

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

近本 祐介¹ 立花 誠也¹ 堤 悠喜¹ 澤野 弘明² 石原 進³

概要：高度経済成長期に敷設された下水管の老朽化に伴い、下水管の検査や修復作業が全国的に必要となっている。しかしながらその時間的、人的コストが作業実施の障壁となっている。筆者らは、下水管検査の短時間化や人的コストの削減を目指し、小口径下水管を対象とする浮流無線観測機による下水管検査システムの開発を進めている。このシステムでは無線通信が可能な浮流無線カメラユニット（浮流ノード）を下水管へ投入し、下流のマンホール下に設置された無線 LAN アクセスポイント（AP）を介して映像データを回収する。そして AP からクラウド上の集約サーバへセルラ通信等を経由して映像データを集約する。集約された映像データは撮影位置とひもづけられた形で検査担当者が閲覧可能とする他、自動診断による障害箇所特定に用いられる。本システム実現のために、複数の浮流無線ノードによる協調型映像送信プロトコルの設計・開発が進められてきたが、映像転送されたデータのサーバへの集約ならびに位置と紐づけられた映像データの揭示システムの実装は行われていなかった。本稿では、撮影された映像と撮影位置を対応づけるため、線形補間によって浮流ノードの位置を推定する手法の提案とその実装について述べる。下水道を模したテストベッドでの実験の結果、提案手法における映像データの推定位置誤差は、検査員が障害箇所を特定する上で支障のない範囲に収まっていることが確認できた。

Designed implementation of video browsing system for labor-saving sewer pipe inspection system with drifting wireless cameras

YUSUKE CHIKAMOTO¹ SEIYA TACHIBANA¹ YUKI TSUTSUMI¹ HIROAKI SAWANO²
SUSUMU ISHIHARA³

1. はじめに

2020年現在、国内の下水管の総延長 47 万 km のうち 40% 以上が耐用年数である 30 年を超えており、老朽化下水管を原因とした道路陥没事故が年間 3000 件以上発生している [1]。このため、老朽化下水管の早急な検査と危険箇所の補修・交換が必要とされている。現在の下水管検査手法には、目視 [2]、ファイバースコープ [3]、自走ロボット [4]、船型カメラを用いた手法 [5] があるが、コストの面あるいは

検査にかかる時間に関する制約が大きい。そこで低コストかつ短時間で検査可能な手法が求められている。

石原らは低コストかつ短時間で下水管検査の実装を目指して、図 1 に示すような浮流無線ノードを用いた下水管検査システム [6] を提案している。このシステムは、まず下水管内に投入されたカメラ付き浮流無線観測機が撮影した管内の映像を、下流にあらかじめ設置した AP が無線 LAN を介して回収する。続いて AP から地上の集約サーバへその映像をセルラ網等を介して集約する。その後検査員が端末から集約サーバ内にアクセスし、回収済の映像を閲覧して下水管内の異常箇所を特定するというものである。

本システムでは、実際に人間が管内に入る必要がないので安全であり、短時間で検査が可能である。また、ファイバースコープや自走ロボットと異なり有線ケーブルによる検査範囲の制限がない。また、検査中に撮影映像を確認でき

¹ 静岡大学大学院総合科学技術研究科
Graduate School of Integrated Science and Technology,
Shizuoka University

² 愛知工業大学
Aichi Institute of Technology

³ 静岡大学学術院工学領域
College of Engineering, Academic Institute, Shizuoka University

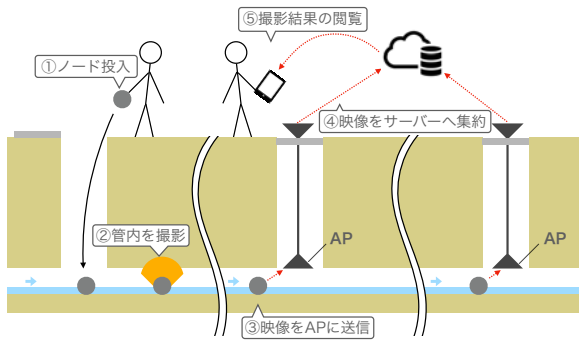


図 1 浮流無線カメラノードを用いた下水管検査

るので利便性が高い。本システム実現のためには、下水管内で浮流ノードから映像データを無線転送できる必要がある。長嶋ら [7] は、これまでに $\phi 200\text{--}250\text{ mm}$ の地下下水管での $2.4\text{ GHz} \cdot 5\text{ GHz}$ IEEE 802.11 無線 LAN, IEEE 802.15.4, ならびに 920 MHz 帯 ARIB STD-T108 での通信性能の評価を行っている。また、安田ら [8] は短い通信可能距離 ($\phi 200\text{--}250\text{ mm}$ の下水管では $5\text{--}10\text{ m}$) の制約を補うため、複数の浮流ノードを用いて映像を撮影収集するためのプロトコルを開発している。筆者らは、このプロトコルを介して AP に届いた映像データを地上の集約サーバへ無線 LAN を介して回収し、映像を流下開始からの経過時間と紐づけられた上で検査員が閲覧できるような映像閲覧システムを開発した [9]。

