

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 18 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22246028

研究課題名（和文）超高度防災支援システム用ユビキタス超小型空中・地上ロボット
ネットワーク網の研究研究課題名（英文）A Study on Advanced Network System of Ubiquitous Small-scale Aerial
and Ground Robots for High Performance Prevention of Disaster

研究代表者

野波 健蔵 (Nonami Kenzo)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30143259

研究成果の概要（和文）：

本研究は、超高度防災支援システムとしての情報収集手段として、いつでもどこでも誰でも使用が可能となる、超小型カメラを始めとする様々なセンサを搭載した約 2Kg 程度の複数の超小型空中ロボット(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基礎研究と応用研究を行った。とくに、UAVs と UGVs による無線ネットワーク網および協調メッシュネットワークの構築、群れをなす小型動物のようにビジョンベースの未知環境外界認識技術とスワーム・フォーメーション技術の確立、SLAM 技術を適用した自己位置同定と 3 次元マッピング技術の確立、UAVs と UGVs が 1 つのタスクを実現するための最適化技術の研究を行った。これにより「ユビキタス UAVs と UGVs の世界初の最先端完全自律協調制御システムの方法論を確立した。本研究を推進中の 2011 年 3 月 11 日に東日本大震災が発生して、その後の巨大津波による東京電力福島第 1 原発事故が発生した。本研究ではこの深刻な事態に対応するために 5 月の連休期間にマルチロータヘリコプターで三陸沿岸の津波被災地域を詳細に調査した。さらに、超高度防災支援システムとして東京電力福島第 1 原発事故放射線汚染地域での線量計測を 2012 年から開始して、現在までに大きな成果をあげている。そして、2012 年 10 月にミニサバイバーコンソーシアムを設立して約 60 の機関による産学官連携を行い、精力的に信頼性・安全性・耐久性の検討を行い、事業化への検討も進めている。

研究成果の概要（英文）：

In recent years, multirotor helicopter type autonomous UAVs are being used for aerial photography and aerial survey. In addition, various applications such as buildings maintenance, security and rescue are expected in multirotor helicopters. Not so distant future, these technology will be penetrate in our life. However, serious accident could occur if became widespread without guidelines and guarantees of safeness. Therefore, manufacturers need to be able to show that region of applicable application and behavior of fault mode to users. To show that, analytical model that can be used for analysis of behavior on model parameter change and hardware fault is needed. Our research group has started research on multirotor helicopters since 2007. In 2010, we started to develop a practical multirotor with own design. Our research goal is to achieve advanced network system of ubiquitous small-scale aerial and ground robots for high performance prevention of disaster in this project. In 2011, we succeeded in autonomous control and we launched a consortium of multirotors in 2012. As described above, analytical model is needed for realizing safe multirotors. In this research, we constructed an analytical model which can be apply to general multirotors. The model was verified in experiment by constructing a control system. We constructed a simulation system which can be use for operator training and control system validation. In addition, this simulator can be simulated rotor failure and sensor failure. Actually by using this simulator, we showed that our simulator is useful for analyzing behavior of rotor failure, and is useful for training an operator. While the multirotor helicopters are mainly used in outdoors, also it is expected for information gathering in indoors. Autonomous navigation of flying robots in GPS-denied environments such as indoors requires that the the flying robot be able to estimate the position using external sensors. While laser scanners are mainly used for studies of indoor flight, development of smaller size robots is prevented due to the larger mass of sensor. Thus in this study, we develop a lightweight flying robot for achieving indoor autonomous flight using four infrared (IR) sensors. However, following problems are exists in localization based on IR sensors. First, it is difficult to use IR sensors close to a wall, because doing so would yield faulty results when calculating distance using the sensor output voltage. The second problem is that the spatial resolution is low because only four IR sensors are used. For the first problem,

we constructed a probabilistic model of IR sensor that can estimate position from voltage information without the use of calculated distance. The second problem, was solved by rotating the robot horizontally at all times to acquire information from various directions. Finally, the localization performance was verified experimentally using an electric turntable and a cart. In the experiments, we confirmed that localization is successful even when the robot is in motion and even when the robot is flying near a wall.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|------------|
| 2010年度 | 17,100,000 | 5,130,000 | 22,230,000 |
| 2011年度 | 12,000,000 | 3,600,000 | 15,600,000 |
| 2012年度 | 7,800,000 | 2,340,000 | 10,140,000 |
| 総計 | 36,900,000 | 11,070,000 | 47,970,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械力学・制御

