

流れる無線カメラによるラクラク下水管検査¹

浮流型無線カメラによる省力型下水管検査技術

石原進（静岡大学学術院工学領域 教授）ishihara.susumu@shizuoka.ac.jp

澤野弘明（愛知工業大学情報科学部 准教授）

日本国内の下水管の総延長は48万km（地球12周分）に及びます。2019年末現在の、標準耐用年数50年を経過した管渠（かんきょ）の延長約2.2万km（総延長の5%）が、10年後は7.6万km（16%）、20年後は17万km（35%）と今後は急速に増加します。2015年の下水道改正では、維持修繕基準が創設され、とくに下水の貯留その他の原因により腐食する恐れが大きいものとして国土交通省令で定める排水施設の点検は、5年に1回以上の適切な頻度で行うように定めています。腐食の主たる要因は硫化水素ガスであり、こうした箇所での作業には危険が伴うため、**点検作業にかかる人的コストならびにそれに伴う金銭的成本は地方自治体の財政の大きな負担となっています。**

下水管の点検・調査の方法には、従来より、マンホールおよび管内に作業員が入って行う目視調査、強力なライトを備えたビデオカメラを地上からマンホール内に挿入して行う管口カメラ調査、自走式の有線接続ビデオカメラを挿入して行うテレビカメラ調査がありました。しかしながら、管内の目視調査には安全面・人的コストの問題があります。管口カメラ調査では一度に検査できる区間長に限られます。有線接続のビデオカメラは高額な上、電源・信号伝送用の太いケーブルの取り回しが必要で、取扱いが容易ではありません。

こうした従来型の手法に加えて、下水管内の作業の効率化・安全化を目指した手法が開発され、利用が始まっています。その一つに浮流型の装置にビデオカメラを搭載して下水管に流す手法があります。この方法ではカメラで撮影された映像はビデオカメラに搭載された記憶媒体に保存され、その内容確認はカメラの回収後に始めて行うことができます。また、UAV（Unmanned Aerial Vehicle、いわゆるドローン）を用いた検査方法も登場しています。下水管の検査にあたっては、検査中の映像をリアルタイムで確認できると作業進行上の利便性が良くなりますが、残念ながら**小口径管（直径200 mm～250 mm程度）では、標準的な無線LANでの通信距離が極めて限定されてしまうため、リアルタイ**

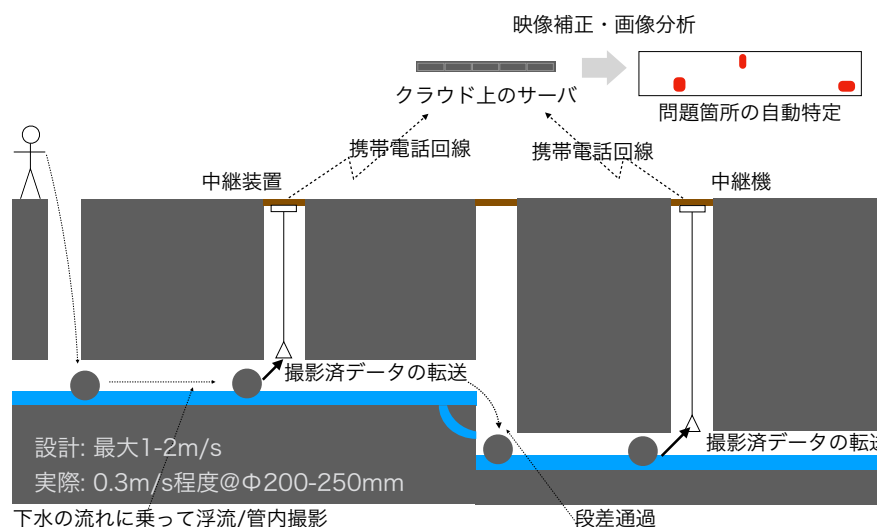


図1. 浮流無線カメラによる省力型下水管検査システム

¹ 本資料の説明では浮流観測機、中継機という言葉を使って説明していますが、当プロジェクトの関連書類では、これらを読者層や学術上の文脈によって異なる表現を用いて説明していることがあります。浮流観測機に関しては、浮流ノード、浮流無線カメラ、浮流カメラ、観測機体、Wireless Camera, Drifting Camera, Drifting Wireless Camera, Camera Nodeなどの言葉を使用しています。また、中継機に関しては、アクセスポイント（Access Point, AP）という言葉を用いています。