しかしながら、下水管内の流速の変化や障害物への衝突により浮流ノードの流速は変化するので、単純に流下開始からの経過時間のみで映像から下水管のひび割れ、老朽化箇所の位置特定を正確に行うことは困難である。下水管内の老朽化箇所の特定を正確に行うためには映像フレームと撮影位置情報が紐づいている必要がある。本稿では、線形補間によって浮流ノードの撮影位置を推定する手法を提案する。また、提案した撮影位置推定機能の設計・実装し、実験用下水管を用いた動作検証を行った。

以下 2 章で無線機器の自己位置推定に関する先行研究を紹介し、3 章では筆者らの開発している浮流無線観測機を用いた下水管検査手法について述べる。4 章では、浮流ノードの撮影位置推定手法について述べ、5 章では、フレームと撮影位置の対応づけ機能の設計について述べる。6 章では、設計をもとに実装した機能の検証実験について述べ、7 章では、本論文のまとめを述べる。

2. 関連研究

浮流ノードの撮影映像フレームと撮影位置の対応づけをするためには、浮流ノードがどこでその映像を撮影したかを知る必要がある。一般に屋外での無線通信機器の位置推定には GNSS や無線 LAN や携帯電話の基地局からの信号強度が使用されるが、下水管内には人工衛星や基地局からの電波が届かない。そのため、これらに依存しない浮流

ノードの自己位置推定技術の開発が必要である。屋内での端末位置推定の方法としては可視光、UWB、超音波並びに、無線 LAN 通信における RSSI を用いたものが考えられる。

可視光通信は、主に発光ダイオード (LED) によって変調・発光される $400\text{--}800\text{ THz}$ の可視光を用いて最大でも 1 km 前後の距離で通信を行える技術である [10]。この技術を利用した位置測位としては、一般的に受信機に取り付けられたイメージセンサを用いて複数の発光源を認識し、あらかじめ既知である発光源の位置情報と合わせて受信機の自己位置を推定するという手法が利用される [11]。可視光通信における位置推定のデメリットとしては、発光源をあらかじめ複数箇所に設置しておかなければならず、提案する下水管検査のように長い区間を移動するノードの位置推定をする場合には、発光源の設置コストが大きくなってしまふ。また、光が障害物によって遮られてしまうと発光源を認識することができなくなり、位置の推定誤差が大きくなってしまふという問題点がある。

超音波は、 20 KHz を超えた周波数の音波を用いて数十メートルまでの距離の映像を送る技術である [11]。超音波は、電磁波に比べて速度が非常に遅く、コンピュータのクロックで容易に音波の到達遅延を計測できるので、高い精度 (数 cm 程の誤差) で位置測位が可能である。しかし、提案する下水管検査は浮流ノードが数百メートル以上の長い区間を移動することを想定しており、超音波センサを用いて常に下水管内のノードの自己位置推定をすることは難しい。

UWB (Ultra Wide Band) は、 500 MHz から数 GHz という広い周波数の帯域を利用して、ノイズ程度の電波を拡散させて 20 m 程の距離まで通信ができる無線通信方式の 1 つである [12]。デューティサイクルが非常に低いため、消費電力が少ないことが特徴である [13]。UWB のデメリットとしては、通信可能範囲が約 20 m 程であり、超音波同様に浮流ノードの位置推定をすることは難しい。

河合らは、下水管内での無線 LAN 通信で、受信端末で計測される受信信号強度 (Received Signal Strength Indicator: RSSI) を用いて自己位置推定する手法を提案している [14]。この手法は浮流ノードに自己位置推定のための特別な機器を取り付ける必要がなく、加えて映像受信用の AP 以外に管内に機器を設置する必要もない。そのため、本研究が想定する下水管内での浮流ノードの自己位置推定に適用できる可能性がある。しかし、管口径の狭い下水管内 ($\phi 200\text{--}250\text{ mm}$) では無線による通信可能範囲が限られている (約 $5\text{--}10\text{ m}$) ので、AP から 10 m 以上離れた浮流ノードの位置を推定することは現状では不可能である。

3. 浮流無線観測機を用いた 下水管検査システム

本章では、筆者らが開発した浮流無線観測機を用いた下水管検査システムの概要について述べる。本システムの構成を以下の2つに分けて述べる。

- (1) 浮流ノードによる下水管内撮影と AP への映像送信
- (2) AP が浮流ノードから受信した映像の集約・閲覧

3.1 浮流ノードによる下水管内撮影と AP への映像送信

浮流ノードは下水管内へ投入した地点から撮影を開始する。その後、AP との無線 LAN における通信可能範囲入ると撮影した映像を AP へ転送する。1章で述べたように IEEE 802.11n 無線 LAN を用いた小口径下水管内での通信可能範囲には制限があることがわかっている。よって浮流ノードが AP との通信可能範囲を通り過ぎるまでに送れる映像データ量には限りがある。例えば、200 m 間隔で AP を設置した下水管を浮流ノードが 0.3 m/s の速さで流れ、映像をビットレート 2.5 Mbps、フレームサイズ 1920 × 1080、30 fps、H.264 形式で保存すると仮定すると、ノードは AP 間を流れる間に約 200 MB の映像を蓄積する。無線 LAN での映像データ転送レートが 20 Mbps だとすると、200 MB 分の送信には 80 秒以上を要する。AP の通信可能距離が 8 m だったとすると、浮流ノードが AP と通信可能な範囲は 16 m となる。流速を考慮すると浮流ノードが AP と通信可能な時間は約 53 秒であるため、この間に蓄積した映像全てを送り切ることができない。そこで安田らは、無線通信可能範囲が狭い下水管内において、複数の浮流無線ノードを用いて映像データを協調的に AP へ送信するためのアプリケーション層プロトコル SVTP2019 (Sewer Video Transmission Protocol) を提案している。

