

省力化下水管検査のための 浮流無線LAN端末による映像伝送プロトコルの改良

石原 進¹ 安田智則¹ 立花誠也¹

概要：筆者らは複数のカメラ付き小型無線LAN浮流端末を下水管内に流し、下水管の管壁の状態を撮影した映像を無線LANにより伝送することによって下水管スクリーニング検査を省力化する手法の実現を目指し、下水管内の浮流端末からマンホール下のアクセスポイントへの映像データ転送プロトコルの開発、ならびに下水管内の無線LAN伝送特性の調査を進めてきた。本稿ではIEEE802.11nを用いた環境を想定して行った映像データ転送プロトコルの信頼性向上のための改良、ならびにφ250mm鉄筋コンクリート製下水管における2.4GHz帯無線LANの伝送特性測定結果について報告する。

1. はじめに

老朽化した下水管は亀裂等からの土砂、木根の侵入などによる詰まり、下水道機能の低下、道路陥没などを引き起こす。下水道管渠の腐食による陥没は年間4000件程度が発生している。こうした状況を踏まえて、国土交通省は2015年より、地方自治体などの下水道管理者に腐食の恐れがある場所に限って5年に一回以上の頻度での検査を義務づけた。下水から発生する硫化水素は腐食の主たる要因であるが、硫化水素は人体にとって危険であるため、検査にかかる管内作業にあたっては、ガス濃度の検査、換気が必須であり、作業に関する人的コストが大きい。筆者らは、浮流型のカメラ付き小型無線LAN端末（以下、浮流ノード）を下水管に流し、管内の撮影映像を何カ所かのマンホール下に一時的に配置したアクセスポイント（以下、AP）を経由して集めることにより、管内作業を省力化した下水管検査手法を提案している[1]。また、そのための映像撮影装置の開発[2]の他、映像データ転送プロトコルの開発[3][4]、下水管内の無線LAN伝送特性の調査[5][6]を行っている。

[3][4]で開発した映像伝送プロトコルは、適当な間隔を空けて流された複数の浮流ノードからそれぞれ異なる場所の映像をAPに送ることで、下水管内のAPと浮流ノード間の通信可能距離の短さに起因する伝送可能データサイズの不足問題を解決するものである。これらのプロトコルでは、各浮流ノードはAPからブロードキャストされる他のノードの通信状況、転送済の映像撮影箇所の情報、ならびに受信信号強度に基づいて、自身のAPへのデータ転

送の開始と送信する映像の撮影箇所を決定する。これらはRaspberry Pi上で実装されているが、研究室内の簡易的な模擬環境では正常に動作するものの、実際の下水道管内の環境では、頻繁に発生するパケットロスおよび短時間に大きく変化する受信信号強度に影響され、通信が長い時間途切れるという問題があった。そこで、同プロトコルの設計を見直し、再実装を行った。

これまでに行った塩ビ製の下水管（φ200mm）での2.4GHz、5GHz帯でのIEEE802.11無線LAN通信特性の測定の結果から、筆者らはφ200mm程度の小口径管では5GHz帯の無線LANがより長い通信可能距離が得られることを確認しており、その後に実験を進めた鉄筋コンクリート製の下水管における実験においても5GHz帯の無線LANを使用していた。しかしながら、5GHz帯で動作する組み込み用の低価格無線LANチップは2.4GHz帯の製品に比べて極めて数が少なく、5GHz帯の無線LANを用いたシステムを小型・低価格で実現することは容易ではない。そこで、2.4GHz帯無線LANを用いた場合の鉄筋コンクリート製下水管での伝送特性について調査した。これまでの調査により、5GHz帯では塩ビ製の管よりも鉄筋コンクリート製の方が通信可能距離が長くなることが確認できており、2.4GHzでも鉄筋コンクリート製管では通信距離を延長できることが見込まれる。

以下、第2章で本研究で想定する浮流型無線LAN端末を用いた省力化下水管検査システムの概要について説明し、第3章で映像伝送プロトコルの改良について説明する。第4章では鉄筋コンクリート製下水管における2.4GHzの無線LANの通信特性測定について述べ、第5章で本稿をまとめる。

