

# 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

堤 悠喜<sup>1</sup> 近本 祐介<sup>1</sup> 石原 進<sup>2</sup>

**概要：**下水管の老朽化が深刻である。我々は、従来の下水管検査手法と比較して安全、取り回し容易で、検査範囲の拡張性や制御・映像確認のリアルタイム性に優れた複数の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた下水管検査手法を検討している。この手法では、小口径下水管内で複数無線 UAV を鎖状に並べ、先頭の UAV が撮影した映像データを無線通信で地上の操作端末までマルチホップ伝送する。地上の作業員は操作端末でリアルタイムで先頭 UAV を制御できる。これを実現するには、操作端末からの制御信号伝送の信頼性を確保しかつ遅延を十分に小さくしつつ、映像データ伝送のスループットを最低限確保するリアルタイムマルチホップ通信手法が必要となる。本稿では、制御信号伝送と映像データ伝送の割り当て時間を調整し、隠れ端末問題による衝突を回避する制御信号・映像データ伝送手法について検討する。

## 1. はじめに

日本の下水管の老朽化が深刻である [1]。筆者らは、従来の検査手法と比較して安く早く安全な下水管検査手法の開発を進めている。下水管内の任意の箇所を撮影した映像を、地上の検査員がリアルタイムで確認できれば、作業時間の短縮や、検査の確実性の向上が見込める。リアルタイムに下水管内の様子を確認する検査手法として、自走式有線ロボットを用いた検査手法 [2] があるが、ケーブルの取り回しが困難であることや、有線ロボットを管内にセットする際に作業員がマンホール内に入らなければならず危険を伴うという課題がある。そこで、取り回しが容易な、無線制御の UAV を用いた検査が考えられる。

しかし、小口径下水管環境では、映像送信に十分な伝送速度の確保と長距離伝送の両立は容易ではない。口径 200 mm 程度の下水管内での 2.4 GHz・5 GHz IEEE 802.11n 無線 LAN 通信の通信距離は 5 m–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 [3]。他に、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。

そこで筆者らは、従来の下水管検査手法と比較して安

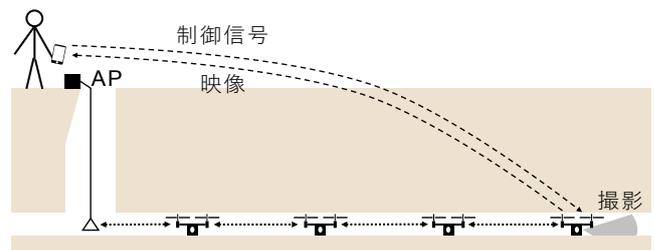


図 1 複数 UAV を用いた下水管検査システム

全、取り回し容易で、検査範囲の拡張性や制御・映像確認のリアルタイム性に優れた検査手法として、複数の無線制御 UAV を用いた下水管検査手法を検討している。この手法では、小口径下水管内での IEEE 802.11 無線 LAN 通信の短い通信距離制約のため、複数の UAV で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。図 1 のように、小口径下水管内で複数の UAV を鎖状に並べ、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・AP (アクセスポイント/基地局) 経由で地上の操作端末までマルチホップ伝送する。地上の作業員は操作端末でリアルタイムで映像確認と先頭 UAV の制御ができる。従来の手法と比較して、UAV が自動で管内に入るため人間がマンホール内に入る必要がなく安全であるほか、撮影映像データや制御信号の伝送を無線で行うため機器の取り回し容易で、作業員の作業が少なくて済む。

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 のリア

<sup>1</sup> 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻

<sup>2</sup> 静岡大学大学院工学領域

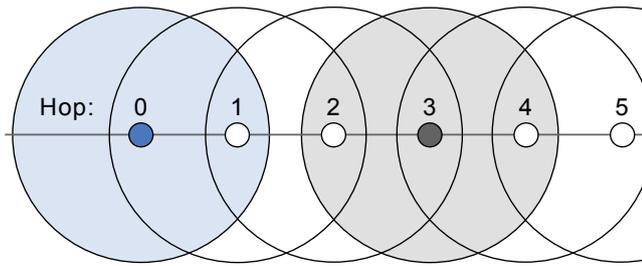


図 2 同一チャネルで同時送信可能なノードの位置関係

リアルタイム操縦・映像伝送を達成しなければならない。UAVの陣形制御については[4]で議論している。リアルタイム操縦・映像伝送を実現するには、操作端末からの制御信号伝送の信頼性を確保し、遅延を十分に小さくしつつ、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となる。本稿では、制御信号と映像データの伝送タイミングを調整し、隠れ端末問題による衝突を回避する制御信号・映像データ伝送手法について検討する。

## 2. カメラ UAV のリアルタイム操縦・映像伝送

リアルタイムの UAV 制御・映像確認を実現するには、制御信号と映像データの通信要件を満たす必要がある。制御信号については、小サイズのメッセージを定期的に十分に短い遅延で確実に送る必要がある。映像データについては、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画質低下を伴わないパケットロス許容される。