キーワード：飛行ロボット、自律制御、地上移動ロボット、ネットワーク、協調制御

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。この姿勢センサは某社から販売中である。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、2Kg程度の複数の超小型空中ロボット(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基礎研究と応用研究を行う。このためUAVsとUGVsによる無線ネットワーク網および協調メッシュネットワークの構築、群れをなす小型動物のようにビジョンベースの未知環境外界認識技術とスワーム・フォーメーション技術の確立、SLAM技術を適用した自己位置同定と3次元マッピング技術の確立、UAVsとUGVsが1つのタスクを実現するための最適化技術の研究を行う。これにより「ユビキタスUAVsとUGVsの世界初の最先端完全自律協調制御システムの方法論を確立する。さらに、その応用として超高度防災支援システムへ適用する。

3. 研究の方法

これまでの無線通信技術・画像伝送技術は特殊なアンテナや送受信機器を用いても、せいぜい数キロメートルが限界であった。UAVs(Unmanned Aerial Vehicles)やUGVs(Unmanned Ground Vehicles)などの自律制御では完全組込み技術で移動するため特段問題はないが、飛行・走行ルートの変更や画像のリアルタイム取得が不可能であった。一方、本提案の航法は携帯電話ネットワーク網とメッシュネットワークを協調させ同時併用することから、高度な信頼性および大量情報通信、準高速通信が可能であるということである。世界中のどの場所からでも任意のUAVsとUGVsへ指令を送信でき、画像取得が可能となるため、リアルタイムでルート変更、搭載カメラの方向やズームングを

制御でき、携帯電話ネットワーク網が利用可能な場所であれば、原理的には全地球的にカバーすることができる。この点が本研究開発の際立った新規性・独創性・優位性である。すなわち、UAVs や UGVs と携帯電話のネットワーク網の融合による新しい付加価値の創造が極めて独創的で新規性に富んでいる。ただし、電波法の関係から UAVs についてはすべて離陸直前にすべてのデータを超小型空中ロボットに送信しておき、飛行中は携帯電話との通信は避けるものとする。緊急時はその限りではない。そして、着陸後に画像データを携帯電話回線ネットワーク網を介して転送するものとする。

携帯電話は現在主な機能として電話、メール、web 検索、テレビ受信などの優れたモバイル端末機能を有しているが、これ以外に「マイクロカメラを搭載した超小型自律型移動体」という媒体を介した能動的な情報収集源としての機能を付加することで、生活スタイルが革新的に変革される。これは新しい価値の創造にもなり、計り知れない効果をもたらすと思われる。100km 先や 1,000km 先、さらには海外のライブ情報をカメラ映像伝送によって意のままに取得できることになる。とくに、わが国のように自然災害が多発する場合、勤務先から自宅や地域の安全を確認したりすることも可能となる。さらに、日本を防災列島化する方策として、消防署や各自治体、警察署が超小型自律型移動体 UAVs と UGVs の無数の機体によるネットワークリンク化を図り携帯電話により情報を共有すれば、災害現場などに人を送り込まなくても、いつでもどこでも誰でもライブ情報を収集可能な体制ができ、超高度防災支援システムネットワーク網の確立となり、災害被害最小化ハイテク技術として世界の安全安心社会実現に大きく貢献できる。

本研究で適用するモバイル通信は通信速度と遅延時間を除けば、理想的な通信網となりうる。したがって、超小型移動ロボットが真に超高度防災支援システムとしての情報収集手段として、いつでもどこでも誰でも使用が可能となる革新的な画期的なインフラ環境が実現できることになる。しかし、これまで本研究のような提案は全く見当たらない。この点が本研究の最も斬新なアイデアと構想である。

携帯電話ネットワーク網と協調させるメッシュネットワークについて述べる。メッシュネットワーク (mesh network) は、ノード間のデータや音声のルーティングの一種で、故障などで使えなくなった経路が発生しても継続的に接続・再構成を繰り返し、送信先に達するまでノードからノードへ転送を行う。メッシュネットワークの最大の特徴は、各ノードがトラフィックを転送する「ホップ

