

複数移動無線端末を用いた下水管検査システムのための映像データと制御情報の間欠的マルチホップ伝送プロトコル：実映像によるシミュレーション評価

メタデータ	言語: ja 出版者: 情報処理学会 公開日: 2023-12-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 西田, 明浩, Pham Van, Thanh, 石原, 進 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/0002000147

複数移動無線端末を用いた下水管検査システムのための 映像データと制御情報の間欠的マルチホップ伝送プロトコル ～実映像によるシミュレーション評価～

西田 明浩¹ Pham Van Thanh² 石原 進²

概要: 下水管検査を省力化するため、筆者らは複数台の無線制御の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた下水管検査手法について検討している。この手法では、下水管内に複数の UAV で直線状のマルチホップ無線ネットワークを構築し、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・制御ノード経由で地上の操作端末までマルチホップ伝送する。この手法における UAV 制御情報と映像データのマルチホップ伝送のために、筆者らは、Bi-IPT (Bidirectional Intermittent Periodic Transmit) 転送方式を改良した転送方式を提案した。本稿では、提案方式やほかの転送方式を用いたビデオストリーミングの再生品質評価を行った。ノード数 4, ノード間距離 250m, IEEE 802.11n/ac MCS0, 全ノードの転送間隔が 6.8ms 一定の場合の直線状トポロジにおいて、提案方式では、ビデオビットレート 0.9Mbps 以下では映像データパケットの最大 E2E 遅延が 0.1s 以下、パケットロス率が 0% となり、単純に UDP による配送を行った場合に比べ、最大 E2E 遅延とパケットロス率が大幅に低くなることが確認できた。

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。全国の下水管渠の総延長は約 49 万 km の内、2021 年度末において、約 3 万 km、つまり、総延長内の約 6% が標準耐用年数である 50 年を経過している [1]。古くなった下水道管は、腐食やひび割れ、破損などの危険がある。また、これらの障害箇所から土砂が水道管内に侵入して地下部に空洞ができ、道路陥没の要因となる。現在年間約 3000 件の道路陥没が発生している。下水管の更新率は低下から横ばい傾向にあり、令和元年度においては 0.67% に留まっている [2]。

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 [3][4][5][6]。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ため、検査の確実性に優れる。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 [7][8] 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

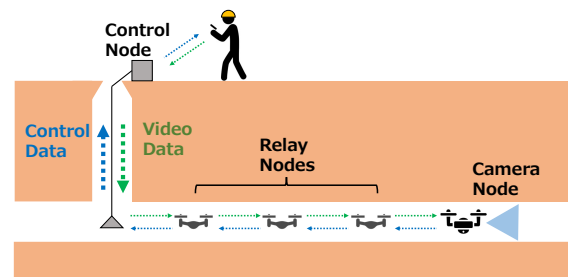


図 1 複数 UAV を用いた下水管検査システム

認できない。石原らは、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 [9]。このシステムでは、検査のために現場に必要な作業は、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。

そこで筆者らは、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が目的とす

¹ 静岡大学工学部数理システム工学科

² 静岡大学大学院工学領域

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いる。この手法では図 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・制御ノード (CN) を経由して地上の操作端末までマルチホップ伝送する。地上の作業員は端末を操作して制御情報を UAV へ送信し、操縦する。ここでいう操縦とは、カメラ UAV の前後移動やカメラの向きの変更などを大まかに指示することであり、細かな姿勢制御を行うことは想定していない。UAV が自動で管内に入るようにすれば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情報の伝送を無線で行うため、危機の取り回しが容易で、作業員の負担が軽減される。

しかしながら、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。UAV がその場で安定した姿勢で留まるための制御は、UAV が自律的に行くと想定する。前者の UAV 位置自動調節については近本ら [10] が提案している。堤らは後者のリアルタイム映像伝送の実現のため、小口径下水管内において、操作端末から制御情報伝送の信頼性を確保し、遅延を十分に小さくしつつ、映像データ転送のためのスループットを確保するマルチホップ無線通信手法として、Bi-IPT (Bidirectional Intermittent Periodic Transmit) 転送方式 [12][13] を改良した転送方式を提案した [14]。

