

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

石原 進¹ 武居 悠樹² 劉 志¹ 前田 拓磨³ 澤野 弘明⁴

概要：筆者らは下水管路のスクリーニング検査を安全、安価、短時間で実現するための手法として、無線通信可能な浮流型のカメラ・センサノードを複数個下水管に流し、マンホールに備え付けたアクセスポイントで映像を回収するシステムを提案し、その実現技術について検討を進めている。本発表では、本取り組みで行った狭下水管路での IEEE802.11n 無線 LAN での無線通信特性測定、複数カメラ・センサノードによる協調型のデータ収集方式の開発、撮影系の設計に関して報告する。

1. はじめに

我が国の都市インフラは高度経済成長期以降に大規模な整備が進んだが、今日ではその多くが老朽化し、それらの維持管理コストが国、地方自治体の大きな財政負担としてのしかかっている。なかでも下水管は総延長が 46 万 km に達しており、これらのうち約 1/5 が敷設から 30 年以上を経過している [1]。コンクリート下水管路は敷設後 30 年以上が経過すると、管材の腐食の進行、クラックの発生が起き、陥没をはじめとする不具合が発生しやすくなる。近年では、下水管の老朽化を原因とする道路陥没事故が全国で毎年約 4000 件発生している。このため、下水管の定期的検査と必要に応じた早期の改修が必要であるが、年間の検査延長は全国の下水管延長の約 1% にすぎないのが現状である。この原因として、既存の下水管の検査手法のコストが高いこと、検査に長い時間を要することが挙げられる。また、平成 27 年 11 月 下水道法の一部が改正・施行され、管渠のうち、腐食のおそれのある箇所について 5 年に 1 回以上の頻度で点検することが義務付けられている。従って、点検作業をより効率良く行う必要がある。

こうした背景の下、国土交通省では B-Dash プロジェクト等で短時間で、人的・金銭的成本が少ない下水管調査方法の開発を推進している。従来型の下水道検査では、目視、ファイバースコープを用いた検査方法の他、有線のカメラ付きロボットを用いる方法が利用されている。これらの方法は、下水道内での人間による作業のためのガス濃度

検査や、下水道内の洗浄、ロボット等の搬入作業が必要であり、長い作業時間を要した。これらに対し、管口カメラや通信機能を持たないボート型カメラ、全方向撮影型カメラを搭載した有線ロボットなどを用いたスクリーニング検査方法が提案され、実用が進められている [2]。スクリーニング検査とは障害箇所の発見・詳細検査の必要性判断の簡易検査であり、短時間、低コストで行うことが求められる。

管口カメラは棒の先に直進性の高い光源とカメラを取り付けた装置で、マンホール入り口から作業者が管内に入ることなく、下水管内の映像を撮影可能である。通信機能を持たないボート型カメラ [3] は、照明装置と小型ビデオカメラをボートに乗せた装置で、水流でボートを上流のマンホール下から下流のマンホール下まで移動させて映像を記録することができる。撮影した映像は下流から装置を物理的に取り出してから確認できる。この方法は必要な装置が安価であり、下水管内での作業も少ないので、時間的、人的、金銭的成本に関して優れた方法である。全方向撮影型カメラを搭載した有線ロボットは、従来型の詳細検査を目的とした可動型カメラとは異なり可動部をもたず、レンズ部の工夫により全方向の映像撮影を可能としたカメラを搭載したロボットである。下水管路を止まることなく移動し続けながら撮影し、スクリーニング検査に必要な品質の映像を記録できる。

筆者らは、前述の通信機能を持たないボート型カメラを用いた検査方法を発展させ、電波による無線通信が可能なセンサ・カメラノードを下水管内に流し、何方所かのマンホールに一時的に設置したアクセスポイントで映像を無線通信経路で回収することで、観測区間の終端まで装置を取り出すことなく映像およびセンサデータを確認しながら検

¹ 静岡大学学術院工学領域

² 静岡大学大学院総合科学技術研究科

³ 愛知工業大学大学院工学研究科

⁴ 愛知工業大学情報科学部

査を可能とする手法（以下、浮流型無線ネットワークカメラシステム）を提案している [4]。下水管にアクセスするためのマンホールは道路下にあることが多いので、検査のためにマンホールの蓋を開けたままにすることは道路交通を阻害する上、蓋が空けたマンホールを監視するための人員も要するので、できるだけマンホールの蓋を空けずに作業を実施できることが望ましい。この提案手法では、マンホール内の作業は、観測区間終端の装置取り出し時だけであり、その他の箇所での作業はアクセスポイントの一時的設置とカメラ・センサノード（以下、観測ノード）の投入に限られる。このため、マンホールの蓋を開けたままにするべき箇所は限られる。観測中の映像の確認に関しては、筆者らによる現場の作業員へのヒアリングによって高い需要があることを確認している。