ムのモニタリングは困難です。公共下水道で最も敷設延長が長いのはこの小口径の管ですから、これらに対する有効な検査手段が求められています。

完全ワイヤレスで、操縦等の高度の技能を必要とせず、無線通信によって検査中の映像をリアルタイムで確認しながら、長距離（数百m）の検査を一度に行えることができ、さらに管内の作業がほとんど要らない検査・調査方法があれば理想的でしょう。こうした理想的な検査方法を実現するため、私たちは、**無線通信可能な小型カプセルに入ったカメラ（浮流観測機）を下水管に流し、これから無線伝送で準リアルタイムで検査中の映像を確認しながら検査できる仕組み（図1）を提案**しています。浮流観測機で撮影された映像データは観測区間内のいくつかのマンホールに一時的に設置された中継機（アクセスポイント、AP）に転送され、さらに中継機からモバイル通信網を介してインターネット上のサーバに転送され、Webページから閲覧可能となります。

上述したように狭い管では長距離の無線映像伝送は困難ですので、何らかの方法で通信距離の不足を補う手法が必要です。さらに下水管内では地面の傾斜と下水管として望ましい傾斜の違いの吸収や、下水管路の合流のために多くの段差があるので、こうした段差を乗り越えて長い区間を観測できるような装置が必要となります。

私たちの研究グループでは、上記の仕組みの実現のため、以下のような要素技術の調査、開発を行っています。

- ・ 下水管内の無線LAN通信性能の調査
- ・ 映像伝送プロトコルの開発
- ・ 下水管内撮影位置の推定
- ・ 映像データの閲覧システムの開発
- ・ 浮流型観測機の開発
- ・ 映像の自動補正技術の開発
- ・ 画像処理による障害箇所の自動検出技術の開発



図2. 静岡大学内 実験用下水管

下水管内の無線LAN通信性能の調査

大学キャンパス内に塩化ビニル製、鉄筋コンクリート製の実験用下水管を設置し、小口径下水管内の無線LAN通信の性能調査を行いました（図2）。調査の結果、国内で利用可能な2.4GHz帯IEEE802.11無線LANでの通信可能距離は口径200mmの塩化ビニル製下水管で3m程度、口径250mmの鉄筋コンクリート製下水管で5m程度であることがわかりました。また5GHz帯IEEE802.11無線LANではそれぞれ6m、10m程度でした（図3）[1][2]。これらに加え、IEEE802.11nで導入されたチャネルボンディング機能、ダイバーシチ受信の効果も確認しています[3][4]。さらにこれらの通信可能距離内では無線LANの受信信号強度の適切な平滑化処理により、誤差1m程度での位置推定が可能であることを確認しています[2]。

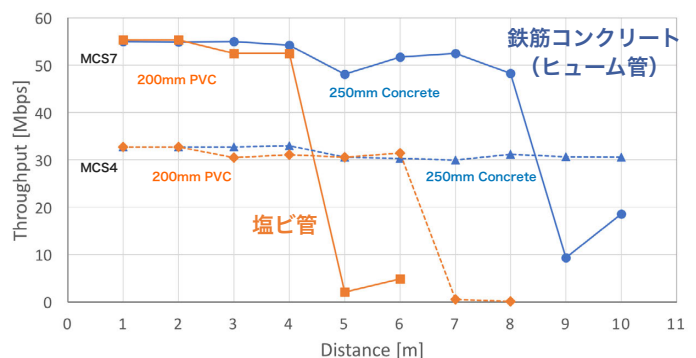


図3. 下水管内でのIEEE802.11n通信のスループット

- (1) Taiki Nagashima, Yudai Tanaka, and Susumu 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.
- (2) Yuki Takei, Zhi Liu, Susumu Ishihara: Effect of channel bonding and parallel data transmission with IEEE802.11n wireless LAN in a small sewer pipe, in proc. of The 32nd International Conference on Information Networking (ICOIN 2018), 2018.
- (3) Yuki Takei, Zhi Liu, Hiroaki Sawano, Susumu Ishihara: Accurate position estimation of a drifting wireless LAN communication device in a 200mm-diameter small sewer pipe, in proc. of The 33rd International Conference on Information Networking (ICOIN 2019), 2019.