同一チャネルで鎖状のトポロジで可能な限り長い距離を通信しようとする、あるノードの前後のノードは隠れ端末の関係になってしまうため、同一フロー上のパケット送信が互いに干渉することになる。干渉が起きないように送信するためには図 2 に示すように、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。したがって、一つのチャネルのみを使う場合には干渉を避けるように適切に送信タイミングを制御する必要がある。

隠れ端末問題による衝突を回避する方法として、IEEE 802.11 には RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send) という機能が用意されている。しかし、制御用の短いメッセージを頻繁に送信する場合、RTS/CTS 送信のオーバーヘッドが相対的に大きくなってしまふ。

単一チャネルでのマルチホップ無線ネットワークにおけるデータ送信スケジューリングの手法に、IPT (Intermittent Periodic Transmit) 転送方式 [5] がある。IPT 転送方式は、送信元ノードが一定の時間間隔 (IPT 継続時間) でパケットを間欠的に送信し、中間に配置された中継ノードがパケットを受信した直後に転送する手法である。IPT 継続時間をうまく設定すれば、同一フロー上のパケット送信が互いに干渉せずにスループットを最大化できる。しかし、MAC プロトコルを変更する必要があるため、一般的な無

線 LAN モジュールへの実装は困難である。そこで、既存の MAC プロトコルの変更を最小限にしつつ、CSMA/CA 上で IPT 方式を動かす方法が考えられている [6]。[6] では、CSMA/CA の最小コンテンションウィンドウの値を非負の小さな値に設定してランダムバックオフ機能を有効化することで、CSMA/CA のオーバーヘッドを抑えつつ、経路が複数ある場合の経路間干渉を回避している。

複数チャネル・複数インタフェースを各 UAV に搭載することで、前述した干渉を避けることができるが、複数の通信インタフェースの搭載は UAV 重量を増加させてしまう。本稿では単一インタフェース・単一チャネルのみ考慮するものとする。

通信品質が貧弱で映像データと制御信号の伝送を両立できない場合、UAV の制御を失うと検査の続行が困難になるため、制御信号を優先するべきである。通信品質が貧弱で低遅延高信頼性の通信が困難であれば、制御信号の伝送をやめ、UAV を自律航行させるアプローチが考えられる。

## 3. 制御信号・映像データの時間分割伝送手法

以下の議論では、制御信号の伝送に十分な伝送速度を保つように UAV が陣形制御されているものとする。同一チャネルで鎖状のトポロジでの隠れ端末問題による干渉を回避し適切な送信タイミングを制御するために、同一フロー・同一チャネルでの干渉を避ける送信スケジューリングについて考える。同一チャネルで鎖状のトポロジでは、同一フロー上のパケット送信が互いに干渉するため、干渉を避ける送信スケジューリングが必要となる。一般的な無線 LAN モジュールへの実装を容易にするため、既存の MAC プロトコルの変更を伴わない手法を検討する。

### 3.1 基本戦略

制御信号伝送と映像データ伝送の性質の違いから、制御信号伝送と映像データ伝送に異なるタイムスロットを割り当てることを考える。制御信号は確実に送信されなければならない、映像データ伝送よりも優先されるため、制御信号伝送スロットでは、制御信号に対して制御端末とカメラ UAV の End-to-end の確認応答 (ACK) を用いた通信を行う。映像データ伝送スロットではカメラ UAV から制御端末へ映像データが送られるため、一方向のデータ量が多い。このため、前述した IPT 転送方式 [5] に基づく送信スケジューリングを行う。各中継ノードは制御ノードからの制御信号とカメラ UAV からの映像データを受信すると直ちに後続ノードに転送する。

### 3.2 動作

制御信号と映像データの伝送について図 3 に示す。この図は、下向きに時間経過、左右で下水管内の位置を表している。制御ノード (CN) 1 台と UAV 4 台 (UAV1-4) が 1

