

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249021

研究課題名(和文) 原発事故復興支援および超高度自律制御型空中・地上ロボットシステムの総合的研究

研究課題名(英文) A Study on High Performance Autonomous Aerial and Ground Robots for Prevention of Nuclear Disaster

研究代表者

野波 健蔵 (NONAMI, Kenzo)

千葉大学・事務局・特別教授

研究者番号：30143259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、原発事故復興支援および超高度自律制御型空中・地上ロボットシステムの情報収集手段として、3Kg程度の小型空中ロボットと小型知能移動ロボットとを完全自律協調制御システムとして実現するための総合的研究を行った。具体的には、自動バッテリー交換ステーションを搭載したUGVの研究開発、3次元SLAMを用いた屋内での自律飛行制御とマッピング、動力系故障判断システムの設計と耐故障制御の研究を実施した。この結果、世界初の画期的・革新的な原発事故支援および超高度自律制御型空中・地上ロボットを確立した。本研究の成果は、原発事故放射線被災地エリアでの線量計測や原発事故建屋内での作業に適用して成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, an intelligent aerial robot of about 3Kg and mobile ground station equipped with robotic battery changer were developed to collect information in a collaborative effort for the purpose of supporting reconstruction after nuclear disasters. To accomplish the goal of autonomous nuclear power system failure safety determination, studies were carried out to develop a fault tolerant autonomous flight controller, as well as SLAM based three-dimensional mapping. Additionally, a UGV, equipped with automated landing support and battery exchanging station was developed for continuous operations. The effect of these innovative developments working in unison is a groundbreaking, ultra-advanced system for the safe exploration and reconstruction support of nuclear accident sites. The resultant system was successfully applied to autonomously perform dosimetry within a nuclear power plant and accidental radiation disaster area.

研究分野：工学

キーワード：飛行ロボット 自律制御 非GPS環境 地上移動ロボット 協調制御 SLAM

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、重量数百 g ~ 数 kg 程度の汎用自律小型飛行体マイクロエアビークル MAV (Micro Aerial Vehicles) の民生用への普及を目指して、クォータニオンを適用した世界最軽量 30g の小型姿勢センサの開発を行い既存のセンサ性能を越える性能を有している。そして、重量 400g から 5kg 程度の飛行体の自律制御に日本で始めて完全自律制御で成功している。また、オペレータアシスト制御、高精度自動離着陸、GPS/INS 複合航法、ビジョンによる高度な飛行技術、複数機編隊飛行、アクロバット飛行の研究に取り組み、これらの技術はすでに成功し確立済みである。研究代表者のグループはこうした小型飛行体やマイクロエアビークルの制御技術では国内はもとより海外においても世界最先端の研究開発を推進している。このため、2008 年 3 月にインドで開催された世界 MAV コンペにおいても日本代表として 5 機を飛行させ優れた成績を収めた。また、2009 年米国で開催された IROS 国際会議では招待講演を行った。その後、毎年数回の招待講演を行っている。姿勢センサは、3 軸の加速度センサ、ジャイロセンサ、地磁気センサの出力を用いて 3 次元剛体の姿勢表現法の一つであるクォータニオンを推定するアルゴリズムを実装している。そして、従来の姿勢センサの 10 分の 1 以下の 30[g] という重量を実現した。このような軽量化によって、従来では搭載重量の制限によって用いることが困難であった重量 400[g] ~ 5[kg] 程度の機体をプラットフォームとした自律制御技術の開発を行うことが可能となった。このセンサ技術は世界最先端である。また、複数機のフォーメーション制御にも成功している。