¹ 静岡大学 Shizuoka University

2. 浮流型無線 LAN 端末を用いた省力化下水管検査システム

図1に浮流型無線 LAN 端末を用いた省力化下水管検査システムの全体像を示す。作業者は上流にあるマンホールから複数台の浮流ノードを投入する。各ノードはそれぞれ下水の流れに従って流下し、その間 LED の照明で管内を照らしながら管内部の映像を撮影する。何れかのマンホールの下に無線 LAN AP が設置されており、これらを経由して携帯電話網を介してインターネット上の映像回収サーバに映像データを集約する。集約された映像データは展開図に変換され、システムが正確な位置情報とともに異常箇所を自動的に特定する。下水管には小口径から大口径まで様々なものがあるが、本研究では敷設延長が最も長い口径 200~250mm の小口径管を主な対象とする。近年敷設された小口径の下水管の大部分は塩ビ製であり、200mm 径がよく用いられる。古いものは小口径でも鉄筋コンクリート製のものがあり、口径 250mm のものが一般的である。

3. 映像伝送プロトコルの改良

3.1 これまでの実装済プロトコル

先行研究 [3] では、複数の浮流ノードが送信する映像を分担することで最大無線通信可能距離が短い下水管内であっても、検査範囲全ての映像を AP に転送可能とするプロトコルを提案し、C 言語による実装を行っていた。このプロトコルでは、複数ノードが同時に同じ AP に送信する事を防ぐため、AP は、現在通信中の浮流ノード ID と、映像未回収区域の情報をビーコンパケットに乗せ、定期的にブロードキャストする。浮流ノードは、下水管内の映像を 2 秒毎に区切って保存し、要求範囲の映像を AP に転送する。パケットロス発生時の TCP 輻輳ウィンドウ縮小による送信レートの低下、ならびに再送タイムアウトまでの遅延を避けるため、この実装ではトランスポート層に TCP ではなく UDP を使用し、信頼性確保のための処理をアプリケーション内で独自実装していた。UDP データグラムのペイロード長は 7360byte とし、そのうち 2byte をシーケンス番号に割り当てている。浮流ノードは、送ったデータグラムのシーケンス番号に対応する確認応答 (ACK) を

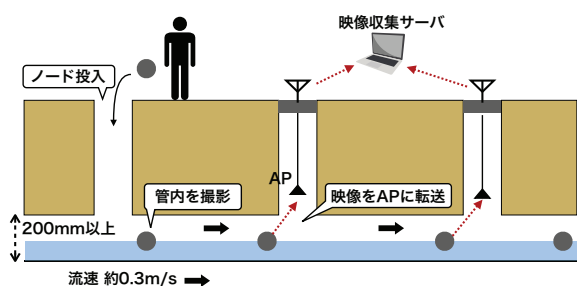


図1 浮流型無線 LAN 端末を用いた省力化下水管検査システム

再送タイムアウト時間 (RTO) 内に受信受信できない場合、同じデータグラムを再送信することで通信信頼性を確保する。送信成功時、浮流ノードは ACK 受信までに要した時間を元に TCP Reno と同様の手法で次の RTO を算出する。一方タイムアウト発生時は、RTO を 2 倍にし、最大 4 回まで再送する。

[3] の手法では、AP は 2 秒間映像を含むデータグラムを受信できなかった時、浮流ノードとの通信を切断し、次の浮流ノードからの映像転送を待つ。そのため、既に電波が届かない位置に移動した浮流ノードからの通信を無駄に待ち続けてしまうという問題があった。この問題に対処するため、[4] では AP がビーコンによって通知する情報に、通信中のノードの通信強度 (Received Signal Strength Indication: RSSI) を加えた。後続の浮流ノードはビーコンを受け取ると、通知された RSSI と自身が検知している AP からの信号の RSSI を比較する。後者の RSSI の方が大きい時、その浮流ノードは AP が他のノードと通信中であっても AP に通信開始を申し込む。その後 AP は、先行浮流ノードからの映像送信に一度でも欠落が生じた場合、すぐに後続ノードとの通信を開始する。これにより、映像送信ノードの切り替え時に生ずる通信断絶時間を短縮している。