Bi-IPT 転送方式では、送信元のノードが一定の時間間隔 (IPT 転送間隔、図 3 中の I) 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。先行研究 [14] では、単一チャン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、パケットの構成と各ノードの動作を定義した。さらに、一定の間隔で生成されるランダムバイト列の映像データパケットを用いたシミュレーションにより、パケットの End-to-end (E2E) 遅延とロス率を算出し、提案方式では E2E 遅延とロス率が十分低いことを確認した。

本稿では、提案方式について、実際のビデオストリーミングのパケットキャプチャした映像データを用いたシミュレーションによりビデオストリーミングの再生品質評価を行う。本稿の主な貢献は、i) 提案方式やほかの方法を用いた際に生成されるビデオを実際に生成し、再生品質を評価した、ii) ノード数 4、ノード間距離 250 m、MCS0、全ノードの転送間隔が 6.8 ms 一定の場合の直線状トポロジにおいて、映像データパケットのロス率と E2E 遅延、ストリー

ミングに適切な映像のビットレートを明らかにしたことである。

以下、2 章で小口径下水管内でのマルチホップ UAV 映像伝送に関連する手法と技術、課題を述べる。3 章では、堤らが提案した方式について述べる。4 章では提案方式について、実映像データのストリーミングを想定したシミュレーションについて述べる。最後に 5 章で本稿をまとめる。

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 802.11n 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 [11]。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。

2.1 UAV 制御・映像確認における課題

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 bytes 程度のメッセージを 0.1 s 程度の間隔で十分に短い遅延で確実に送る必要がある。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許容される。

しかし、単一チャン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よい。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。

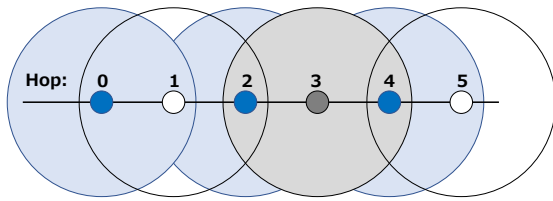


図 2 同一チャネルで同時送信可能なノードの位置関係

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。

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

ここでは、堤らが提案した UAV 制御情報と映像データをマルチホップ伝送する転送方式について述べる [14]。提案方式は、Bi-IPT 転送方式 [12][13] を基本としている。

3.1 基本戦略

提案方式では図 3 のように、Bi-BPT 転送方式に対し、映像データと制御情報の性質の違いに合わせて以下の変更・改良が加えられている。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。それぞれ送信されるパケットについて、制御情報パケットは映像データパケットに比べてサイズは小さく、送信頻度も低い、また、信頼性と低遅延の確保を目指す。対して映像データパケットはサイズが大きく、送信頻度が高いが、下水管内の損傷の視認を大きく妨げず、画質に大きな影響を与えない程度の少量のパケットロスは許容される。

- (1) CamN から CN へ方向である下り方向のフローに映像データを送信する。
- (2) CN から CamN へ方向である上り方向のフローに制御情報を送信する。制御情報の送信頻度は映像データの送信頻度に対して十分小さいと仮定する。
- (3) 中継ノード (Relay Node, 以下 RN) は上り方向宛の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。これにより、NIC のプロミスキャスト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

