

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

堤 悠喜¹ Pham Van Thanh² 石原 進²

概要: 日本の深刻な下水管の老朽化に対応するため、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。地上からの UAV 制御とリアルタイムな撮影映像の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、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である。筆者らは、単一チャンネルでのマルチホップ無線ネットワークにおける間欠伝送に基づくマルチメディアデータと制御情報の転送について、IEEE 802.11 無線 LAN を想定したシミュレーションより、映像データ転送性能と制御情報の転送のリアルタイム性と信頼性を評価した。その結果、中継ノード 5 個の直線状トポロジで、0.1 s 間隔で送信される制御情報については、全ノードで一定の転送間隔 7.5 ms を保てていれば、MCS0、ノード間距離 250 m でエンド間遅延 0.03 s 程度でロス率 0% で送信できることを確認できた。一方、データリンク層での再送により送信タイミングの制御にずれが生じると、送信タイミングが一定に保てなくなり End-to-end のロス率の上昇とエンド間遅延が増大することが確認された。

1. はじめに

日本の深刻な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。2021 年 3 月末において、全国の下水道管渠の総延長は約 49 万 km である。このうち、標準耐用年数である 50 年を経過した下水管の延長は約 2.5 万 km であり、総延長の約 5% に相当する。この標準耐用年数を経過した老朽管の割合は、10 年後には 8.2 万 km (17%)、20 年後には 19 万 km (39%) と、今後急速に増加すると予想されている。また、管路施設に起因した道路陥没事故は、年間約 3000 件も発生している [1]。

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、安く早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、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検査がある。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ため、検査の確実性に優れる。しかし、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 [2][3]

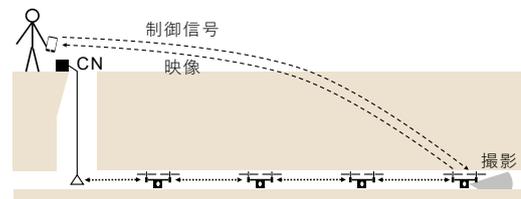


図 1: 複数 UAV を用いた下水管検査システム

も開発されている。この方法は、金銭的・人的コストは低い、カメラ回収時まで映像を確認できない。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 [4]。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実装可能である。しかし、下水管内に浮流カメラのカプセルを流すのに十分な水が必要となる。

そこで筆者らは、従来手法と比較して安全性や人件費の少なさという点で有利な、複数台の無線制御の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた検査について検討している。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で、小口径下水管内での無線 LAN 通信の短い通信距離制

¹ 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻

² 静岡大学大学院工学領域

約を克服し検査範囲を拡大している。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) 経由で地上の操作端末までマルチホップ伝送する。地上の作業員は端末を操作し、制御情報を同様に任意の UAV へ転送し、制御する。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信号の伝送を無線で行うため、機器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。ここで言う操縦とは、カメラ UAV の前後移動やカメラの向き変更などを指示することである。UAV がその場で安定した姿勢で留まるための制御は、UAV が自律的に行うと想定する。前者の UAV 位置自動調節については近本ら [5] が提案している。筆者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、操作端末からの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、映像データ伝送のスループットを最低限確保するマルチホップ無線通信手法の研究を進めている [6]。

本稿では、単一チャンネルでのマルチホップ無線ネットワークにおける間欠伝送に基づくマルチメディアデータと制御情報の転送について、シミュレーションに基づき、映像データ転送性能と制御情報の転送のリアルタイム性と信頼性に着目して評価する。本稿の主な貢献は、直線状の単一チャンネルマルチホップ無線ネットワークにおいて、間欠伝送に基づく双方向転送手法での制御情報と映像データ転送の End-to-end 遅延とロス率を評価したことである。

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、筆者らが適用を検討している、映像データと UAV 制御情報のマルチホップ無線伝送を可能とする手法について述べる。4 章でシミュレーションによる性能評価について述べる。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

小口径下水管環境では、映像伝送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、複数の UAV で検査範囲を拡大する。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 [7]。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、複数の UAV