(4) Seiya Tachibana, Susumu Ishihara: Wireless LAN communication using multiple antenna access points in narrow sewers, 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2020), DOI:10.34385/proc.63.C4-5, 2020.

映像伝送プロトコルの開発

浮流型観測機によって下水管内で撮影された映像データを地上の作業員がリアルタイムで受け取るためには、撮影データを無線伝送で送る必要がありますが、そのためには観測機からの送信信号を受信・中継する装置が必要です。口径200–250mm程度の下水管では無線LANでの通信距離は最大でも10m程度ですから、単純に全検査領域をカバーするように中継装置を配置してしまうと $10\text{m} \times 2 = 20\text{m}$ 以下の間隔中継装置が必要になってしまいます。マンホールの間隔はこれより長いものがありますし、仮に短い間隔でマンホールの全てに中継装置を配置するのは現実的ではありません。従って、中継機はより長い間隔で配置せざるをえません。こうした場合、完全にリアルタイムで映像を地上で受信することは困難です。そこで、一度観測機側に蓄積された映像データを、観測機が中継装置と通信出来る間に転送し、それを地上側に送信することとします。そのため、私たちはこの手法による映像モニタリングに関して、「準リアルタイムのモニタリング」とであると説明しています。

観測機に蓄積した映像を、中継機と通信可能なときにまとめて転送するだけではまだ問題は解決しません。中継機間の距離が長くなると、蓄積した映像データのサイズが大きくなり、中継機と通信可能な時間内ではその映像データを全て送りきることが出来なくなってしまうのです。

そこで私たちは、**複数の観測機を用いて、長い中継機間の区間の撮影データを分割して伝送する仕組みを開発**しました[5][6] (図4)。例えば2台の観測機（1号機と2号機）があるとしましょう。1号機が先に上流のマンホールから流されて、映像を撮影蓄積し、最初の中継機との通信可能領域に到達します。1号機は撮影済の映像データを1号機に送信しますが、この中継機との通信可能な時間の間に全ての撮影済のデータを送りきることが出来ません。入り口のマンホールと中継機との間の距離いと撮影データが大きくなり、限られた通信可能期間の間に送りきるには時間が足りなくなるのです。そこで、中継機は、1号機から受信したデータが入り口のマンホールと中継機の間どの区間で撮影されたものかを推定します。この推定にはマンホールへの投入時刻、その後の経過時間を使います（最初の中継機より下流では各中継機との最初の通信時刻、あるいは中継機の最近傍通過時の時刻を使います）。こうして推定した1号機が転送した撮影データの撮影区間の情報を、中継機はその後にやってくる2号機に伝えます。2号機は1号機が送ることができなかった区間の映像の中継機に送ります。例えば、1号機が入り口のマンホールへの投入後130秒後のデータまで転送済であるならば、2号機は自身のマンホール投入から130秒後の少し前からの撮影データの中継機に送ります。

上記のように中継機間の撮影データを分割して転送する仕組みの開発に加え、**無線リンクでのデータ転送の工夫**も行っています。下水管を流れる観測機と中継機との無線伝送路の状態は短い間に大きく変化し、さらにその通信可能期間は限られています（観測機の浮流速度は典型的には0.3 m/s程度なので、中継機との通信可能距離が10 mの場合、通信可能なのは60秒程度。）。IEEE802.11無線LANでは変調方式、誤り訂正符号のパラメータを調整できるようになっています。刻々と変化する浮流観測機と中継機間の伝送路の状態に応じてできるだけ高速かつ誤りなくデータ伝送できるように、**パラメータの調整を最適化**する必要があります。さらにIEEE802.11n以降の無線LANでは**チャンネルボン**