浮流型無線ネットワークカメラシステムを実現するために、筆者らはこれまでに直径 200mm 程度の幹線下水管を対象に、下水管内の無線データ通信の特性調査、浮流ノードにおける撮影系の開発を進めてきた [5]。狭い下水管内では室内や屋外等の一般的な環境に較べて無線 LAN での通信可能距離は短くなる。このため、アクセスポイントとの通信可能な時間が短くなるため、これによるデータ送信可能量の制限を克服する工夫、ならびに無線通信特性の理解が必要である。また、下水管内を浮流する小型観測ノードで実用に耐えるビデオ撮影が出来ることが求められる。[5] で、筆者らはそれまでの活動をとりまとめ、実験用下水管における IEEE802.11a/g, ならびに IEEE801.15.4, 920MHz 帯で動作する ARIB STD T-108 規格の無線通信インタフェースを用いた無線通信性能の調査、ノードによる管内ビデオ撮影と協調型のデータ転送戦略、撮影系の試作、回転に対する映像補正方法について紹介した。本稿は、その後の本プロジェクトでの活動をとりまとめ、IEEE802.11n のチャンネルボンディング機能、複数無線インタフェースを用いた並列送信による無線データ転送速度の向上の試みと、大型実験用下水管を用いた実験、協調型ビデオデータ転送の実装、改良型の撮影系の設計について紹介するものである。

以下、まず 2 章で下水管検査のための浮流型無線ネットワークカメラシステムについてその概要を説明する。3 章で IEEE802.11n 無線 LAN を用いた下水管管路内の無線通信容量の拡大を意図した性能調査について述べ、4 章でビデオ映像を撮影する複数のセンサ・カメラノードからアクセスポイントへの協調型データ転送システムの設計と実装について述べる。5 章では撮影系の改良について説明する。最後に 6 章で本論文のまとめと今後の展望について述べる。

2. 浮流型無線ネットワークカメラシステム

2.1 システムの概要

図 1 に本プロジェクトで目指す下水管検査のための浮流

型無線ネットワークセンサ・カメラシステムの概要を示す。

本システムでは、野球ボール程度の大きさの小型・軽量の浮流型観測装置（以下観測ノード）を一つないしは複数、マンホール上部から投入し、最終的な観測ノード回収地点（マンホール下）で回収するまでの間に、途中の幾つかのマンホールに一時的に配置されたアクセスポイントを経由して映像を回収するほか観測ノードの位置モニタリングを行う。これによって、1 回の機器投入で長区間の観測を可能とし、作業者がマンホール内に入る頻度を少なくすることが期待できる。映像に関しては、観測が滞りなくできた場合、最終回収地点で取り出した観測ノード上に蓄積したデータを読み取ることも可能であるが、途中のアクセスポイントを経由したデータ収集によって、観測ノードの最終回収地点に到達する前に映像確認を可能とする。これによって、撮影の進捗状況確認が行え、異常発見時に迅速にピンポイントでの詳細調査に移れるほか、確実に撮影が行われていることを確認することによって、上流部のマンホール開口部の片付けを開始できるので、作業全体の時間短縮に貢献する。またトラブルによって観測ノードの移動が滞ったときにも、データの回収が行える。なお、本研究では、分流型（雨水と汚水を分離して回収する）の下水管システムにおける本管として多く利用される直径 200mm の塩ビ管、並びに直径 250mm のヒューム管（コンクリート管）を主な対象とする。これは、検査対象としてこれらのサイズの下水管が多く存在するからである。

このようなシステムの実現に当たっては、少なくとも以下のような技術開発が必要である。

- 撮影データの無線通信による確実な回収
 - 観測ノードの下水管内位置の特定
 - 小型観測ノードによるスクリーニング検査に耐える品質の映像撮影技術およびその加工技術
 - 下水管内を滞りなく浮流可能な観測ノード筐体の設計
- 以下、上記項目についてその要点について説明する。

2.2 撮影データの無線通信による確実な回収

撮影データをできるだけ、少ない無線アクセスポイントで確実に回収するための技術が必要である。直径 200mm, 250mm の下水管のサイズは、一般的な無線 LAN で使用される 2.4GHz, 5GHz の波長に対して短いため、無線通信可能距離は、地上での通信に較べて大幅に制限される。また、観測ノードは下水道の流速 1~2m/s（この値は下水道の設計上、この程度に決められている）で移動するため、通信可能な時間はアクセスポイント近辺に滞在している時間に限られる。このような条件の下、アクセスポイント間で撮影されたカメラ映像を伝送するためには、通信可能な距離、達成可能な伝送速度、エラー発生率を把握したうえで、アクセスポイント間での撮影データサイズに応じたデータ伝送戦略を得る必要がある。具体的には、無線通信デバ

