

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18746

研究課題名（和文）無線通信困難な地下空間でのドローン群活動のための高信頼無線ネットワーク技術の開発

研究課題名（英文）Development of reliable wireless network technology for drone swarm activities in underground spaces where wireless communication is difficult

研究代表者

石原 進（Ishihara, Susumu）

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：10313925

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：将来的に活用が期待される下水管内での無線制御のドローン（UAV）や自走ロボット（UGV）を使用した小口径下水管内でのリアルタイム映像検査のための基礎技術として、UAV/UGV制御と映像データストリーミングを確実に行うための複数ドローン群の位置制御戦略、単一チャンネルを使った無線マルチホップネットワークでの制御コマンドと映像ストリーミングデータのための転送プロトコル、ならびに音声ビーコンを用いた小口径下水管内移動機器の位置追跡手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の法律改正により下水道における危険箇所に関しては5年ごとの検査が義務づけられたが、検査コストの高さから、基礎自治体の大きな負担になっている。下水道検査の効率化は喫緊の課題であるが、従来型の検査用ロボットは有線接続を前提としており、現場での取り回しが面倒であり、無線で利用できる検査装置が求められている。本研究で開発した技術は、無線LANでの通信距離が限られる小口径下水管内でリアルタイムでの映像検査を無線の検査装置（UAV/UGV）で実施するための基礎技術である。同様の技術開発は国内外で例がなく、同技術をUAV/UGVを複数用いた検査システムを実現する上で有用である。

研究成果の概要（英文）：As the fundamental technologies for realizing a realtime video surveillance of narrow sewer pipes using wireless-operated drones (UAVs) and self propelling robots (UGVs), we developed a UAVs/UGVs formation control strategy for realizing reliable control and video streaming, video streaming and control command transmission protocol for 1-ch wireless multihop networks, and machine tracking methods based on acoustic beacons.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：下水管検査 ドローン 映像ストリーミング マルチホップ通信 無線LAN 位置追跡 下水道維持管理

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

老朽下水管路の検査は、危険度が高い箇所について 5 年以下の周期での検査が義務づけられているが、その作業コストの高さから、実施は容易ではない。下水管検査では図 1 に示すような下水管路の障害を検出するが、図に記載の通り、既存の有線カメラ、浮流型カメラを用いた手法は適用可能範囲が制限される問題がある。

近年ドローン（Unmanned Aerial Vehicle: UAV）を用いた検査に注目が集まっているが、管壁・土砂によって第 1 フレネルゾーンが遮断されるため、通常 10m 以下となる。従って、通常数十～100m 程度の間隔で設置されるマンホール間で常時接続での映像モニタリング、操縦の実施は困難である。検査対象の下水管路では管壁の腐食や樹木根の侵入、侵入水、堆積土砂などが存在し、管内状態は映像で確認するまでわからないことが多く、完全自律での運用は容易ではない。

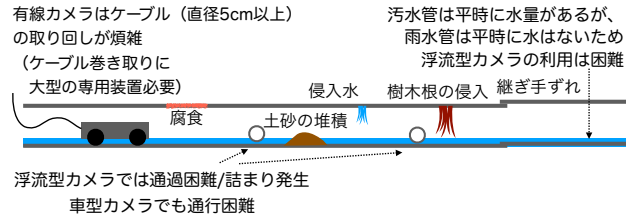


図 1. 下水管検査における課題

### 2. 研究の目的

本研究では、下水道等の老朽地下管路の省力化および短時間検査のための基盤技術として、図 2 に示すような複数の小型ドローンによる協調動作によって長距離の無線通信が困難な小口径地下管路内でも常時接続の映像通信、遠隔操作を可能とするための無線ネットワーク制御技術を開発することを目的とした。具体的には、マルチホップ通信の通信品質を保つように、i) 通信品質およびドローンでの観測対象領域・および今後の移動計画に応じた適切なドローンの陣形の制御手法、ii) ドローン陣形と通信品質に応じた適切な経路選択とデータ・制御パケットの送信制御手法の開発を目指した。