2. 研究の目的

本研究は、3Kg 程度の複数の小型空中ロボット (UAVs) と複数の 100kg 程度の小型知能移動ロボット (UGVs) とを完全自律協調制御システムとして実現するための総合的研究を行う。このため UAVs と UGVs による可動式低コストセンサによる屋内の自律飛行制御、自動バッテリー交換ステーションを搭載した UGVs の研究開発と UAVs との協調制御の研究、UAVs と UGVs による 3 次元 SLAM を用いた屋内での自律飛行制御とマッピング、オプティカルフローを用いた速度制御と自己位置推定、UAVs と UGVs によるリアルタイム誘導制御、動力系故障判断システムの設計と故障容認制御、パラシュート搭載による安全性の向上と自動作動、ロボットハンド搭載型飛行ロボットの研究開発等を行う。そして、世界初の画期的・革新的な原発事故支援および超高度自律制御型空中・地上ロボットを確立する。

3. 研究の方法

近年のセンサ技術の向上及び小型コンピ

ュータの性能向上を背景として小型無人航空機が劇的な進化を遂げた。ドローンの名で知られるマルチロータヘリコプタをはじめとして、それらはもはや研究開発の現場のみではなく様々な産業現場において活用されは始めている。従来、小型無人航空機の応用といえば空撮や農薬散布といった屋外の広大空間におけるものがほとんどであったが、近年ではインフラ設備の点検、警備、災害救助といった環境に近接した空間での応用が求められている。屋外の広大空間で小型無人航空機の制御を行う場合、自己位置を計測するために Global Positioning System : GPS を用いる。しかしながら、前述した環境に近接した空間では GPS の精度が劣化する、もしくは一切使用できない状況が存在し、GPS を用いない自己位置の計測方法が必要となる。ここでは、GPS の使用できない非 GPS 空間における小型無人航空機の制御について述べる。特に、非 GPS 空間における自己位置推定手法として、レーザセンサと Simultaneous Localization And Mapping : SLAM 技術を用いた自己位置推定システムを詳説する。

実環境でロボットを自律移動させるには、周囲の障害物の位置情報などが必要となる。その情報を表すための手段の一つとして、周囲環境の地図がある。例えば、周囲環境の地図によって、障害物の位置情報がわかれば、移動可能な空間を探し出し、安全に移動することが可能となる。しかし、周囲環境の地図は必ずしも存在するとは限らない。したがって、まず地図生成をロボットに行わせることが重要となる。一方で、周囲環境の地図を生成するためには、ロボットの移動中に各位置で計測されたデータを位置合わせし、統合する必要がある。計測データの位置合わせには、ロボットの自己位置推定データが重要となる。これは、いわゆる Simultaneous Localization and Mapping (以降 SLAM と略) 問題としてよく知られている。この問題は、IMU やエンコーダなどの内界センサによるオドメトリやカメラや LIDAR、GPS などといった外界センサによる計測位置情報を用いた最適化問題に帰着できると考えられる。ここでは、外界センサとして、Laser Range Finder (以降 LRF と略) を用いた自己位置推定のベースの SLAM アルゴリズムについて述べる。

独国ダルムシュタット工科大学のロボット研究チーム Hector のメンバーは、未知な環境下において環境地図を構築する際、オドメトリを用いることができない環境が多く存在することから、オドメトリに頼らず、3D モーションを推定することを目的として、Hector SLAM を開発した。

Hector SLAM は、LRF のような正確で高解像度、高周波数域の測定ユニットより距離を測定することを想定している。アルゴリズムは、完全な 3D モーションの推定をサポートするように設計されているが、SLAM アルゴリズムは、環境が平坦であるという仮定の下で、

2次元地図作成を行う。Hector SLAMは、グリッドマップで動作し、その基本原理は、スキャンマッチングである。アルゴリズムが起動すると、最初のLRFのスキャンがマップに書き込まれる。その後のLRFのスキャンは、並進と回転における相対変位間の剛体変換を推定するために、マップとマッチングを行う。LRFのスキャンは前のマップの書き込みの位置からの相対並進または回転中の最小容量の基準に応じてマップに書き込まれる。スキャンマッチング手順は、コンピュータビジョンの研究に触発されている。このアルゴリズムは、Gauss-Newton法で最適化を行い、最適されたものを剛体変換している。この繰り返し計算でマップ上での位置を修正している。前項では、Hector SLAMによるロボットの自己位置を推定方法について述べた。しかしながら、ドローンのような飛行ロボットの制御を行う場合、位置だけでなく速度も必要となる。単純に位置を時間微分することによっても速度を得ることができるが、その際に計算された速度はノイズを多く含むため、望ましくない。ここでは、機体に搭載された加速度計出力と、推定された自己位置を用いたカルマンフィルタによる速度推定について述べる。