SVTP2019 の構成を以下の2つに分けて説明する。

- (1) 複数浮流無線ノードによる送信映像データの分割送信
- (2) 複数の浮流無線ノードによる AP への同時送信の抑制

複数浮流無線ノードによる送信データの分割送信

SVTP では個々の浮流ノードが下水管全体を撮影し、それぞれ異なる箇所の映像を AP に送信する。いくつかのマンホールに設置される各 AP は、浮流ノードが一つ手前の AP から初めてビーコンパケットを受信した時刻を基準時刻として、この時刻を経過してから浮流ノードが自身に到達する時刻までに撮影した映像を受信する。AP は未回収映像の範囲をこの基準時刻からの経過時刻によって指定し、未回収範囲情報を含んだビーコンパケットをブロードキャストする。これを受信した浮流ノードは AP との通信可能範囲を通過する間に、未回収範囲の映像を AP に対して可

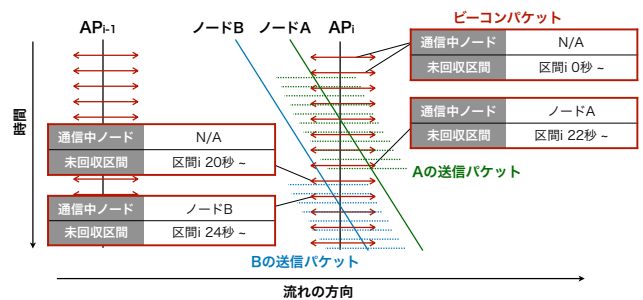


図 2 2 台の浮流無線ノードと AP_i の通信の例

能な限り送信する。この方法により、先行する浮流ノードが AP に対して送信しきれなかった撮影範囲の映像を後続のノードが分担して送信する。

複数の浮流無線ノードによる送信データの同時送信の抑制

複数の浮流無線ノードが同時に 1 つ AP と通信可能になった場合、それらが隠れ端末の関係にあると、映像データフレームを同時に送信してしまう可能性がある。この場合、複数のノードからの送信信号が衝突し、通信効率が低下する。SVTP2019 では、こうした複数の無線観測機によるフレームの同時送信を防ぐために、AP が定期的にブロードキャストするビーコンパケットに現在データを送信中の浮流ノード ID を含めることで、他の浮流ノードによるデータ送信を抑制する。

図 2 に 2 台の浮流ノード A・B が AP_i の下を流れる際の通信の例を示す。横軸は水平方向の位置を表し、縦軸は経過時間を表す。図 2 中の両端に矢印がついた赤線は AP がブロードキャストするビーコンパケットの到達可能距離を表している。ノード A は、AP_i が発するビーコンパケットを受信すると、それに含まれた AP が未回収映像の撮影範囲 (例えば AP₁ から最初のビーコン受信から 10 秒地点以降) の情報を読み取り、それに基づいて次に送る映像の区間を決定する。その後ノード A は、AP_i に対して自身の ID とこれから送る映像の開始時刻を表すタイムスタンプのデータ (つまり区間開始の基準時刻からの経過時間) と送信予定の映像データ量を制御用メッセージとして送った後に、映像送信を開始する。

AP_i は、ノード A から映像を受信している間、ビーコンパケットに現在通信中であるノード A の ID を含めておく。この間にノード B が AP_i からのビーコンパケットを受信すると、ビーコンパケット内に現在ノード A と通信中であるという情報を入手できる。この時ノード B は AP_i への映像データの送信を保留する。AP_i はノード A からのパケットを一定時間通信できなければ、ノード A が自身の通

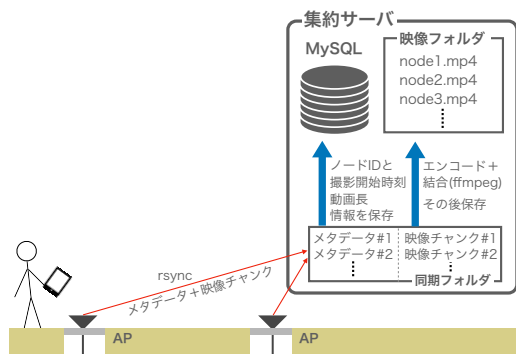


図 3 映像チャンクの集約サーバへの保存

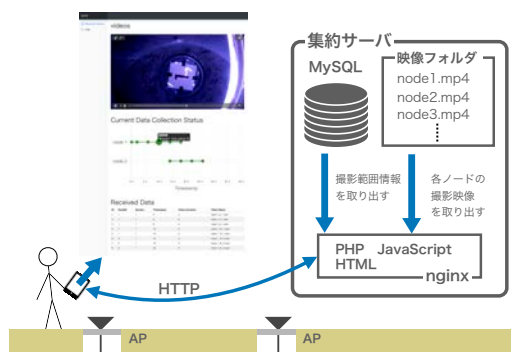


図 4 集約サーバから映像を閲覧する機構

信可能範囲外に流れたと判断し、通信を打ち切る。そして以後のビーコンパケットを送信する際には、パケット内にノード A の ID 情報を含めない。その後ノード B はビーコンパケットを受信した際、 AP_i が通信中の相手は存在しないと判断し、映像データを送り始める。なお、AP への映像送信ノードを切り替える時、映像に含まれる下水管の映像範囲に漏れがないように、後続ノードは未回収範囲より少し前から撮影された映像を送る。

