複数のドローンを用いた下水管自動検査システムの実現技術の開発

静岡大学 学術院工学領域工学領域 数理システム工学系列
石原 進

1. はじめに

下水管の老朽化に対応するため、早急な検査・補修・交換が求められている。現行の下水管検査手法には作業時間が長い、費用が高い、危険等の問題があるため、速く安く安全な下水管検査手法の開発が急務である。現行の下水管検査手法としては、目視、管口カメラ、ファイバースコープ、自走式有線ロボットを用いた手法がある。これらの手法は、下水管内をリアルタイムに確認可能である。一方で、費用が高い、ケーブルの取り回しが困難、危険などの問題を抱えている。近年、舟形カメラを用いた検査手法が開発されている。この方法は、金銭的・人的コストは低いが、カメラを回収するまで映像を確認できない。また我々は、前述の問題を克服する複数浮流無線カメラを用いた下水管検査システムを提案している[1]。このシステムでは、検査のために現場で必要な作業は、AP の設置と浮流カメラの放流・回収および映像の確認のみである。また、浮流カメラは安価に作成可能である。ただし、下水管内に浮流カメラのカプセルを流すのに十分な水量が必要となる。

そこで我々は、下水管内の水量が少ない場合にも利用でき、かつ下水管内をリアルタイムで見ることを目的とする複数台の無線制御 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた検査手法について検討を進めており、本手法実現のための要素技術の開発が本助成研究の目的である。この手法は日本で多く敷設されている小口径下水管内の検査を目的としている。直径 200-250mm 程度の小口径下水管内では無線 LAN の通信可能距離が地上の一般的な環境と比べて極端に短い（10 m 程度まで）ことが分かっている。従って、1 つの UAV を用いて検査する場合、検査可能範囲が短くなってしまう。我々の手法では図 1 のように、下水管内に複数の UAV で鎖状のマルチホップネットワークを構築することにより、小口径下水管内での無線 LAN 通信の短い通信距離制約を克服し、検査範囲を拡大する。この手法では、先頭のカメラ搭載 UAV が撮影した映像データを、無線 LAN 通信で中継 UAV・制御端末を経由して地上の操作端末までマルチホップ伝送する。中継 UAV は前後の UAV と通信接続性を維持しつつデータを転送する。地上の作業員は制御端末を操作する。この操作を行ったときに生じる制御情報を UAV へ送信することで UAV を操縦する。

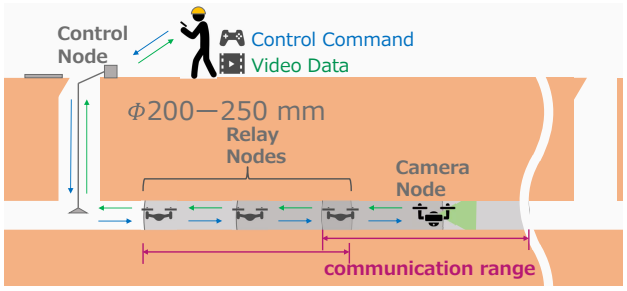

図 1. 複数 UAV を使用した下水管内映像伝送

この検査手法を実現するには、通信接続性を維持するような中継用 UAV 位置の自動調節と、カメラ UAV の操縦・リアルタイム映像伝送を達成しなければならない。前者の UAV 位置自動調節について[2]で提案している。また、後者のリアルタイム映像伝送の実現のため、Bi-IPT

(Bidirectional Intermittent Periodic Transmit)転送方式[3][4]を改良した転送方式を提案している[5]。この転送方式では、通信方向の異なる i) UAV の操縦のためのコマンド送信と ii) UAV から制御元の機器へのリアルタイム映像伝送、を同時に高い信頼性で実施することを意図して設計されている。また、下水管内では GPS 等の人工衛星からの電波に依存する位置測位技術は使用できないので、小口径の下水管内で安価に長距離の信号伝達が可能である音声を用いた位置測位技術を提案している[6]。本研究では、これらの技術に基づいた複数 UAV 間での下水管内映像伝送を実際の無線ネットワークで実現することを目指し、その開発に取り組んだ。