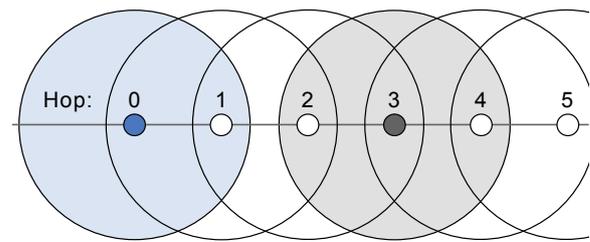


図 2: 同一チャンネルで同時送信可能なノードの位置関係

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、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的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、同一チャンネル・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、ある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、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。したがって、一つのチャン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。

2.2 UAV 制御・映像確認における課題の解決方法

隠れ端末問題による衝突を回避する代表的な方法は、次の 3 つが挙げられる。キャリアセンスの拡張、複数の異なるチャンネルの利用、送信タイミングの同期である。

2.2.1 キャリアセンスの拡張

キャリアセンスは、同一チャンネルの複数の無線局によるアクセスの競合を回避する仕組みである。代表的なのは IEEE 802.11 の CSMA/CA とその拡張機能の RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send) である。RTS/CTS は、

送信ノードが RTS パケット, 受信ノードが CTS パケットという小さな制御用パケットを送信し, これらのパケットを受信したノードの送信行動を一定期間抑制することで, 隠れ端末問題による衝突を回避する. しかし, 制御用の短いパケットを頻繁に送信する場合, RTS/CTS パケット送信のオーバーヘッドが相対的に大きくなってしまふ.

2.2.2 複数チャンネルの利用

複数の無線通信インタフェースを搭載して異なる周波数のチャンネルで通信することで, 隠れ端末問題による衝突を回避する方法もある. 例えば, 全 UAV が使用チャンネルが異なる 3 つのインタフェースを搭載し, 図 2 の UAV0 番と 3 番がチャンネル A, 1 番と 4 番がチャンネル B, 2 番と 5 番がチャンネル C を送信用に使い, それ以外のチャンネルを受信用とすれば, 各 UAV は隠れ端末問題による衝突を回避しつつ, 任意のタイミングで送信できる. しかし, 複数インタフェースを各 UAV に搭載すると, 重量の増加や同一端末での隣接チャンネル内干渉が問題となる.

2.2.3 送信タイミングの同期

干渉が起きないように予め送信タイミングを同期させておく手法もある. 代表的なのは, 単一チャンネルでのマルチホップ無線ネットワークにおいて, 隠れ端末問題による衝突を回避しつつスループットを最大化する IPT (Intermittent Periodic Transmit) 転送方式 [8] である. この転送方式では, 送信元ノードが一定の時間間隔 (IPT 転送間隔, 図 3(a) 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するようにデータ送信をスケジューリングする. 全てのノードでの転送間隔を一定に保ち, 干渉を避けるため, 送信パケットは同じ時間長になるよう構成する. IPT 転送間隔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.

Bi-IPT (Bidirectional IPT) 転送方式 [9][10] は, IPT 転送方式を, 双方向通信に拡張した手法である (図 3(b)). [9] では逆方向のトラフィックの例として, TCP による End-to-end の確認応答 (TCP-ACK) が挙げられている. 図 3(b) のように, ノード 2 はノード 1 にデータパケットを送っており, このパケットを受信したノード 1 は TCP-ACK を, 上流からのパケット受信の直後にノード 2 に送信する. 送信されたパケットが上流宛であっても, 反対側の下流のノードがこのパケットを受信 (オーバーヒア) できるため, このオーバーヒアをトリガーに下流へのパケットを転送できる. ノード 2 は全てのデータパケットの送信完了後も, 下流のノードに送信機会を与えるために最後の TCP-ACK を受信するまでダミーパケットの送信を続ける. パケット伝送時間を揃えるため, 下流宛のデータパケットよりもサイズが小さい TCP-ACK パケットにはダミーのデータをピギーバックする.