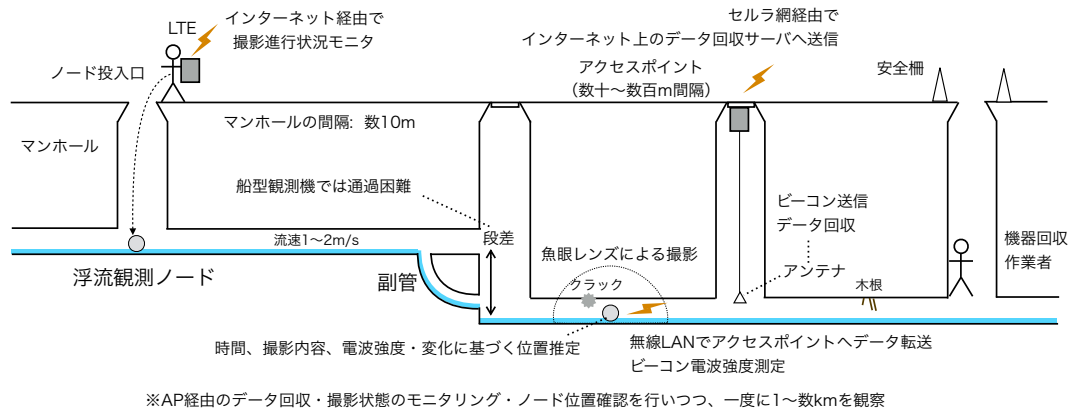


図 1 下水管検査のための浮流型無線ネットワークセンサ・カメラシステム

スで使用するアンテナ配置，変調方式，観測ノードとアクセスポイント間でのデータ転送プロトコルの開発が必要である。

筆者らのこれまでの研究により，静止時には直径 200mm の下水管では 5GHz の IEEE802.11a を使用することで最大 8m の距離において実用速度でデータ転送が可能である一方，2.4GHz，920MHz 帯では高さ 3m しか通信ができないことが分かっている [6][5]。自由空間では周波数が低いほど距離に対する減衰は小さくなり，長距離伝送が可能であるが，下水管のように狭いトンネル状の空間では，送受信アンテナ間の第 1 フレネルゾーンを障害しないような見通しの確保が必要であり，周波数が高い方が見通しを得るのは容易となる。このため，下水管内では，より周波数が高い 5GHz 帯を使用する IEEE802.11a の方がより長い通信可能距離が得られる。

しかしながら，より新しい無線 LAN の規格，IEEE802.11n や 11ac におけるチャンネルボンディング使用時，複数チャンネル，インタフェースの同時使用を含めた大容量化の効果検証，ならびに下水流速での移動，アンテナの回転移動を伴う環境での性能評価はこれまで行われておらず，下水道内での実環境での性能推定，並びにそれに適応した通信方式の選定やアンテナ配置の決定に関しては，詳細な実験が必要だった。

2.3 浮流ノードの下水管内位置の特定

回収した映像から下水管内の障害箇所を特定するためには，映像が管内のどこで撮影されたが正確に分かることが求められる。下水管内の水流速度が常に同じであり，かつ観測ノードがその速度で流れるのであれば，観測ノード投入からの経過時間で位置を推定可能と考えられるが，下水管路に流れ込む水量により水流速度は変化するので，時間のみで位置を正確に推定することは困難である。そこで，映像によって知りうる管内の光景の変化（マンホールの通過，塩ビ管・ヒューム管の継ぎ手の通過），アクセスポイン

トから発せられるビーコン信号強度なども用いて複合的手段によって下水管内の観測ノードの位置を推定できるようにすべきである。これまでの測定によってごく限られた条件下で下水管内末端の位置と受信電波強度の関係を得ているが，アクセスポイントの位置・高さと同観測ノード側での受信電波強度の関係，移動時の電波強度の変化，移動中の測定地変化に基づく末端位置の関係導出ならびに位置推定手法の開発は行われていない。

2.4 小型浮流ノードによるスクリーニング検査に耐える品質の映像撮影技術およびその加工技術

観測ノードを扱いやすい球体で設計すると，その筐体は回転しながら管内を浮流することになる。外部光源が入らない下水管内で，移動，回転しつつ検査に耐える品質の映像を撮影し続けるためには，十分な光源確保と撮影条件の設定，移動・回転によって生じる映像のブレ補正技術が必要不可欠である。

2.5 下水管内を滞りなく浮流可能な浮流ノード筐体の設計

アンテナ，カメラ，バッテリー，照明装置をその機能を損なうことなく搭載し，故障，停滞なく観測区間を移動しきることができる筐体の設計が必要である。

3. IEEE802.11n を用いた下水管路内の無線通信性能評価

IEEE802.11n で導入されたチャンネルボンディング，ならびに複数のインタフェースを同時に使用した並列データ送信によって観測ノードとアクセスポイント間のデータ転送量の拡大の可能性を調べるため，実験用下水管で実験を行い，1m ごとの各地点でのスループットを測定した。IEEE802.11n では MIMO による複数アンテナを用いたマルチストリーム通信が可能であるが，観測ノードに搭載可能な複数アンテナを搭載した適当な MIMO 対応端末を入手できていないため，MIMO ではなく複数の独立したイ



図 2 実験用下水管の概観

ンタフェースを用いた並列送信に関してその効果を調査した。また、下水管内での電波強度に基づいた観測ノードの位置推定の可能性を調べるため、10cm 単位での受信電波強度の測定を行った [7]。