Bi-IPT 転送方式では、送信元のノードが一定の時間間隔でパケットを間欠的に送信し、中継ノードがパケットを受信した直後に転送できるようにデータパケット送信をスケジュールする。これにより、1 チャネルのみを使用するマルチホップ無線 LAN の環境においては、端末間の直接通信が可能な距離に対して、その 2 倍の距離の範囲にある端末が同じ時間帯に通信すると、両者の間にある端末は、信号の干渉により正しく信号を受信できなくなる問題（隠れ端末問題）による影響を回避する。無線 LAN の隠れ端末問題に関する対策としては、IEEE 802.11 無線 LAN では、RTS と CTS という制御パケットを用いた技法が標準に含められているが、RTS/CTS の制御パケットの送信時間がオーバーヘッドとなるため、単純に鎖状のトポロジの無線 LAN での通信に素直に適用しても十分に高いスループットを得ることが困難である。我々は、Bi-IPT 方式に基づき単一チャネルで直線状のトポロジでの隠れ端末問題による干渉を回避するためのスケジューリングについて提案し、適切な IPT 転送間隔を導出した。また、実システムで本方式による映像データ・UAV 制御コマンド送信を動作させるため、具体的なパケットの構成と各端末の動作を定義した。これらに基づき、実映像を用いたシミュレーションを行い、同転送方式は他の転送方式に比べ、パケットの End-to-end（E2E）遅延とロスが十分低いことを確認したほか、より高いビデオビットレートでビデオストリーミングが可能であることを確認した[7]。そして、同方式を小型シングルボードコンピュータ Raspberry Pi 上に実装し、同軸ケーブルを介した模擬無線ネットワーク環境で、通信実験を実施し、良好な性能を得た[8][9]。以下、この転送方式の Raspberry Pi への実装ならびに、同軸ケーブルを介した模擬無線ネットワーク環境における実験に基づく同方式の性能評価について報告する。

2. 小口径下水管内での UAV 制御情報・映像伝送

UAV を用いた下水管内検査について、小口径下水管環境では、映像送信に十分な無線伝送速度の確保と長距離伝送の両立は容易ではないため、本研究では複数の UAV を用いることにより検査範囲を拡大することを目指している。口径 200 mm 程度の下水管内での 2.4 GHz、5 GHz IEEE 802.11 無線 LAN 通信の通信距離は 5 m から 10 m 程度、920 MHz ARIB STD T-108 無線通信の通信距離は 3 m 程度にとどまる。特に、赤外線や可視光を含む光通信、超音波を含む音波通信などの通信手法が考えられるが、強い指向性や UAV の重量制限、映像伝送に耐えうるビットレートの制限などの理由から無線 UAV システムには現実的ではない。そこで、複数の UAV で鎖状のマルチホップネットワークを構築することで、検査範囲を拡大する。

リアルタイムの UAV 制御・映像確認を実現するためには、制御情報伝送の信頼性を確保し、映像データ伝送のスループットを最低限確保するマルチホップ通信手法が必要である。制御情報は、数十バイト程度のメッセージを 0.1 秒程度の間隔で十分に短い遅延で確実に送る必要があると考える。映像データは、最低限の画質の動画のリアルタイム伝送に十分な伝送速度を必要とするが、作業員が映像を確認できる程度の大幅な画質低下を伴わないパケットロスは許容される。しかし、単一チャネルでの直線トポロジにおいて可能な限り長い距離を通信する場合、各ノードの前後のノードは互いに隠れ端末の関係になり、同一フロー上のパケット送信が干渉してしまう。具体例を図 2 に示す。左端のノードからのホップ数で各ノードを区別することにする。0 番から 5 番に次々にパケットを送ろうとする時、2 番が既に届いたパケットを 3 番に転送していると、2 番からの信号と 0 番からの信号が干渉するため、1 番は 0 番からの信号を正しく受信できない。このため、このような状況では 0 番は 1 番にパケットを送信しない方が良い。2 番が 3 番にパケットを転送した後、つまり 3 番が 4 番にパケットを転送するときであれば、0 番は干渉を回避しつつ送信できる。このように、干渉が起きないように送信するため、同時に送信するノード同士が 3 ホップ以上離れている必要がある。Bi-IPT 転送方式では、各ノードのパケット送信タイミングを調節することにより、干渉を回避する。

