

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：25503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05010

研究課題名（和文）移動エージェントを用いた構造物検査のための飛行群ロボット制御の研究

研究課題名（英文）Development of an Algorithm for UAV Formation Control for Structural Inspection

研究代表者

神林 靖（Kambayashi, Yasushi）

山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：40269527

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：構造物点検において、ドローンに搭載したカメラによる構造物表面の撮影は効率的な手段である。そのために、ドローンに搭載したカメラで構造物表面を撮影することで、構造物表面の撮影を効率的に行うUAVの自動飛行検査システムを開発した。本システムの有効性を実証するために、ドローンシステムを広い室内で飛行させ、平らな壁面に対して200cmの距離を保ちながら撮影するドローンシステムを設計し実装した。実験の結果、ドローンシステムは安定した飛行姿勢を保つことができた。この安定性は統計的に有意である。本研究では、ドローンによる自律的に飛行姿勢を安定かつ正確に保持させる方法について解明することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

橋梁のような構造物は、定期的に点検しなければならない。とりわけ昨今のように頻発する地震の後には、定期点検とは別途に至急大規模に実施しなければならない。人手による操縦では、時間と人手がかかるだけでなく見落としも多い。結果としてひび割れ等がかなり進んだ状態で発見される。とりわけ災害復旧時には、短期間に数多くの橋梁を検査しなければならないので、現状のように人間による視覚検査では間に合わない。この研究で示した自律的な飛行ロボットによる構造物の網羅的な健全性検査の自動化は、このような問題を解決する糸口となる。

研究成果の概要（英文）：We have developed an inspection system that makes a UAV fly automatically at a constant distance from a structure. The drone system that automatically keeps facing straight to the structure's surface at a constant distance from the surface while the operator manually commands it to move up or down and left or right. We made the drone system fly in a large room so that it would keep facing straight to the flat wall at the distance of 200 cm. The results showed that the standard deviation of the angles from the straight facing and the standard deviation of the distance from the wall are both stability is statistically significant.. Taking pictures of the structure surface by a camera mounted on such a drone facing straight to the surface and flying along the surface. We have combined a series of taken pictures into a single large image of the surface for its visual inspection. This This study clarified how a drone system can autonomously maintain a stable and accurate flight posture.

研究分野：計算機科学

キーワード：UAV LiDARセンサ 自律飛行 ロボットビジョン 画像処理

1. 研究開始当初の背景

橋梁のような構造物は、定期的に点検しなければならない。とりわけ昨今のように頻発する地震の後には、定期点検とは別途に至急大規模に実施しなければならない。構造物点検において、UAV に搭載したカメラによる構造物表面の撮影は有効な手段であるが、人手による操縦ではその性質上一機を巡回させて人間が視覚検査する必要がある。この従来方法は、時間と人手がかかるだけでなく見落としも多い。結果としてひび割れ等がかなり進んだ状態で発見される。とりわけ災害復旧時には、短期間に数多くの橋梁を検査しなければならないので、現状のように人間による視覚検査では間に合わない。この問題を解決するために、本研究では、自律的な飛行ロボットによって、構造物の網羅的な健全性検査の自動化を試みた。そのための方法としては、UAV に搭載したカメラで構造物表面を撮影することで、構造物表面の撮影を効率的に行うこととし、UAV に搭載したカメラで構造物表面を撮影することで、構造物表面の撮影を効率的に行うことを目的とした。

構造物の点検に UAV が使われる環境には 2 種類ある。全地球航法衛星システム (GNSS) を使って自らの位置を特定できる環境と、橋の下やトンネル内など GNSS を使って位置を特定できない環境である。われわれの研究は、後者の環境を想定している。同環境を想定した類似の研究は複数存在する。研究開始時ならびに研究途中で参考とした関連研究は、次のとおり。

Woo らは、UAV を使って構造物の表面を大規模に撮影した。操縦者が UAV を手動で操作して構造物の表面に一定の距離で向かせることができるように自動調整するシステムを開発した。UAV に搭載されたジンバルのカメラはほぼ安定した姿勢を保ち、搭載された LiDAR センサは UAV が構造物の表面に近づきすぎないように飛行を調整した。システムは、カメラが構造物の表面に対してほぼ一定距離を保つようにしているが、精度に問題があった。

岡本らは、UAV が構造物の表面から一定の距離を保ちながら、構造物の表面に対して直進するように制御する半自律制御装置を導入した。UAV は同じ位置でホバリングしていることという制約が課されている。UAV を別の位置に移動させるためには、操縦者が自律制御を解除して手動コマンドで UAV を目標位置まで移動させる必要があった。