3.2 AP が浮流ノードから受信した映像の集約・閲覧

3.1 節で述べたように撮影映像を AP に対して転送する際には、複数の浮流ノードが AP に対して異なる撮影範囲の映像を送信している。これらの映像を集約し、閲覧するためのシステムを筆者らは設計・実装した [9]。集約サーバは AP から転送された映像データと、映像データの撮影開始時刻、映像長、撮影した浮流ノード ID (メタデータ) を結びつけて管理する。図 3 のように AP は浮流ノードから回収した映像データとメタデータを集約サーバへ送信する。集約サーバは受信したこれらのデータをデータベースへ蓄積する。集約サーバは蓄積した各映像データとメタデータから、浮流ノード毎に映像と撮影範囲情報をまとめて表示する Web ページを生成する (図 4)。検査員は端末からこの Web ページへアクセスすることで、各浮流ノードから集約した映像を閲覧する。

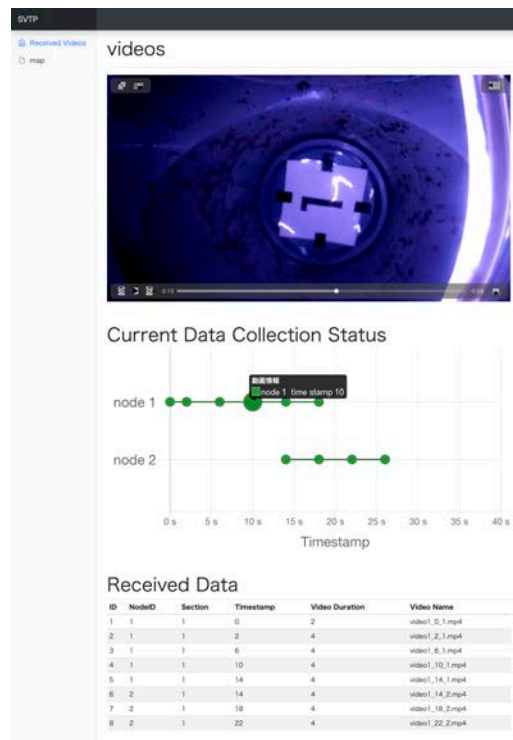


図 5 実装した Web ページ (撮影開始 10 秒後の映像フレームを表示している)

4. 映像フレームと撮影位置の対応づけ

3 章で述べた下水管検査システムにおいて、集約サーバが回収した映像は、浮流ノードが AP からビーコンパケットを受信してからの経過時刻情報と結びついているのみである。このため映像内のフレームの撮影位置を把握するには、フレームの撮影時刻と下水管内の水流の速度から撮影位置を推定する必要がある。しかし、AP の設置間隔が長くなると、浮流ノードが AP 間を浮流する間に刻々と水流の速度が変化し、推定撮影位置に大きな誤差が生じてしまうと考えられる。本章では、この大きな誤差を抑えるため、AP やマンホールなどのランドマークを用いて、ランドマーク間の浮流ノードの位置を線形補間により推定する手法を提案する。

4.1 浮流ノードの位置推定

2 章で述べたように、既存の屋内での無線通信機器の位置推定手法は下水管内を流れる浮流ノードの位置推定へ応用するには困難であることを述べた。また、浮流ノードは映像転送用の無線 LAN 通信用アンテナと管内撮影用のカメラを搭載しているが、コストの面を考慮すると他にデバイスを追加することなく無線 LAN 機能とカメラのみで浮流ノードの位置を推定できることが望ましい。そこで、下水管内のランドマークを浮流ノードに搭載されたセンサ情報から検出し、ランドマーク間を流れる浮流ノードの位置を線形補間により推定することにした。図 6 のように浮流

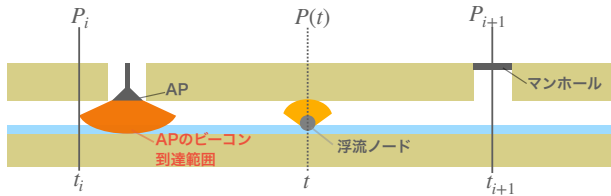


図 6 ランドマーク (AP とマンホール) その間を流れる浮流ノード

ノードを流し始めてから i 番目のランドマークの位置を P_i とする。浮流ノードの P_i を通過する時刻を t_i とすると、区間 $[P_i, P_{i+1}]$ を通過する任意の時刻 t での浮流ノードの撮影位置 P は線形補間により

$$P = P_i + (P_{i+1} - P_i) \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

と表せる。ここで t, t_i, t_{i+1} は同じ浮流ノードで記録される時刻であるので他の機器の時刻同期は必要ない。このため映像データを集約する際には、映像データの撮影時のローカルタイムスタンプを同時に管理しておくことで、映像データが撮影された位置を推定することができる。また、この撮影位置推定方法であれば、管内の流速がたとえ変化したとしても、ランドマークを通過するたび推定位置を補正することができる。よってランドマークの候補が多くなるほど、高精度な浮流ノードの位置推定が可能となる。