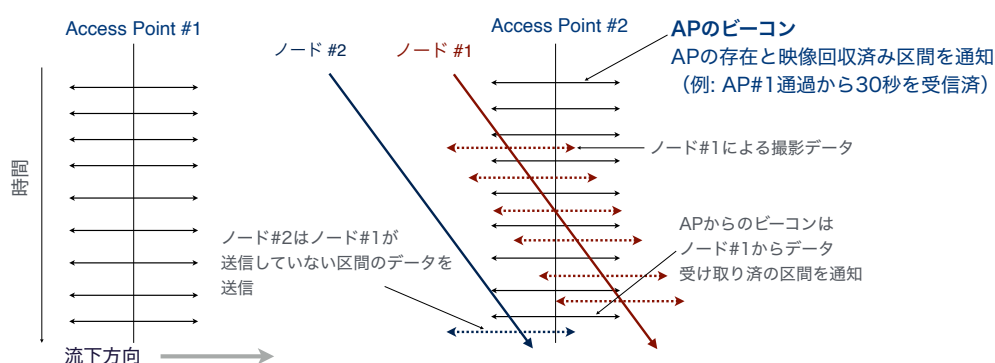


図4. 複数観測機による協調型映像伝送プロトコル

ディング機能やフレームアグリゲーションといった技法がありますが、これらも浮流観測機と中継機との間の伝送路の状態に応じて調整する必要があります。私たちは、こうした調整を盛り込んだ上で、信頼性のあるデータ通信を行うプロトコル、観測機、中継機用のソフトウェアを開発しています。

- (5) Susumu Ishihara, Zhi Liu, Seiya Tachibana, and Tomonori Yasuda, 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.
- (6) 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.

撮影位置推定手法の開発 / 映像データの閲覧システムの開発

観測機から中継装置を介してサーバに集められたデータはWebページを介して作業者が閲覧可能となります。映像閲覧時には、映像の各フレームがどこで撮影されたものかわかることが求められます。さもなれば、管内の障害箇所がどこなのかが特定できます。地上では衛星測位 (GNSS) 等の技報で容易に位置の取得が可能です。下水管内ではGNSSは使えませんし、中継機の無線LANの信号は中継機周辺でしか位置検出に使用できません。そこで他の手法で**撮影位置を推定する方法と関連ソフトウェアを開発しました**。この方法では、**ランドマークの通過時刻に基づいた線形補間**を行います[7]。ランドマークとしては、最初のマンホール、途中のマンホール、下水管の継目を使います。最初のマンホールへの投入時刻に関しては、作業補助用の制御装置 (数個のボタンがついた手のひらサイズの装置、あるいはスマートフォン) を使用して撮影装置にコマンドを送ることにより記録します[8]。途中のマンホール、下水管の継目に関しては画像処理によって検出します。マンホールのふたの円図形、継目の直線はハフ変換という画像処理上の技法を用いて検出します。こうした技法を用いた撮影位置推定の実行、撮影装置へのコマンド送出のためのソフトウェア、ハードウェアを開発しました。また、**中継機を介してサーバに集められた映像データを位置と対応づけてWebページ上で閲覧できるシステムを開発しました** (図5) [7]。このソフトウェアは上述した撮影位置の推定機能を含んでいます。

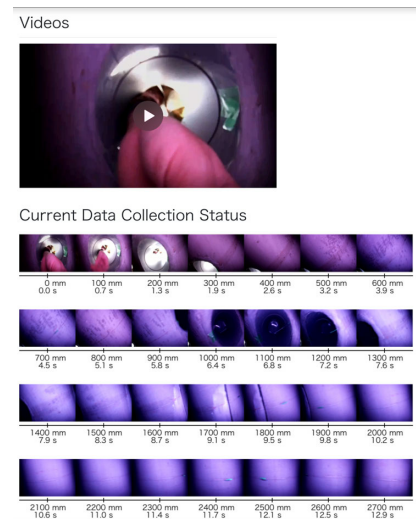


図5. 撮影映像閲覧システム

- (7) 近本 祐介, 立花 誠也, 堤 悠喜, 澤野 弘明, 石原進: 浮流無線観測機を用いた省労力下水管検査システムのための映像閲覧システムの構築, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2021)シンポジウム, pp. 741-749, 2021.
- (8) 堤 悠喜, 立花 誠也, 近本 祐介, 石原進: 浮流無線カメラを用いた下水管検査システムにおける撮影時刻の管理方法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2021)シンポジウム, pp. 81-89, 2021.