カルマンフィルタとは、雑音を含むシステムが与えられた際に、システムの動特性、雑音の統計的性質、システムの初期値及び観測データを用いてシステムの状態を推定するオンラインアルゴリズムである。カルマンフィルタの理論は、

1. システム方程式の線形性(linearity)
2. システム及び観測雑音の白色性(whiteness)
3. 雑音のガウス性(Gaussian)
4. 最小2乗規範(quadratic criteria)

という4つの仮定に基づいている。これらの仮定は非常に制限が強く非現実的であるように思われる。しかし、詳細な説明はさけるが、実際にこのような仮定のもとで導出されたカルマンフィルタは多くの実システムに対して有効である。

小型無人航空機を用いた屋内飛行の研究では、LRFや測距データやカメラの画像データを一度地上局に送信し、上局のオンボードコンピュータで、自己位置推定の演算を行い、演算結果などを機体に送信して機体を制御するという研究が一般的である。しかし、地上局のコンピュータを一度介す必要がある場合、万一地上局との通信が途絶えた際には、機体単体での安全な飛行を継続することは困難である。また、未知環境や災害環境などにおいて、LANが行き届いており、無線が途絶することがないという保証はない。そこで、ロバストな自律飛行を実現するためには、自己位置推定演算用のオンボードコンピュータを機体上に搭載し、オンラインで行う必要がある。本節では、屋内飛行用にオンボ-

ードコンピュータを小型無人航空機に搭載し、リアルタイムで自己位置推定および自律制御を実現するシステムについて述べる。はじめに、屋内飛行システムの実現に用いる機器構成および詳細を述べ、次にシステムや実装性能の結果について述べる。

搭載するオンボードコンピュータの要件としては、制御ボードからの各センサデータ、LRFのデータ収集を行うためのUSBポートが付属しており、水平方向、高度方向の自己位置推定の演算を行うのに十分なスペックのコンピュータである必要がある。また、飛行体のため、ペイロードは約6.0キログラムと限られている。そこで、スペック上の要求を満たしたオンボードコンピュータとしてGIGABYTE社製のGB-XM1-3537を用いる。このPCは、無煙炭アルミフレームとガラス面のシャーシをベースにした超小型PCである。CPUには、低消費電力のIntel Core i7-3537Uを採用しており、省スペース、省電力を実現している。また、mSATA規格のSSDおよびメモリを挿入し、OSをインストールすることで動作可能である。実装するOSには、多くの企業のインターネットサーバや携帯電、家電などの組み込み機器のOSとしても利用されている、Linuxを採用する。Linuxは、他のOSに比べ、低い性能のコンピュータでも軽快に動作する。また、ネットワーク機能やセキュリティに優れており、非常に安定しているという特徴を持つ。また、後述するRobot Operating SystemのFuerteバージョン(以降ROSと略)をベースに屋内飛行システムを実現する。Linuxのバージョンとしては、ROSの動作が保障するLinuxのディストリビューションのひとつであるUbuntu12.04を採用する。

ROSとは、米国のロボットベンチャー企業であるウィローガレージ社が中心となって開発しているロボット用のツールキットである。ROSは、LinuxなどのOSにROS固有のツールをインストールすることで利用できるミドルウェアである。ソフトウェア開発者のロボット・アプリケーション作成を支援するライブラリとツールを提供している。ROSはハードウェア抽象化、デバイスドライバ、ライブラリ、視覚化ツール、プロセス間通信、パッケージ管理、組み込み関数などの機能を持っている。ROS用のソフトウェアは主にUbuntuとMac OS Xで実装される。