4.2 位置推定に求められる精度

下水管の補強工事や取り替え工事はマンホールからマンホールまでの区間もしくは、下水管の継ぎ目から継ぎ目までの区間を最小区間単位として行われる。よってすべてのマンホールと継ぎ目を検出することができれば、検出時刻をもとに線形補間による浮流ノードの撮影位置誤差を最小区間単位の範囲内に抑えることができる。これにより、管内の異常箇所を撮影した映像の推定撮影位置の誤差が最小区間単位をはみ出してしまい、誤った区間に対して下水管の補強工事や取り替え工事をしてしまうことを防げる。本研究で検査対象とする小口径下水管 ($\phi 200$ mm–250 mm) のマンホール間の長さは数十メートルであるのに対し、下水管の継ぎ目から継ぎ目までの長さは、990 mm–2000 mm である [16]。よってすべての継ぎ目の検出をすることができれば、線形補間による浮流ノードの推定位置誤差を、2000 mm 以下に抑えられる。本稿では、i) マンホールの真下と ii) 下水管の継ぎ目に加え、推定位置精度向上のため iii) AP の真下の 3 種類をランドマークとして位置推定を行うことにした。

4.3 ランドマークの検出方法

3 つのランドマーク i) マンホールの真下 ii) 下水管の継ぎ目 iii) AP のビーコンパケット受信地点の検出方法について述べる。

マンホールあるいはハンドホールの真下

マンホールの真下で撮影した映像フレームにはマンホールの円形の蓋の形状が映り込むので、カメラの画角に対して適切な大きさの円図形を画面中央に検出できればマンホールの真下であることがわかる。具体的には、以下のように実装した。各フレームの画素をグレースケール化してからヒストグラム平坦化を行い、Canny 法を用いたエッジ検出により映像内の各画素を 2 値化する。この 2 値画像に対して Hough 変換による円検出を行うことでフレーム内に写っているマンホールを検出する。

下水管の継ぎ目

下水管の継ぎ目は管の進行方向とは垂直の向きの線分として観測される。そこで、マンホールの検出同様に、まず映像内のフレームに対してグレースケール化してからヒストグラム平坦化を行う、そのフレームに Hough 変換による直線検出を行うことで下水管の継ぎ目を検出する。

AP のビーコンパケット受信地点

各 AP は定期的にビーコンパケットを送信している。今までに受け取っていない ID を持つ AP からのビーコンパケットを受信すると、浮流ノードはこの時のタイムスタンプを記録する。

5. 映像フレームと位置の対応づけ機能の設計

本章では、4 章で述べた浮流ノードの位置推定をしたのち、浮流ノードから回収した映像と撮影位置を対応づけるための機能の設計について述べる。

5.1 機能要件

映像フレームと撮影位置の対応づけをするための機能要件は以下の通りである。

- (1) 映像フレームの推定撮影位置の誤差は、少なくとも隣り合うマンホール間、下水管の継ぎ目–下水管の継ぎ目の区間に収まっていること。
- (2) 準リアルタイムに下水管内の検査をするために、浮流ノードが AP へ送信した映像を素早く位置と紐付けできること。

機能要件 1 については、4.1 節で述べた通り映像の推定位置の誤差により誤った箇所を補強・取り替え工事してしまうことを防ぐために必要となる。機能要件 2 における準リアルタイムの検査とは、浮流ノードから撮影映像がサーバへ送信されると、直ちに検査員が集約サーバ内の Web ページを通して映像を確認し、管内の異常箇所の特定検査ができることを指している。検査時間を短縮化したり、浮流ノードの撮影位置を作業現場で素早く把握するために必要となる。そこで本稿では、浮流ノード内部で自身の位置を推定

し、撮影した映像と位置を対応づける機能を設計した。

5.2 基本設計

浮流ノードは、浮流中常にカメラで管内を撮影し、記憶領域へ撮影映像を保存している。この撮影・プロセスが起動している中、バックグラウンドで i) ランドマークの通過時刻の記録と、ii) 映像と撮影位置の対応づけを行う。

ランドマークの通過時刻の記録

浮流ノードは流下中に AP、マンホール、下水管の継ぎ目を検出し、通過時刻（流下開始からの経過時刻）を記録する。AP については、浮流ノードが AP からのビーコンパケットを受信した直後に、この受信時刻を通過時刻として記録する。マンホールと下水管の継ぎ目については、浮流ノードが保存した映像のフレームを 4.3 節で述べた画像処理を行うことで検出を行い、検出された映像フレームの撮影時刻を通過時刻として記録する。同じランドマークが複数の映像フレームで検出された場合は、マンホールが画角の中央にある映像フレームを選出するために、それらのフレームの撮影時刻の平均をとり、平均時刻に最も近いフレームを選択する。そしてこのフレームの撮影時刻を通過時刻として記録する。

