

令和元年6月21日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00360

研究課題名(和文) 精度保証を考慮した環境計測用飛行ロボットの移動経路計画

研究課題名(英文) Path planning method of an Unmanned Aerial Vehicle for environment measurement considering the measurement accuracy

研究代表者

道木 加絵 (DOKI, Kae)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00350942

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、大規模インフラ設備を飛行ロボット(UAV)で自動点検するため、環境に衝突することなく対象範囲内の環境を確実に計測するための飛行ロボットの移動経路計画手法の確立を目指した。

本研究では、風の影響や飛行ロボット自身の移動にばらつきが生じる状況下において、対象を確実に計測するための計測点を自動生成する手法と生成した計測点を使った移動経路生成手法を実現した。シミュレーション等を通して、提案手法により計測精度を保証しつつ対象を漏れなく計測できる飛行ロボットの移動経路が生成可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インフラ点検や災害現場では飛行ロボットを用いた環境計測が急速に進むが、人手不測の解消や点検の効率化には飛行ロボットが自動点検できる機能が必要となる。本研究はその第一歩として、計測対象を与えられた計測精度で漏れなく計測するための計測点の自動生成と移動経路計画手法に取り組んだ。現在は人間が手動でUAVを操縦しインフラ点検を行っているが、非常に時間と手間がかかるのが実情である。ロボットによる自動点検技術を確立することで、多くの老朽化したインフラ設備を短時間かつ低コストで点検でき、老朽化インフラによる大規模災害などを未然に防ぐことが可能となる。

研究成果の概要(英文)：In this research, it was aimed to realize a path planning method of an Unmanned Aerial Vehicle(UAV) in order to measure an huge infrastructure facility considering the unstable movement of UAV and the measurement accuracy.

As results of this research, a path planning method of a UAV was realized, where a measurement point as a waypoint was generated to ensure the measurement accuracy considering the specification of a sensor and the UAV's movement influenced by wind. In addition, the generation method of measurement points was improved by applying a clustering method in order to measure the whole surface of the target. The usefulness of the proposed method was shown through some simulation and experimental results with a real aerial robot in this research.

研究分野：ロボティクス

キーワード：飛行ロボット 経路計画 インフラ点検 環境計測

1. 研究開始当初の背景

大規模災害時の迅速かつ効率的な人命救助・復旧活動、老朽化した大規模インフラの破損による災害防止の解決策の一つに UAV (Unmanned Aerial Vehicle) やドローンと呼ばれる飛行ロボットを利用した建造物等の計測（環境計測）に関する検討が急激に進んでいる。上記について従来検討されてきたシステムは、操作者が目視により飛行ロボットを遠隔操作することで、対象範囲の環境把握や検査を実現するものである。これに対し、風等の外乱に対する飛行の安定化、計測データを用いた環境認識等が研究されてきた。しかし、操作者が遠隔操作する場合、a) 風による移動のばらつきを考慮した操作の負担、b) 操作者の能力による計測精度のばらつき、c) 目視で確認できない想定外の障害物と飛行ロボットの衝突、が問題となる。

2. 研究の目的

飛行ロボットによるインフラ点検や災害現場のための環境計測における人手不足の解消や点検の効率化の実現にはより高い自律性を持つ飛行ロボットが必要であると考えられる。そこで、より高い自律性を持つ飛行ロボット実現の第一歩として、本研究では「風の影響による飛行ロボットの移動のばらつきや環境の事前情報と実際が異なる状況下で、環境に衝突することなく対象範囲内の環境を確実に計測するための飛行ロボットの移動経路計画手法」の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究で目指す「対象範囲内の環境を確実に計測するための飛行ロボット（以下、UAV）の移動経路計画」は、環境と UAV の物理的な関係で計測不可能な部分は除いた上で「計測対象を漏れなく計測するための経路点生成問題」と「生成された計測点をすべて経由する UAV の経路生成問題」に分けることができる。本研究の主眼は経路生成手法であるため、これを中心に以下に述べる。

前提条件として図1で示すように点検対象の情報が三角ポリゴン形式で事前に得られるものとする。また、対象計測用のセンサとして UAV にカメラを搭載することを想定し、点検に必要な計測精度が与えられるとする。