Chao らは、光学ナビゲーション手法を採用してリアルタイムの高解像度画像処理とマルチビジョンシステムに関する問題に取り組んだ。

Montes らは、UAV を使って橋の下を調査させた。利用者は、UAV の飛行経路を設定して橋の下を飛行させて点検する。このシステムで UAV は、既知の環境でしか飛行できない。

溝口らは、長距離地上型レーザースキャナを用いて、老朽化したコンクリート構造物のスクレーピングを定量的に評価する効果的な方法を提案した。溝口らによる別の研究では、スキャナから取得したデータを自律的かつ効率的に処理する方法が提案されている。上記の手法は、陸上から計測できる構造物には有効であるが、河川や海洋などの水上にある構造物や、足場を組んでから計測する構造物には有効ではない。なぜなら陸上の長距離スキャナだけでは測定できる範囲が限られ、コストも高くなることが予想されるからである。また同著者らは、UAV に搭載した LiDAR センサを用いて橋梁の 3D 計測を行い、取得した点群の精度を評価する研究も行っているが、彼らの研究では操縦者が UAV を制御している。彼らの UAV は GNSS を使って位置を保持しているとはいえ、このような計測器を搭載した UAV を操縦するには、操縦者に十分な熟練が必要である。

これらの研究成果を踏まえてわれわれは、UAV の位置や姿勢の維持を自律的に行う UAV システムを製作し高い精度でデータを収集することを目的とした。

2. 研究の目的

橋やトンネルなどの構造物のコンクリート表面は、定期的に点検する必要がある。点検は従来人の手に頼ってきたが、人手不足のために難しくなっている。人手の問題だけでなく、構造物の多くは地理的に近づきにくい場所にあるため、人の目視に頼った点検を実施するのは難しい。このような問題を解決するために UAV が使われ始めているが、操縦者がカメラを通して UAV を正確に制御して点検するのはまだ難しい。UAV を点検する壁面と平行して正確に飛行させる必要がある。

構造物を視覚的に検査するためには、構造物表面の一連のクローズアップ画像を組み合わせた単一の大きな画像の形で、構造物表面の写真画像を表示することが有用である。このような組み合わせは、画像ステッチングアルゴリズムによって実現されるが、このアルゴリズムを適用するためには、構造物の表面に対して一定の距離で垂直に向いたカメラによって画像を撮影しなければならない。そのためにこの研究では、UAV が自律的に構造物表面から一定の距離を保ち、構造物表面に対して並進し続ける自律型 UAV システムを提案した。本システムで UAV は、与えられた指令に従って、自律的に構造物表面に対して垂直な飛行姿勢を調整することができる。UAV は、前方に取り付けた 2 つの LiDAR センサで測定した構造物表面からの距離に基づいて、時計回りまたは反時計回りに自律制御する。

3. 研究の方法

(1) 本システムでは、基本となる UAV として汎用クアッドコプターである DJI Phantom 4 Pro V2.0 を採用した。UAV は自律的に構造物の表面に向け、構造物の表面から一定の距離を保つことができなければならない。この要求を達成するために、UAV に LiDAR センサを装備した。図 1 に、UAV の筐体前方の左右に取り付けられた 2 つの LiDAR センサ（レーザー距離計）を搭載した UAV を示す。これらのセンサは、構造物の表面からの距離を取得することで、UAV をして自律的に前進または後退させるだけでなく左右に旋回させることができるようにする。これにより UAV は自身の位置と姿勢を維持することができる。

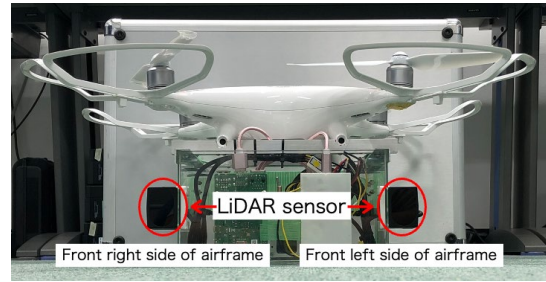


図 1 LiDAR センサを搭載した UAV

(2) 構造物の表面を検査する際、UAV はコントローラの指令に従って上下左右に移動する。そのため、UAV が上下左右に移動している間、制御システムが UAV の飛行姿勢を安定させていることを、コントローラが発する信号で確認する必要がある。図 2 に、UAV の機体下部に上下動を観測するための LiDAR センサを 1 つ、機体の左右に左右の動きを観測するための LiDAR センサを 1 つずつ取り付けた UAV を示す。