ROSは、「ノード」と呼ばれる複数のシステムを組み合わせることによって一つの大きなシステムを実現させることができる。ROSにおいてノードはひとつのプログラムであり、C++やPythonにより作成できる。このようにそれぞれの機能を有するノードを組み合わせることによってお互いに違う言語同士でも情報を渡しあえるようなシステムを構成できる。その利点は以下の通りである。

1. 複数のシステム間で共通のノードの使用が可能であり、プログラムの再利用性が高い。

2. ノード単位でデバック可能なため、効率的に開発が行える。

ノードは異なる言語で書かれていても同じことをするプログラムであれば、全く同様な表示のされ方をする。また、ノード名が異なれば複数起動することが可能である。ノード間の通信においては、トピックを配信（パブリッシュ）する側と、トピックを購読（登録）する側、サービスを提供するサービスサーバ、サービスを利用するサービスクライアントの4種類のポートが存在する。各ノードは、いくつでもこのポートを持つことができ、自由に組み合わせることもできる。このように複数のノードがポートを介して通信することで、複雑なシステムが構成できる。

機体に搭載した慣性センサ IMU より得られる Z 方向加速度と、加速度、角速度、地磁気情報より推定した姿勢角を、オートパイロットからオンボードコンピュータへ、シリアル通信を通じて送信する。また、外界センサである、2つの LRF をオンボードコンピュータに接続し、距離データを取得する。オンボードコンピュータ上で取得した、Z 方向加速度と、ロール・ピッチ・ヨー角の姿勢角を用いて、LRF の測距データに対して座標変換等の処理を行い、水平方向自己位置推定および高度推定を行う。水平方向自己位置推定には、Hector SLAM を用いる。高度推定では、垂直 LRF の距離データと Z 方向加速度を Canonical Scan Matcher (以降 CSM と略) より推定する。このスキャンマッチングは、距離計測器のスキャンマッチングのために最適化された point-to-line metric を使用した、高速な ICP アルゴリズムに基づいている。推定された自己位置 (X,Y,Z) をそれぞれカルマンフィルタより速度 (VX,VY,VZ) を求め、オートパイロットに送信する。以下にオンボードコンピュータ内部で行う自己位置推定のシステム図を示す。

4. 研究成果

本研究で製作した完全自律型飛行体を図 1 に示す。この機体は 2014 年に開発したもので、本グループでは Mini-surveyorMS-06LA と呼んでいる。本機は主に非 GPS 環境下での自律飛行を目的として設計・製作した。したがって、図 2 に示すようなレーザースキャナを 2 個搭載している。もちろん、高画質のカメラや映像レコーダなども搭載して非 GPS 環境下の空撮も可能である。機体本体重量は 3kg、直径 90cm、ペイロード 6kg、飛行時間 15 分の機体で本研究のプラットフォームとしての位置づけである。LRF は、距離を測定し自己位置推定を行うために使用する。環境情報を取得する際に用いた外界センサには、北陽電機株式会社が開発した LRF を用いる。LRF は、センサの中心からレーザを照射し、対象物に反射して戻ってくるまでの時間から対象物までの距離を測定する。これは送信機から照射

したレーザを回転ミラーで反射させ、前方を帯状にスキャンすることで、一定の平面上に存在する障害物までの距離を測定できる。一般に LRF を選定する際は、測距距離、計測周期、計測範囲を基準とする。ここでは自己位置の推定を一番の目的として考え、LRF の中で最も計測周期が早い UTM-30LX-F を用いる。