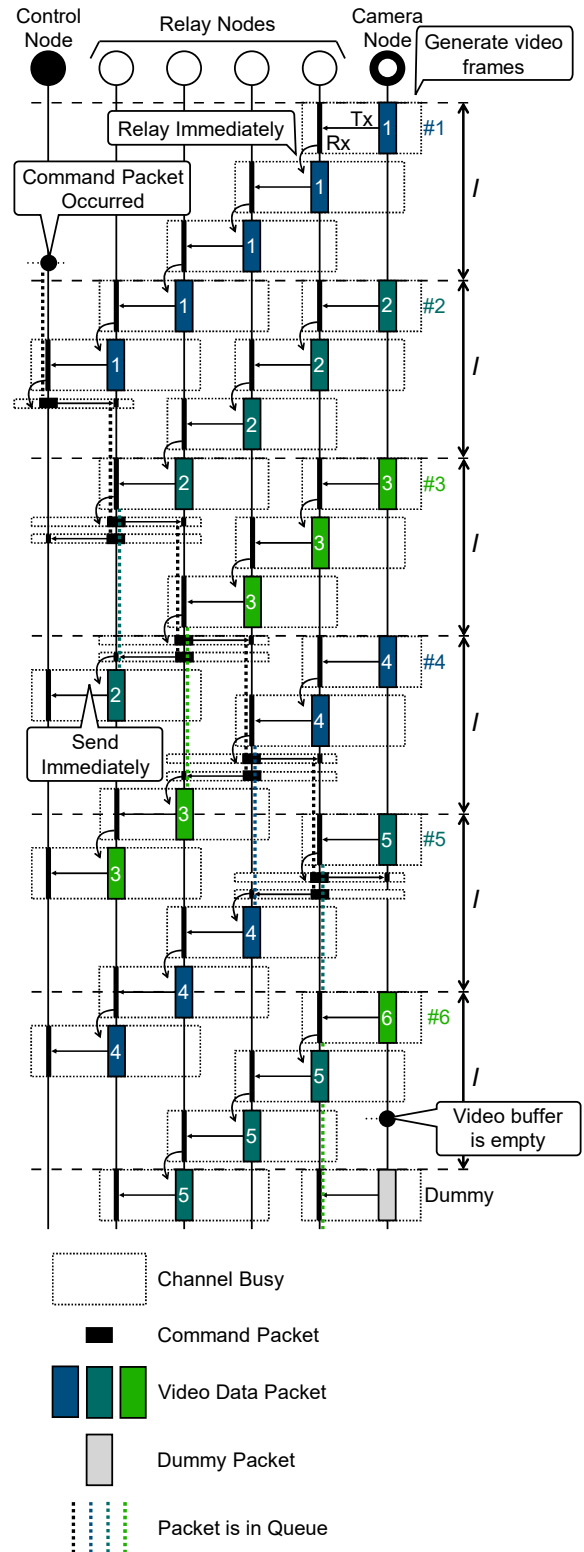


図 3 UAV 制御情報と映像データを伝送するための提案方式 [14]

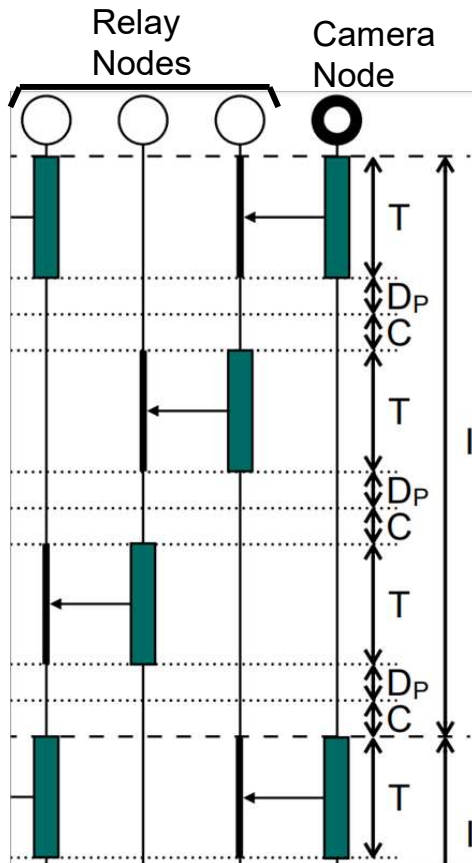


図 4 提案方式の変数定義

によるパケット伝送の信頼性向上も期待できる。

- (4) 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。そのため、中継ノードでは映像データよりも制御情報を優先して送信する。中継ノードは制御情報の送信のために、映像データの送信を延期し、次の送信機会以降に送信する。