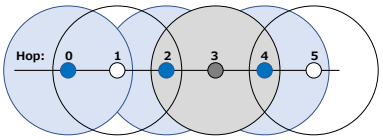

図 2. 単一チャネルマルチホップ無線 LAN での干渉

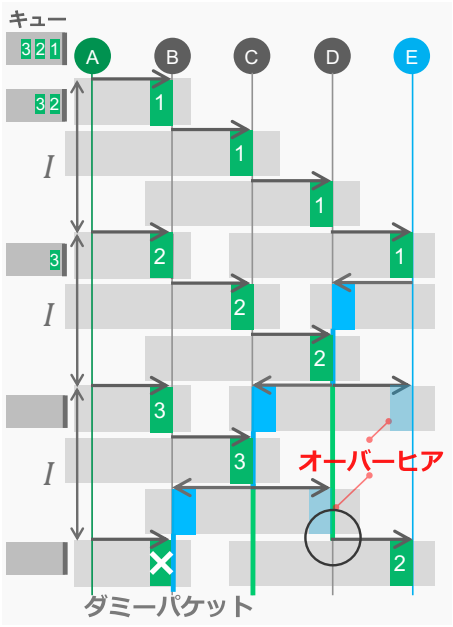

図 3. Bi-IPT 転送方式

3. 映像データと UAV 制御情報のマルチホップ伝送プロトコルとその実装

我々が提案した UAV 制御情報と映像データの双方向マルチホップパケット転送方式（Multi-hop UAV Control and Video Streaming。以下 MUCViS）について説明する。各ノードの動作は、Python 3.9 のプログラムとして実装した。MUCViS の設計は Bi-IPT 転送方式を基本としている。Bi-IPT 転送方式は、単一チャネルのマルチホップネットワークにおいて、パケット送信のタイミングを適切に制御することにより干渉を回避しつつスループットを最大化し、かつ双方向の通信を可能とする転送方式である。Bi-IPT 転送方式のパケット転送の様子を図 3 に示す。Bi-IPT 転送方式では、主たるデータ送信者（図中のノード A）が一定の間隔 I（=IPT 転送間隔）でパケットを間欠的に送信する。ノード A 以外のノードはノード A 側からのパケット送信が終了後、

すぐに自身のパケット送信を 1 回行う。つまり、自身発のパケット、あるいは送信待ちとなっていた中継中のパケットの送信を、ノード A 側からのパケット送信完了をトリガーとして行う。これにより、I を適切に設定することで、各ノードによるパケット送信タイミングを干渉が発生しないタイミングになるように同期することができる。A からの送信とは逆方向、つまり E から A に向かうパケットの送信に関しても、ノード A 側からのパケット送信完了をトリガーとして行う。中継ノード（Relay Node, RN）（B～D）は、ノード A へ向かうパケットを保持しているときにはそれを先に送信し、それらがないときにはノード E 向けのパケットを送信する。以上により、Bi-IPT 転送方式は双方向のパケット送信を可能にする。

ノード A 以外のノードは、パケットを送信するためにノード A 側からの送信が完了したことを検知する必要がある。このため、ノード A 以外のノードは自身宛以外のパケット送信をオーバーヒアする（例えば、図中の〇印での送信）。また、ノード A 以外のノードに送信機会を与えるため、ノード A は送信するべきパケットがなくなった場合、中身のないダミーパケットを送信する。なお、すべてのパケット送信時間を揃えるため、送信されるパケットサイズを同じにする。