3.1 測定環境と機材

図 2 に 2017 年 6 月に静岡大学浜松キャンパスに設置した延長 24m の実験用下水管の外観写真を示す。また図 3 にこの設備の構造を示す。当初、筆者らは大学内の直径 200mm の下水管の最も設置間隔が短いマンホール間で IEEE802.11 無線 LAN を使用するスマートフォンを用いて予備実験を行ったが、この時は全くデータ通信をすることができなかった。この後、市内の畑および静岡大学の農場内に 4m~8m の実験用下水管を埋設し、基礎的な実験を進めた結果、より規模の大きな施設が必要になったため、このような規模尾大きな実験設備を用意するに至った。

この設備では、管路に傾斜は設けていないが、ポンプを使って水を循環させることによって、実際の下水管内と同様の水流を発生できるようにしてある。管の両端に深さ 1m 程度のますが設置されており、下流側のますにポンプを入れてホースを介して上流のます側に水を送ることで、水流を発生させる仕組みである。管路の中央部には 1m 毎に縦穴が設けられており、この穴を通して任意の場所に測定器を配置できるようにしてある。測定の際には、全ての縦穴に蓋をし、さらにその上に土のうを置いて、縦穴からの電波の漏れがないようにしている。縦穴の真下以外の場所での測定に当たっては、10cm 毎に印をつけた紐に端末をつなげ、印を見ながら紐を引っ張ることで、任意の場所に端末を配置している。なお、現在はまだ導入していないが、今後移動中の端末位置を正確に測定できるようにレーザ測位機センサを用いる予定である。

図 4 に測定に用いた装置を示す。小型 Linux マシン Raspberry Pi を制御用に使用し、これに延長用の USB ケーブルを介して、USB ドングル型の IEEE802.11n 無線 LAN 端末 (Planex 社製 Gw-40D) を接続している。延長ケーブルを用いるのはアンテナ位置の調整を容易にするためである。無線 LAN 端末はプラスチック製のメッシュを張ったラックを使い、管断面上の任意の位置に配置できるようにした。複数インタフェースを用いた並列通信の実験

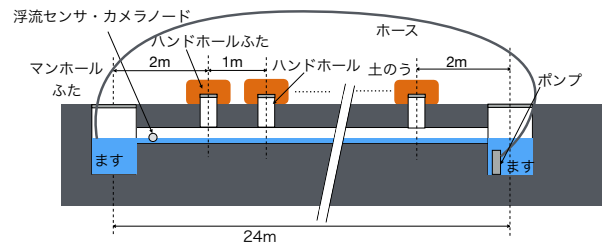


図 3 実験用下水管の構造



図 4 無線通信特性測定用機材

では、これら端末を管断面の半分の高さの位置に 12cm 離して、すなわち、それぞれ管の中心から 6cm の位置に配置した。単一インタフェースを用いた場合は断面中央部に端末を配置した。実験では、5GHz 帯の無線 LAN 用の周波数帯のうち W52 帯 (5.17GHz~5.22GHz) を使用した。この中で、チャンネルボンディングを使用しない単一端末の通信では Ch.36 (中心周波数 5.18GHz)、チャンネルボンディングを使用する場合にはこれに加えて Ch.40 (同 5.20GHz) を使用した。また、複数インタフェースを用いる場合は、チャンネル間での干渉を最小限にするために、W52 帯で最もチャンネル間の周波数が大きくなる組み合わせ、Ch.36 と Ch.48 (同 5.24GHz) を使用した。スループットの計測に当たっては、TCP/IP ネットワーク用の帯域測定ツール iperf[8] を使用した。

3.2 測定結果

ここでは、図 2 で最近行った測定結果の一例を紹介する。以下に示す測定結果は、図 2 の実験用下水管の中に水を入れずに測定して得られたものである。IEEE802.11n でのチャンネルボンディングと複数インタフェースを使った並列データ送信実験の結果を図 5 に示す。IEEE802.11 無線 LAN での空間ストリーム数、変調方式、符号化レートの組み合わせを示す MCS インデックスを 7 とした。この MCS インデックス値は単 1 ストリームでの最大データレートを達成する設定である。ガードインターバルは 800ns とした。この時ストリーム数は 1、変調方式は 64QAM で、チャンネルボンディングを使用しない場合のデータレートは 65Mbps、チャンネルボンディングによって合わせて 40MHz 幅のチャンネルを用いる場合のデータレートは 135Mbps である。

チャンネルボンディングを使用した場合、端末間距離が 5m 未満でスループットがチャンネルボンディングを使用し

ない場合に較べて 20%程高いスループットが得られているが、チャンネル周波数の倍増に対して十分なスループット向上効果は得られていない。また距離が 5m 以上になると、スループットはチャンネルボンディングを使用しない場合に較べて小さくなってしまった。これは、チャンネルボンディングにより 40MHz 幅のチャンネルを用いる場合、OFDM のサブキャリアあたりの送信電力がチャンネル帯域幅 20MHz 幅の場合の半分にされるためである。このため、端末間距離が遠くなると SINR が悪化してエラー率が多くなり、スループットが低下する。

