

報告番号	甲 第 13138 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 無人航空機によるインフラ設備外観自動点検における計測タスク達成のための経路計画
(Path-planning of UAV for Measurement Task in Visual Inspection of Infrastructures)

氏 名 麻 晃太郎

論 文 内 容 の 要 旨

無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, 以降, UAV) とは, 人間が搭乗せず遠隔操縦や自律制御によって飛行する航空機を指す. UAV は空中を移動可能である, 人間が搭乗しないため作業員の負担が少ないといった特徴から, 様々な分野での導入が進められてきた. これまでに, 農業・測量の分野で利用され, 今後は点検・物流といった分野で導入が進むと予測される.

幅広い分野での利用が進む UAV であるが, 現行の UAV には技術課題が存在する. 特に, 労働力不足解消のためには UAV の自律移動が必須である. 自律移動システムは大きく分けて, センシング, 自己位置推定, 経路計画, 機体制御の 4 ステップで構成される. UAV を前述のような様々な分野に導入するためには, 各分野におけるタスクに応じた経路計画が重要となる. 従来の主流であった経路計画に関する検討は, 2 点間の移動経路の生成, 複数目的地の巡回順決定の大きく 2 つに分けられる. これらの経路計画法は単純な移動を目的としている. 物流のように, タスクを目的地への到達と見なせる分野には適用可能であるものの, あらゆる分野に適用することはできない.

UAV のタスク達成のためには, これまでの移動を目的とした手法とは異なる, タスクを考慮した経路計画が必要である. 農業分野での農薬散布タスク達成のために, 作業員は UAV を散布対象領域から一定距離を保ちつつ直線移動を繰り返すように飛行させる. 自律飛行する UAV においても, この知見を基に計画された経路に追従することで農薬散布タスクを

達成可能である。地形の測量タスクにおいても同様の経路計画が可能である。

一方、点検作業において、UAV は対象設備の周辺を移動しながら各種データを収集する。以降、対象設備のデータを収集するタスクを計測タスクと呼ぶ。計測タスク自体は地形測量と類似するものの、対象は単純な形状の地面ではなく、複雑な立体形状のインフラ設備である。そのため、地形測量と同様の経路計画法の適用は困難・煩雑となる。また、インフラ設備周辺では衛星からの電波を受信できず、GNSS を用いた自己位置推定が困難となる。そのため、開けた環境で電波を良好に受信可能な農薬散布・地形測量と同様の経路計画法の適用は不適と言える。

前述の問題と社会的意義の高さから、本研究の対象を点検用 UAV の経路計画に限定する。まず、インフラ設備点検における計測タスクを達成するための絶対条件として、経路を巡回することで対象設備全領域のデータを一定以上の精度で収集できること、設備と UAV が衝突しないことが存在する。また、絶対ではないが考慮すべき要件として、作業時間を最短にする、飛行中のエネルギー切れを回避する、UAV の飛行特性を考慮する等がある。インフラ設備点検やそれと類似した立体構造物計測のための UAV の経路計画の従来手法においては、対象構造物の形状データから、異常検出に用いるデータの収集のために UAV が到達すべきウェイポイントを導出し、導出された全ウェイポイントの巡回順を決定するといった手順で経路を計画する。これらの手法では構造物全体を計測可能であり、UAV と構造物の衝突回避および UAV のバッテリー残量管理も可能である。一方で、収集データの精度に関する検討が不十分であった。インフラ設備点検においては 0.1mm 単位の幅のひび割れの検出が要求され、従来手法ではこれを可能とする高精度なデータの収集を保証できず、インフラ設備点検には適当と言えない。また、UAV の定位が理想化されており、前述の位置推定に関する問題が考慮されていない。

以上より、橋梁等の立体形状を持つインフラ設備の点検作業を代替可能な、UAV を用いたインフラ設備自動点検システムの実現を本研究の目的とし、データ収集のための UAV の経路計画法を検討する。

想定する点検作業は簡易的な定期点検とし、事前に作成された定期点検計画に基づいて実施されるものとする。UAV が達成すべきタスクは、人間による点検作業の代替を想定し、対象設備の指定された全領域のデータを収集することとする。経路計画の要件に関して、本研究では絶対に充足すべき「対象設備全領域の計測」、「一定以上の精度での計測」および「対象設備と UAV の衝突の回避」に加えて、できれば充足すべき「短時間でのタスク達成」を充足する経路計画法を検討する。「バッテリー残量の管理」、「UAV の飛行特性の考慮」も充足すべきであるが、これらは従来研究にて充足可能である。本研究では計測タスクの達成を重視し、取り組む課題を限定して検討を進める。以上の前提を基に、従来手法では十分に考慮されなかった、高精度なデータ収集を可能とする UAV の経路計画法を検討する。