以下、MUCViS での具体的な実装、パケット転送方法を述べる（図 4）。ここでは、制御ノード（Control Node、 以下 CN）からカメラノード（Camera Node、 以下 CamN）への方向を上り方向、CamN から CN への方向を下り方向と定義する。MUCViS では制御情報（上り）、映像データ（下り）、ダミー（下り）の 3 種類パケットを使用する。これらは UDP パケットのペイロードとして格納される。これらにつき具体的なパケットフォーマットを設計した。主たるフィールドは、パケット種別（Type）、シーケンス番号（Seq）、確認応答（Ack）、ペイロード（制御メッセージ、あるいは映像データ）である。CamN は送信する映像データがない場合はダミーパケットを送信する。RN と CN は下り方向のパケット受信をトリガーにしてパケットの送信を行うので、ダミーパケットにより、映像データの送信が必要ない場合でも RN と CN にパケット送信の機会を提供する。ただし、ダミーパケットの連続送信回数には上限を設定する。これは、再送発生等の理由で CamN のパケット転送間隔が乱れてしまった場合、元の IPT 転送間隔に戻すために、CamN が何も送信しない期間を用意するためである。

MUCViS の実装では、オリジナルの Bi-IPT とは異なり、RN は、制御情報パケットを上り下り両方向の隣接ノードにそれぞれユニキャストで送信する。制御情報を下りパケットとして受け取った RN と CN は、このパケット受信を自身のパケット送信の機会として用いる。下り方法の送信するのは、Bi-IPT 転送方式のオーバーヒアの代わりの役目を果たすためである。これにより、オーバーヒアできない（NIC のプロミスキャスモードが存在しない）端末でも実装できるようにしている。ブロードキャストでも両方のノードに送信できるが、ユニキャストであれば MAC 層での Ack によるパケット伝送の信頼性向上も期待できる。

RN がパケットを受信すると、まず受信パケットの種別を確認する。受け取ったパケットの種別が制御情報パケットであれは、制御情報パケットキューにこのパケットを入れる。映像データパケットもしくはダミーパケットの場合、パケット中の ACK 番号を取り出し、自身の送信する ACK 番号を更新する。映像データパケットを受信したとき、このパケットを映像データパケットキューに入れる。このときキューの長さが最大長に達していれば、キューから映像データ

パケットを 1 つ取り出し破棄する。これはバッファ溢れを防ぐためである。映像データパケットを受信した場合は、これを自身の次のパケット送信のトリガとする。

一方で、制御情報パケットまたはダミーパケットを受信した場合は、すぐにこれを次の自身のパケット送信トリガーであるとはみなさない。パケットの先頭の受信開始から経過時間が映像データパケットの受信の場合と同じになるまで待った後に、次のパケットの送信を開始する。これは、MUCViS で用いられる 3 種類のパケットサイズは同じではないため、パケット受信後のパケット送信タイミングを映像データパケットと揃えるためである。

RN は次に、制御情報パケットキューを確認する。キューに制御情報パケットが存在する場合、制御情報パケットキューから取り出し、上り下り両方向の隣接ノードにそれぞれ送信する。つまり、RN では、映像データよりも制御情報を優先して送信する。これは、作業員による UAV 操縦をスムーズに行うため、映像データの遅延よりも制御情報の遅延を小さくしたいからである。キューが空だった場合、映像データパケットのキューから映像データパケットを取り出し、ACK と共に下り方向に送信する。すべてのキューが空だった場合、ACK を格納したダミーパケットを作成し、下り方向に送信する。