CamN のパケット送信間隔である IPT 転送間隔 I は、事前に値を与えるものとする。小口径下水管内のような、直線状のトポロジを構成するノード以外からの妨害を受けにくい環境であれば、干渉を回避できる IPT 転送間隔 I の範囲を算出できる。あるノードの N_h ホップ先のノードと同時刻に送受信できるノード間距離であるとする。図 4 では、 $N_h = 3$ である。CSMA/CA でのメディアアクセスに伴うコンテンション遅延 C 、映像データフレーム伝送遅延 T 、中継ノードの転送処理遅延 D_P とすると、 I の取りえる範囲は次のように求まる。

$$I \geq N_h \cdot (T + D_P + C). \quad (1)$$

CamN は Bi-IPT 転送方式と同様に、送信する映像データパケットがない場合はダミーデータパケットを送信する。これは、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開始するため、RN と CN に

パケット送信の機会を提供するためのものである。

3.2 制御ノード (CN) の動作

CN は制御情報転送用のキューを持ち、制御情報が発生する都度、それをキューに入れる。CN は下り方向のパケットを受信すると、次の処理を行う

- (1) CN はまず、受信したパケットの種別を確認する。映像データパケットであれば映像データを取り出し、それ以外であれば破棄する。
- (2) CN は次に、制御情報のキューを確認する。制御情報がある場合、制御情報を取り出す。その後、制御情報パケットにシーケンス番号と取り出した制御情報を格納し、上り方向に送信する。キューが空だった場合、何もしない。

3.3 中継ノード (RN) の動作

RN は、制御情報転送用のキューと、映像データ転送用のキューを持つ。

- RN は上り方向のパケットを受信すると、受信パケットの種別を確認する。種別が制御情報パケットであれば、制御情報のキューにこのパケットを入れる。
- RN は下り方向のパケットを受信すると、次の処理を行う。

- (1) RN はまず、受信パケットの種別を確認する。種別が映像データパケットであれば、このパケットを映像データパケットのキューに入れる。それ以外であれば破棄する。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。
- (2) 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、制御情報パケットの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。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、下り方向に送信する。すべてのキューが空だった場合、ダミーパケットを作成し下り方向に送信する。ダミーパケットには中身の無いデータを追加し、伝送時間を映像データパケットと揃える。これは、RN は下り方向のパケット受信終了後すぐにパケット送信を行うため、パケットの伝送時間の差による通信の干渉を回避するためである。

3.4 カメラノード (CamN) の動作

CamN は、映像データキューを持つ。CamN は撮影された映像データを定期的に映像データキューに格納する。

- CamN は上り方向のパケットを受信すると、受信パ

ケットの種別を確認する。種別が制御情報パケットであれば、そのパケットから制御情報を取り出す。

- CamN はある一定の間隔 (IPT 転送間隔) で次の処理を行う。

(1) 映像データキューに映像データが存在すれば、CamN はこれを取り出す。CamN はパケットに映像シーケンス番号と取り出した映像データを書き込み、下り方向に送信する。

(2) 映像データが空であれば、下り方向のノードに転送機会を与えるためにダミーパケットを下り方向に送信する。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 [図 5(a)], 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。

4. 実映像を用いたシミュレーション

堤らの提案方式について、Space-Time Engineering 社のネットワークシミュレータ Scenargie[15] を用いたシミュレーションを行った。先行研究 [14] では、一定の間隔で生成されるランダムバイト列の映像データパケットを用いたシミュレーションにより、制御情報・映像データ送信のリアルタイム性と信頼性の評価を行っている。しかし、先行研究のシミュレーションでは実際の映像データを用いていないため、シミュレーションで発生したパケットロスがビデオフレーム復元時のビデオ品質に与える影響については評価されていない。

転送方式によるパケットロス率がビデオストリーミングに与える影響を調査するため、ビデオストリーミングのパケットをキャプチャした pcap ファイル内のパケットと同じパケットをシミュレーション内で作成し、CamN から映像データパケットとして送信することにより、CN で再生されるビデオを再現し、パケットロス率との関係を調査した。この結果に基づきビデオストリーミングの再生品質評価を行う。