3.2 映像転送プロトコルの改良

先行研究 [3][4] で用いたプロトコルでは、TCP Reno 実装と同様に RTO を送信毎に再計算していた。また、再送が起きるたびに RTO を倍にしていた。ところが、下水管内の通信では、同じ下水管を流れる数台の他の浮流ノードと AP 以外には競合する通信ノードは存在しないという、他の浮流ノードとは原則として並行してデータの送信を行わないように AP が通信開始のタイミングを調整している。TCP Reno の RTO 計算方法は、有線インターネットでの利用を想定し、主にルータでのキューイング遅延の変動に対応するように設計されたものである。本研究における下水管内の浮流ノード、AP 間の通信の条件ではこのようなキューイング遅延による変動はなく、遅延の変動範囲は推定可能である。従って、TCP Reno の RTO 計算方法を本研究での想定環境で使用することは適切ではない。

加えて、これまでの実装では、IEEE802.11n で導入されたフレームアグリゲーションの影響を十分に考慮していなかった。IEEE802.11n ではそれまでの IEEE802.11 規格 (11b, 11a, 11g) に対して、MIMO やチャネルボンディングによる物理的な伝送速度の向上に加え、フレームアグリゲーションおよびブロック ACK の導入を行っている。IEEE802.11 では、データ転送速度の向上にあたり、フレーム先頭部分、制御フレームに関しては伝送速度を変更しないことで下位互換性を維持しつつ、データ部分に関して変調方法を変更することで転送速度を可変とする設計を採用



図 2 簡易実験環境

している。従って、データ転送速度が大きくなると、相対的にフレーム単位のアクセス制御、プリアンプルの送信、ならびにフレーム単位の ACK の送信のオーバーヘッドが相対的に大きくなるという問題があった。フレームアグリゲーションを用いると、複数のフレームをひとまとめでして一度のアクセス制御の下で送信できる。これによって、上述したオーバーヘッド増大の影響を軽減できる。加えて、ブロック ACK ではまとめて送られたフレームそれぞれに対しての受信成否をまとめて通知する。これにより、受信されなかったフレームのみを再送できる。

本改良では、IEEE802.11 でのフレームアグリゲーションを用いて MAC 層において従来の IEEE802.11 のフレームがまとめて送信されること、ならびにブロック ACK 基づく再送が行われることを想定し、固定の再送タイムアウトをアプリケーション層で与えることとした。通信状況の悪化により、IEEE802.11n の MAC での再送上限に達することが連続し、アプリケーション層でのタイムアウトが連続する場合、アプリケーションでのタイムアウトを倍増することはせず、AP との通信を諦めることにする。下水管内の浮流ノードにおける連続した再送失敗はノードが AP から離れていることによることが主原因と考えられるので、再送タイムアウトをより長く設定しても通信が成功する見込みは低い。従って、本研究で想定するシナリオにおいてはこのような戦略が有効と考えられる。また、無線リンクの伝送レートが既知の場合、この方針によってパケット送信開始から再送放棄までの時間が推定可能となる。この時間を用いると、受信側、つまり AP 側は浮流ノードから前回のデータ受信時刻とこの時間の和から、通信が不可能になったことを判定するタイミングを決定できる。この結果、AP は通信不能になった浮流ノードとの通信を速やかに諦め、新たに AP に近づく後続の浮流ノードとの通信に備えることが可能となる。

改良したプロトコルは実験室環境ではパケットロスが発生しても良好に動作することが確認できている。また、図 2 に示すように模型鉄道、電波暗箱、ならびに電波遮断布

により移動に伴う信号強度の変動、通信遮断を模した環境を用いて、詳細な試験を進めている。

先行研究では、TCP の輻輳制御の影響を避けるためにトランスポート層に TCP を使用しなかったが、Linux では TCP 通信の輻輳制御に関するパラメータを変更することができる。今後、新たにトランスポート層に TCP を用いる映像転送プロトコルを実装し、UDP を用いた時と各種 TCP パラメータを調整した時のスループットを比較することにしている。

4. 2.4GHz 無線 LAN の鉄筋コンクリート管内通信特性の測定

大学構内の土中に、延長 14m、 $\phi 250\text{mm}$ の鉄筋コンクリート製下水管（ヒューム管）を管底が地中 450mm になるように埋設し、管内に配置した 2 台のノード間での RSSI とスループットの測定を行った。この実験設備には、実験を容易に行えるようにするために複数の開口部があり、1-8m で 1m 間隔で端末間距離を変更した測定を行うことができる。また、管の開口部に蓋と土嚢を被せることにより地中と同等の環境を模擬的に再現できるように設計されている。