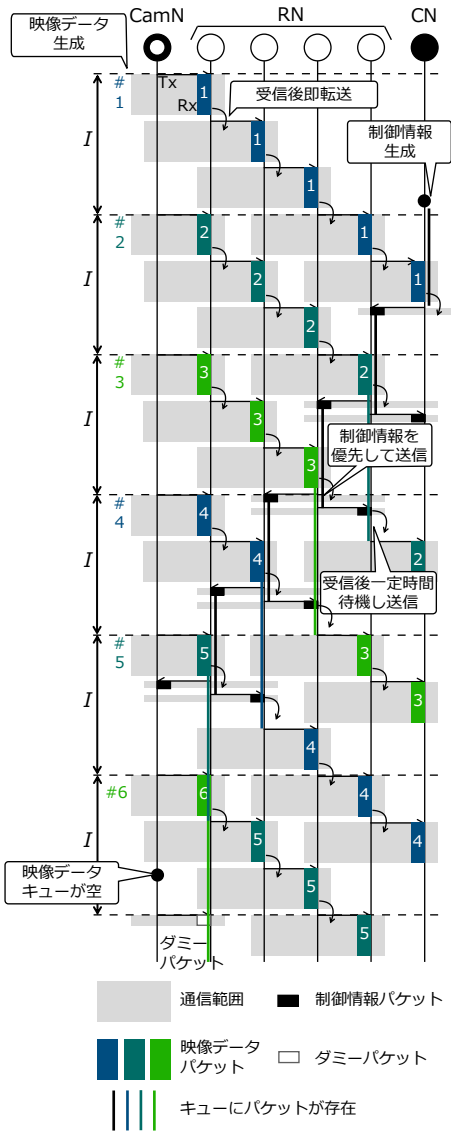

図 4. MUCViS でのパケット送信

4. 模擬環境における通信性能の評価

MUCViS について Raspberry Pi に実装し、無線 LAN アダプタと同軸ケーブルを用いて作成したネットワーク環境を用いて実際に通信を行い、通信性能の評価を行った。図 5 に作成したネットワーク構成を示す。同軸ケーブルで接続された 4 台の Raspberry Pi のうち、一方の端のマシンでカメラノード（CamN）、もう一方の端のマシンで制御ノード（CN）のプログラムを動作させ、中央 2 台では RN のプログラムを動作させた。本体のモデルは

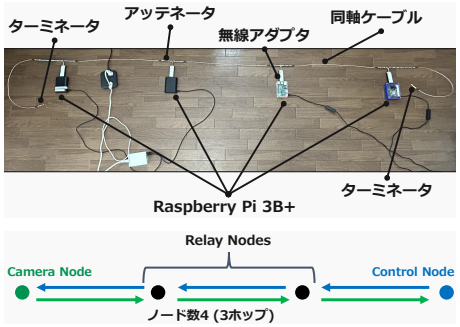

図 5. 実験ネットワーク構成

Raspberry Pi 3 Model B+であり、OS は Raspberry Pi OS 11（Kernel Ver. 6.1.21-v8+） である。

MUCViS との比較対象として以下の転送方式を用意した。

- UDP: パケットの送信タイミングを調整せず、各データを生成したらすぐに UDP パケットとして送信する方式。ただし、IEEE 802.11 の RTS/CTS を使用しない。
- RTS/CTS: UDP 方式にたいし、映像パケット送信時のみ IEEE 802.11 の RTS/CTS を有効にしたもの。なお、MUCViS では RTS/CTS を使用しない。

実験では、一定間隔ごとに一定サイズのバイト列を生成し、これを映像データとして映像データキューに入れることで映像トラフィックを模擬した。映像データの生成間隔は 0.125 秒、映像データ生成時間を 30 秒とした。制御情報に関しては、ダミーの制御情報 60 bytes を 30 秒間、10 Hz の頻度で生成した。CamN は映像データキューからデータを 1456 バイトずつ取りだし、パケットを生成した。MUCViS の制御情報とあわせて、UDP ペイロードサイズは 1464 バイトである。ダミーパケットはパケット種別フィールドと確認応答フィールドのみの 4 バイトとした。CamN のパケット送信間隔である IPT 転送間隔は、パケットサイズと計測した平均伝送レート 40 Mbps 考慮した上、試行錯誤の結果より 1 ms とした。中継ノード（RN）での映像データパケットキュー長の上限を 10 パケットとした。ダミーパケット送信後の送信待機時間を IPT 転送間隔の約 3 分の 1、0.3 ms とした。