4.1 ビデオトラフィックの作成方法

CamN が支障なくビデオストリーミング可能なビデオビットレートを調査するため、元となる 1 つのビデオ (<https://pixabay.com/ja/videos/%E9%9B%B2-cloudscape-%E9%A2%A8-158384/> より入手) からビデオビットレートを変更した複数のビデオを用意した。オリジナルのビデオデータは解像度 1080p, フレームレート 30fps, ビデオビットレート 2.7Mbps, 再生時間 25s である。このビデオデータを基にビデオビットレートが 0.5Mbps から 1.6Mbps までを 0.1Mbps 刻みに変化させた計 12 種類の H.264 ビデオデータを ffmpeg を用いて用意した。解

表 1 無線通信関連パラメータ

パラメータ	設定値
無線通信規格	IEEE 802.11n/ac Ad-hoc
中心周波数	5.18 GHz
MCS (固定)	0 (BPSK, 1/2 coding) (最大伝送レート: 6.5 Mbps) (チャンネル幅: 20 MHz, GI: 0.8 us)
無線インターフェイス	1 個 (1 stream)
アンテナ	全方向性, Gain: 0.0 dBi 位置: 高さ 1.5 m
電波伝搬モデル	TwoRayGround
送信電力	13 dBm
雑音指数	10 dBm
プリアンプ検知閾値	-82 dBm
チャンネルビジー判定閾値	-62 dBm

像度とフレームレートは変更していない。なお、ビデオの音声は消去している。各ビデオをループバックネットワークでストリーミングした。このときのパケットキャプチャ結果を pcap ファイルとして保存する。

Scenargie シミュレータでは pcap ファイルを読み込み、pcap ファイルに含まれるパケットのサイズと送信時刻に基づいてパケットを生成することが可能である。シミュレーション開始時に CamN が pcap ファイルを読み込み、CamN のモデルが送信する映像データパケットを生成する。

4.2 シミュレーション条件

4 台のノードが一直線上に配置された図 1 のような直線トポロジを想定した。両端に配置された CN と CamN の間に RN を 2 台配置した。全てのノードで、3 章で説明したような提案方式のシミュレーションモデルを動かした。無線通信関連のパラメータ詳細を表 1 に示す。無線通信には IEEE 802.11n/ac の 5 GHz 帯を Ad-hoc モードで利用した。MCS (Modulation and Coding Scheme) は 0, つまり変調方式を BPSK1/2 coding で固定し、チャンネル幅 20 MHz の GI (Guard interval) 0.8 μ s とした。送信電力は 13 dBm とした。本来は下水管内の通信での利用を想定したものであるが、本稿のシミュレーションでは地上でのマルチホップ通信環境を想定して実施した。

提案方式に対する比較対象として、制御情報・映像データの送信タイミングを UDP に任せる方式 (以下 UDP) と、UDP に RTS/CTS を有効化した方式 (以下 UDP+RTS/CTS) を用意した。この UDP では、CN でのユーザからの制御情報、CamN で生成された映像データをキューから取り出すと、送信タイミングを調整せずに即時 UDP で送信バッファに書き込む。なお、提案方式は隠れ端末による干渉を回避できるため、RTS/CTS は無効とした。

提案方式に関するパラメータを表 2 に示す。ノード間距離は、なるべく遠くかつ、低い SNR (Signal to Noise Ratio)