(hop)」という動作をする点で、それによって各ノードから任意のノードへ接続する。メッシュネットワークはアドホックネットワークの一種で、自己修復性がある。1つのノードがダウンしたり、1つの接続が不良となっても、ネットワーク全体は運用可能である。結果として、非常に信頼性の高いネットワークとなる。この概念は無線ネットワークにも有線ネットワークにも、あるいはソフトウェアの相互のやり取りにも適用可能である。

本提案の航法の有効性が実証されれば、超高度防災支援システムとして、また、災害被害最小化ハイテク技術として利用が期待される。とくに、災害地域の正確で最新の情報収集や安全安心社会を維持する目的で、消防署、警察署、自治体、新聞社、テレビ局、報道番組制作会社、防災・防犯関連の警備保障会社などで最新の情報収集に寄与する。よって、災害被害最小化ハイテク技術として世界の安全安心社会実現に大きく貢献できる。

本研究は超高度防災支援システムとしての情報収集手段として、いつでもどこでも誰でも使用が可能となる、超小型カメラを始めとする様々なセンサを搭載した 2Kg 程度の複数の超小型空中ロボット (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基礎研究と応用研究を行う。このため、3年間の研究を2年間の基礎研究と1年間の応用研究に分ける。平成 22~23 年度の基礎研究においては、以下の6項目について研究する。【1】信頼性・耐久性のある超小型自律制御 UAVs・UGVs の開発と多数機配備による Wi-Fi ネットワーク網の確立、【2】信頼性・耐久性のあるメッシュネットワーク網と携帯電話ネットワーク網の協調ネットワークによる航法の開発、【3】ネットワーク化に関する具体的な実験計画、【4】ネットワーク化の技術的課題、【5】群れをなす小型動物のようにビジョンベースの未知環境外界認識技術とスワーム・フォーメーション技術の確立、【6】DP-SLAM 技術を適用した自己位置同定と3次元マッピング技術の確立、MAVs と UGVs が1つのタスクを実現するための最適化技術の研究を実施する。以上の基礎研究の後に、応用研究として「超小型空中・地上移動ロボットによるコピキタス超高度防災支援システム」を実現する。

4. 研究成果

本研究で製作した完全自律型飛行体を図1と図2に示す。この機体は2011年に開発したものであり、本グループでは Mini Surveyor と呼んでいる。本機は主に空撮用に設計されており、高画質のカメラや映像レコーダなどを搭載できる。機体重量は 1.7kg、直径 80cm、ペイロード 1.1kg、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。



図1 ミニサーベイヤー機体 MS-06



図2 飛行中のミニサーベイヤー機体 MS-06



図3 東日本大震災後の女川町被災地空撮

図3はミニサーベイヤーMS-06による東日本大震災後の女川町被災地空撮写真である。このように2011年3月11日の東日本大震災発生後は、研究方針を少し変えて巨大津波被災地の被害調査を空中ロボットで実施すること、さらに、福島第1原発事故後の放射線量モニタリングを定期的の実施していくことなど、緊急性の高い課題とも取り組んだ。図4は福島県川俣町山木屋地区放射線量の2012年8月5日時点と12月8日時点のモニタリング結果を示している。これから放射線量が4ヶ月で18%減少したことが明らかとなった。このように本研究で開発した完全自律型マルチロータヘリコプタ、ミニサーベイヤーは様々な活用ができることが検証できた。このように実利用をしながら、もちろん当初掲げた研究目的の約7割は達成できた。さらに、2012年10月にミニサーベイヤーコンソーシアムを設立したことも大きな成果



図4 福島県川俣町山木屋地区放射線量モニタリング結果(2012.8.5と2012.12.8の経時変化)

である。現在は約60機関の産学官連携組織となっている。図5、図6はミニサーベイヤーコンソーシアム設立総会とその時のデモフライトの様子である。



図5 ミニサーベイヤーコンソーシアム設立総会(2012年10月16日)



図6 コンソーシアム設立総会のデモ飛行

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文](計18件)
- (1) S. Azrad, M. Fadhil, F. Kendoul, K. Nonami, Localization of Small Unmanned Air Vehicle in GPS-Denied Environment Using Embedded Stereo Camera, International Journal of Automation, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 12 (2012), No. 1 pg. 1-10.
 - (2) M. Razali and K. Nonami, Autonomous Walking over Obstacles by Means of LRF for