複数インタフェースを用いて並列データ転送を行った場合のスループットは単一インタフェースの場合よりも悪化した。これには複数の理由が考えられる。一つは、複数のインタフェースを管の同じ断面上に配置したため、アンテナから管壁までの距離が短くなった結果、アンテナ間のフレネルゾーンが管壁および土によって塞がれやすくなったことである。この影響は、アンテナの配置を管の延長方向に沿うように変えた場合にスループットが若干向上することによって確認できた。もう一つは並行して通信する端末管の距離が近いために、相互の伝播干渉が起り、互いの MAC 制御によって一方のインタフェースしか送信できなくなったことである。複数のアンテナを用いる場合であっても MIMO の場合は複数のアンテナから送信されるストリームは同期されているため、一方の送信によって他方の送信が延期されることはない。一方、本実験では各端末が独立して動作するうえ、アンテナ管の距離が近いためにチャンネルは別であってもチャンネル帯域幅以外の漏れ成分によってキャリア検出が生じ、一方の端末のみが送信を行う結果となったと考える。

10cm 単位で測定した下水管内での 5GHz 帯での通信時の受信電波強度の測定結果を図 6 に示す。筆者らが以前に実施した FDTD 法による電波伝播シミュレーションの結果からは [6]、受信電波強度はわずかな端末の位置の違いにより大きく変動し、局所的な受信電波強度の落ち込みが存在することが予想された。異なる 3 日で実施した測定の結果は、この予想に準ずるものとなった。図 6 に示した実測結果を見ると、位置の違い 10cm に対して、受信強度の差は大きくて 10dBm 程度である。ただし、Day 1 での距離 0.5m 以下のケースでは、2 点で 17dBm と 20dBm の差が生じている。また同じ距離であっても測定試行ごとの差が大きく、概ね 10dBm 程度であり、最も大きい場合では、19dBm の差があった。同じ受信電波強度での距離の分布は -75dBm 程度で最も広く、3m 程度になっており、受信電波強度の測定値から端末間の距離を推測する場合、単純な方法では 3m 程度の誤差が生ずることが分かる。また、3 日間の測定のうち、Day 1 では、Day 2, 3 と較べると受信電波強度が大きく、環境の違いによる影響が疑われた。ひとつの要因として考えられるのは、土壌水分量の違いであ

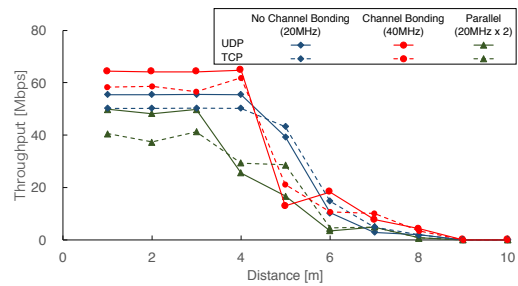


図 5 直径 200mm の下水管内での 5GHz 帯でのチャンネルボンディングと複数インタフェースでの並列送信の効果

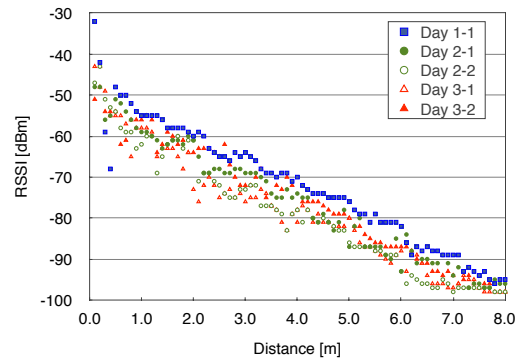


図 6 直径 200mm の下水管内での 5GHz 帯通信時の受信電波強度

るが、図 6 で示した 3 日間の測定での管路脇の土壌水分量は全域にわたってほぼ 50%であり、有意な差は見いだせなかった。また、気温、湿度についても有意な相関は見いだせなかった。

以上の結果より、受信電波強度から端末間の距離、実際にはアクセスポイントに対する端末の相対的位置を推定するにあたっては、わずかな位置の違いによる受信信号強度の変動を考慮して、アクセスポイント側に複数のアンテナを用いて複数アンテナでの受信強度から位置を推定することが有効と考えられる。アクセスポイント側は観測ノードに較べて装置の大きさに関する制限は少ないため、これは比較的实现が容易だと考える。送信側のアンテナに関しては、複数のアンテナを配置することによって、送受信間の見通しを得づらくなること、物理的サイズを小さくする必要があることから、単一にすることが適当であると考えられる。また、チャンネルボンディングの使用に関しては、効果が限定的であることから、用いないのがよいと判断した。

4. 複数ノードの協調による分割映像伝送

4.1 複数ノード協調の必要性

アクセスポイント間の距離が長いと、観測ノードとアクセスポイント間の限られた通信可能時間の中に、観測ノードがアクセスポイント間での移動中で撮影したビデオデータを全てアクセスポイントに送りきることができなくなってしまうため、何らかの方法で短い通信可能時間による制限の影響を軽減する必要がある。筆者らは [5] で二つの戦