初年度は、風の影響による UAV の移動のばらつきや環境の事前情報に差異がない状態での UAV の経路計画に取り組んだ。本手法では、事前情報として与えられた計測精度、UAV に搭載するカメラの仕様並びに UAV から計測対象までの計測距離  $D$  から、図2で示す一度に計測可能な領域（図中の計測円）を求める。続いて、求めた計測円を基に経路点を決定する。図1に示すように点検対象の形状により三角ポリゴンの大きさは異なる。そこで、先に求めた計測円にすべての三角ポリゴンが入るよう、計測円に収まらないすべての三角ポリゴンを分割する。そして、図2に示すように分割されたものを含むすべての三角ポリゴンに対し、外接円中心から法線方向に距離  $D$  離れた位置を求め、これを UAV の経路点とする。一方、経路生成については計測開始点を設定し、A\*アルゴリズムを用いて移動距離が最小となるような経路点順を決定し、経路を生成する。ただし、UAV の移動特性を考慮して上下運動は大きなコストとなるようコスト関数内で重みづけを行う。また移動中の安全を確保するため UAV が周囲環境に接触する経路点は除外する。

次年度は、風の影響により UAV の移動のばらつきが存在する状態での点検対象を漏れなく計測するための経路点生成問題に取り組んだ。風の影響により UAV の移動にばらつきがある場合、図3のように計測範囲内がばらつき、前年度で確立した手法では計測漏れが生じる可能性がある。そこで、UAV の移動のばらつきを見込めることを仮定し、その上で移動にばらつきが生じていても確実に計測可能な範囲を求め、これを計測円とすることとした。更に、初年度

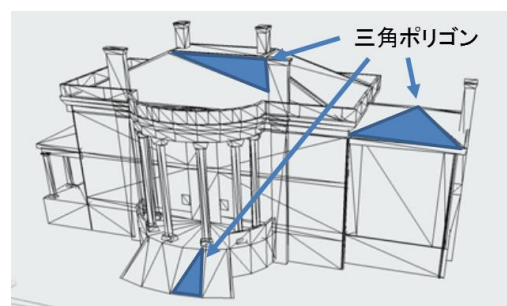


図1 三角ポリゴンを用いた 3次元環境表現の例

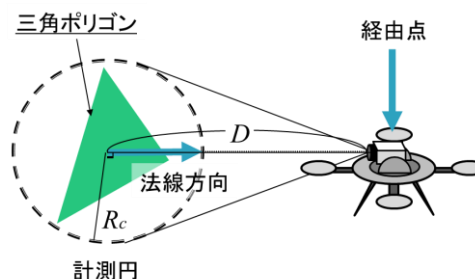


図2 計測精度を保证するための 飛行ロボット経路点の決定方法

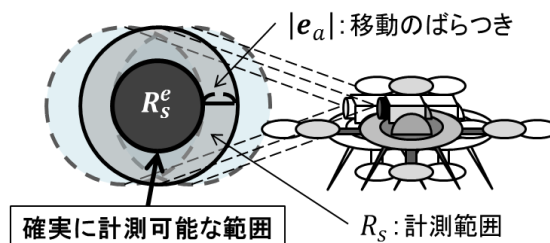


図3 移動のばらつきを考慮した 計測円の決定

で構築した手法では事前情報として与えられる点検対象の三角ポリゴンを計測円に収まるように分割していた。しかし、この手法では計測円内に収まる三角ポリゴンの大きさにばらつきが生じ、計測円が何重にも重なる無駄な計測が行われる現象が見られた。更に、曲面が存在する場所では計測方向と面の法線方向のずれにより計測円端のデータに歪みが生じ、計測精度への影響が生じる。そこで、図4に示すように平面ではこれまで通りのような計測を、曲面では面の法線方向のずれが計測精度に影響しない範囲で密な計測を行う事が必要と考える。そこで、図5に示すようにクラスタリングの概念を適用した UAV の経路点決定方法を構築した。図5(a)に示すよう、事前情報として与えられた点検対象のすべての三角ポリゴンを事前に設定した大きさ（分解能）の三角ポリゴンになるまで分割する（以下、分割ポリゴン）。そして、UAV の移動のばらつきに基づき決定した計測円に入る、かつ計測円に含まれる分割ポリゴンの法線ベクトルのばらつきが所望する計測精度に基づき決定した範囲内に収まるよう、分割ポリゴンをまとめていく。このように複数の分割ポリゴンでまとめられた領域の重心を経由点とする。なお、計測方向は同一領域としてまとめられた複数分割ポリゴンの法線ベクトルの平均値とする。

