

小口径下水管内における 無線LANマルチホップ映像ストリーミングの基礎性能評価

森本蒼一郎[†] 堤悠喜[†] 石原進[†]

[†] 静岡大学

1 はじめに

日本の下水管の老朽化が深刻である [1]. そのため早急な下水管検査が必要であり, 低コストかつ短時間で実施可能な下水管検査手法が求められている. そこで筆者らは, 国内の敷設延長が最も長く, 管内調査の需要が大きい 200–250 mm の下水管を対象として, 複数の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を下水管内に配置し, カメラを搭載した先頭の UAV が撮影した下水管内の映像データを地上の端末まで無線 LAN でマルチホップ伝送する手法を検討している.

直径 200–250 mm の小口径下水管内では, IEEE 802.11 無線 LAN の通信可能距離が 2.4 GHz 帯では 6 m 程, 5 GHz 帯では 8 m 程に制限されることが分かっている [2]. そこで検査範囲を拡大するため, 複数の UAV でマルチホップネットワークを構築することを考える. しかし, マルチホップ伝送には同一フローのパケットが伝送路上で干渉することにより十分な帯域が得られないという課題がある. 複数 UAV を用いた下水管内検査システムを実現するためには, 屋外とは環境が異なる小口径下水管内で安定したマルチホップ伝送を行うための条件を明らかにする必要がある.

本稿では, 埋設された模擬下水管を用いたスループット測定実験により, 直径 200–250 mm 程度の小口径下水管での無線マルチホップ映像ストリーミングによる下水管検査の実現可能性について検討する.

2 複数 UAV を用いた下水管検査システム

本システムの概要を図 1 に示す. 図のように UAV を一直線上に配置し, 無線 LAN によるマルチホップネットワークを構築する. UAV は通信接続性を維持するよう自律的に端末間距離を調節する. 先頭のカメラを搭載した UAV (カメラ UAV) は飛行しながら管内を撮影し, 映像データを地上の端末へストリーミング送信する. 映像品質に関しては, 高品質な映像をリアルタイム

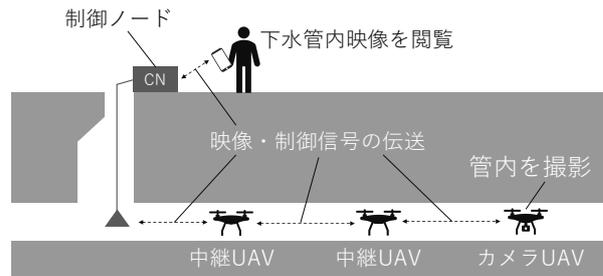


図 1: 検査システムの概要

で閲覧できることが望ましいが, 高品質映像を UAV 本体に保存し, UAV の位置や状況が確認できる程度に品質を低下させた映像をリアルタイムで転送することも考えられる. カメラ UAV の飛行を制御する信号は地上の検査員の端末からカメラ UAV へ中継 UAV・制御ノードを経由してマルチホップ伝送される. これにより, 地上の検査員の端末でリアルタイムの映像閲覧とカメラ UAV の飛行制御の実現を目指す.

IEEE 802.11 無線 LAN 通信では符号化率と変調方式の組み合わせ (MCS), 並びにチャネル帯域幅により最大転送データレートが変化するが, より高い伝送レートを達成する設定では通信可能な距離は短くなるので, より多くの中継が必要となる. また, 本システムにおける複数 UAV によるマルチホップ伝送では隠れ端末問題の影響を考慮しなければならない. 隠れ端末の関係にある端末同士による同時送信は衝突による受信エラーを招き, スループットが低下する. 従って, 隠れ端末関係にある端末の同時送信を避ける必要がある. 本稿では, MCS, ホップ数及び端末間距離の変化がスループットに与える影響を大学構内に敷設された直径 200 m の塩ビ製模擬下水管を用いたスループット測定実験により調査する.

3 塩化ビニル製下水管内における測定実験

3.1 実験環境と使用機器及び実験手順

大学構内に埋設された全長 20 m, 直径 200 mm の塩化ビニル製模擬下水管内で測定を実施した. この模擬下水管は管底が地上から 400 mm になるよう埋設されており, 1 m 間隔で縦穴が空けられている. 管の両端

Basic Study on the Performance of Wireless LAN Multi-hop Video Streaming in Narrow Sewer Pipes
Soichiro MORIMOTO[†], Yuki TSUTSUMI[†] and Susumu ISHIIHARA[†]

[†]Shizuoka University

表 1: 各端末のパラメータ設定

中心周波数	2.412 GHz (チャネル 1)
無線規格	IEEE 802.11n
チャンネル幅	20 MHz
送信電力	10 mW
トランスポート層プロトコル	UDP
送信データレート	72.0 Mbps
	(64-QAM 変調, 符号化率 5/6, MCS7)
	43.5 Mbps
	(16-QAM 変調, 符号化率 3/4, MCS4)