浮流観測機の開発 / 映像の自動補正技術の開発

下水管内の段差を乗り越え、さらに水流や障害物による姿勢の変化が生じても下水管内の映像をうまく撮影できるような浮流観測機を開発しました[9]。この観測機は図6に示すような二重カプセル構造をしています。外側のカプセルの内部に入れられた水の上に、カメラ等の装置を含む内部カプセルが浮かんでいる構造となっています。この構造により、外側のカプセルの向きが変わったとしても内部カプセル上のカメラの向きは変わらず、

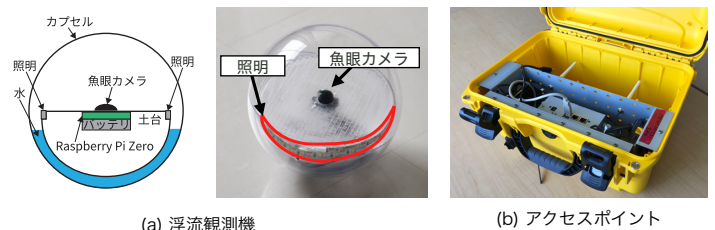


図6. 浮流観測機とアクセスポイント

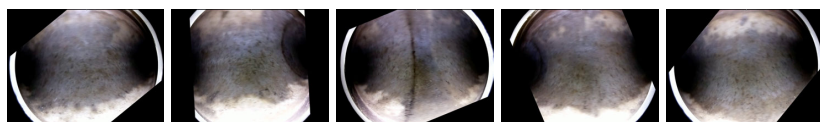


図7. 水平方向の回転補正例

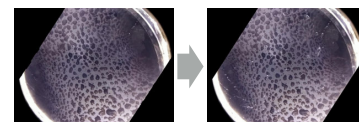


図8. 水滴・傷の除去例

管内上側を撮影可能となっています。カプセル内部にはカメラの他に無線通信装置、照明、電池が含まれています。

二重カプセル構造を用いているため、内部カプセルの向きは変化します。垂直方向の回転は一時的なもので比較的短い時間に取りますが、水平方向に関しては容易に取ることがありません。そこで、**画像処理により水平方向への回転を自動的に補正する技術を開発**しました[9][10]（図7）。また、外側のカプセルが回転すると、カプセル外側に水滴が付着することがあるほかカプセルに傷が生ずることがあります。こうした**水滴や傷による撮影映像の劣化を補正する技術を開発**しました（図8）。

(9) 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 ～ 撮影機体の設計とひび割れ検出手法の提案 ～, 映像表現・芸術科学フォーラム, 2019.

(10) 前田拓磨, 清水竣太, 澤野弘明, 石原進: 下水管内映像撮影のための二重カプセル構造浮流型撮影機体の照明設計と映像回転補正の実現, 映像表現・芸術科学フォーラム, 2018.

画像処理による障害箇所の自動検出技術の開発

観測機で撮影された映像から、画像処理により**管壁のひび割れ（クラック）を自動で検出する手法を開発**しました（図9）[9]。

下水管の障害はひび割れの他にも、破損、接合不良、隙間、木根の侵入など様々なものがあります。ひび割れ以外の障害にも対応していく必要があります。本研究で開発したひび割れ検出の方法は古典的画像認識手法に基づくものですが、今後は大量の撮影映像に基づく機械学習ベースの手法を用いて自動検出の仕組みを整えていくことが現実的と考えています。

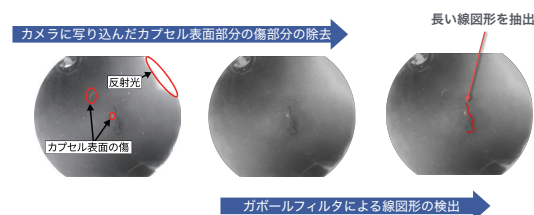


図9. クラックの自動検出

■お問い合わせ・共同研究のご相談

石原進（静岡大学） <ishihara.susumu@shizuoka.ac.jp>

<https://www.shizuoka.ac.jp/ishilab/>