映像と撮影位置の対応づけ

新しくランドマークの通過時刻を記録するたび、浮流ノードは全映像フレームについて撮影時刻と撮影位置の紐付けをする。具体的には以下の過程で各映像フレームの撮影時刻と撮影位置の紐付けをする。投入開始から t 秒後に撮影された映像フレームについて、 i 番目のランドマークの通過時刻を t_i として $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ を満たす i を求める。あらかじめ浮流ノードを投入する前に浮流ノード内に記録しておいたランドマークの位置情報から i 番目と $i+1$ 番目のランドマークの位置 P_i, P_{i+1} を取り出し、これらと t_i, t_{i+1} と合わせて式 1 を用いて映像フレームの推定撮影位置 P を求める。この t と P の組み合わせを浮流ノードの記憶領域に記録・更新していくことで、映像と撮影位置の対応づけをする。ただし、浮流ノードの撮影開始時刻における撮影位置は 0 m であることは明らかなので、 $i=0$ のときは $t_i=0, P_i=0$ とする。また、 t が検出されたランドマークの中で最も投入地点から遠くのランドマーク $P_{i_{\max}}$ の検出時刻 $t_{i_{\max}}$ を超えている場合、 t 並びに $t_{i_{\max}-1}, t_{i_{\max}}$ と、 $P_{i_{\max}-1}, P_{i_{\max}}$ を式 1 に対して適用し、 P を算出する。

6. 動作検証

5.2 節で述べた設計は、浮流ノードがマンホールや下水管の継ぎ目を検出する際に Hough 変換を用いた画像処理を用いている。浮流ノードに搭載する CPU のおおよその処理量はマシンコスト、バッテリー容量の面から制限されて

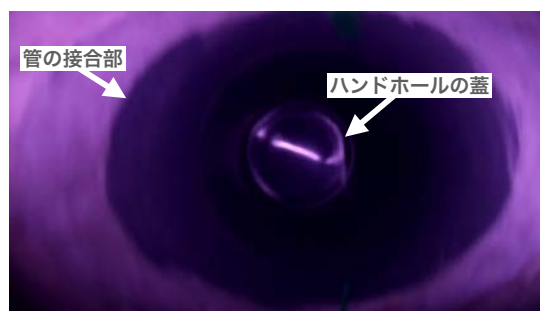


図 7 浮流ノードがハンドホールの裏を撮影した映像フレーム



図 8 図 7 の映像フレームにてハンドホールを検出した様子

おり、この処理負荷が大きくなってしまふと準リアルタイムでの映像撮影位置の紐付けができなくなる、あるいは観測可能距離が大きく制限される。よって本稿では、1 台の浮流ノードが撮影した映像を、計算能力の制限がないサーバへ移してから映像と撮影位置の対応づけをする機能を実装し、この機能が 5 章で述べた機能要件 1 を満たしているか動作検証をすることにした。

6.1 映像と撮影位置の対応づけ機能の実装

浮流カメラが撮影した映像を Linux サーバ内に移し、Linux サーバ内で python を用いて映像と撮影位置の対応づけする機能を実装した。今回の実装ランドマークとしてマンホールのみを検出した。5.2 節で述べた設計に従って各マンホールの通過時刻を記録する。映像内のマンホールあるいはハンドホールの蓋の形状を検出する機能については OpenCV を使って実装した。検出する際には、図 7 に示す管の接合部の円を検出してしまふと、マンホールの真下を画角の中央にとらえる前に円が検出されてしまふので、図 8 のようにハンドホールの蓋の形状のみが検出されるようにあらかじめ Hough 変換における円の検出半径の大きさを調整した。各マンホール通過時刻を記録したのち、ランドマークの通過時刻情報と検査対象の下水管内の各マンホールの位置情報を用いて、5.2 節で述べた設計にしたがって映像内の全てのフレームの撮影位置を算出し記録する。

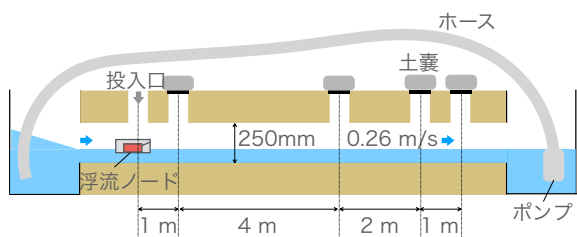


図 9 実験環境

表 1 浮流ノードが撮影した映像の設定

解像度 (サイズ)	フレームレート	コーデック
1080p (1920×1080)	30fps	H.264

6.2 検証実験

図 9 に示すように、地下 400 mm に埋められた口径 200 mm、長さ 9 m のヒューム製下水管内に水をあらかじめ水深 10 cm 程の深さになるまで溜め込んでおき、下流から上流へポンプで水を送り流水を発生させた。また下水管内にはあらかじめ目盛り付きロープを投入地点から取り出し地点まで管内上部に貼り付けておき、後に管内を撮影した映像が何メートル地点を撮影したものか映像を通して目視で確認できるようにした。ポンプの栓を調整し、流速は約 2.6 m/s に設定した。図 11 に示すように浮流ノードはプラスチック製の容器の中に Raspberry Pi 3B と魚眼レンズを搭載したカメラと LED ライトを搭載し、管内を照らしながら映像データ収集する。浮流ノードは表 1 の設定で映像を撮影する。