測定には、小型 Linux コンピュータの Raspberry Pi Model B に IEEE 802.11n 規格に対応した無線通信 USB ドングル GW-450D（Planex 社製）を USB 延長ケーブル越しに接続し、無線通信端末として使用した。また、給電のために、Raspberry Pi と同程度の大きさのバッテリーを使用した。実験では、この無線通信端末を 2 セット用意し、実験管断面を中心に各ドングルの先端が向かい合うように配置した。Linux の無線制御コマンド `iwconfig` を用いて 16 秒間隔で RSSI を測定し、10 回分の平均を求め、測定値とした。また、スループットの測定には、Linux のネットワーク測定コマンドである `iperf` を用いて 10 秒間 UDP により通信し、10 回分のスループットの平均を求め、測定値とした。また通信の際には、変調方式と符号化率の組み合わせ（MCS）に関して、RSSI の測定時には MCS7、スループットの測定には MCS4 と MCS7 を用いた。

図 3 に 2.4GHz と 5GHz での IEEE802.11n 通信時の RSSI 測定結果を示す。端末間距離が 1-5m の時は、2.4GHz の方が RSSI は高くなる結果となった。一方、距離が 5m を超えると、5GHz の場合の方が RSSI は大きいという結果になった。図 4 にスループットの測定結果を示す。2.4GHz の場合、MCS7 使用時には距離が 5m 以下では 40Mbps 以上のスループットが得られているが、5m を超えるとスループットが急落している。また、MCS4 使用時には距離 6m まで 25Mbps 以上のスループットを維持しているが、これ以上の距離ではスループットは急落している。長島ら [7] の測定では $\phi 200\text{mm}$ の塩ビ管では 2.4GHz の IEEE802.11g の各送信レートにおいて最大 3m までしか通信が確認できな

かったが、これと較べると通信可能距離は約2倍となっている。これにより AP との遭遇時に 12m の範囲での通信可能となる。これまでの実験で得た浮流ノードの流下速度(約 0.3m/s) に照らすと、約 40 秒間の通信が可能となることがわかる。一方、5GHz 帯の場合、いずれの MCS を使用しても、距離 8m のときでも距離 1m のときと較べてスループットが落ち込むことはなかった。

小径の下水管内の通信は、アンテナ間の第 1 フレネルゾーンによって通信可能距離が左右される。第 1 フレネルゾーンはアンテナ間を両端とする回転楕円状の領域で、この中心部の半径 r_1 は、 $r_1 = \sqrt{\lambda d}/2$ である。ここで、 λ は波長、 d はアンテナ間距離である。 r_1 の 60%以上が遮断されていなければ、受信信号強度は自由空間の電波伝搬とほぼ等しくなる。 $\phi 200\text{mm}$ 塩ビ管の場合に対して $\phi 250\text{mm}$ 鉄筋コンクリート管で 2.4GHz 帯の無線 LAN での通信可能距離が大きく伸びたのは、管径が $5/4$ になったことで r_1 が同じになるアンテナ間距離 d が $(5/4)^2 = 1.5625$ 倍になったことに加え、管壁内部の鉄筋による反射が影響していると考えられる。5GHz の場合は、 λ が小さいことにより、アンテナ間距離が 8m 未満の場合、 $\phi 250\text{mm}$ の条件で

はフレネルゾーンによる遮断の影響がほとんどなかったと考える。

5. おわりに

複数のカメラ付き小型無線 LAN 浮流端末を用いた省力化下水管検査システムの実現のための映像伝送プロトコルの改良、 $\phi 250\text{mm}$ 鉄筋コンクリート製下水管における 2.4GHz 帯 IEEE802.11 無線 LAN の伝送特性測定について述べた。改良したプロトコルは実験室環境ではパケットロスが発生しても良好に動作することが確認できている。2.4GHz 無線 LAN の鉄筋コンクリート製下水管内の通信特性は、5GHz 帯無線 LAN と同様に塩ビ製の管の場合よりもより長い通信距離(約 5m)を確保できることが確認できた。これまでの実験では、学内設置の実験管に配置可能という条件から小さな筐体のものが求められ、下水管内に配置するアクセスポイントは浮流ノードと同様に Raspberry Pi としていた。しかしながら、実際の下水管のマンホールにはより広い空間があるので、より大きな筐体のアクセスポイントも配置可能である。今後複数アンテナを備えたアクセスポイントの使用による通信品質改善、ならびに実環境での開発プロトコルの実証を進めていく予定である。