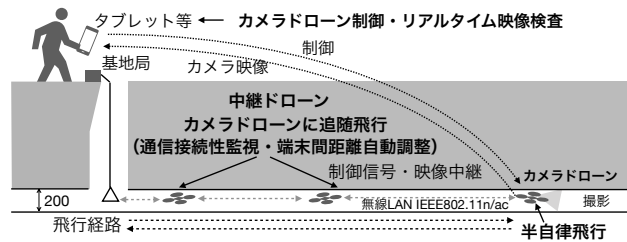


図 2. 目標とするシステム

### 3. 研究の方法

口径 200-250mm の小口径下水管路における無線 LAN 通信特性ならびに測距手法について調査し、これらの特性に基づいて、ドローンの編隊飛行制御手法、ビデオ転送プロトコルの開発、ならびに小口径管内での測位技術の開発を行った。小口径の下水管内では無線 LAN での通信可能距離は 10 m 以下にとどまるので、典型的なマンホール間隔 40 m 程度の条件では、1 台のドローンで直接マンホールに一時的に設置した基地局と通信するのは困難である。そこで、本研究では複数のドローンを使った中継によるマルチホップ通信でビデオストリーミングを行うことを目指した。

ドローンの編隊飛行制御手法に関しては、一本の下水管内での一次元の動作の制御方法を検討した。具体的には、隣接ドローン間の距離を通信可能以内に保ちながらドローン間の間隔を広げる一方で、カメラを搭載した先頭ドローンからの映像転送におけるホップ数を最小限にするような経路制御を行いながらも、経路変更時のパケットロスが最小限となるようにドローンの位置を制御するような方法を検討し、これを実現する簡易的なシステムを実装した。

ビデオ転送プロトコルに関しては、ドローンに搭載する装置を最小限にすることを念頭に、各ドローンは一つの無線機を無線 LAN の 1 チャネルのみを使用することを前提として設計した。同一チャネル上の無線マルチホップ通信では隠れ端末問題による衝突の発生が問題となるが、互いに干渉する位置関係にある端末 (=ドローン) が同時に無線 LAN フレームを送出することのないように間欠的に通信する手法 (IPT) を基本とした通信を行うことで、衝突を避けつつ先頭のカメラ搭載機からの映像ストリームデータと、制御用端末からの制御コマンドを高い信頼性で送信できるようにした。プロトコルの評価は Space-Time Engineering 社の無線ネットワークシミュレータ Scenergie[1]を用いたシミュレーションにより行った。

実験に当たっては、学内に保有する実験用下水管、協力会社の模擬下水管設備を利用した。また、実際に小口径下水管内で飛行するドローンは存在するもののコストが高く、制御が困難なの

で、カメラ・無線 LAN 通信機能、LiDAR による測距機能を備えた陸上移動ロボット (Unmanned Ground Vehicle (UGV)) を作成し、これを利用して実験を進めた。この他、音声ビーコンを用いた測距を行う浮流型の装置を作成し、音声ビーコンを用いた測距手法の開発に使用した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 下水管検査用ドローン群の制御手法

一直線に並んだドローン群の先頭にカメラを搭載し、反対側に制御用の装置を配置したドローンの制御戦略に関して、基本的な二つの方式 (図 3 (a) 一様伸縮方式、(b) 一部伸縮方式) について検討した。一様伸縮方式では各ドローンが均等に隣接ドローンとの距離を伸縮させるが、この方式では隣接ドローン以外との通信リンクの切断が複数個ほぼ同時に発生するので、経路の更新処理に時間がかかりやすくなり、パケットロスが発生しやすく、安定して映像データ、ドローン制御データを配送することが容易ではない。一方、一部伸縮方式では、一部の隣接ドローン間のみの距離を伸縮させ、その他では隣接ドローン間距離を維持する。このため、ドローン間の接続性の変化は一部のみでしか起こらないので、経路変化に伴うデータ通信への影響は最小限にとどめることができる。

一様伸縮方式によるドローン隊列の制御方式、ならびに接続性変化に応じたネットワーク経路制御プロトコルを、陸上移動ロボット (UGV) 群上に実装し、意図通りのドローン位置の制御、経路更新が実施できることを確認した (図 4)。