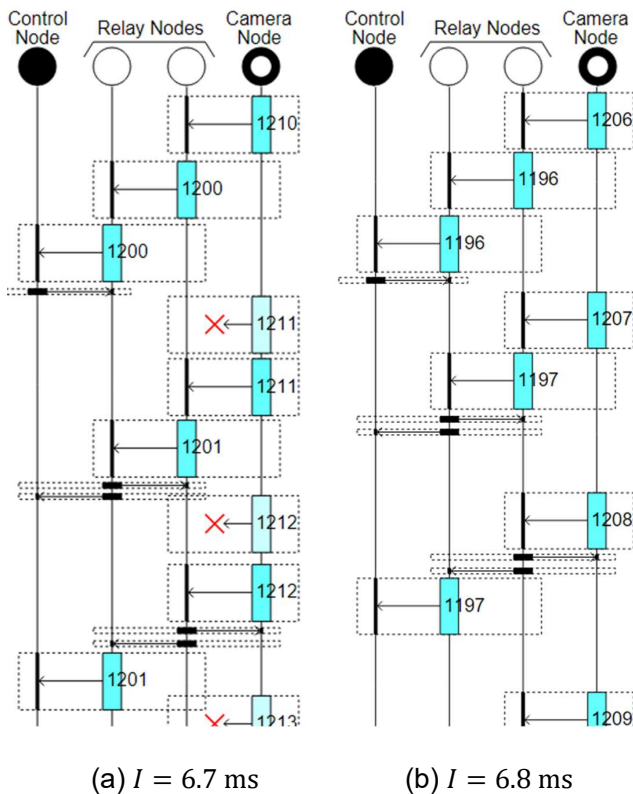


図5 提案方式でのパケット送受信の様子 (ビデオビットレート 2.7 Mbps)

表2 シミュレーション条件

パラメータ	設定値
ノード数	4
ノード間距離	250 m
IPT 転送間隔	6.7 ms
制御情報の生成	10 Hz
映像データのビデオビットレート	0.5 Mbps-1.6 Mbps
制御情報パケット長	64 bytes
映像データパケットデータ長	1348 bytes
ダミーパケット長	
ダミーパケットの最大連続送信回数	3
RN の映像データパケットキューサイズ	10 packets

値による送信失敗を回避できる距離である 250 m を選んだ。制御情報パケットの UDP ペイロード長は 64 bytes, 映像データパケットとダミーパケットは 1348 bytes とした。ダミーパケットと映像データパケットの伝送時間をそろえるために, それぞれのパケットにパディングを追加しダミーパケットデータ長と映像データパケット長を同じにした。IPT 転送間隔 I は, 式 (1) に基づき, 映像データパケット長が 1348 bytes の場合, $I = 6.8 \text{ ms}$ とした。中継ノードの映像データパケットキューのサイズは 10 パケットとした。

4.3 結果と考察

提案方式, UDP, UDP+RTS/CTS それぞれにおいて, 映像データのビデオビットレートを変更したシミュレ-

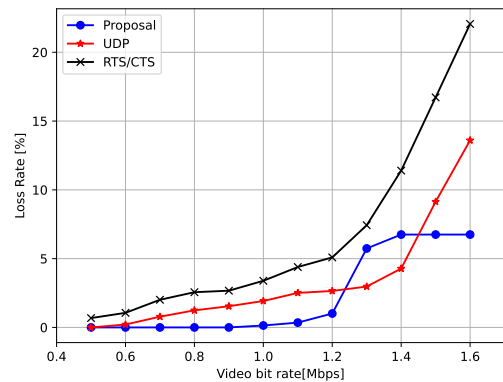


図6 各ビデオビットレートにおけるそれぞれの転送方式の映像データパケットのロス率

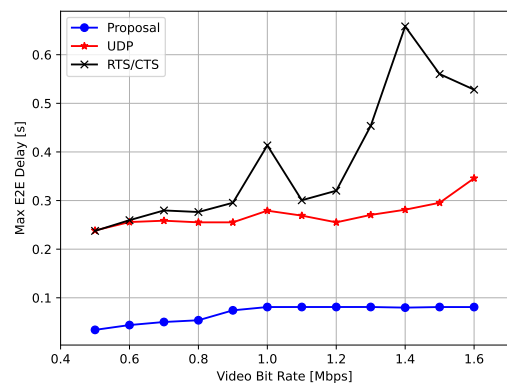


図7 各ビデオビットレートにおけるそれぞれの転送方式の映像データパケットの E2E 遅延の最大値

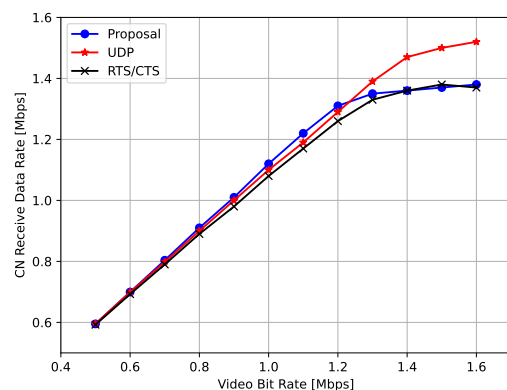


図8 各ビデオビットレートにおける提案方式の CN が受信した映像データのスループット

ションを 1 回ずつ行った。CN における, 映像データパケットのロス率を図 6, E2E 遅延の最大値を図 7 に示す。CN が受信した映像データスループットを図 8 に示す。