以下の手順で実験を行った。浮流ノードと制御端末をあらかじめ 2.4GHz 帯 IEEE802.11n のアドホックモードで SSH 接続しておく。この浮流ノードを上流の 1 つ目のハンドホール地点から投入すると同時に制御端末から浮流ノードに対して raspivid コマンドを実行し、カメラ撮影を開始する。カメラの撮影期間は浮流ノードが流れ切るときの時間を十分に上回る 40 秒に設定した。浮流ノードは管内を撮影しながら最下流まで流れ、流れ切ったところで浮流ノードを回収する。この浮流ノードの管内の撮影を 15 回試行する。試行後に浮流ノードが撮りためた 15 回分の撮影映像を Linux マシンに移し、それぞれの映像に対して本稿で実装した映像フレームの撮影位置推定プログラムを実行し、映像内の各フレームの撮影位置を記録した。各試行の映像から $0.5 \times n$, ($n = 0, 1, 2, \dots, 17$) m 地点を推定している映像フレームを確認し、映っている目盛り付きロープを見て、実際に何メートル地点を撮影しているのか確認し記録する。

6.3 実験結果

図 12 は、15 回の試行実験における浮流ノードの推定撮影位置と Ground Truth の関係の推移を表したものである。目印として模擬下水管内のハンドホールの位置 1 m, 5 m, 7

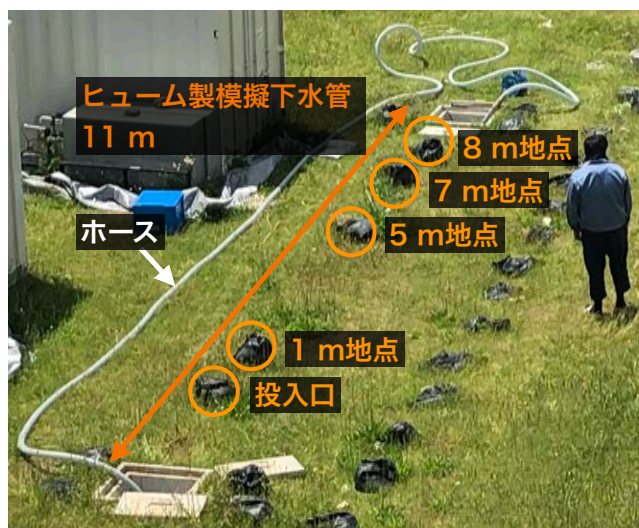


図 10 実験で使ったヒューム製模擬下水管



図 11 実験に使用した浮流ノード

m, 8 m 地点に赤色の点線を引いてある。どの試行においても撮影位置が大きくずれることがなかった。さらに、推定撮影位置が隣のランドマーク間を推定してしまうほどの誤差はないことがわかった。

図 13 は、15 回の試行実験における推定撮影位置の Ground Truth との誤差の関係における推移を表したものである。ハンドホールの位置から遠い地点における推定位置程、位置推定誤差のばらつきが大きくなっていることがわかる。このことから模擬下水管内を流れる浮流ノードは管内の壁や流水の速度変化に影響されて浮流速度に変化があったことがわかる。

また、区間 [1 m, 5 m] 内の映像フレームの推定撮影位置の誤差は全て負の値となっており、Ground Truth よりも手前の地点を推定してしまっている。この原因について述べる。浮流ノードは投入地点からこの区間を浮流する間、流水速度と同等になるまで速度上昇を続けている途中段階であり、1 m 地点付近を通過する時は区間平均速度よりも

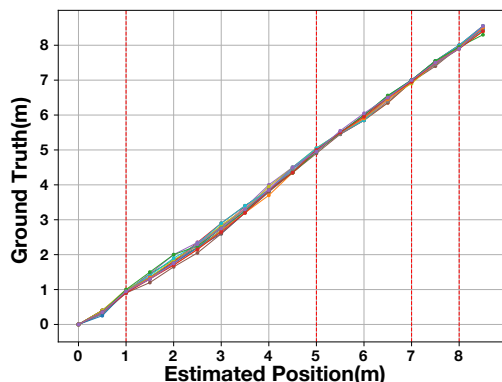


図 12 実際の位置と映像フレームの推定位置との関係

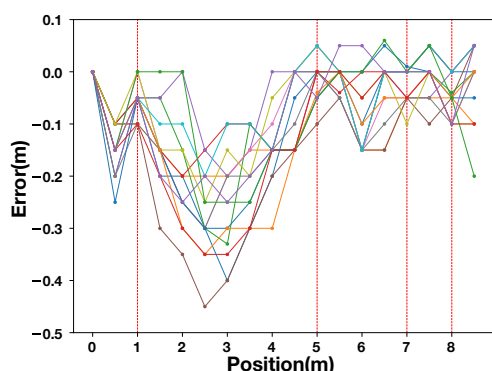


図 13 映像フレーム推定位置の誤差

遅く、5 m 地点付近を通過する時は区間平均速度よりも早くなってしまうと考えられる。これにより区間中央付近を浮流ノードが流れる際には線形補間による推定位置よりも手前の地点を浮流していることが原因であると考えられる。

図 14 は 15 回の試行実験における推定撮影位置の誤差についての CDF を示したものである。この図から、全ての映像フレームの内約 9 割以上の推定撮影位置の誤差が 0.3 m 以内に収まっていることがわかる。

6.4 考察

推定撮影位置における誤差はハンドホール-ハンドホールの区間を超えていないことが確認された。よって本稿で設計・実装した機能は機能要件 1 を満たして動作しているといえる。