最終年度は、図6に示すように補機 UAV を用いた主機 UAV の自己位置推定システムの構築に取り組んだ。点検対象を確実に計測するには前年度までに生成した各計測点への確実な移動とその点での計測のために頑健かつ高精度な自己位置推定手法の構築が必要不可欠と考えたためである。自己位置推定とは移動環境中での自身の位置を推定することを意味する。一般に、UAV の自己位置推定には全球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System: GNSS）が用いられる。GNSS は衛星信号を用いた自己位置推定であるため上空が開けた環境では非常に有効であるが、構造物付近では補足衛星数の低下やマルチパスにより計測精度が著しく劣化する。そこで、本研究では点検作業を行う飛行ロボット（以後、主機 UAV）の自己位置推定を補助する飛行ロボット（以後、補機 UAV）群を導入した自己位置推定システムの確立を目指した。本システムでは主機 UAV は前年度までの手法で計画された経路に従い移動するものとし、補機 UAV 群は主機 UAV の移動に合わせて自己位置推定を補助するよう移動を行う事を想定する。そこで、最終年度は主機 UAV の自己位置推定補助を目的とした補機 UAV の経路計画手法を構築した。事前情報として、主機 UAV の経路計画に用いた点検対象の情報に加え、衛星配置情報が得られるものとする。まず初めに、点検対象周囲の空間をボクセルグリッド化し、衛星配置情報と点検対象の情報から求めた GNSS 精度情報と補機 UAV 群の相対位置に関する配置コストに基づき図7に示す補機位置評価マップを生成する。補機 UAV の経路は主機 UAV の移動に合わせて先に求めた補機位置評価マップのコストが最小となるような経路を選択することで生成することとした。

#### 4. 研究成果

研究期間内に構築した各手法の研究成果を図8～図10に示す。

図8は初年度に構築した手法で生成された UAV 飛行経路を示す。図中赤線は UAV の飛行経路を、青い三角ポリゴンは計測可、白い三角ポリゴンは計測不可の領域を表す。初年度に構築した手法では事前情報として与えられた点検対象の三角ポリゴンを計測円に合わせて分割するのみとしたため、図のように計測不可の部分が残る結果となった。

図9に次年度に構築した手法で生成された UAV 飛行経路を示す。この年度では移動のばらつきを考慮し、更に事前情報として与えられた点検対象の三角ポリゴンを細かく分割した後にクラスタリングの概念を適用して領域をまとめ、経路点を決定している。そのため、図9の両図が示す通り計測不可の部分が消滅したことがわかる。さらに、図9(a)は UAV の移動のばらつきが小さい場合、図9(b)は移動のばらつきが大きい場合

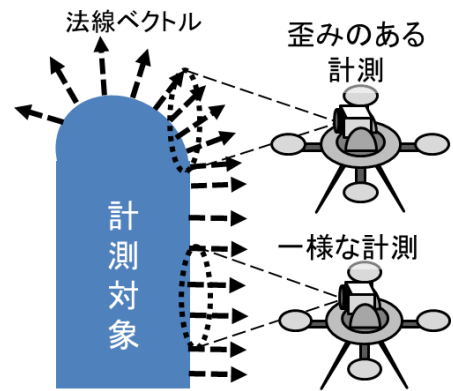
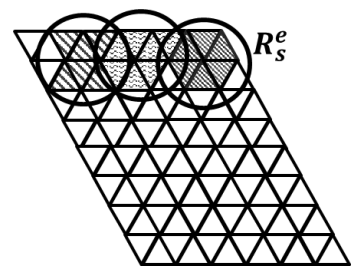
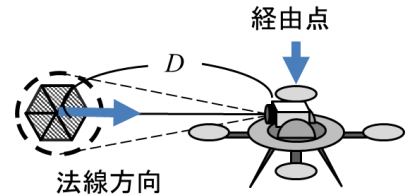


図4 計測対象の形状と計測精度の関係(概念図)