なお, [9] には明示されていないが, 隣接ノードのユニ

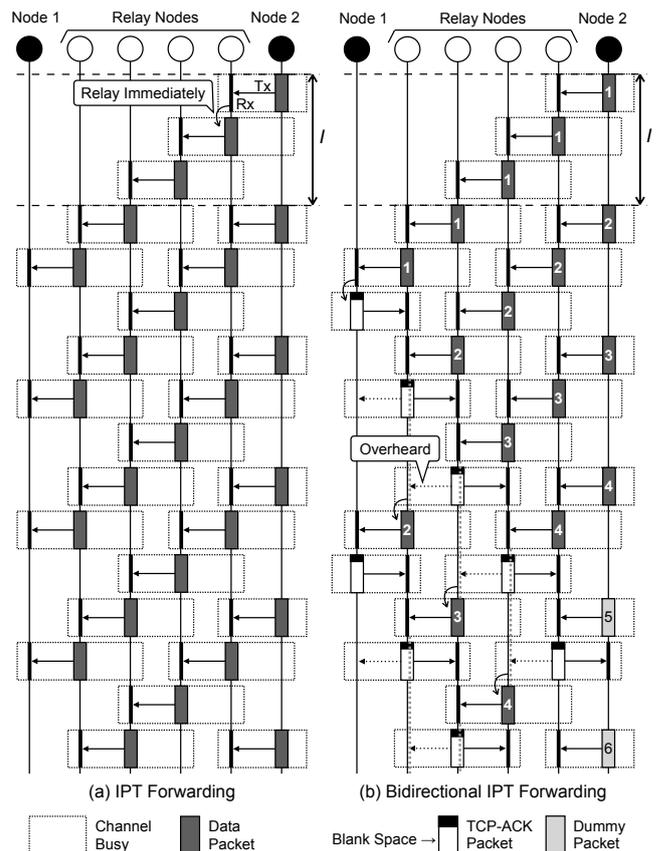


図 3: IPT 転送方式と Bi-IPT 転送方式

キャストパケットをオーバーヒアするためには, 自分以外に宛てられたパケットを受信できるようにする工夫が必要となる. 例えば, Bi-IPT の中継ノードの処理を MAC 層に実装する, あるいは NIC (Network Interface Card) のプロミスキャスモードを使用する, などが考えられる.

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

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できる, 適切な送信タイミングを制御するための双方向での送信スケジューリングについて考える. 単一チャンネルで直線状のトポロジでは, 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, 本稿では Bi-IPT を基本にするものの既存の 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

提案方式では図 4 のように, Bi-IPT 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・改良を加える. 制御ノード (CN) からカメラノード (CamN) への方向を上流, CamN から CN への方向を下流と定義する.