図 6, 7, 8, 9 に実験の結果を示す。図 6 は平均エンド間遅延を示している。MUCViS を使用した場合、映像パケットに関しては、他の方法に比べで約半分の遅延となっている。また、コマンドパケットに関しては、他の手法と大きな違いはないが、これは、MUCViS では、コマンドパケットの送信機会は、映像パケットを送信したタイミングに限られることに起因するものである。図 7 は平均スループットを示している。MUCViS では、送信データレート 11 Mbps の時に 10 Mbps を達成しており、入力負荷に対して十分なスループットが得られていることが確かめられた。一方、UDP, RTS/CTS では、スループットは 1 Mbps にとどまっている。図 8, 9 に制御パケット、映像パケットの平均パケットロス率を示す。いずれも MUCViS は低いパケットロス率を達成している。一方、UDP, RTS/CTS では、映像パケットに関してパケットロス率が 90%以上のパケットロスが発生している。これは、隠れ端末に起因するパケットロスと考えられ、このロスが、図 7 に示した極めて低いスループットの要因となっている。これらの結果より、MUCViS の優位性が明らかとなった。

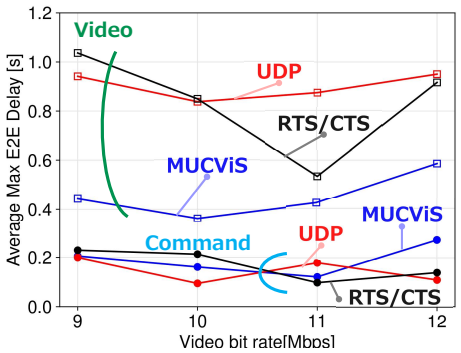

図 6. 平均エンド間遅延

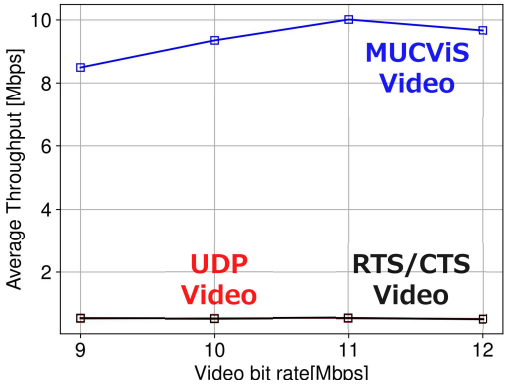

図 7. 平均スループット

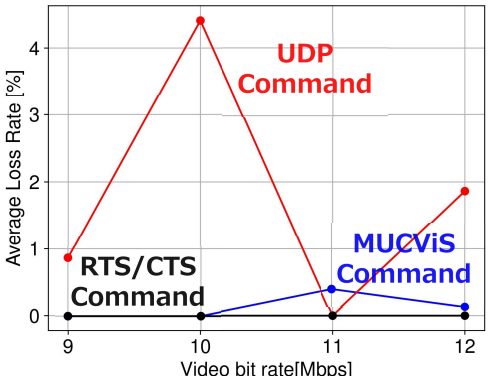

図 8. 平均パケットロス率（制御パケット））

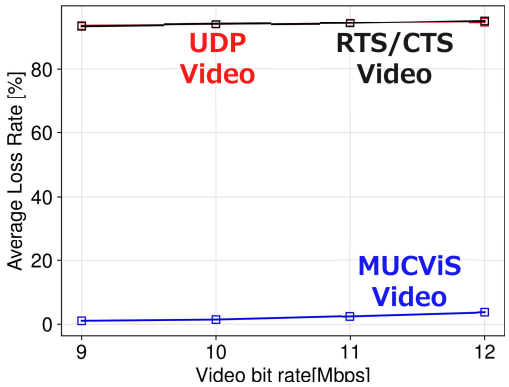

図 9. 平均パケットロス（映像パケット）

MUCViS は他の転送方式に比べ、低いパケットロス率、高いスループットを達成したものの、パケットロス率 0%を達成することはできなかった。これは、各端末が MUCViS 由来のもの以外のパケットを無線 LAN で送信していることによる。これらのパケットが他のノードが送信した電波と干渉し、パケットロスやパケット送信所要時間の揺らぎの要因となっていたと考えられる。システムのチューニングにより、これら MUCViS 以外のパケットの送信頻度は低くすることが見込めるので、さらなる性能向上が期待できる。今回の実験では、MUCViS の IPT 転送間隔 I について、パケットサイズと伝送レートを考慮して試行錯誤した結果 1 ms としたが、理論的にはさらに小さくでき、スループットも向上させることができると考えられる。ただし、IPT 転送間隔を小さくしすぎると、IEEE 802。11n のフレームアグリゲーションにより、パケット送信のタイミングが意図したものとは異なってしまうことがある。また、多くの無線 LAN アダプタは MCS を自動的に調節するため、伝送レートが変化する。よって、送信間隔を固定して設定すると、MCS が変化することによりパケット伝送時間が変わり、他のノードの電波と干渉を引き起こす可能性がある。

5. まとめ

複数台の UAV を用いた小口径下水管検査手法における単一チャネルの直線状マルチホップ無線ネットワークでのカメラ UAV の操縦・リアルタイム映像伝送を実現するために、Bi-IPT 転送方式に準拠して双方向の UAV 制御情報と映像データを伝送する方式 MUCViS を設計、実装した。また、同軸ケーブルを用いた模擬無線ネットワーク環境における実験に基づき、同方式の性能評価により、MUCViS により良好なスループット、低エンド間遅延、低パケットロス率を実現できることを確かめた。本助成の期間では、実際の下水管の中で、UAV あるいはその代替となる地上移動型の機器を用いた通信実験を実施するまでには至らなかったが、今後、現実的な環境で実映像を用いた検証を行う予定としている。その準備のため、複数台の無線機が同時に小口径下水管内で通信した場合の相互干渉の影響を調査している。

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2023 年研究助成を受けて実施されました。

参考文献