略を示している。一つめの方法は複数の観測ノードを用いて、それらのマルチホップ通信によって常時全ての端末がアクセスポイントと通信可能とする方法である。しかしながら常時全ノードがアクセスポイントと通信可能とするためには、端末数を非常に多くする必要がある。例えば、アクセスポイント間の距離が100mだとすると、少なくとも10台のノードが必要になってしまう。もう一つの方法は複数の観測ノードを用い、アクセスポイント接続時にそれぞれアクセスポイント間の区間の異なる場所のビデオデータを送信するようにする方法である。この方法はビデオの回収時間の遅れは生じるものの、観測ノード数は少なく済むためより実現は容易である。そこで、本方式に基づいてプロトコルの具体的設計と実装を行った [9]。

4.2 プロトコルの設計と実装

図7にプロトコルの動作概要を示す。複数の観測ノードは適当な間隔を空けて下水管内に投入され、それぞれ下水管内のビデオ撮影、センシングを行う。アクセスポイントは定期的にビーコンパケットをブロードキャストし、観測ノードはそれを検出することで、自身のデータ送信の開始タイミングと送るべきデータの選択をする。ビーコンパケットにはアクセスポイントおよび現在そのアクセスポイントにデータ送信中の観測ノードの識別子、さらにアクセスポイント及びバックエンドのデータ収集サーバで回収済みの映像データの下水管内の区間情報が格納されている。これに基づき、各観測ノードは他のノードがデータ送信中はデータの送信を控えることで、隠れ端末問題による通信性能悪化を避ける。また、すでに映像データ回収済みの区間の情報に基づいて、映像未回収区間のみのデータを送信する。ただし、未回収区間との接続部に関しては一部重複したデータを送り、接続部におけるデータの欠落を避ける。

観測ノードおよびアクセスポイント用のプロトコルをRaspberry Pi3で動作するLinux OS (Raspbian) 上でC言語で実装した。Raspberry Pi3には、Raspberry Pi用のカメラを接続し、ビデオ撮影とビデオデータの分割保存、データ転送を可能とした。また、複数のアクセスポイントによって受信された映像データを一点で回収するためのバックエンドサーバも実装した。なお、観測ノードがアクセスポイントと通信できる短い期間で可能な限り高いトランスポート層データ送信レートを確保することと、無線LAN上でのパケットロスにおける送信遅れの発生の防止、接続終了状態の速やかな検出を行う観点から、トランスポート層のプロトコルにはTCPではなくUDPを使用し、データの再送、レート制御、接続不能状態の検出に関して独自の実装を行った。

アクセスポイント用に1台、観測ノード用の2台のRaspberry Pi3を使用し、実験用下水管を用いた動作実験を行った。できるだけ短い区間での観測ノードとアクセスポイン

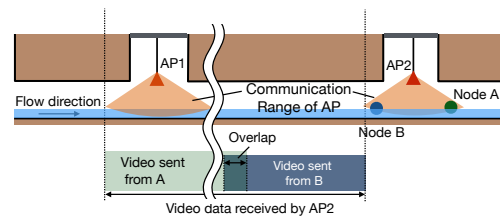


図7 複数ノード協調によるアクセスポイントへの映像データ送信

ト間の接続断を発生させてプロトコル動作を確認するために、より通信可能距離が長い5GHz帯ではなく、2.4GHz帯を用いて無線通信をするようにした。この結果、先行して流れる観測ノードがアクセスポイントを検出して撮影済映像データを送信し、このノードのアクセスポイントとの接続が失われた後に後続ノードが未回収区間の映像データを転送することを確認できた。

5. 浮流型観測ノードによる映像撮影

5.1 従来の浮流型観測ノード [5]

老朽化した下水管路内における、傷やひび割れが生じる位置は、下水管路の高さ中央より上部に存在することが下水道局の取材により確認されている。これまでに筆者らは、下水管路内を浮流し、かつ傷やひび割れが存在する可能性が高い上方向を、全方位カメラで撮影し続ける浮流型観測ノードについて検討してきた [5][10]。これまでに設計したノードは二重カプセル構造により、移動時の外側カプセルの回転が内側のカプセル内に配置されたカメラの撮影方向に影響を与えにくいようにしていた。資格品では、LED照明 (パナソニック社製 EA758ZA-2.5B (10lm 以下)) を用いていたが、撮影映像中の管の障害を視認できるほどの映像品質が得られなかった。加えて、ポリ塩化ビニル製のカプセルの透明度が低いという問題もあった。下水処理場協力の下、図8に示す実験環境を用意し、従来ノードの試作品を下水管内に放流したところ、水深3cmの環境では、撮影機体の重量 (約850g) が浮力に対して大きいため、試作品が浮流できなかった。