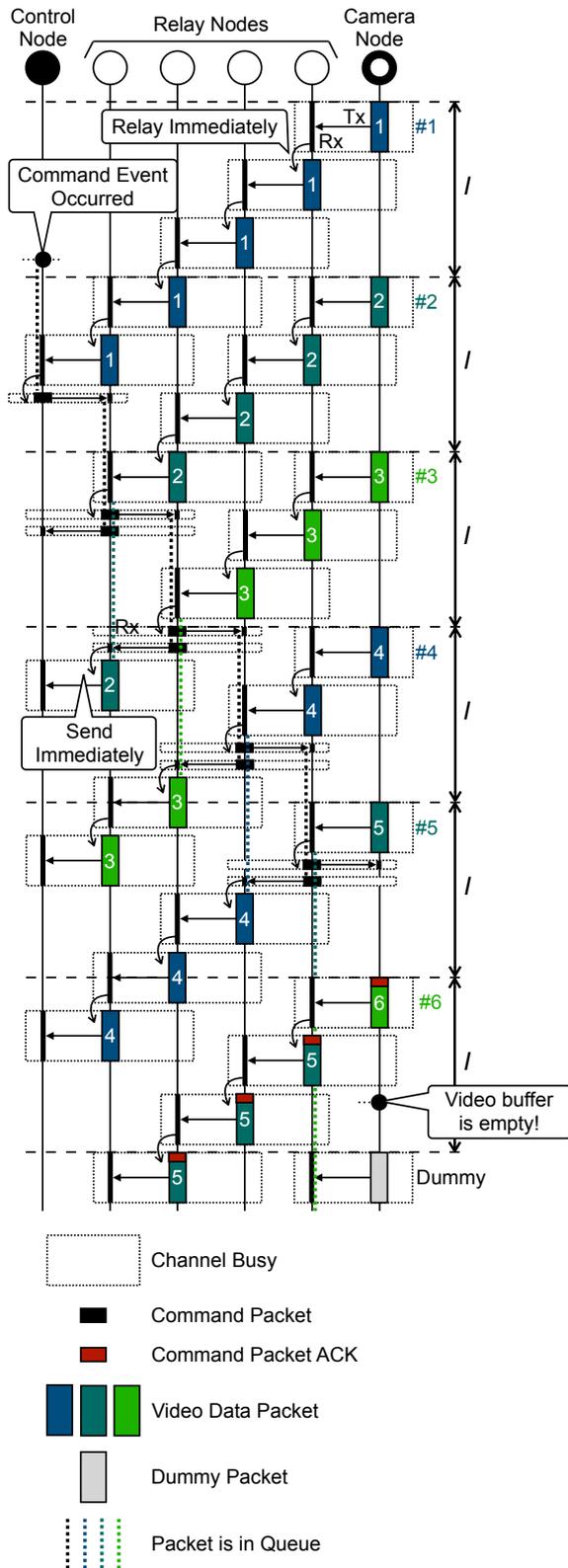


図 4: 提案方式

- (1) 映像データと制御情報の性質から、上流のフローに制御情報、下流のフローに映像データを割り当てる。制御情報の送信頻度は映像データパケットの送信頻度に対して十分小さいと仮定する。
- (2) 中継ノード (RN) は上流宛のパケットを上流と下流

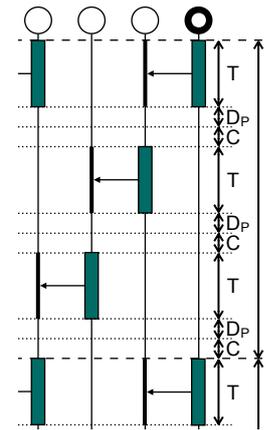


図 5: 提案方式の変数定義

のノードの両方にそれぞれユニキャストで送信する。これにより、NIC にプロミスキューモードが存在しない端末でも実装できるようにする。もちろん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。

- (3) 制御情報の信頼性保障のため、制御情報に対する End-to-end の確認応答 (制御情報 ACK) を、映像データあるいはダミーパケットと一緒に CamN から CN に届ける。
- (4) 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。

IPT 転送間隔は、事前に算出した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 5 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 の取り得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、送る映像データがない場合はダミーデータを送信する。

3.2 パケット構成

提案方式は制御情報、映像データ、制御情報 ACK を含む、次の 3 つのパケットを使用する。パケットのフォーマットを図 6 に示す。これらは UDP パケットのペイロードとして格納される。

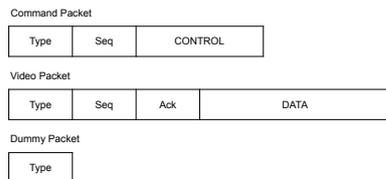


図 6: 提案方式のパケットフォーマット

- (1) 制御情報パケット
- (2) 映像データパケット
- (3) ダミーパケット

全てのパケットは、パケット種別 (Type) というフィールドを共通して持つ。制御情報パケットと映像データパケットはシーケンス番号 (Seq) フィールドを持ち、映像データパケットとダミーパケットは制御情報パケットに対する確認応答 (Ack) フィールドを持つ。制御情報パケットは制御メッセージ (Ctl.) フィールドを、映像データパケットは映像データ (Data) フィールドを持つ。Ack フィールドには、CamN が受信した制御情報の最大シーケンス番号が格納される。この Ack フィールドによって、CN は制御情報パケットが CamN に届いたことを確認する。なお、提案手法のダミーパケットは、2.2.3 で述べたダミーパケットに、TCP-ACK ではなく制御情報 ACK とパケット種別を持たせたものである。2.2.3 でのダミーパケットと同様に、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。

3.3 制御ノード (CN) の動作

CN は制御情報のキューを持ち、制御情報が発生する都度、それをキューに入れる。CN は上流のノードから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。制御情報が入っていた場合、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、上流のノードに送信する。キューが空だった場合、何もしない。