1) Susumu Ishihara, Zhi Liu, Seiya Tachibana, and Tomonori Yasuda, Implementation of video data transmission protocol for a narrow sewer pipe screening system using drifting wireless cameras, 2020 International Conference on Information Networking (ICOIN), pp.384-389, 2020.
2) 近本祐介，Thanh V. Pham，石原進: 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，情報処理学会研究報告，高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), vol.2023-ITS-92, no.7, pp.1-7, 2023.
3) K. Maruta, Y. Tohzaka, Y. Higa, H. Furukawa, Bidirectional Traffic Handlings in Wireless Multi-hop Networks Incorporating Intermittent Periodic Transmit and Packet Forwarding Path Reservation, In Proceedings of the IEEE Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS2007), 2007.
4) K. Maruta, H. Furukawa, Highly Efficient Multi Channel Packet Forwarding with Round Robin Intermittent Periodic Transmit for Multihop Wireless Backhaul Networks, Sensors, Vol. 17, No. 11, p. 2609, 2017.
5) Yuki Tsutsumi, Thanh V. Pham, Susumu Ishihara: Intermittent Multi-hop Video and UAV Control Command Transmission for Sewer Inspection, 5th International Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems (PerVehicle 2023), 2023.
6) 丸山健斗, Thanh V. Pham，立蔵洋介，石原進: 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～インパルス応答測定に基づいた実現～，電子情報通信学会技術研究報告，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), vol.123, no.276, SeMI2023-43, pp.11‐16, 2023.
7) Akihiro Nishida, Thanh V. Pham, Susumu Ishihara, Evaluation of an intermittent packet transmission method in UAVs-based sewer pipe inspection, International Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems (PerVehicle2024), 2024.
8) 西田明浩, Pham Van Thanh，石原 進，複数 UAV の制御とビデオストリーミングのための双方向間欠的無線マルチホップ転送方式の実装，情報処理学会マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO2024)シンポジウム, pp.1118–1127, 2024.
9) Akihiro Nishida, Thanh V. Pham, Susumu Ishihara, Implementation of A Bi-Directional Intermittent Wireless Multi-Hop Transmission Method for Multiple UAVs Control and Video Streaming, 2025 International Conference on Information Networking (ICOIN), pp.317–322, 2025.