で設計した UAV には、二次元 LiDAR、超音波センサ、シングルボードコンピュータ、トラッキングカメラを採用した、ここでは、採用したコンポーネントの特徴や選定理由を説明する。

#### 4.4.1 二次元 LiDAR

水平 360 度方向に距離情報を取得可能な二次元 LiDAR を採用した。これを搭載することで、機体の向きを変えずに全方向に対象物までの距離を取得することが可能である。水平方向だけでなく垂直方向にもデータを取得可能な三次元 LiDAR センサも存在する。しかし、消費



図 3 RPLIDAR S1 の外観  
Fig. 3 Overview of RPLIDAR S1.

表 1 RPLIDAR S1 の仕様表  
Table 1 Specification of RPLIDAR S1.

Distance range [m]	40
Sample Rate [Times per second]	9,200
Sample Frequency [Hz]	10
Angular Resolution [deg]	0.391
Distance Resolution [m]	0.03
Size W × H × D [mm]	55.5 × 51.0 × 55.5
Weight [g]	105

電力が大きいことや重いことから屋内で飛行を想定する小型 UAV には搭載が困難である。そこで小型軽量で省電力な二次元 LiDAR である SLAMTEC 社の RPLIDAR S1 (RPLIDAR) を選定した。RPLIDAR の外観を図 3、諸元表を表 1 に示す [15]。

#### 4.4.2 超音波センサ

超音波センサは LiDAR のように光を透過するような対象物に対しても使用可能である。そのため、LiDAR センサでは計測が困難な対象物であっても対応できるため、障害物検知のサブシステムとして利用する。超音波センサは指向性が高く、小型で長距離の測定が可能な Maxbotix 社の MB 1240 XL-MaxSonar-EZ4 (EZ4) を選定した。EZ4 の外観を図 4、諸元表を表 2 に示す [16]。

#### 4.4.3 トラッキングカメラ

本研究で想定している環境では外部機器を用いらずに自己位置の推定を行う必要があるため、搭載センサによって自己位置推定を行う。自己位置を推定するための手法の 1 つとして Intel 社製 RealSense T265 (T265) を使用する。T265 は 2 つの広角な RGB カメラを用いたトラッキングカメラであり、搭載している IMU の情報と合わせることで SLAM を行っている。SLAM によって推定した自己位置や姿勢角をシングルボードコンピュータに配信する。T265 の外観を図 5、諸元表を表 3 に示す [17]。

#### 4.4.4 シングルボードコンピュータ

外部機器と通信することができない環境下では、UAV の内部で制御入力の算出を行う必要がある。そのため、本研究では小型で軽量のコンピュータであるシングルボードコンピュータを UAV に搭載する。本研究では、小型で処理



図 4 EZ4 の外観  
Fig. 4 Overview of EZ4.

表 2 EZ4 の仕様表  
Table 2 Specification of EZ4.

Distance range [m]	7.65
Sample Frequency [Hz]	10
Distance Resolution [m]	0.01
Size W × H × D [mm]	19.9 × 22.1 × 15.5
Weight [g]	4.3



図 5 RealSense T265 の外観  
Fig. 5 Overview of RealSense T265.

表 3 T265 の仕様表  
Table 3 Specification of RealSense T265.

Fisheye resolution [pixel]	848 × 800
Fisheye angle of view [deg]	163
Aspect ration	1.06
Estimation accuracy [%]	1
Size W × H × D [mm]	108 × 24.5 × 12.5
Weight [g]	55
Connector	USB 3.1 Micro B

能力の高い NVIDIA 社製 Jetson Nano (Jetson) を選定した。Jetson の外観を図 6, 諸元表を表 4 に示す [18].