3.4 中継ノード (RN) の動作

RN は、制御情報パケットキューと、映像データパケットキューを持つ。

- RN は下流のノードから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、制御情報パケットのキューにこのパケットを入れる。
- RN は上流のノードから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、このパケットを一旦キューに入れる。それ以外であれば破棄する。この時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、制御情報パケットのキューを確認する。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流と下流の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流のノードに送信する。キューも空だった場合、ダミーパケットを作成し下流のノードに送信する。

3.5 カメラノード (CamN) の動作

CamN は、映像データキューと、制御情報 ACK のための制御情報シーケンス番号のキューを持つ。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 は下流のノードから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、このパケットからシーケンス番号を取り出し、制御情報シーケンス番号のキューに書き込む。
- CamN はある一定の間隔 (IPT 転送間隔) で次の処理を行う。
 - (1) 制御情報シーケンス番号のキューに制御情報シーケンス番号が存在すれば、CamN は映像データパケットの Ack フィールドを有効化し、取り出したシーケンス番号を Ack フィールドに書き込む。このキューが空であれば、パケットの Ack フィールドを無効化する。
 - (2) 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、下流のノードに送信する。映像データキューが空であれば、下流のノードに転送機会を与えるためにダミーパケットを送る。

4. シミュレーション

筆者らが利用を検討している Bi-IPT の性能を、Space-Time Engineering 社のネットワークシミュレータ Scenargie[11] を用いたシミュレーションにより評価した。あるパラメータにおける Bi-IPT による制御情報・映像データ送信のリアルタイム性と信頼性を評価するため、次のシミュレーションを行い、制御情報・映像データパケットの End-to-end(E2E) 遅延とロス率を算出した。ここでいう信頼性とは、送信バッファに入れた制御情報・映像データが、

表 1: 無線通信関係パラメータ

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), 4 (16QAM, 3/4 coding)
最大伝送レート	MCS0:6.5 Mbps, MCS4:39 Mbps (チャンネル幅:20 MHz, GI:0.8 μ s)
無線インタフェース	1 個 (1 stream)
アンテナ	全方向性, Gain:0.0 dBi, 位置:高さ 1.5 m
電波伝播モデル	TwoRayGround
送信電力	13 dBm
雑音指数	10 dB
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

受信時刻に関わらず, End-to-end で確実に受信バッファから取り出せることを指す. E2E 遅延は, 制御情報あるいは映像データが CN あるいは CamN でエンキューされてから, もう一端の CamN あるいは CN の受信バッファから取り出されるまでの時間を指す. ロス率は, CN あるいは CamN が送信した制御情報または映像データパケット数を N_S , CamN あるいは CN が受信できた制御情報または映像データパケット数を N_R として, 次のように求めた.

$$1 - N_R/N_S. \quad (2)$$

4.1 シミュレーション条件

N 個のノードが一直線上に配置された直線トポロジを想定した. 両端に CN と CamN が, 両者を結ぶ線分の中間に RN が $N - 2$ 個存在する. 全てのノードで, 3 章で説明したような Bi-IPT に準拠したプログラムを動かした. 無線通信関係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 か 4 固定で, チャンネル幅 20 MHz の GI (Guard interval) 0.8 μ s とした. 送信電力は, 国内基準に則り 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.

Bi-IPT 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 UDP と, UDP に RTS/CTS を有効化した $UDP+RTS/CTS$ を用意した. この UDP は, CN でのユーザからの制御メッセージ, 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, Bi-IPT は単体で隠れ端末問題による干渉を回避出来るため, RTS/CTS は有効化しない.

表 2: Scenargie パラメータ

パラメータ	設定値
ノード数	7
ノード間距離	MCS0:250 m, MCS4:160 m
IPT 転送間隔	MCS0:7.5 ms, MCS4:3.5 ms
制御情報の生成	10 個/s, 間隔 0.1 s で 60 s
映像データ生成	1 Mbps から 4 Mbps, 間隔 0.125 s で 60 s
制御情報パケット長	64 bytes
映像データパケット データ長	1464 bytes