には貯水升がある。

小型 Linux コンピュータ (RaspberryPi3 Model B+) に Planex 製の USB 無線 LAN ドングル GW-450D2 (シングルアンテナ) を接続した端末を 2-4 台用意し, 送信端末, 中継機, 受信端末として使用した. 表 1 に送信端末, 受信端末及び中継機の設定を示す. 事前実験により 5 GHz 帯での 2 ホップの通信可能距離が 16 m であることがわかっている. したがって, 5 GHz 帯での通信では本模擬下水管内で隠れ端末問題を発生させることはできない. そのため, 本実験では 5 GHz 帯と比較して通信可能距離が短い 2.4 GHz 帯を使用した. 送信端末と受信端末は中継機を介さないとお互いに通信できないようルーティングを行った. また, 本実験では RTS/CTS は無効になっている.

送信端末, 中継機, 受信端末のそれぞれのアンテナが管の中央に位置するように調節して配置した. 3-4 台の端末を用いた際の配置を図 2 に示す. 送信端末と受信端末間のスループット測定をネットワーク測定ツール iPerf3[3] を用いて実施した. スループットの最大値は互いに干渉する可能性のある端末数 n 台に対して $1/n$ となることは明らかであるので, データ転送が可能になるよう iPerf3 に与える送信データレートを調整した (例: 2 ホップ・端末間距離 2 m での測定では 20 Mbps を与えた). このような調整をしない場合には, 衝突により期待するスループットは得られなかった.

測定は次の手順で行った. i) 端末をそれぞれ管内に設置し, 蓋と土嚢で縦穴を閉じる. ii) 20 秒間 UDP により通信. iii) ii) を 10 回繰り返し実行し, スループットの平均を求める. 本実験では管内に水は存在しない.

3.2 スループット測定結果とまとめ

送信端末と受信端末間のスループットの測定結果を図 3 に示す. MCS4, MCS7 のいずれの場合でも 1 ホップ時のスループットに対して, 2 ホップでは約 1/2, 3 ホップでは約 1/3 に低下している. これは前説で示した予測通りである. MCS4 の場合の 1 ホップでは 2 m まで 35 Mbps のスループットを維持している. 単純な推測では, 2 ホップでは 4 m, 3 ホップでは 6 m まではデータ転送が可能と予想される. しかし, 2 ホップでは 4 m までスループットの変動が少ないのに対し, 3 ホップでは 6 m においてスループットが急落している. こ

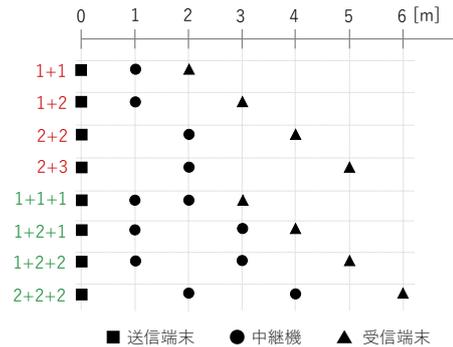


図 2: 各距離における送信端末, 中継機及び受信端末の配置

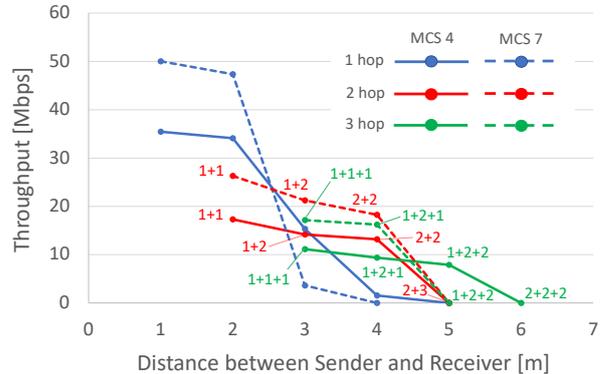


図 3: 塩ビ製下水管内におけるスループット

れは, 3 ホップの 6 m において送信端末と中継機が隠れ端末の関係になっており, 衝突が頻発するためと考えられる. MCS4 の場合の 1 ホップでは 2 m まで安定したスループットを保っているが, 3 ホップではスループットは低下するものの, およそ 2 倍の 5 m にまで伸びていることがわかる. 本実験は 2.4 GHz を使用したが, 5 GHz では 1 ホップのデータ転送可能距離が 8 m であるので, 3 ホップでおよそ 16 m までデータ転送が可能であると考えられる. また, RTS/CTS が無効になっているため, 隠れ端末問題によりスループットが大幅に低下しているが, RTS/CTS を有効にするとスループットは向上すると予想される.

今後は, RTS/CTS を有効にした場合に隠れ端末問題が生じている環境でどの程度スループットが向上するのかを調査するほか, 実際の映像ストリーミングでの動作検証を行う予定である.

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/crdseweragetk000135.html>> (参照 2022-01-05).
 [2] Nagashima, T., et al.: 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).
 [3] iPerf, 入手先 <<https://iperf.fr>> (参照 2022-01-05).