謝辞 本研究は総務省戦略的情報通信開発推進事業(SCOPE)の助成によるものである。

参考文献

- [1] 石原進, 武居悠樹, 劉志, 前田拓磨, 澤野弘明: 下水管路検査用浮流型無線ネットワークカメラシステムの実現技術, 情報処理学会研究報告, 分散システムとマルチメディア通信研究会, vol.2017-DPS-172, No.4, pp.1-8 (2017).
- [2] 清水竣太, 佐野裕哉, 澤野弘明, 石原進: 浮流型ネットワークカメラによる下水管スクリーニング検査~撮影機体の設計とびり割れ検出手法の提案~, 映像表現・芸術科学フォーラム (2019).
- [3] 田中悠大, 武居悠樹, 石原進: 複数の浮流無線ノード協調による下水管内撮影データ回収手法の設計と実装, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J100B, No.12, pp.1004-1013 (2017).
- [4] 西島達哉, 武居悠樹, 劉志, 石原進: 複数ノード協調型下水管内映像収集プロトコルの信頼性向上手法, 2018 年電子情報通信学会総合大会, B-18-20, p.364 (2018).
- [5] Y. Takei, Z. Liu, S. Ishihara: Effect of channel bonding and parallel data transmission with IEEE802.11n wireless LAN in a small sewer pipe, Proc. The 32nd International Conference on Information Networking (ICOIN 2018), pp.223-228. (2018).
- [6] 島田彩加, 川合健斗, 武居悠樹, 石原進: 鉄筋コンクリート製小径下水管内の 5GHz 浮流無線 LAN 端末の通信性能調査, 情報処理学会 モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム研究会, Vol.2018-MBL-89, No.4, pp.1-5 (2018).
- [7] T. Nagashima, Y. Tanaka, and S. Ishihara: Measurement of WLAN in sewer pipes for sewer inspection systems using drifting wireless sensor nodes, IEICE Trans. on Communications, Vol.E99-B, No.9, pp.1989-1997 (2016).

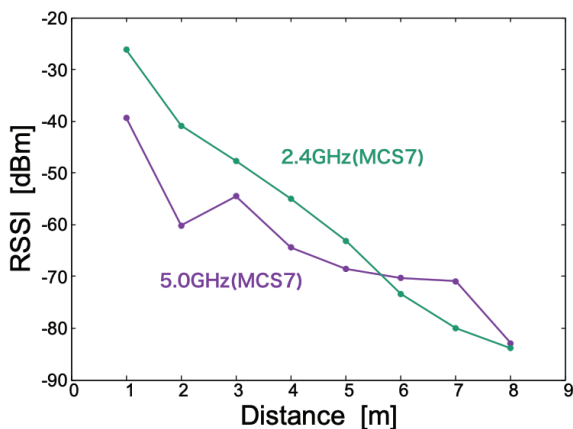


図 3 $\phi 250\text{mm}$ 鉄筋コンクリート製下水管内での無線 LAN 受信信号強度

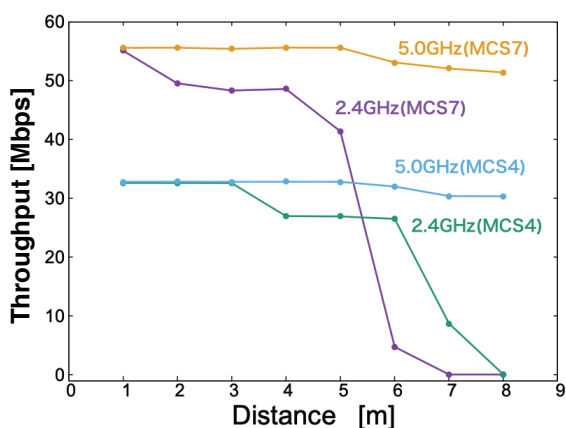


図 4 $\phi 250\text{mm}$ 鉄筋コンクリート製下水管内での IEEE802.11n 無線 LAN スループット