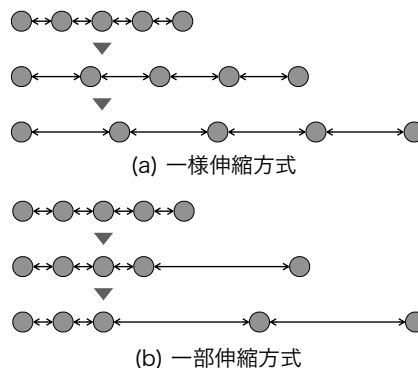


図 3. ドローン隊列制御の方式

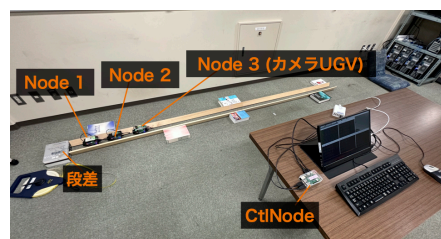


図 4. ドローン隊列制御実験システム

##### (2) マルチホップ映像転送とドローン制御用コマンドの送信を両立する通信プロトコル

無線 LAN の同一チャネル上で各端末が 1 台の無線機を使用する条件の下、マルチホップ通信で隊列の先頭のドローンからビデオストリーミングを行う一方で、マンホールに設置された基地局経由でドローンの制御を行う制御コマンドを確実に送信できるようなプロトコルを設計した。同一チャネルでの無線マルチホップ通信では隠れ端末問題による衝突により通信エラーが発生しやすいが、本研究では、[2]で提案された IPT 方式を応用し、カメラ搭載ドローンからの映像データパケットを間欠的に送信し、かつ制御コマンドの送信・中継を映像データパケットの受信完了をトリガとして行うことにより衝突の発生リスクを最小限とする (図 5)。提案手法を無線ネットワークシミュレータ Scenargie 上で実装し、ビデオデータパケット、制御パケットのエンド・トゥ・エンド遅延、パケットロス率を既存手法に対して十分に低減できることが確かめられた (図 6)。

##### (3) 機器位置の追跡手法の開発

下水管内を移動する観測器の位置推定に関し、UWB を用いた手法と音声ビーコンを用いた手法について検討し、それぞれ学内の実験管を用いてその効果を確認した。UWB を用いた手法に関しては、直径 250 mm の鉄筋コンクリート管では UWB タグと測定端末間の距離 6 m までの範囲で誤差 10 cm 程度で位置推定可能であることが確認できた。音声ビーコンを用いた手法では、音源・マイク間の距離が、口径 200 mm の塩化ビニル製管による実験環境において、測定可能な 19 m までの範囲で誤差 50 cm 以下で推定可能であることが確かめられた。さらに、同手法を浮流型の移動観測器と固定の制御端末に実装して実験した結果、カルマンフィルタ等による補正をしない条件の下、測定点の 72.3%で推定誤差を 1m 未満とできることが確認できた (図 7)。下水道の本管での総敷設長が長い口径 200 mm - 250 mm の環境では無線 LAN (2.4 GHz, 5 GHz) の信号、およびこれらよりも低い周波数の通信機器の電波は 10m 程度しか届かないので、電波による機器の位置推定は困難である。小口径下水管での移動観測器の位置を 10m 以上の距離で測位できることを実証したのは意義が大きい。

参考文献:

- [1] Space-Time Engineering, <https://www.spacetime-eng.com/>
- [2] Jin, G. and Furukawa, H.: Automatic Transmission Period Setting for Intermittent Periodic Transmission in Wireless Backhaul System, IEICE Transactions on Com-