(a) クラスタリングによる計測対象領域の分割



(b) 飛行ロボット経路点の決定

図5 クラスタリングの概念を適用した新しい経路点決定方法

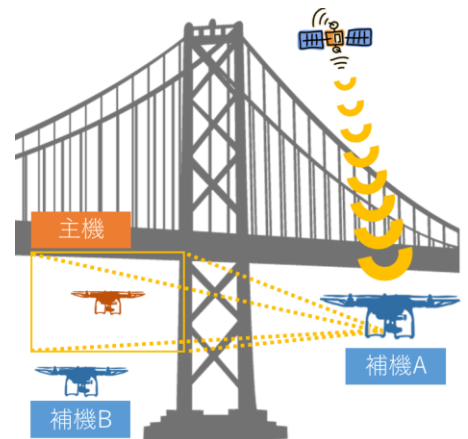


図6 補機 UAV を用いた主機 UAV の自己位置推定

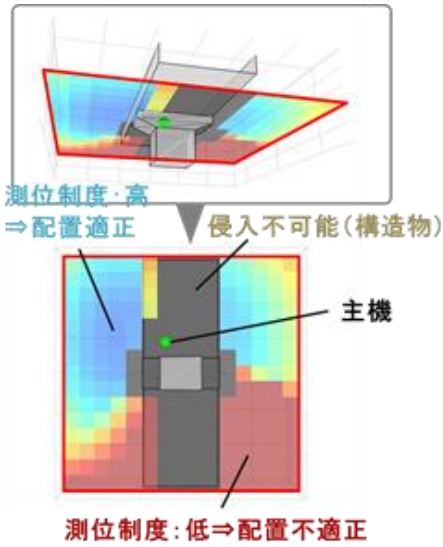


図 7 DOP および主機—補機の相対位置に基づく補機位置評価マップ

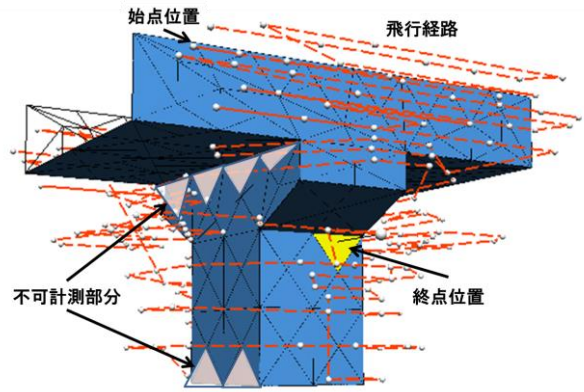
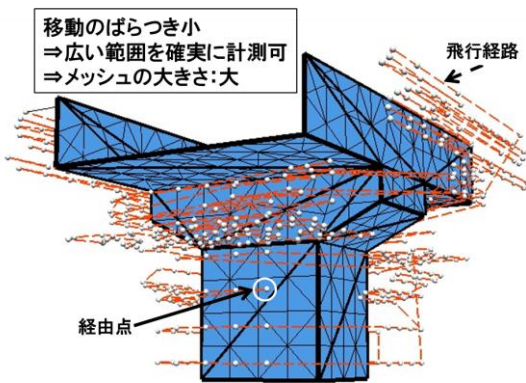
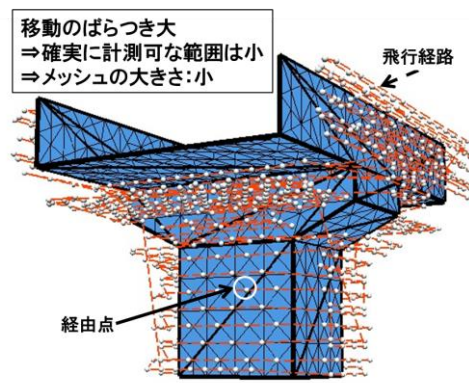


図 8: 移動のばらつきを考慮しない場合の飛行ロボットの移動経路



(a) 移動のばらつきが小さい場合



(b) 移動のばらつきが大きい場合

図 9 移動のばらつきを考慮してクラスタリングの概念を適用して生成した経路点を用いた飛行ロボットの移動経路計画結果

に生成された UAV の飛行経路を示す。移動のばらつきに応じた密度で経路点が生成されていることが確認された。

図 10 に最終年度で構築した補助 UAV 群を用いた主機 UAV の自己位置推定結果を示す。縦軸は位置推定誤差、横軸は補機 UAV 数で、補機数 0 は主機のみで自己位置推定を行ったことを意味する。青は主機の移動全体での平均誤差、赤は主機移動中における最大誤差を示す。補機 UAV 数が増加するに従い、平均誤差並びに最大誤差が低下する結果が示された。

以上の結果より、対象範囲内の環境を確実に計測するための飛行ロボットの移動経路計画問題に対し、研究期間内を通して有用な飛行ロボットの経路計画手法並びに確実に環境を計測するための自己位置推定手法を確立したことが示された。