4.3.1 映像データパケットのロス率

図 6 に各ビデオビットレートに対する映像データパケットのロス率を示す。提案手法では, ビットレート 1 Mbps 以下でロス率は 0% であり, それより大きい場合ではパケットロスが発生している。UDP はビットレート 0.5 Mbps のときのみロス率は 0% である。UDP+RTS/CTS では常にパケットロスが発生している。ビデオビットレートを下げ

ることによりパケットロス率が低くなっている。

4.3.2 映像データパケットの E2E 遅延

図 7 に各ビデオビットレートに対する映像データパケットの最大 E2E 遅延を示す。提案方式については、UDP と UDP+RTS/CTS に比べて最大 E2E 遅延は小さい。パケットロスが発生しないビットレート 0.9 Mbps 以下では、ビットレートが減少するにつれて最大 E2E 遅延が減少している。UDP については、最大 E2E 遅延は 0.4s から 0.2s、UDP+RTS/CTS については、0.7s から 0.2s の範囲内にある。以上より、提案手法について、ノード数 4 (3 ホップ) の場合、1s のバッファ時間を設定すれば、CN がビデオを再生するタイミングに十分間に合うことが分かる。

4.3.3 映像データのスループット

図 8 にそれぞれの転送方式における、CN が受信した映像データのスループットを示す。提案方式において、映像データのパディングとダミーパケットはカウントしていないため、実際のスループットはさらに増加する。なお、提案方式における CamN の最大データ送信可能レート θ_{\max} は以下の式より約 1.49 Mbps である [17]。

$$\theta_{\max} = L_v \left(\frac{1}{I} - N_c \right) \quad (2)$$

ここで、 L_v は映像データ長 (1348 * 8 [bit])、 N_c は制御情報パケット送信レート (= 10 [Hz]) である。提案方式は、UDP と UDP+RTS/CTS に比べて、CN の映像データのスループットが少し大きいことがわかる。これは、提案方式によって映像データパケットの送信間隔が適切に開けられていることにより、パケットロスが抑制されていることによるものである。

4.3.4 ビデオの再生品質評価

シミュレーションより再構成されたビデオデータに関する主観的な評価について述べる。

映像データパケットのロス率が 0% のビデオデータは、ビデオの停止やノイズはない。ロス率が 1% 以下のものは、ビデオが一瞬停止したり、少しのノイズが乗っているが、問題なく視聴できた。ロス率が 1% より大きく、5% 以下のものは、ビデオが大きく止まることはないが、画面の半分をノイズが占めており、内容確認は困難だった。ロス率が 5% 以上のものは、映像が高頻度で停止し、ノイズが大きく乗っており、内容確認は困難だった。

4.4 議論

本稿のシミュレーションでは、全ての映像データパケットとダミーパケットのサイズを揃え、伝送時間を同じにするために、パディングを行った。しかし、RN と CN のパケット送信タイミングを、パケット受信完了後ではなく、パケット受信開始してから一定の時間後という設定すれば、パディングの必要がなくなり、パケットサイズが小さく

なる。これにより、パケットの伝送時間が短くなり、干渉を回避できる可能性がある。

本稿のシミュレーションからビデオを生成した方法では、CN に映像データパケットが到着したかどうかのみを調査し、これによりビデオを生成しているため、CN に映像データパケットが到着した時刻が再生映像に与える影響については正しく取り扱うことができていない。また、地上と下水管内のマルチホップ無線通信環境の違いがプロトコルの伝送性能に与える影響に関しては未検証である。

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 [14] について、実ビデオトラフィックを用いたシミュレーションを行った。