- Hexapod Robot COMET-IV, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24, No.1, 2012
- (3) R.L.A. Shauri and K. Nonami, Calculation of 6-DOF Pose of Arbitrary Inclined Nuts for a Grasping Task by Dual-Arm Robot, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24, No.2, pp.363-371, 2012
- (4) M. Tawara and K. Nonami, General Airframe Design and Implementation with Low-Cost for Multi-Rotor Type Helicopters, Trans. of Japan Society of Mechanical Engineers, Ser.C, Vol. 78, No.787, pp.872-882, 2012
- (5) S. Toritani, K. Nonami and R.L.A. Shauri, Numerical Solution Using Least-Squares Method for Inverse Kinematics Calculation of Redundant Manipulators, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24, No.2, 2012
- (6) A. Irawan and K. Nonami, Optimal impedance control based on body inertia for a hydraulically driven hexapod robot walking on uneven and extremely soft terrain, Journal of Field Robotics, Vol. 28, pp.690-713, 2011
- (7) A. Irawan and K. Nonami, Adaptive Impedance Control with Compliant Body Balance for Hydraulically Driven Hexapod Robot, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 5, pp.893-908, 2011
- (8) D. Pebrianti, W. Wang, D. Iwakura, Y. Song, and K. Nonami, Sliding Mode Controller for Stereo Vision Based Autonomous Flight of Quad-Rotor, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.1, 2011
- (9) A. Irawan and K. Nonami, Compliant Walking Control for Hydraulic Driven Hexapod Robot on Rough Terrain, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.1, pp.149-162, 2011
- (10) J. Luo and K. Nonami, Approach for Transforming Linear Constraints on Petri Nets, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.56, No.12, pp.2751-2765, 2011
- (11) K. Saiki and K. Nonami, Force Sensorless Impedance Control of Dual-Arm Manipulator-Hand System, Journal of System Design and Dynamics, Vol.5, No.5, pp.953-965, 2011
- (12) D. Iwakura, W. Wang, K. Nonami and M. Haley : "Movable Range-Finding Sensor System and Precise Automated Landing of Quad-Rotor MAV," Journal of System Design and Dynamics, Vol.5, No.1, pp.17-29, 2011
- (13) R.L.A. Shauri and K. Nonami, Assembly manipulation of small objects by dual-arm manipulator, Assembly Automation, Vol. 31, pp. 263-274, 2011
- (14) D. Pebrianti, F. Kendoul, S. Azrad, W. Wang, K. Nonami, Autonomous Hovering and Landing of a Quad-rotor Micro Aerial Vehicle by Means of on Ground Stereo Vision Systems, Journal of System, Design and Dynamics, Vol.4, No.2, pp.269-284, 2010
- (15) Azrad, F. Kendoul, K. Nonami, Visual Servoing of Quadrotor Micro-Air Vehicle Using Color-Based Tracking Algorithm, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 4 (2010) No. 2 pg. 255-268
- (16) S. Suzuki, K. Nonami, Attitude Control of Quad Rotors QTW-UAV with Tilt Wing

- Mechanism, Journal of System Design and Dynamics, 4-3, pp.416-428, 2010
- (17) D. Iwakura, W. Wang, K. Nonami : Precise Landing of Quad-rotor MAV with Movable Outer sensors , Trans. of Japan Society of Mechanical Engineers, Ser.C, Vol.76, No.761, pp.61-68 , 2010
- (18) S. Suzuki, D. Nakazawa, K. Nonami, M. Tawara : Attitude Control of Small Electric Helicopter by Using Quaternion Feedback , Trans. of Japan Society of Mechanical Engineers, Ser.C, Vol.76, No.761, pp.51-60, 2010

〔図書〕(計2件)

- (1) Autonomous Flying Robots, K. Nonami, K. Farid, S. Suzuki, W. Wang Springer, 2010
- (2) システム動力学と振動制御、野波、コロナ社, 2010

〔産業財産権〕
出願状況(計1件)

名称：小型姿勢センサ
発明者：野波健蔵、鈴木智、田原誠
権利者：野波健蔵、鈴木智、田原誠
種類：
番号：特願 2012-67533
出願年月日：平成 24 年 3 月 23 日
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

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

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

6 . 研究組織

- (1) 研究代表者
野波 健蔵 (Nonami Kenzo)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：30143259
- (2) 連携研究者
並木 明夫 (Namiki Akio)
千葉大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40376611