図 1 ミニサーベイヤー機体 MS-06

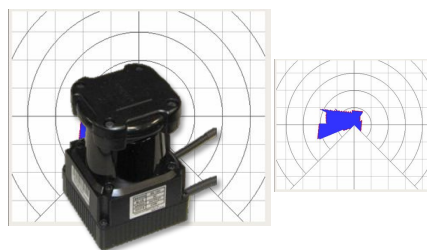


図 2 レーザースキャナーとイメージデータ

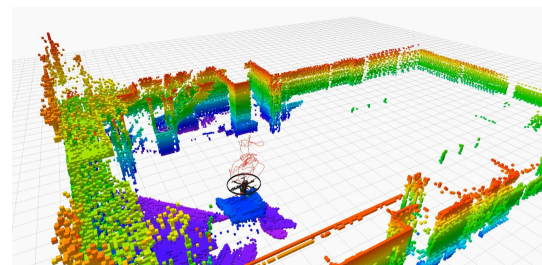


図 3 非 GPS 環境下の自律飛行と SLAM

図 3 は実際に非 GPS 環境下の自律飛行とその際にオンボード PC によって作成された 3 次元 SLAM 地図である。これによって自己位置推定が出来る。

以上述べた SLAM 技術を用いて 2015 年 2 月に福島第一原子力発電所 5 号機原子炉建屋内にて自律飛行実験を実施し、当初のシナリオ通りの自律飛行実験に成功した。ミニサーベイヤーに搭載したレーザースキャナによって取得したデータをもとに SLAM 技術で作成した 3D 地図を図 4 に示す。図 4 は原子炉建屋内を飛行した図で、障害物を正確に認識していることが分かる。

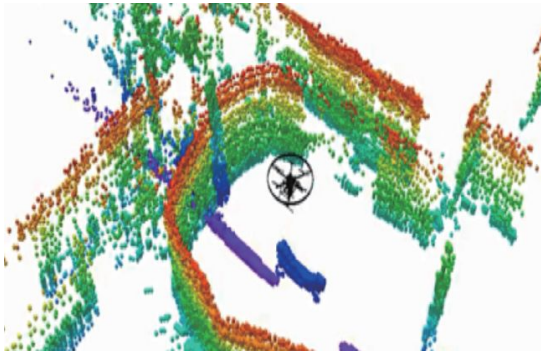


図4 福島第一原子力発電所内の自律飛行

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- (1) 堀悖史、古井達也、岩倉大輔、野波健蔵、産業用マルチロータヘリコプタのオンラインシステム同定機構を有する自動チューニング適応 I-PD 制御、日本機械学会論文集、査読有、Vol.82、No.834、2016、pp1-11
DOI:10.1299/transjsme.15-00315
- (2) M.F.B.Abas, D.Pebrianti, S.Azrad, D.Iwakura, Y.Song, K.Nonami, MAV Circular Leader-Follower Formation, Control Utilizing Mass-Spring-Damper with Centripetal Force Consideration, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol.25, No.1, 2013, pp.240-251
<https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot002500010240/>
- (3) M.F.B.Abas, D.Pebrianti, S.Azrad, D.Iwakura, Y.Song, K.Nonami, Circular Leader-Follower Formation Control of Quad-rotor Aerial Vehicles, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol.25, No.1, 2013, pp60-71
<https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot002500010060/>

〔図書〕(計3件)

- (1) 野波健蔵他、朝倉書店、制御の事典、2015、592

- (2) K.Nonami, K.Muljowidodo, K.J.Yoon, Springer, Autonomous Control Systems and Vehicles, 2013, 315
- (3) K.Nonami, R.Barai, A.Irawan, M.R.Daud, Springer, Design, Implementation and Control of Hydraulically Actuated Hexapod Robot, 2013, 300

〔その他〕

ホームページ等

URL:<http://mec2.tm.chiba-u.jp/~nonami/>

URL:<http://mini-surveyor.com/>

URL:<http://acsl.co.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

野波 健蔵 (NONAMI, Kenzo)
千葉大学・事務局・特別教授
研究者番号：30143259

(2)研究分担者

大武 美保子(OOTAKE, Mihoko)
千葉大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10361544
(平成26年10月29日削除)