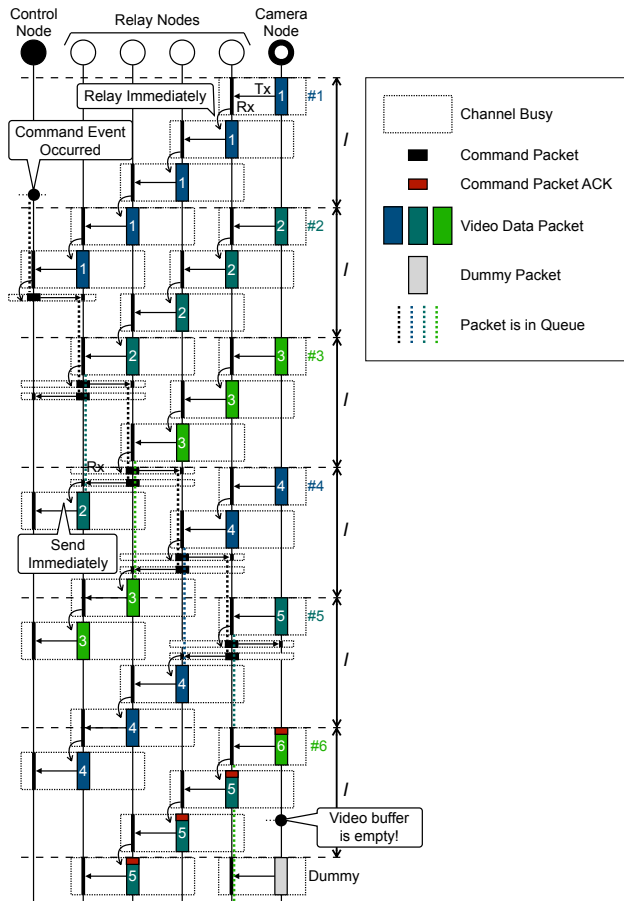


図 5. マルチホップ映像転送とドローン制御用コマンドの送信を両立する通信プロトコル

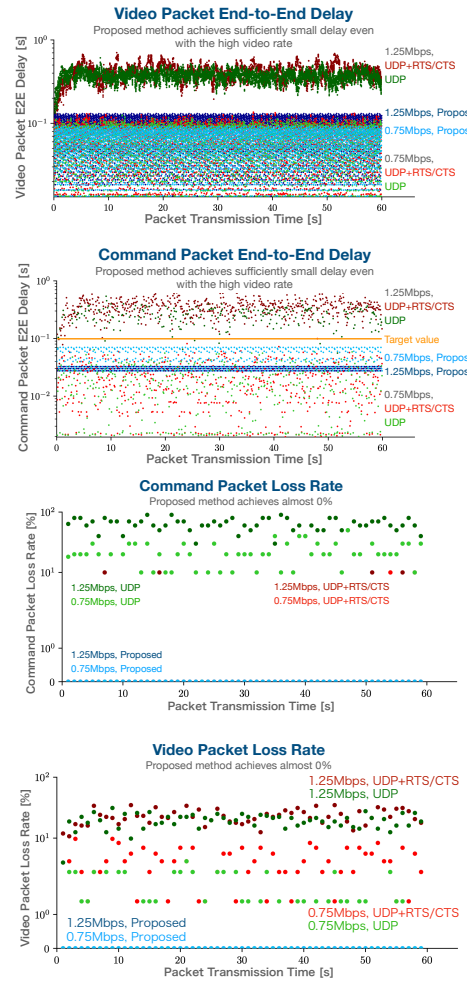


図 6. 提案プロトコルのシミュレーション結果

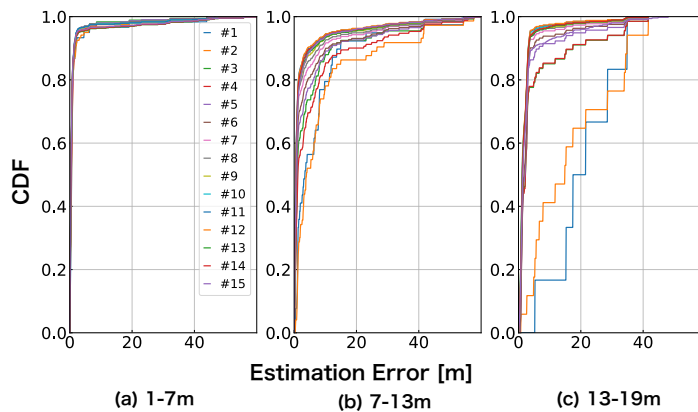


図 7. 音声ビーコンの伝播時間による下水管内浮流観測器の位置推定の結果 (推定誤差の累積分布 (CDF))