IEEE 802.11ac MCS 0 の 3 ホップの鎖状ネットワークにおいて、提案方式では、ビデオビットレート 0.9 Mbps 以下において、映像データパケットの最大 E2E 遅延が 0.1s 以下、ロス率は 0% であり、UDP と UDP+RTS/CTS に比べて十分小さいことが分かった。また、CN の映像データスループットは UDP と UDP+RTS/CTS より若干大きくなった。シミュレーションより再構成したビデオデータを見てみると、提案方式のものは UDP と UDP+RTS/CTS と比べ、内容を確認できた物が多かった。UDP と UDP+RTS/CTS の多くのビデオデータにおいて、内容の確認が困難であった。

本稿のシミュレーションでは、地上環境で実施したため、下水管内のマルチホップ無線通信環境の違いが提案方式プロトコルの伝送性能に与える影響に関しては未検証である。また、各ノードは位置が固定されているため、ノードが動いた時の影響についても未検証である。また、シミュレーションより再生した受信ビデオの品質に関して定量的な評価は行っていない。今後は、ノードが移動するシミュレーションや、再生したビデオについての定量的な評価を行う予定である。また、プロトコルを実装し、模擬下水管での実験などにより提案手法の効果の検証を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、JST、CREST、JPMJCR21D2 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 国土交通省: 下水道: 下水道の維持管理, https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/\crd_sewerage_tk_000135.html (参照 2023-11-01).
- [2] 日本ダクタイル鉄管協会: 協会誌, No. 110, pp. 4-5 (2022) https://www.jdpa.gr.jp/download/\journal_page/jdpa_110_018.pdf (参照 2023-11-

- 01).
- [3] 市川建設株式会社: 下水道管路施設の点検・調査「視覚調査」とは?, <https://ichikawa-kensetsu.com/post-1521/> (参照 2023-11-01).
 - [4] 管診鏡 SHOP: 管診鏡, https://kanshinkyou.nextshop.jp/html/user_data/assets/img/Kanshinkyou_catalog.pdf (参照 2023-11-01).
 - [5] 株式会社レックス: ファイバースコープと管内検査カメラ～選定の3つのポイント～, https://www.rex-rental.jp/feature/1032/note/fiberscope_inpipecamera (参照 2023-11-01).
 - [6] 株式会社テムザック: リリース | 群れで働くクモ型ロボット『SPD1』を発表, <https://www.tmsuk.co.jp/topics/3540/> (参照 2023-11-01).
 - [7] 関野勇: ストリーム・カメラシステムによる幹線管きよのTVカメラ調査について, 月刊下水道, Vol. 34, No. 3, pp. 55-58 (2011).
 - [8] SGC下水道センター: ストリーム・カメラシステム, <http://wink-sgc.co.jp/pdf/SGC2022\%2078-79.pdf> (参照 2023-11-17).
 - [9] Ishihara, S., Liu, Z., Tachibana, S. and Yasuda, T.: “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).
 - [10] 近本祐介, 立花誠也, 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, 情処研報, vol.2021-MBL-101, No. 17, pp. 1-5 (2021).
 - [11] 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 Trans. Comm., Vol. 99, No. 9, pp. 1989-1997 (2016).
 - [12] Maruta, K., Tohzaka, Y., Higa, Y. and Furukawa, H.: “Bidirectional Traffic Handlings in Wireless Multi-hop Networks Incorporating Intermittent Periodic Transmit and Packet Forwarding Path Reservation,” IEEE Asia Pacific Wireless Communications Symposium (AP-WCS2007) (2007).
 - [13] 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, p. 2609, DOI: 10.3390/s17112609 (2017).
 - [14] 堤悠喜, Pham Van Thanh, 石原進: 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, 情処研報, vol. 2022-MBL-105, no. 23, pp. 1-8 (2022).
 - [15] Scenargie: Space-Time Engineering, LLC, <https://www.spacetime-eng.com/> (参照 2023-11-17).
 - [16] 小箱雅彦: 電子化文書の画像圧縮ガイドライン, JIIMA, 機関紙 IM, vol. 50, no. 5, pp. 21-24 (2011-5). 入手先 (https://www.jiima.or.jp/pdf/5-JIIMA_guideline.pdf) (参照 2023-11-17).
 - [17] Yuki Tsutsumi, Pham Van Thanh, 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).