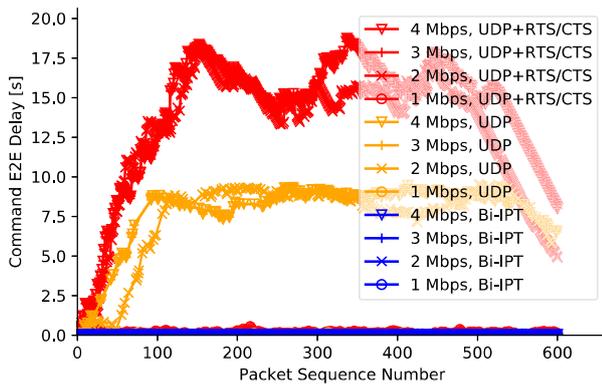
提案方式に関するパラメータを 2 に示す. IPT 転送間隔は, 干渉による L2 での再送および IPT のパケットのスケジューリングの崩壊を極力避けるため, 干渉ができるだけ起きない値 (MCS0 で 7.5 ms, MCS4 で 3.5 ms) を選んだ. ノード間距離についても同様に, 低い SNR (Signal to Noise Ratio) 値による送信失敗をなるべく回避できる距離を選んだ. 制御メッセージ・映像データともに, 60 秒間生成される. 映像データは 1 Mbps から 4 Mbps まで変化させた. 映像データは任意長のランダムバイト列である. 制御情報パケットは UDP ペイロード長が 64 bytes, 映像データパケットでは同じく 1464 bytes である. 中継ノードの映像データパケットキューのサイズは 1 とした.

4.2 結果と考察

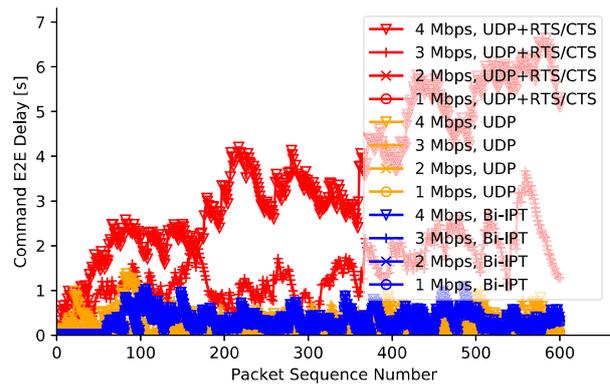
Bi-IPT, UDP , $UDP+RTS/CTS$ の 3 つにおける, MCS0, 4 での制御情報・映像データパケットの End-to-end (E2E) 遅延を図 7, ロス率を図 8 に示す. MCS0 のグラフは Bi-IPT のパケットの送信スケジューリングが最後まで正常に保たれた例を, MCS4 のグラフは Bi-IPT の送信スケジューリングが崩れてしまった例を示している.

4.2.1 パケットの End-to-end 遅延

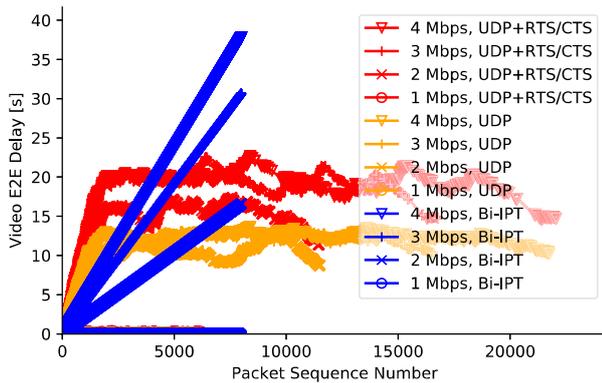
図 7(a)(b) は制御情報パケットの End-to-end 遅延の時間変化の一例を示している. (a) が MCS0 の場合, (b) が MCS4 の場合である. 図 7(a) (MCS0 の場合) を見ると, UDP , $UDP+RTS/CTS$ では時間の経過とともに, End-to-end 遅延が大きく増加しているのに対し, Bi-IPT ではいずれの映像データ送信レート対しても低い値 (0.03 s 程度) が維持されている. 一方図 7(b) (MCS4 の場合) では, データレートが高いため UDP , $UDP+RTS/CTS$ の End-to-end 遅延の値は全体的に短くなっている. $UDP+RTS/CTS$ では最大 7 s 程度になり, UDP , Bi-IPT より大幅に大きな値となった. UDP の End-to-end 遅延は Bi-IPT と同程度になっている. 一方, Bi-IPT は MCS0 の場合と比べてばらつきが大きくなっており, 最大 1 s 近くになることがある. この理由は, MCS4 では MCS0 に比べてノイズによるパケットロスが発生しやすい条件であったため, データリン