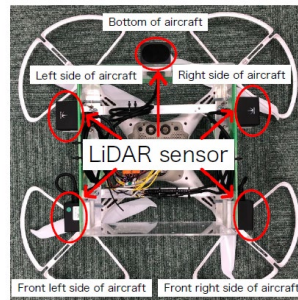


図 2 UAV の LiDAR センサ位置

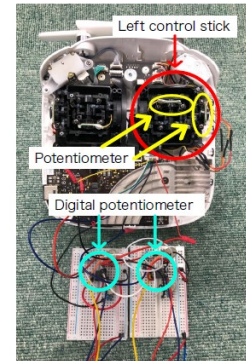


図 3 オリジナルのポテンシオメータをデジタルポテンシオメータで置き換えたコントローラ

(3) 制御システムとしては、外部コンピュータの制御の下リモートコントローラ・ユニットの 2 本のコントローラのスティックを設定することで、UAV を自律的に左右旋回および前後進制御する。具体的には、UAV の左右旋回と前後進を制御する図 3 に示す左スティックに連動する 2 つのポテンシオメータを外部コンピュータによって抵抗値を変化させることができるデジタルポテンシオメータに置き換える。

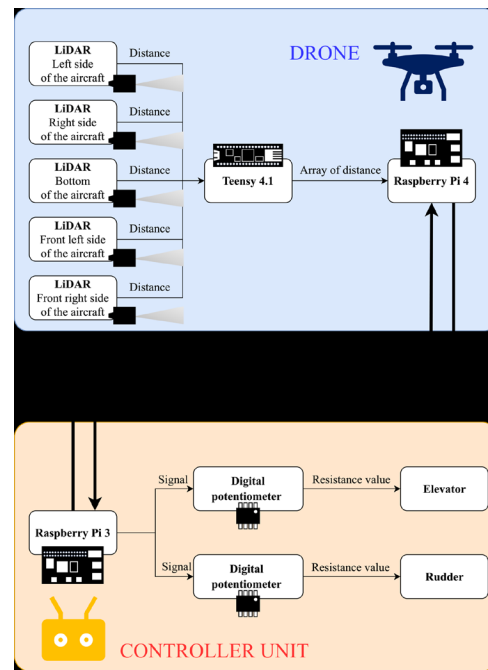


図 4 制御システムのデータフロー

(4) 本システムでは、UAV の筐体前方の左右に取り付けた 2 つの LiDAR センサから取得した距離に応じて、コントローラユニットのコントローラスティックにリンクしたデジタルポテンシオメータの抵抗値を変化させることで、UAV が構造物の表面を向き、構造物の表面との距離を一定に保つように制御している。図 4 に制御システムのデータフローを示す。

(5) コントローラは、UAV の前面に 2 つ、底面に 1 つ、側面に 2 つ取り付けられた LiDAR センサから距離データを収集する。収集されたデータは Teensy 4.1 に集約される。収集された距離データは、Teensy 4.1 から Raspberry Pi 4 に転送される。図 5 に、5 つの LiDAR センサ、Teensy 4.1, Raspberry Pi 4 を搭載した UAV を示す。

(6) UAV に搭載された Raspberry Pi 4 からの距離データは、Wi-Fi 経由でコントローラユニットに搭載された Raspberry Pi 3 に over HTTP プロトコルによる XML-RPC によって送信される。この Raspberry Pi 3 が、UAV の飛行姿勢を決定し、回転や前後進の制御入力を行う。

Raspberry Pi 3 は、デジタルポテンシオメータである X9C103C にパルス制御信号を送り、その抵抗値を 0 から 10kΩ まで 100Ω のステップで増減させる。オフセット抵抗を微調整するため

に、デジタルポテンショメータの両端に 10kΩ のトリマー抵抗を 2 つ直列に追加した。図 6 に示すレジスタのカスケード接続により、電源電圧 5V が分圧され、コントローラユニットへのアナログ電圧入力となる。

4. 研究成果

(1) 壁面に対して垂直な姿勢を安定して保ち、検査用の画像を採取することに成功した。本システムの有効性を実証するため、トンネル内などの無風環境を模擬した屋内環境での実験を行った。広い室内で UAV システムを飛行させ、200cm の距離で壁面に対して垂直に向き続けることができた。UAV システムは安定した飛行姿勢を保つことができた。この安定性は統計的に有意であることが確認できた。実験結果の詳細は発表した国際会議論文を参照されたい。