前述のとおり、構造物外観計測用 UAV の経路計画のための従来手法では、データ収集のためのウェイポイント導出、全ウェイポイントの巡回順決定といった手順で経路を計画す

る。これらの手法では暗に、構造物外観計測というタスクが目的地巡回タスクとデータ収集タスクに分離して考えられている。本研究でもこの知見を利用し、対象設備からデータを所望の精度で効率的に収集するためのウェイポイント導出を検討する。対象設備からデータを収集するタスクは、対象設備と UAV に搭載されたセンサの位置合わせ作業とみなせる。例えば、画像データは対象設備表面からある距離・角度でカメラを向けてシャッターを押すことで得られる。打音データはハンマーを用いて対象設備表面をある距離・角度から打撃し、その際の打撃音をマイクで集音することで得られる。一定以上の精度でデータ収集するためには、特定の距離・角度でセンサを位置合わせする必要がある。以上から、UAV が対象設備表面に対して一定の位置関係を保ちながら飛行することを想定して経路を計画する。

本論文の構成を以下に示す。

第 1 章では、UAV の利用とそのため経路計画の重要性を示す。これまで主流であった経路計画法は、インフラ設備点検のような構造物の計測を目的とした作業に直接は適用できなかつた。構造物計測のための経路計画の既存法では収集データの精度が十分に考慮されておらず、点検作業の遂行には不十分であった。以上を受けて、インフラ設備自動点検システムのための UAV の経路計画を本研究の目的とする。

第 2 章では、本研究で想定するインフラ設備点検について説明し、経路計画に必要な条件を設定する。対象設備・収集データ等が多岐にわたるインフラ設備点検に対して、本研究で取り扱うべき問題を「目視点検を代替するための UAV の経路計画」に具体化する。その後、経路計画に必要な事前情報（対象設備の 3D モデル、収集すべき画像データの要求精度、機器の性能・制約）を定め、解くべき問題を「3D モデルの全構成要素を計測するための UAV の経路計画」とみなす。

第 3 章では、第 2 章の問題設定および経路計画方針の妥当性を評価する。収集すべき画像データの要求精度、機器の性能・制約から、必要最低限の精度で画像データを収集可能な最大の範囲（計測範囲）を設定し、3D モデルの各構成要素を計測範囲に収めることで所望の精度の画像データを収集できるとみなす。以上の方針を基に、収集データの精度を考慮した基礎的な経路計画法を提案し、シミュレーションにて有効性を検証する。

第 4 章では、第 3 章で検討した方針に基づき、収集データと作業効率を両立した経路計画法を提案する。基礎的な経路計画アルゴリズムでは考慮されなかつた作業効率を確保するために、3D モデルを再構成することを考える。クラスタリング法を用いて 3D モデルの構成要素を計測範囲に収まる形状に再構成した後に経路計画を行い、シミュレーションにて有効性を検証する。

第 5 章では、本研究における社会実装に向けたこれまでの取り組みを述べる。本研究では、社会実装を、提案手法を実在する対象設備に適用し、計画された経路に沿って UAV が実環境を飛行することで計測タスクを達成することとする。社会実装のためには、大規模設備に対しても手法を適用できること、実環境において所望の計測タスクを達成できるこ

とを明確にする必要がある。そこで、上記の課題に対する検証実験を計画・実施する。大規模な対象設備への手法の適用に向けて、3Dモデルの規模と手法の計算量の関係を検討する。実環境でのタスク達成に向けて、第3, 4章では理想化されていた「センシング」、「自己位置推定」および「機体制御」を考慮した検証実験を計画・実施する。さらに、今後の実験計画・展望を述べる。

最後に、第6章において本研究のまとめおよび今後の課題について述べる。

本研究では初期段階として、取り扱うインフラ設備点検を限定して経路計画問題を検討する。一方、研究の展望として、特定のインフラ設備点検のみでなく幅広いインフラ設備点検や、インフラ設備点検以外の作業を代替するロボットの経路計画を考えている。前述のとおり、点検作業における収集データは様々な種類のものが存在する。最終的には、収集データに関する事前情報が与えられれば、各種データの収集に最適化された経路を計画できる手法を目指す。また、計測タスクは立体構造物表面を網羅するタスクとみなせ、これは測量、塗装、清掃といったタスクと類似する。そのため、経路計画への要求も類似しており、本研究の発展としてこれらタスクへの応用も考えられる。