#### 4.5 機体スペック

製作した UAV の外観を図 7, 仕様表を表 5 に示す。本研究では機体サイズが小さくなるようにモータとプロペラが 4 つのクアッドコプタとした。機体が屋内施設の扉を通過できるサイズとなるように、プロペラは小型な 4 inch, モータ間距離は 240 mm のフレームを選定した。小型なプロペラで大きな推力を発生させるため、2,300 KV の高回転なモータを選定している。また、より大きな推力を発生させ、周辺物への安全性を高めるため、プロペラガードはダクト形状とした。ステレオカメラは機体前方、超音波センサはステレオカメラの真下に、それぞれ進行方向である前

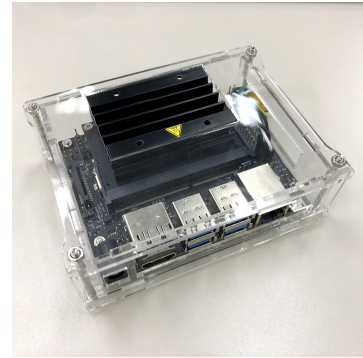


図 6 Jetson Nano の外観  
Fig. 6 Overview of Jetson Nano.

表 4 Jetson Nano の仕様表  
Table 4 Specification of Jetson Nano.

OS	Ubuntu18.04
CPU	ARM A57
RAM [GB]	4
Size W × H × D [mm]	100 × 29 × 80
Weight [g]	248

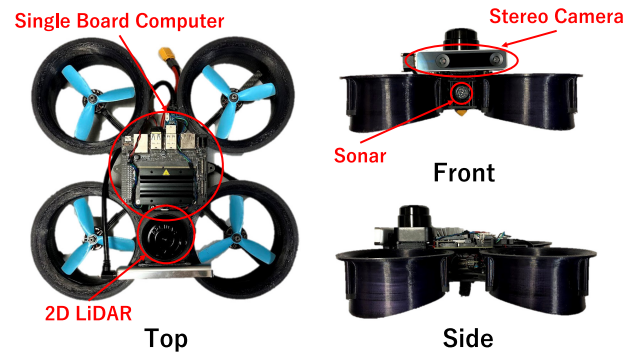


図 7 UAV の外観  
Fig. 7 Overview of UAV.

表 5 UAV の仕様表  
Table 5 Specification of UAV.

Wheelbase [mm]	240
Propeller size [inch]	4
Number of motors	4
Size W × H × D [mm]	310 × 180 × 305
Weight [g]	990
Flight time [min]	5

向きに取り付けた。二次元 LiDAR は全方位の水平方向に赤外光を照射するため、他のコンポーネントと重ならないように上部に設置した。シングルボードコンピュータは中央に取り付けている。サイズは幅 310 mm, 高さ 180 mm, 奥行 305 mm となった。バッテリーを装着していない状態での重量は 990 g である。使用するバッテリーの電圧は定格電圧 14.8 V のリチウムポリマーバッテリーである。放電容量が 2,000 mah のものを用いた際には飛行時間は 5 分程度となっている。バッテリーの放電容量と UAV の機動性能はト

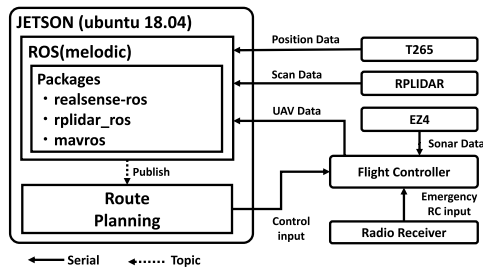


図 8 ソフトウェアのシステム図  
Fig. 8 Software system diagram.

表 6 ROS に導入したパッケージ  
Table 6 Packages installed in ROS.

Packages Name	Purpose
realsense-ros	Control T265
rplidar-ros	Control RPLIDAR
mavros	Communicate with the flight controller

リードオフとなるため、搭載方法は用途に応じて放電容量を変更できるように設計している。そのため、用途に応じて放電容量の多いバッテリーに変更して飛行時間を伸ばすことも可能である。