(2) 本制御システムの有効性を実証するために屋内環境での実験を行った。広い室内で、平らな壁面を検査対象とし、検査対象までの距離を 200cm に設定して UAV の左右回転と前後移動を自律制御した。飛行中の UAV の上下左右の移動は、ランダムに行われるようにした。UAV はランダムに上下左右に移動するが、構造物表面と垂直に対向し、構造物表面との距離を一定に保つように自律制御されることを確認した。UAV の角度、壁からの距離、床からの距離、側壁からの距離を測定するデータとした。UAV の角度の定義を図 7 に示す。

(3) UAV の前方に取り付けられた左右の LiDAR センサ間の距離は 25cm である。UAV の前方左側に取り付けられた LiDAR センサによって測定された距離を a 、UAV の右側に取り付けられた LiDAR センサによって測定された距離を b とすると、UAV の右側に傾く角度 θ は、次式で与えられる。

$$\theta = \tan^{-1}((b-a)/25)$$

(4) 図 8、図 9、図 10、図 11 に、UAV の角度、構造物表面からの距離、床からの距離、側壁からの距離の時間変化をそれぞれプロットしたものを示す。

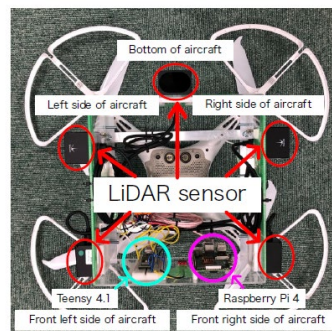


図 5 LiDAR センサ, Teensy 4.1, Raspberry Pi 4 を搭載した UAV

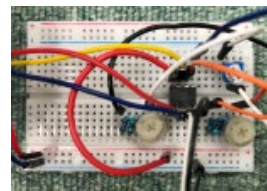


図 6 トリマーレジスタを付加したデジタルポテンショメータ

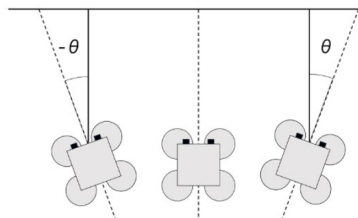


図 7 UAV の角度の定義

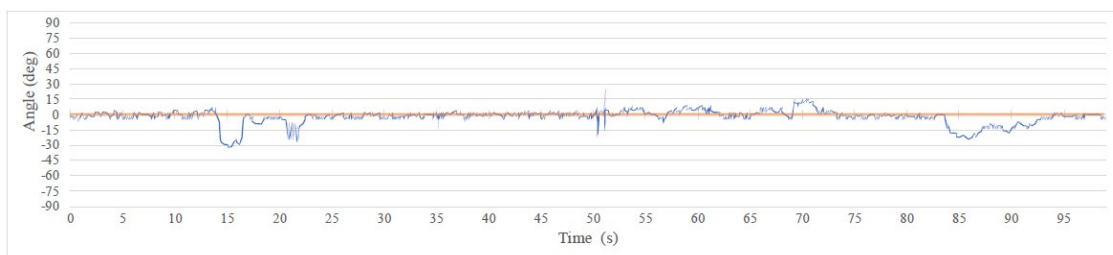


図 8 UAV の角度

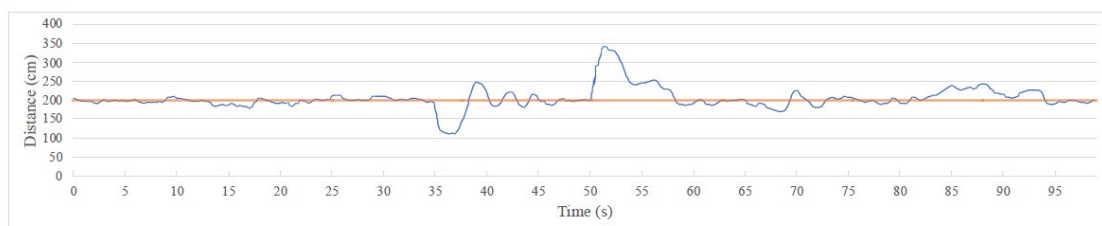


図 9 壁からの距離。

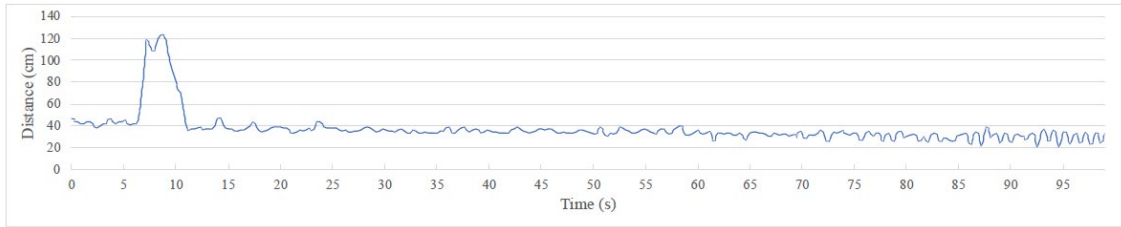


図 10 床からの距離

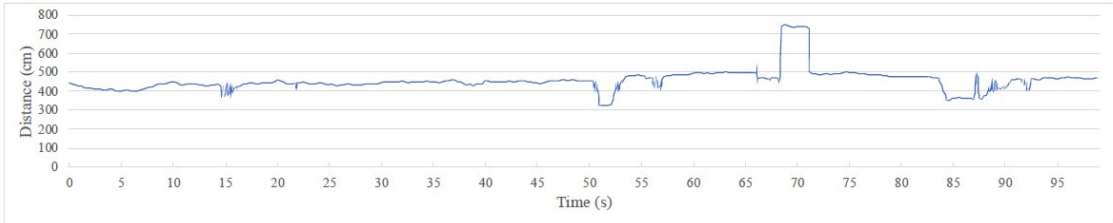


図 11 側壁からの距離

(5) 実験結果は発表した国際会議論文に詳述したが、表 1 に実験中に観測された UAV の角度と壁からの距離の標準偏差を示す。

表 1. 標準偏差。

	Sample size	Standard deviation
Angle of the drone	9901	6.94 (deg)
Distance from the flat wall	9901	28.90 (cm)

(6) UAV を壁面に対して垂直に安定した飛行姿勢を維持させることに成功した。UAV 自身が発生させた風が飛行中に壁や床に跳ね返ることで発生した風によって UAV の飛行姿勢が崩れることがあったが、しばらくすると UAV は飛行姿勢を制御して目標値内に回復する。実際の検査では乱れた部分を簡単に削除することができるので同じ場所を自動的に再検査させればよい。実験の様子を図 12 に示す。



図 12. 自律飛行実験の様子

(7) 実験を通して UAV の角度の標準偏差は 6.94 度、壁からの距離の標準偏差は 28.90cm を保つことができた。これらの値は、搭載したカメラで構造物の表面を撮影する UAV としては十分なものである。収集した一連の画像を画像ステッチングアルゴリズムを使って目視検査用の表面の大きな 1 枚の画像に一貫して合成することができる。