さて、浮流型観測ノードで撮影された映像は、浮流移動中に内部で回転移動が生じる。これまでに全方位カメラで撮影された映像に対して、輝度ヒストグラムの変化に基づいた回転補正方法を提案してきた [5]。しかし、撮影映像のコントラストが低い場合、回転補正の精度が低いことが予想される。また、従来ノードでは通信機能を持つ全方位カメラ*1を採用しているが、特定のPCもしくはスマートフォンを必要とする。将来的にはマンホールごとのアクセスポイントで接続を可能にするために、拡張性を持つデバイスを採用する必要がある。

*1 コダック社製 PIXPRO SP360



(a) 実験環境 (b) 管内に流した試作ノード
図 8 下水処理場における実験

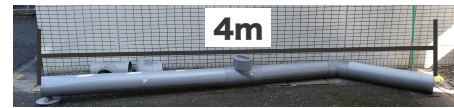
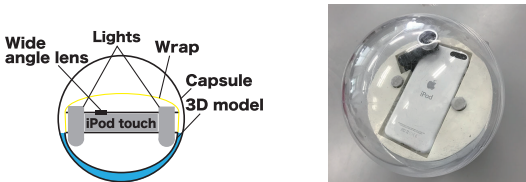


図 10 ビデオ撮影実験環境



(a) 構造図 (b) 試作品の概観
図 9 iPod touch を利用した観測ノード

表 1 浮流ノード筐体の仕様の比較

	従来型	改良型
光束 [lm]	17	130
搭載機材の重量 [g]	270	270
総重量 (カプセルと水を含む) [g]	850	820
浮流可能水深 [cm]	5.3	3.7

5.2 機体設計

浮流型観測ノードを実用化に近づけるために、カメラ及び照明設備の変更、そして回転補正方法の改善を行った。従来ノードでは、特定の PC もしくはスマートフォンに限定して接続可能な全方位カメラを利用してきた。改良型では通信環境の拡張性を含めて、Raspberry Pi のようにシングルボードコンピュータも検討したが、電力を供給するための外付けバッテリー (蓄電容量: 3,000mAh, 連続稼働時間: 約 1.2 時間) が必要であるが、機体総重量が約 930g となり、従来ノードよりも重量化したため、採用を見送った。そこでカメラとバッテリーが内蔵されたモバイルメディアプレイヤー Apple 社製 iPod touch (MKH62J/A) を利用することとした。iPod touch に内蔵されたカメラを全方位撮影に対応するために、魚眼レンズ TS-1258 を搭載した。また、バッテリー内蔵の照明 WUBEN 社製 G340 (130 lm) を二つ用いた。照明の光量を保ったまま反射光を抑えるために、拡散フィルム (LSD80PC10-5) を照明に被せた。さらにカプセルの透明度を向上させるために、材質をポリ塩化ビニルからポリエチレンテレフタレートに変更した。3D プリンタでデバイス配置用の土台を作成し、各デバイスをカプセル内部に固定した。表 1 に従来ノードと改良型の仕様比較を示す。図 9 に改良型の構造図と試作品の写真を示す。

5.3 センサを利用した回転補正法

文献 [5] で提案した回転補正法では、全方位カメラで撮影した映像をパノラマ展開し、フレーム間の輝度ヒストグ

ラムの変化により回転量を推定した。この方法では映像中の輝度値差が少ない場合、回転量を推定することが難しい。また、下水管路で十分な光量で照射したとしても、汚れなどの輝度値差だけでは現実的な回転補正はできないと考えられる。そこで本論文では、5.2 節で提案した観測ノードにおいて、輝度値の影響を受けない iPod touch の 3 軸ジャイロセンサを用いることとした。ここで厳密な回転補正にはカプセル中心の回転軸と iPod touch のセンサまでの距離、iPod touch の回転軸及び移動距離を考慮する必要があるが、まずは iPod touch に生じる回転のみを考慮し、センサから得られた回転角度に基づいて逆回転のアフィン変換を入力映像に施すこととした。今回の実験では画像処理において最も影響の大きいヨー角のみを対象とした。

5.4 実験結果と考察

5.2 節で提案した観測ノードを用いて撮影した映像に対して、従来手法と提案手法による回転補正を行った。図 10 に示す直径 200mm, 長さ 4m の塩ビ管内部で観測ノードを手動で移動させた。この実験では水を流していない。図 11-図 13 に、入力画像、従来手法及び提案手法による回転補正結果を示す。従来手法の実験結果では、映像中の輝度値差の大きいフレーム (図 12(a), (b)) では回転補正ができていないが、輝度値が小さいフレーム (図 12(c), (d)) では回転補正の精度が充分でないことが目視で確認された。一方、提案手法の実験結果では、映像中の進行方向が大まかに一定であることから、回転補正の効果が従来手法よりも向上していることが目視で確認された。

今回の実験では、水流を利用していないため、外側カプセルは回転して移動するが、内部機体の回転数は 4m の塩化ビニル管においては約半回転にとどまった。またピッチ角及びロール角の値はほとんど変化がなかった。下水管路では、水流を利用するため、内部機体への回転の影響はさらに小さくなることが予想される。今後はカプセル中心の回転軸推定を行うとともに、補正された実験結果に基づいて、パノラマ展開による下水管地図の作成、傷の自動検出、三次元復元を行っていく予定である。