#### 4.6 ソフトウェア構成

本研究で提案するソフトウェアの構成は図 8 に示したシステム図のようにした。JETSON には Linux ベースのオペレーティングシステムである Ubuntu 18.04 LTS が搭載されており、ミドルウェアとして Robot Operating System (ROS) を導入している。ROS はロボットのソフトウェアを開発するためのミドルウェアであり、ハードウェアの制御を行うためのパッケージやセンサとの通信形式などが準備されている。搭載センサやフライトコントローラを制御するため、ROS に導入したパッケージを表 6 に示す。各センサが取得した情報は ROS 上にトピックとして配信され、機体制御を行うプログラムがトピックを購読可能となる。また、実験時に手で緊急停止する機能を実装するため、フライトコントローラには送信機と通信するための受信機が接続されている。搭載したセンサのフローチャートは図 9 のようになる。二次元 LiDAR と超音波センサの情報から二次元環境地図を生成する。環境地図は制御プログラムがループするごとに更新され、連続した環境地図の生成は行わない。小型 UAV であり搭載するセンサや演算装置の数の制限があるため、集中型センサ・フュージョンシステムとして構成している。また、三次元の移動が必要となる際には、UAV が推定している高度に応じて二次元環境地図を階層的に重ね合わせることで、三次元環境地図を生成することも可能である。それら情報から飛行経路の算出を行い、フライトコントローラに送信する。

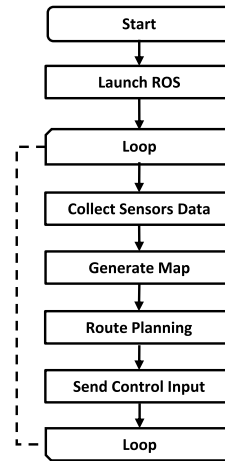


図 9 システムのフローチャート  
Fig. 9 System flowchart.

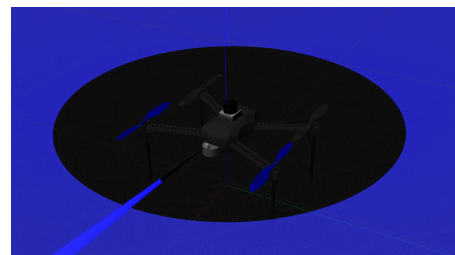


図 10 シミュレーション環境内の UAV の外観

Fig. 10 Overview of quadcopters in a simulation environment.

#### 4.7 シミュレーション環境

実機的设计に加え、実験環境としてシミュレーション環境を構築した。Linux ベースのオペレーティングシステムである Ubuntu 18.04 LTS を採用した。ROS のバージョンは Melodic を採用した。これにより、実機実験を行う前に自律飛行プログラムが正しく動作するか検証を行う。実機実験後はシミュレーション結果と比較して評価する。

##### 4.7.1 Gazebo

オープンソースで使用することのできる 3D モデルのバーチャルシミュレータであり、ROS 上で動作する。物理エンジンを採用しており、現実環境に近いシミュレーション環境を構築する。Gazebo 内で動作させるロボットの座標や姿勢角を ROS にトピックとして配信することが可能である。

##### 4.7.2 UAV の 3D モデル

製作した UAV と同等のセンサを搭載する 3D モデルを設計した。3D モデルの外観を図 10 に示す。

超音波センサと二次元 LiDAR は実際に搭載しているセンサと同様の性能となるように設定した。UAV の IMU 情報や搭載したセンサ情報は実機と同様の形式で ROS に配信される。ただし、T265 が用いている SLAM のアルゴリズムは公開されていないため、自己位置情報は Gazebo が配信する 3D モデルの位置情報とした。

## 5. 検証実験

### 5.1 屋内環境における巡回飛行

未知な環境で飛行する場合、あらかじめ飛行経路を設定する自動飛行は不可能である。さらに、外部機器と通信できない環境では、例外的な事態が発生した際に人間が状況を判断して操作することも不可能となる。そのため、このような環境では UAV 内部で経路計画や障害物回避を行う自律飛行が必要となる。

本実験では、実験室を外部機器と通信できない未知な屋内環境と仮定する。そのため、外部機器に UAV が取得した情報を送信して処理させることはできない。また、あらかじめ環境地図を用意して飛行経路を設定することや外部機器による位置推定を行うことも不可能である。本実験により、設計した UAV で自律飛行プログラムを実行して、これらの状況下で自律飛行が可能であるか検証する。搭載センサによって環境を把握して回避行動が必要か判断して、壁面に衝突せずに巡回飛行することを自律飛行の実現とする。図 11 に示した実験室で検証を行った。