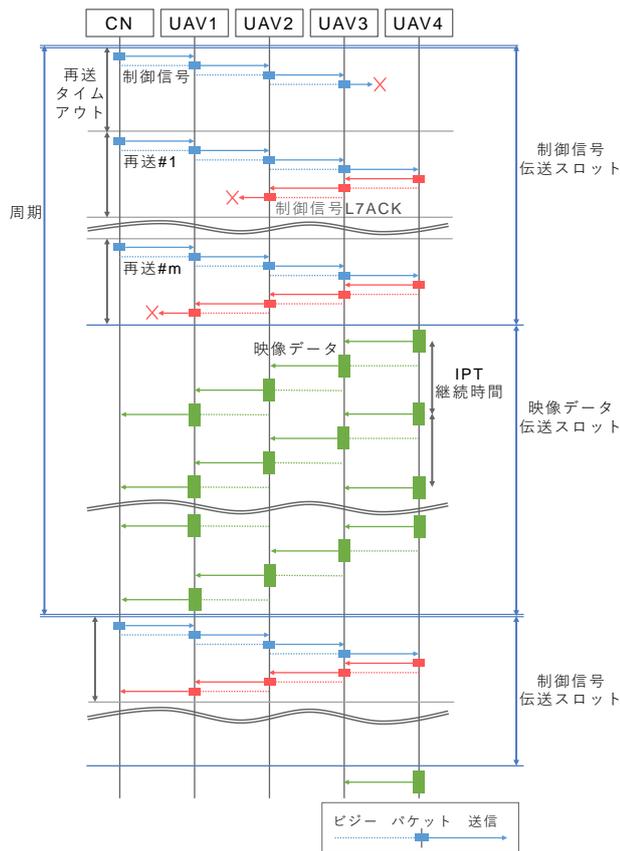


図 3 制御信号・映像データ伝送のタイムスロット割り当て

列に並んでいる状況を考える。UAV4 は管内撮影用のカメラを搭載している。

図 3 のように、制御信号伝送 1 回と映像データ伝送  $n$  回を 1 周期とし、この周期を繰り返すことで制御信号と映像データを伝送する。制御信号伝送のための時間を制御信号伝送スロット、映像データ伝送のための時間を映像データ伝送スロットと呼ぶ。CN は、周期のはじめに制御信号パケットを 1 ホップ先の UAV に送信し、これを受信した中継ノード (UAV1-3) は制御信号パケットの受信後直ちにこれを転送する。カメラ UAV は CN からの制御信号パケットを受け取ると直ちにアプリケーション層での確認応答 (L7-ACK) を返送する。中継 UAV はこの L7-ACK を受信すると直ちに後続ノードに転送する。CN は、L7-ACK を設定期間中に受信できなければ、制御信号パケットを再送する。再送処理は最大  $m$  回行う。再送タイムアウト時間は、伝送遅延、ノード同士の距離による伝播遅延、ノード数から事前に決定する。制御信号伝送スロットが終了すると、CN からの最初の制御信号パケットの通信開始から、再送タイムアウト時間  $\times (m + 1)$  時間の経過に相当する映像データ伝送スロットが開始する。カメラ UAV は制御信号パケットの受信の成否に関わらず、映像データ送信を開始する。映像データ伝送スロットでは、CN はデータパケットは送信しない。また確認応答も行わない。カメラ UAV は事前に設定されたサイズの映像データを 1 ホップ先

の UAV に間欠的に送信し、これを受信した中継ノードは映像データパケット受信後直ちに転送する。カメラ UAV は、ノード数から決定される一定の時間である映像データ伝送スロットの間だけ映像データを再送なしで送信する。

#### 4. まとめ

複数の UAV を用いた下水管検査システムを実現するために、鎖状のトポロジーにおいて同一フロー・チャンネルで制御信号伝送と映像データ伝送のタイムスロットを明確に分け、隠れ端末問題による衝突をなるべく回避する制御信号・映像データ伝送手法について検討した。提案手法では、制御信号伝送スロットと映像データ伝送スロットを周期的に繰り返し、制御信号伝送スロットではカメラ UAV からの制御信号 L7ACK を CN が受信するまで最大  $m$  回再送する。映像データ伝送スロットではカメラ UAV から一定期間映像データを再送なしで CN へ間欠的に伝送する。今後は、制御信号パケットの送信間隔や制御信号伝送スロット、映像データ伝送スロット、IPT 継続時間の適切な値を実験で明らかにすることが挙げられる。

**謝辞** 本研究は科学研究費補助金 21K18746 の助成により行われたものである。

#### 参考文献

- [1] 国土交通省：下水道：下水道の維持管理，国土交通省（オンライン），入手先 ([https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd\\_sewerage\\_tk\\_000135.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html))（参照 2021-11-09）。
- [2] 株式会社キュー・アイ：管内検査カメラ，株式会社キュー・アイ（オンライン），入手先 (<https://www.qi-inc.com/products/snake-camera/>)（参照 2021-11-09）。
- [3] Nagashima, T., Tanaka, Y. and Ishihara, S.: Measurement of wireless LAN characteristics in sewer pipes for sewer inspection systems using drifting wireless sensor nodes, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 99, No. 9, pp. 1989-1997 (2016).
- [4] 近本祐介, 堤 悠喜, 石原 進: 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, 情報処理学会, モバイルコンピューティングと新社会システム (MBL) 研究会 Work in Progress (WiP) (2021).
- [5] Jin, G. and Furukawa, H.: Automatic Transmission Period Setting for Intermittent Periodic Transmission in Wireless Backhaul System, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E95.B, No. 3, pp. 857-865 (online), DOI: 10.1587/transcom.E95.B.857 (2012).
- [6] Maruta, K. and Furukawa, H.: Highly Efficient Multi Channel Packet Forwarding with Round Robin Intermittent Periodic Transmit for Multihop Wireless Backhaul Networks, *Sensors*, Vol. 17, No. 11 (online), DOI: 10.3390/s17112609 (2017).