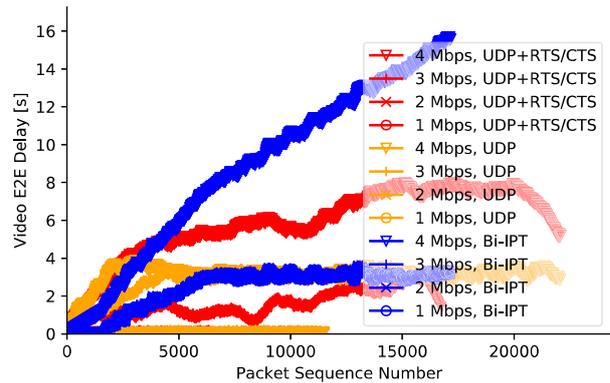
(a) 制御情報パケット (MCS0)



(b) 制御情報パケット (MCS4)



(c) 映像データパケット (MCS0)



(d) 映像データパケット (MCS4)

図 7: End-to-end 遅延

ク層での再送が発生し送信タイミングのずれが生じたためである。

図 7(c)(d) は映像データパケットの End-to-end 遅延の時間変化の一例を示している。(c) が MCS0 の場合、(d) が MCS4 の場合である。図 7(c) (MCS0 の場合) を見ると、Bi-IPT は時間の経過とともに、End-to-end 遅延が大きく増加しているのに対し、UDP、UDP+RTS/CTS は End-to-end 遅延が 12s 程度、20s 程度で頭打ちとなっている。一方図 7(d) (MCS4 の場合) では、全体的に UDP、UDP+RTS/CTS、Bi-IPT の順で End-to-end 遅延が小さい。

4.2.2 パケットのロス率

図 8(a)(b) にデータ伝送レートに対する制御情報と映像データパケットのロス率を示す。(a) が MCS0 の場合、(b) が MCS4 の場合である。Bi-IPT では映像データサイズが変化しても、制御情報と映像データパケットのロス率はほぼ一定であるが、他 2 つでは映像データサイズの増加に伴いロス率も増加している。Bi-IPT は UDP、UDP+RTS/CTS と比較して、制御情報パケットのロス率は MCS0 で 1Mbps 以上、MCS4 で 3Mbps 以上で他 2 つの方式のロス率以下の値だった。同様に、Bi-IPT は映像データパケットのロス率は MCS0 で 2Mbps 以上、MCS4 で 4Mbps の時に、他 2 つの方よりもロス率は低くなった。

4.3 議論

Bi-IPT は、データリンク層での IPT 転送間隔を式 2 の下限近くの値に設定すると、パケット再送によりパケット送信タイミングにずれが生じることによって各ノードが適切なパケット送信間隔を維持できなくなる。これによって、結果的に送信タイミングの制御ができなくなる。この問題への対策として、(i) IPT 転送間隔を拡げる、(ii) 定期的に何もパケットを送信バッファに書き込まない期間を作る、(ii) データリンク層で再送を行わない、の 3 つが挙げられる。(i)、(ii) の対策でも、単位時間あたりに送信できるデータ量は減少し、制御情報パケットの E2E 遅延もやや大きくなってしまふことが予想できる。しかし、送信タイミングの制御が失われた状態では、制御情報・映像データパケットの信頼性が損なわれる上に、E2E 遅延がさらに大きくなる可能性もある。(iii) の方法ではエンド間のパケットロス率が増大してしまう。

本稿でのシミュレーションでは、制御情報パケットの送信を、映像データパケットと比べて十分少ない毎秒 10 個と設定したため、映像データパケットには制御情報 ACK を 1 つだけ含めた設計にした。しかし、より多くの制御情報パケットを送信することを求められる場合は、複数の制御情報 ACK をまとめて映像データパケットに格納