UAV の自律飛行プログラムは屋内空間を規則性なく巡回する経路計画とした。一定高度でつねに直進し続け、障害物を検知した際には回避するため経路を変更する。前方に障害物を検知した際には、規則性なく巡回させるため角度を無作為に  $30\sim 180^\circ$  の間に設定し、時計回りに方向転換を行う。このプログラムのフローチャートを図 12 に示す。

本実験では巡回飛行プログラムに高度 0.5 m、飛行時間 1 分間を設定して自律飛行を行った。シミュレーション環境での実験結果を図 13、実際に自律飛行を行った際のデータを図 14 に示す。LiDAR が取得したオブジェクト情報を緑点、UAV の始点を赤点、終点を青点、推定した自己位置を橙点とした。緑点は自律飛行開始時に始点で取得した値である。

シミュレーションと実機実験のどちらも UAV は壁面を検知した際には方向転換を行い、衝突することなく設定時間経過後に着陸した。したがって、自律飛行を達成した



図 11 実験室  
Fig. 11 Laboratory.



図 15 透明なプラスチックシート  
Fig. 15 Transparent plastic sheet.

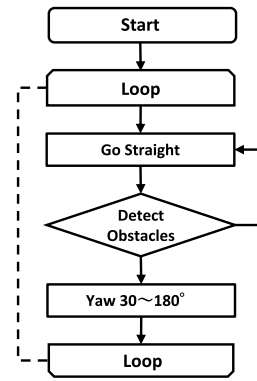


図 12 巡回飛行のフローチャート  
Fig. 12 Flowchart of cyclic flight.

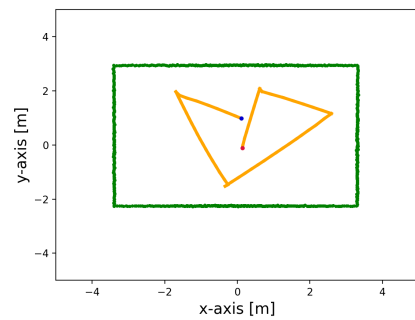


図 13 屋内環境における自律飛行のシミュレーション  
Fig. 13 Simulation of autonomous flight in indoor.

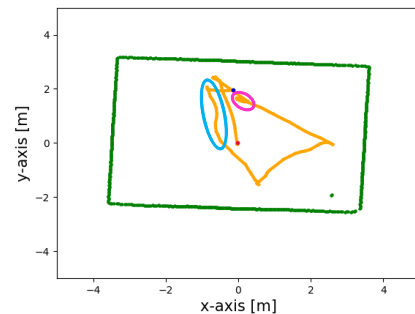


図 14 屋内環境における自律飛行  
Fig. 14 Autonomous flight in indoor.