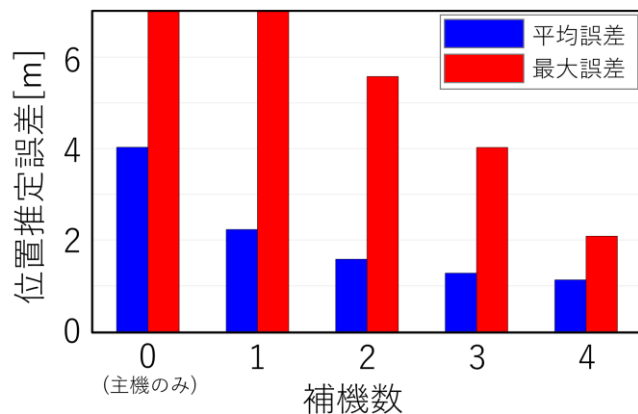


図 10: 補機 UAV を用いた主機 UAV の自己位置推定結果 (全ステップの平均誤差と最大誤差)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 麻晃太郎、舟洞佑紀、道木慎二、道木加絵「無人飛行体によるインフラ設備外観自動点検システムのための 状態データの精度と作業効率を考慮した計測位置決定」、計測自動制御学会論文、55 巻 5 号、pp.386-392、2019
- ② 麻晃太郎、舟洞佑紀、道木慎二、道木加絵「UAV によるインフラ設備外観の自動点検システムの実現に向けた三次元モデルに基づく状態データの精度を考慮した計測位置算出」、計測自動制御学会論文、53 巻 3 号、pp.229-235、2017

[学会発表] (計 15 件)

- ① 麻晃太郎、舟洞佑記、道木慎二、道木加絵、” 無人飛行体を用いた構造物外観自動計測システムのための経路生成法の計算量評価”、第 30 回日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、2018
- ② 洪曜漢、舟洞佑記、道木慎二、道木加絵、”Efficiency improvement of infrastructure inspection by maneuvering assistance of an unmanned aerial vehicle using augmented reality”、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2018
- ③ 前田圭吾、舟洞佑記、道木慎二、道木加絵、”構造物付近で作業する UAV の位置推定を補助する UAV 群の飛行経路計画”、平成 30 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2018
- ④ 洪曜漢、舟洞佑記、道木慎二、道木加絵、” Supporting maneuvers of an unmanned aerial vehicle by visual display of waypoints using augmented reality”、平成 30 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2018
- ⑤ 前田圭吾、舟洞佑記、道木慎二、道木加絵、” 複数無人飛行体を用いた構造物自動計測のためのロボストな位置推定 -位置推定を補助する飛行体の経路計画”、第 44 回東海ファジィ研究会、2018
- ⑥ 麻晃太郎、舟洞佑記、道木慎二、道木加絵、” 対象構造物の三次元モデルと計測条件を基にした外観計測用無人飛行体の経路計画”、第 44 回東海ファジィ研究会、2018
- ⑦ Kotaro Asa, Yuki Funabora, Shinji Doki, Kae Doki, ”Evaluation in Real World of the Measuring Position Determination for Visual Inspection using UAV”, Proc. of 44<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2018
- ⑧ Keigo Maeda, Yuki Funabora, Shinji Doki, Kae Doki, ”Flight Path Planning of Multiple UAVs for Robust Localization near Infrastructure Facilities”, Proc. of 44<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2018
- ⑨ Kotaro Asa, Yuki Funabora, Shinji Doki, Kae Doki, ”Measuring Position Determination for Accurate and Efficient Visual Inspection using UAV”, Proc. of 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2017
- ⑩ 麻晃太郎 舟洞佑記 道木慎二 道木加絵、” インフラ設備外観自動点検システムのためのベクトル量子化を利用した無人飛行体の計測位置決定”、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017、2017
- ⑪ 前田圭吾 舟洞佑記 道木慎二 道木加絵、” UAV のロボストな自己位置推定を目指した複数補助 UAV の位置情報の統合”、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017、2017
- ⑫ 前田圭吾 舟洞佑記 道木慎二 道木加絵、” 補助 UAV で計測した複数位置情報の選択的統合による UAV 自己位置推定のロボスト化”、平成 29 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2017  
(他、3 件)

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：舟洞 佑記

ローマ字氏名：(FUNABORA, yuki)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：20633548

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。