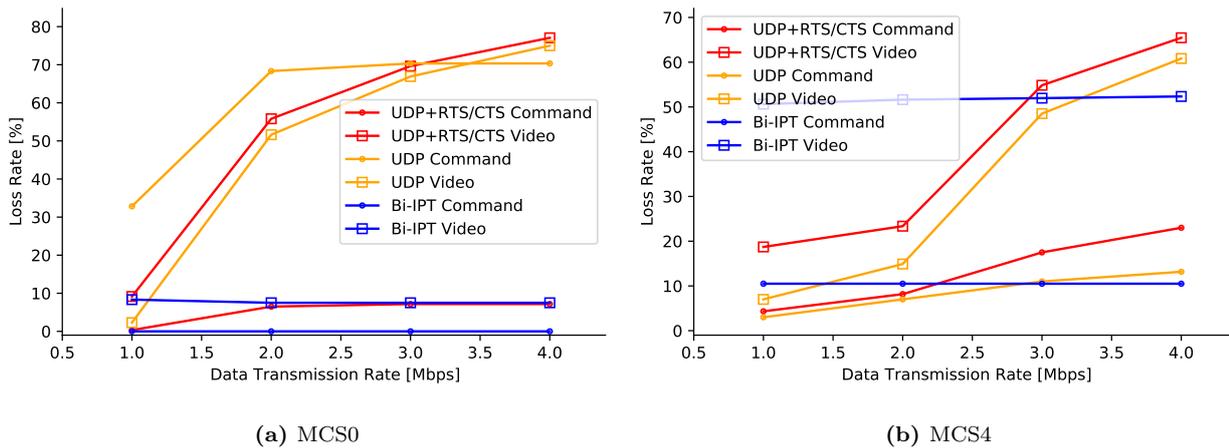


図 8: 制御情報・映像データパケットのロス率

することが考えられる。元の Bi-IPT 転送方式 [9] でも、複数の TCP-ACK を 1 つのパケットにまとめて送信する TCP-ACK Aggregation という方法が提案されている。

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プロトコルを、ネットワークシミュレータ Scenargie を用いたシミュレーションを行い、リアルタイム性と信頼性について評価した。制御情報パケットについては、全てのノードで一定の送信間隔を保てていれば、MCS0 で E2E 遅延 0.03s 程度でロス率 0% と、低遅延でロスなく伝送できることを確認した。一方、データリンク層でのパケットロスに伴う再送によって送信タイミングのずれが発生すると、制御情報パケットは MCS4 で E2E 遅延 1s 程度でロス率約 10% と、リアルタイム性と信頼性が大きく損なわれた。

本稿のシミュレーションは実際の映像データを使っていないため、このロス率が映像フレーム復元時の映像品質に与える影響は明らかではない。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。今後は、下水管を模したマルチホップ通信環境での実際の映像データを入力とするシミュレーションによる評価、大学構内の模擬下水管での実験などにより、手法の検証・改良を行う予定である。

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, 入手先 (<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd.sewage.tk.000135.html>) (参照 2022-11-01).

[2] 関野勇: ストリーム・カメラシステムによる幹線管まきの TV カメラ調査について, 月刊下水道, Vol. 34, No. 3, pp. 55–58 (2011).

[3] SGC 下水道センター: ストリーム・カメラ システム, 入手先 (<http://www.wink-sgc.co.jp/pdf/stream.pdf>) (参照 2022-11-01).

[4] 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), IEEE, pp. 384–389 (2020).

[5] 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).

[6] 堤悠喜, 近本祐介, 石原進: 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, 情報処理学会, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2022 論文集, Vol. 2022, pp. 1101–1107 (2022).

[7] 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. on Comm., Vol. 99, No. 9, pp. 1989–1997 (2016).

[8] Guangri, J. and Furukawa, H.: “Automatic Transmission Period Setting for Intermittent Periodic Transmission in Wireless Backhaul System,” IEICE Trans. on Comm., Vol. E95.B, No. 3, pp. 857–865 (online), DOI: 10.1587/transcom.E95.B.857 (2012).

[9] 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,” In Proceedings of the IEEE Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS2007), (2007).

[10] 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 (online), DOI: 10.3390/s17112609 (2017).

[11] Scenargie: Space-Time Engineering, LLC, (online), 入手先 (<https://www.spacetime-eng.com/>) (参照 2022-11-01).