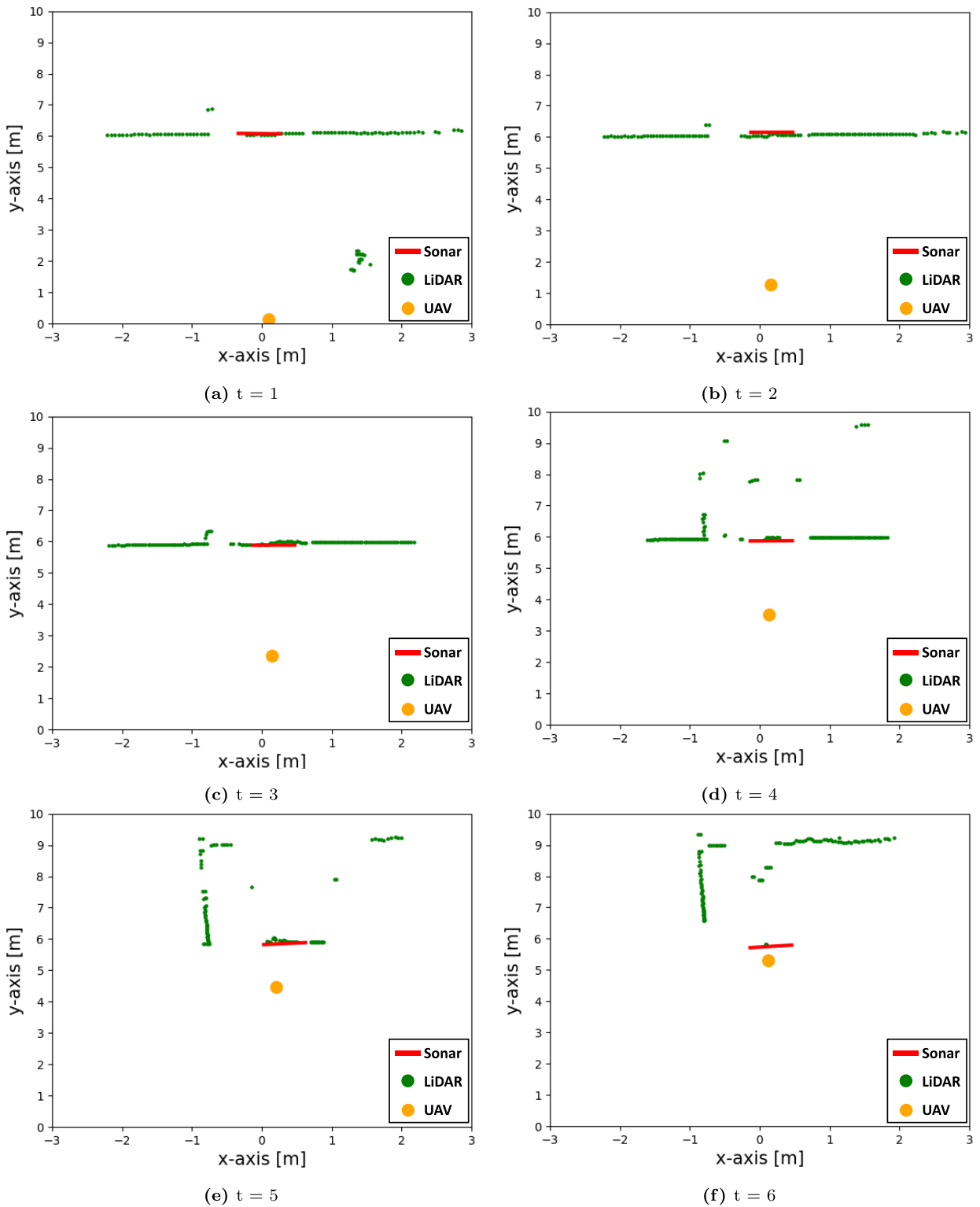


図 16 LiDAR と超音波センサによる計測結果

Fig. 16 Measurement result using LiDAR and ultrasonic.

といえる。

シミュレーションの結果では UAV は直線的な動きとなっている。しかし、実機実験では図 14 で水色で囲んだ箇所のように直線的に進まず、進行方向が逸れている。また、桃色で囲った箇所では UAV が停滞した。これはプロペラから発生した風が地面から吹き返され、UAV の飛行に

影響を与えたことが原因と考えられる。現状のハードウェア構成では、最小限のプロペラサイズで大きな揚力を発生させるため、ダクト形状のプロペラガードを採用している。しかしながら、UAV の表面積が大きくなることから、風による影響を受けやすくなる。今回の実験環境のような閉ざされた空間である場合は風の逃げ場がないため、風の吹き

返しによる影響を受けたと考えられる。

よって今後の検討課題として、プロペラガードやフレームの形状を再検討して、本実験のような環境においても影響を受けにくいハードウェアの構築が必要となる。また、ソフトウェア面においても自己位置情報から目標軌道との差分を検知したり、モータの負荷から異常を検知したりした際に、飛行経路を修正や飛行の停止を行うなどの対策を検討する。