6. まとめと今後の展望

安全、安価、短時間で下水管路のスクリーニング検査を実現するための技術として筆者らが取り組む浮流浮流型無線ネットワークカメラシステムの開発に関して、[5] 以降での取り組みについて紹介した。狭下水管内での無線データ伝送速度の向上のために検証した IEEE802.11n 以降で

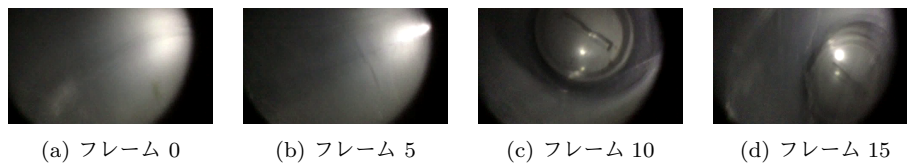


図 11 入力映像のフレーム映像

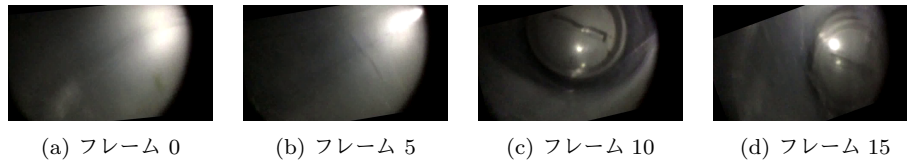


図 12 従来手法による回転補正結果

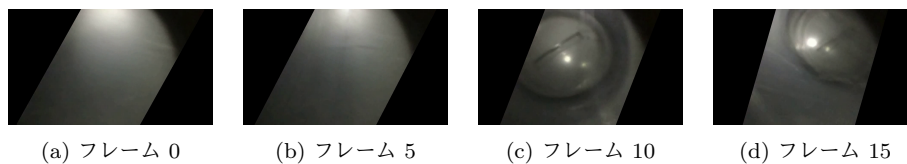


図 13 ジャイロセンサ値に基づく回転補正結果

導入されたチャネルボンディングの効果, ならびに複数インタフェースを用いた並列送信に関しては, 期待したほどの効果を得ることは出来なかった. 一方, これらの実験を通して, アクセスポイント側のアンテナを複数にする必要性や, 受信電波強度に基づく位置推定で得られる精度の見通しを得ることができた.

観測ノードからのデータ転送に関しては, 複数ノードの協調によるデータ転送プロトコルを実装し, 実験環境での動作確認までを行った. 現在までの実装では, 先行ノードでの通信断を検出してから後続ノードによる通信が許可されるようになっているので, 後続ノードによる通信開始が遅くなるという問題があったが, 今後, この問題を解消する改良を行う予定である. さらに, マンホール内にあるアクセスポイントからマンホール外のセルラ通信網に接続するために, マンホール内外間の通信方法について検討を進める予定である. 映像撮影系に関しては, ジャイロセンサ情報を用いた回転補正に関して改良を進めていくほか, これまで別個に開発してきた無線通信系と映像撮影系の統合を進めていく予定である.

謝辞 本研究はJSPS 科研費 26540034, 栢森情報科学振興財団研究助成金, 豊田理化学研究所豊田理研スカラー研究助成金, 総務省戦略的情報通信開発推進事業 (SCOPE) の助成の下で実施されたものである. ここに記して謝意を表す.

参考文献

[1] 国土交通省, 下水道:計画的な改築・維持管理, http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html (2017年11月5日確認).
[2] 国土交通省, スクリーニング調査を核とした管渠マネジメントシステム技術導入ガイドライン,

<http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/guideline20151001.pdf> (2017年11月5日確認).
[3] 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).
[4] Ishihara, S. and Sato, D.: Active node selection in flowing wireless sensor networks, The 6th international conference on mobile computing and ubiquitous networking (ICMU2012) (2012).
[5] 石原進, 長島大貴, 田中悠大, 林友貴, 前田拓磨, 澤野弘明: 下水管路検査のための浮流型ネットワークカメラシステムの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, 知的環境とセンサネットワーク研究会, Vol.115, No.467, ASN2015-106, pp.123-128 (2016).
[6] Nagashima, T., Tanaka, Y. and Ishihara, S.: 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).
[7] 武居悠樹, 田中悠大, 石原進: 映像伝送を目的とした下水管内 IEEE802.11n 無線 LAN におけるチャネルボンディングと複数チャネル並列通信の適用, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2017) シンポジウム, pp.712-719 (2017).
[8] iPerf, <https://iperf.fr> (2017年11月5日確認).
[9] Tanaka, T., Ishihara, S.: Cooperative Video Data Transmission for Sewer Inspection Using Multiple Drifting Cameras, Adjunct Proceedings of the 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing Networking and Services, pp.190-195 (2016).
[10] 前田拓磨, 林友貴, 澤野弘明, 石原進: 下水管路内検査のための浮流式全方位カメラシステムの検討, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2016) シンポジウム, pp.212-219 (2016).