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Chikamoto Yusuke, Tsutsumi Yuki, Sawano Hiroaki, Ishihara Susumu	4. 巻 23
2. 論文標題 Design and Implementation of a Video-Frame Localization System for a Drifting Camera-Based Sewer Inspection System	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 793 ~ 793
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s23020793	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 立花誠也, 石原進
2. 発表標題 小口径下水管内におけるSRTベースの協調映像伝送プロトコルのデータ転送性能
3. 学会等名 情報処理学会 第190回マルチメディア通信と分散処理(DPS)・第96回コンピュータセキュリティ合同研究発表会 (CSEC)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丸山健斗, 近本祐介, 堤悠喜, 立花誠也, 石原進
2. 発表標題 音波による小口径下水管内における浮流型観測機の位置推定に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近本祐介, 堤悠喜, 石原進
2. 発表標題 複数UAVを用いた小口径下水管検査のための陣形制御手法の検討
3. 学会等名 情報処理学会 第101回モバイルコンピューティングと新社会システム・第87回高度交通システムとスマートコミュニティ合同研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堤悠喜, 近本祐介, 石原進
2. 発表標題 複数移動無線端末を用いた下水管検査における端末制御と映像データ転送のためのマルチホップ通信手法の一検討
3. 学会等名 情報処理学会 101回モバイルコンピューティングと新社会システム・第87回高度交通システムとスマートコミュニティ合同研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 立花誠也, 近本祐介, 堤悠喜, 石原進
2. 発表標題 小口径下水管内における高信頼性UDPベースプロトコルを使用した際のデータ転送性能
3. 学会等名 電子情報通信学会 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Tsutsumi, Thanh V. Pham, Susumu Ishihara
2. 発表標題 Intermittent Multi-hop Video and UAV Control Command Transmission for Sewer Inspection
3. 学会等名 5th International Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近本祐介, Thanh V. Pham, 石原進
2. 発表標題 複数の無線自走ロボットを用いた小口径下水管検査のための陣形制御手法の設計と実装
3. 学会等名 情報処理学会 第92回高度交通システムとスマートコミュニティ(ITS)研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水裕斗, Thanh V. Pham, 石原進
2. 発表標題 複数台の浮流無線カメラを用いた小口径下水管検査のためのSRTベース協調映像伝送プロトコルの性能評価
3. 学会等名 第85回情報処理学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kento Maruyama, Thanh V. Pham, Susumu Ishihara
2. 発表標題 Acoustic Beacons-based Long-range Localization of Wireless Cameras Drifting in a Narrow Sewer Pipe
3. 学会等名 2022 ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堤悠喜, Thanh V. Pham, 石原進
2. 発表標題 複数UAVを用いた下水管検査システムのための映像データとUAV制御情報の間欠的マルチホップ伝送プロトコルの評価
3. 学会等名 情報処理学会 第91回高度交通システムとスマートコミュニティ(ITS)研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堤悠喜, 近本祐介, 石原進
2. 発表標題 複数ドローンを用いた下水管検査システムのための映像データとドローン制御情報のマルチホップ伝送プロトコルの設計
3. 学会等名 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOM02022)シンポジウム
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 丸山健斗, 堤悠喜, 近本祐介, 石原進
2. 発表標題 小口径下水管検査のための浮流型観測機の音波による位置モニタリングシステムのプロトタイプ実装
3. 学会等名 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOM02022)シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Susumu Ishihara, Yusuke Chikamoto, Yuki Tsutsumi, Thanh V. Pham
2. 発表標題 Poster: Multi UVs-Based Narrow Sewer Inspection System - UVs Formation Control and Video Streaming
3. 学会等名 2023 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丸山健斗, Thanh V. Pham, 石原進
2. 発表標題 浮流型無線カメラによる下水管検査のための音ビーコンを基にした位置追跡手法 ~ 相互相関法を用いた実現 ~
3. 学会等名 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学大学院工学領域 石原研究室  
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/ishilab/>



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
連携研究者	フアム ヴァン・ティン  (Pham Van Thanh)  (50883609)	静岡大学・工学部・助教     (13801)	

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0件

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