## 5.2 LiDAR と超音波センサの組合せ

本研究で設計した UAV には、障害物検知のために LiDAR と超音波センサを搭載している。実際の施設にはガラス窓など透明であり LiDAR が発信する赤外光が反射や拡散して認識できない対象物が多く存在する。UAV が対象物を認識できなければ、その位置を空間と認識して飛行するため衝突する。そこで、UAV の進行方向に超音波センサを取り付けることで、LiDAR で測定できない対象物を検出するシステムを構築した。本実験により、LiDAR で測定できない対象物を超音波センサで検知可能であることの検証を行う。対象物は図 15 に示した透明なプラスチックシートを用いた。

UAV をプラスチックシートの 6m 手前から約 50cm 手前まで移動させ、データを取得した。UAV が推定した自己位置を橙点、LiDAR が取得したオブジェクト情報を緑点、超音波センサの取得した距離情報を赤線として、1 秒ごとのデータを  $t = 1 \sim 6$  秒までそれぞれ図 16(a) から (f) に示す。UAV とプラスチックシートの距離が 4m 以上離れている際には、プラスチックシートのある箇所を LiDAR は点群情報、超音波センサは対象物として取得できている。しかし、LiDAR は図 16(c) から徐々にプラスチックシートを透過して、その奥にある壁面を点群として取得している。これはプラスチックシートが透明なため、LiDAR が照射している赤外光が透過して奥の壁面から反射していると考えられる。さらに、図 16(f) ではほとんどプラスチックシートを認識しておらず、奥側の壁面情報を取得している。一方で、超音波センサは図 16(a) から図 16(f) において、つねに一定の位置に対象物の情報を示している。これは超音波は赤外光のように物質を透過することなく反射するためである。これらのことから、LiDAR では認識できなかった対象物を超音波センサによって認識可能であることを確認した。本実験では、光を透過する対象物として透明なプラスチックシートを用いた。実際の屋内環境には、このほかにも窓ガラスや半透明な仕切りなどの光を透過する対象物が存在する。よって、本研究で提案した複数センサを搭載した UAV システムが有用であると考えられる。

## 5.3 例外的障害物を設置した環境での自律飛行

5.1 節では障害物のない環境において、本研究で実装し



図 17 例外的障害物を設置した実験室

Fig. 17 Laboratory with exceptional obstacles.



図 18 設置した透明な仕切り板

Fig. 18 Transparent divider plate.

た UAV が自律飛行を実現可能なことの検証を行った。また、5.2 節では LiDAR センサやビジョンセンサでは認識が困難である透明な物体の検出の確認を行った。本実験では図 17 に示すように実験室に障害物を設置し、窓ガラスのある高度で飛行させた。障害物は直径 25mm のボールであり、x 軸方向 2m、y 軸方向 -1m の位置と x 軸方向 -1.5m、y 軸方向 1.5m の位置に設置した。窓ガラスには赤外光の透過性が高い黒色のビニルシートが貼られている。

また、飛行開始地点の正面にある窓ガラスを図 18 のように透明なプラスチックパーティションに置き換えた。

本実験では 5.1 節と同様の巡回飛行プログラムに高度 1.5m、飛行時間 1 分間を設定して自律飛行を行った。実験結果を図 19 に示す。二次元 LiDAR によって取得したオブジェクト情報を緑点、UAV の始点を赤点、終点を青点、推定した自己位置を橙点、設置した障害物の位置を水色点とした。緑点は自律飛行開始時に始点で取得した値である。

UAV は壁面や障害物を検知した際には方向転換を行い、衝突することなく設定時間経過後に着陸した。よって、例

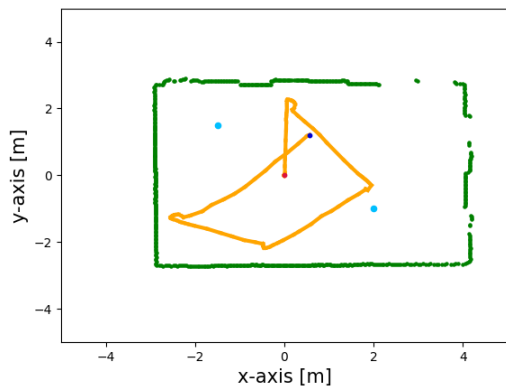


図 19 例外的障害物を設置した環境での自律飛行  
Fig. 19 Autonomous flight in indoor with obstacles.