(8) コロナ禍もあり UAV の製作と実験を進めることができず計画の実施には遅れをきたしてしまった。市販の UAV を改修することで製作費用を抑えることはできたが、デジタル信号とアナログ信号の変換に複雑な機構を持ち込むことになってしまったのは反省点である。また実験途中で 2 機目の UAV が損壊してしまい複数機による実験ができなくなってしまったことも残念である。

(9) 研究成果として 2023 年に第 28 回人工知能とロボティクス国際会議 (Twenty-Eighth International Symposium on Artificial Life and Robotics) で開発の中間報告を “An Autonomous UAV System for Inspecting Structures” として、2024 年に第 29 回同国際会議で完成した UAV による実験結果を “A Semiautonomous Drone System for Inspecting Structures” として発表することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kaiyu Suzuki, Yasushi Kambayashi, Tomofumi Matsuzawa
2. 発表標題 CrossSiam: k-Fold Cross Representation Learning
3. 学会等名 Fourteenth International Conference on Agents and Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuta Sato, Masaru Kamada, Munehiro Takimoto, Yasushi Kambayashi
2. 発表標題 An Autonomous UAV System for Inspecting Structures
3. 学会等名 Twenty-Eighth International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuta Sato, Masaru Kamada, Munehiro Takimoto, Yasushi Kambayashi
2. 発表標題 A Semiautonomous Drone System for Inspecting Structures
3. 学会等名 Twenty-Ninth International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	滝本 宗宏 (Takimoto Munehiro) (00318205)	東京理科大学・理工学部情報科学科・教授 (32660)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松澤 智史 (Tomofumi Matsuzawa) (20385529)	東京理科大学・理工学部情報科学科・准教授 (32660)	
研究分担者	鎌田 賢 (Kamada Masaru) (70204609)	茨城大学・理工学研究科（工学野）・教授 (12101)	
研究分担者	中谷 多哉子 (Nakatani Takako) (30431662)	放送大学・教養学部・教授 (32508)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 International Conference on Artificial Intelligence for Communications and Networks	開催年 2022年～2022年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関