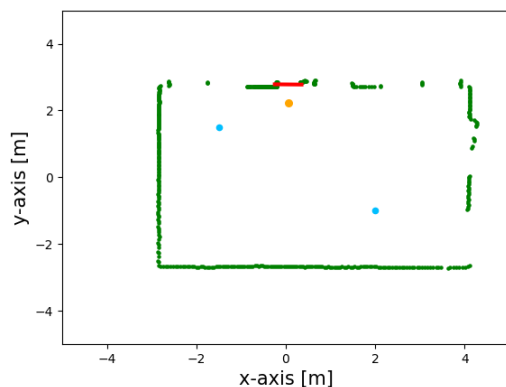


図 20 透明な仕切り板の手前で取得した情報  
Fig. 20 Information acquired in front of the transparent divider.

外的障害物のある屋内環境でも自律飛行を達成した。しかし、飛行開始地点での取得情報では、黒色のビニルシートが貼られた窓ガラスをLiDARの赤外光が透過して取得できていない箇所が存在している。5.2節の結果のようにUAVと赤外光を透過する対象物の位置関係によって対象物の位置をとらえられていないと考えられる。次に、UAVが透明な仕切り板の手前に到達した際の取得情報を図20に示す。UAVが推定した自己位置を橙点、LiDARが取得したオブジェクト情報を緑点、超音波センサの取得した距離情報を赤線、設置した障害物の位置を水色点とした。

LiDARによって正面にある透明な仕切り板を認識できていない。しかし、超音波センサによって仕切り板の位置をとらえている。これによってUAVが障害物検知を行い別方向に回避行動を行ったと考えられる。これらから、本研究によって提案したUAVシステムによって1つのセンサでは認識のできない例外的な対象物がある屋内環境でも自律飛行が可能であることを確認した。

## 6. まとめ

本研究では、未知な屋内環境における自律飛行型UAVに着目した。未知な屋内環境では様々な問題点があげられ

るなかで、それらを解決する手法を採用したUAVの設計と実装について検討を行った。そして、外部機器と無線通信を行うことのできない未知な屋内環境で自律飛行可能なシステムを提案した。これを実現するため、複数のセンサとシングルボードコンピュータを搭載した屋内用のUAVシステムを設計した。UAVによって取得した情報から障害物回避などの算出を行い、自律飛行が可能であることの検証実験を行った。検証実験では提案したUAVシステムは屋内環境で壁面や障害物に当たることなく、自律飛行を実現した。また、屋内環境で想定される様々な環境に適応するため、複数のセンサによって環境把握を行うシステムとした。そのため、光を透過するような障害物など、メインのセンサでは検知の難しい障害物をサブシステムによって検知可能であることを確認した。

本研究によって実装した自律飛行型UAVは測位システムおよび無線通信環境を必要としない。そのため、人が端末から飛行経路を設定することが困難な現場や未知環境、環境が時々刻々と変化する状況での利用を実現する。具体的には、調査の行われていない洞窟内や通信環境を用意できない災害現場などがあげられる。これによって、従来では人間が行うにはリスクをとまなう作業の置き換えや災害時に要救助者の早期発見などで活用が期待される。

今後の課題として、本研究で提案したUAVシステムを社会実装してゆくため信頼性や安全性を考慮した設計にすることがあげられる。現状ではセンサの通信や制御プログラムに時間的制約を与えたリアルタイム性を確保していない。環境の変化や状況によって、データ量や計算コストが変化した際に実行時間にばらつきが出る。そこで、屋内型UAVに求められる応答時間の設定や評価を行い、リアルタイム性を考慮したシステムとする必要がある。このように、今後は実際の現場で本研究によって実装したUAVによる実証実験などを行い、自律飛行アルゴリズムの検討やシステムの改善を進めていく。

## 参考文献

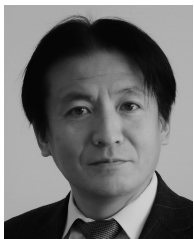
- [1] 野波健蔵：UAV技術の現状と課題およびビジネス最前線，情報管理，Vol.59，No.11，pp.755–763（2017）。
- [2] SKYDIO，available from <https://www.skydio.com/>
- [3] Dowling, L., Poblete, T., Hook, I., Tang, H., Tan, Y., Glenn, W. and Unnithan, R.R.: Accurate indoor mapping using an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV), *IEEE Trans. Industrial Electronics* (2018).
- [4] 福島荘之介：研究・開発の動向事情 理解するためのGPS測位計算プログラム入門 (1) WGS-84と座標変換のはなし，航空無線，航空無線編集委員会（編），No.34，pp.67–73（2002）。
- [5] 鈴木 智：非GPS環境における小型無人航空機の自律制御，計測と制御，Vol.56，No.1，pp.18–23（2017）。
- [6] 鈴木 智，野波健蔵：拡張カルマンフィルタを用いたGPS/非GPS空間における自律飛行UAVのナビゲーション，計測と制御，Vol.56，No.9，pp.675–678（2017）。
- [7] 佐藤真平：モーションキャプチャシステムの計測原理と

- 運用上の留意点, 計測と制御, Vol.59, No.10, pp.739–742 (2020).
- [8] Masiero, A., Fissore, F., Antonello, R., Vettore, A. and Cenedese, A.: A COMPARISON OF UWB AND MOTION CAPTURE UAV INDOOR POSITIONING, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Geospatial Week 2019*, Vol.XLII-2/W13 (2019).
- [9] 徳永悠希, 高橋淳二, 兼子朋也, 戸辺義人, 花見 唯: 線分マッチングに基づく位置推定アルゴリズムの GPU 並列演算による高速化, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.116, No.508, pp.111–118 (2017).
- [10] 田崎勇一: LiDAR を用いた SLAM 技術の現状と展望, システム制御情報学会誌, Vol.64, No.2, pp.51–56 (2020).
- [11] 福島寛之, 鈴木雄介: LiDAR と車輪移動ロボットによる 3D 空間計測自動化とその応用, 情報処理学会インタラク ション 2017 (2017).
- [12] Engel, J., Schops, T. and Cremers, D.: LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM, *European Conference on Computer Vision (ECCV)* (2014).
- [13] Mur-Artal, R., Montiel, J.M.M. and Tardos, J.D.: ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System, *IEEE Trans. Robotics*, Vol.31, No.5, pp.1147–1163 (2015).
- [14] Jones, E., Sofonia, J., Canales, C., Hrabar, S. and Kendoul, F.: Applications for the Hovermap autonomous drone system in underground mining operations, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol.10, No.1, pp.323–334 (2020).
- [15] RPLIDAR S1, available from (<https://www.slamtec.com/en/Lidar/S1/>)
- [16] Maxbotix EZ4, available from ([https://www.maxbotix.com/ultrasonic\\_sensors/mb1040.htm](https://www.maxbotix.com/ultrasonic_sensors/mb1040.htm))
- [17] RealSense T265, available from (<https://www.intelrealsense.com/tracking-camera-t265/>)
- [18] JETSON NANO, available from (<https://www.nvidia.com/ja-jp/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/>)



大坪 洋人 (学生会員)

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科に在籍。屋内環境における UAV の研究に従事。



武田 圭史

2001 年慶應義塾大学後期博士課程修了, 博士。防衛庁航空自衛隊, アクセンチュア株式会社, カーネギーメロン大学日本校教授を経て, 2009 年慶應義塾大学環境情報学部教授。2015~2016 年マサチューセッツ工科大学 W3C リサーチフェロー。無人航空機, 情報システムに関する研究に従事。兵庫県参与。日本ドローンコンソーシアム理事。