今回の実験で利用した模擬下水管においてハンドホールの区間が 2 m 以内である [5 m, 7 m] 区間, [7 m, 8 m] 区間内の撮影位置における推定撮影位置誤差は、図 13 を見ると最大で 0.15 m 以内に収まっていることが分かる。また、下水管の継ぎ目と継ぎ目の間の長さは長くても 2 m であることから、ハンドホールだけでなく下水管の継ぎ目もランドマークとして加えれば、実際の下水管で撮影した浮流ノ

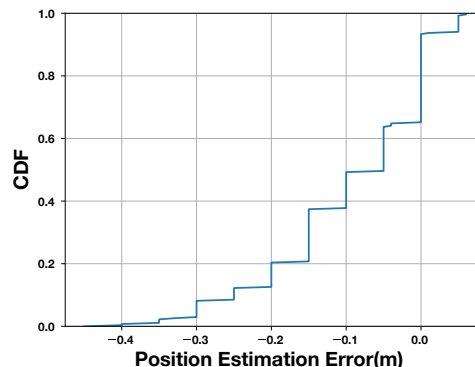


図 14 映像フレーム推定位置の誤差の CDF

ドの撮影位置の誤差は約 0.15 m 程になるといえる。しかしながら、下水管内の障害物への衝突により浮流ノードが一時的に停止してしまい、線形補間による推定撮影位置に大幅な誤差が生じることが予想される。今後これらの障害に対応した撮影推定手法を検討する必要があるといえる。

7. まとめ

本稿では、浮流無線観測機を用いた下水管検査システムにおいて、浮流ノードが撮影した映像と撮影位置の対応づけをするための手法の提案・実装について述べた。映像とその映像の撮影位置の紐付けをする際には下水管内のランドマークを用いて区間内の撮影位置を線形補間により推定する。

浮流ノードの撮影映像の位置を推定する機能を実装し、大学内に敷設された模擬下水管に流水を発生させて、撮影位置推定精度を検証する実験を行った。すると実装した撮影映像の位置推定機能は、下水管の補強工事や、取り替え工事の対象箇所を調べるために必要な撮影位置精度を確保できていることがわかった。また、今後ランドマークにマンホールだけでなく下水管の継ぎ目を加えたうえで、線形補間による撮影位置推定を行えば、障害物などによる流速の大きな変化による影響を無視すれば、推定位置の精度は誤差が約 0.15 m の範囲内に収まることが分かった。

よって今後はマンホールの継ぎ目をランドマークに組み込むため、浮流ノードが継ぎ目を通過する時刻を画像処理により検出する機能の追加実装を検討する予定である。また、実環境において、障害物や、下水管内のひび割れなどといった画像処理のノイズにより浮流ノードがランドマークの通過を検出できなかった場合でも位置推定の誤差を抑えられるシステムの開発も検討する予定である。

参考文献

- [1] 国土交通省, 下水道, “下水道の維持管理,”. http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html (2021/5/7 確認)

- [2] 株式会社東利: 工事事例, 目視検査, http://www.tohri-net.co.jp/works_detail/8/0/0/1/ (2021/5/10 確認)
- [3] 東芝テリー株式会社: 管内検査用カメラ, ハードケーブルカラーカメラシステム, HS3040 <https://www.toshiba-teli.co.jp/products/inspection/scope/hs3040.htm#bkm5> (2021/5/10 確認)
- [4] 株式会社キュー・アイ: 長距離走行型デジタル伝送 TV カメラ装置 PV-2300 <https://www.qi-inc.com/products/snake-camera/> (2021/5/10 確認)
- [5] 関根勇: 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, 月間下水道, vol.34, no.3, pp.55-58, 2011.
- [6] 石原進, 武居悠樹, 劉志, 前田琢磨, 澤野弘明, “下水管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, vol.DPS-172, no.4, pp.1-8, 2017.
- [7] T. Nagashima, et al.: “Measurement of Wireless LAN Characteristics in Sewer Pipes for Sewer Inspection Systems Using Drifting Wireless Sensor Nodes,” IEICE Trans. Commun., vol.E99-B, no.9, 2016.
- [8] 安田智則, 他: “狭下水管内における複数浮流無線カメラからの映像転送プロトコルの設計と実装,” 電子情報通信学会研究報告技術研究報告, vol.119,no.406, SeMI2019-118, pp.79-84, 2020.
- [9] 近本祐介, 他: “浮流無線カメラを用いた下水管検査システムのためのデータ集約システムの設計と実装,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.120, no.315, SeMI2020-46, pp.16-21, 2021.
- [10] Bemri. Visible Light Communication (VLC/Li-Fi) Systems. Accessed: Apr. 12, 2019. [Online]. <https://bemri.org/visible-light-communication.html> (2021/5/10 確認)
- [11] F. Zafari, A. Gkelias and K. K. Leung, “A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies,” in IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, thirdquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2911558.
- [12] M. Shaik. Ultra Wide-Band vs. Wi-Fi A Study and Comparison of the Two Technologies. Accessed: Apr. 12, 2019. [Online]. http://www.academia.edu/4810093/Ultra_Wide-Band_vs._Wi-Fi_A_Study_and_Comparison_of_the_two_technologie (2021/5/10 確認)
- [13] H. S. Maghdid, I. A. Lami, K. Z. Ghafoor, and J. Lloret, “Seamless outdoors-indoors localization solutions on smartphones: Implementation and challenges,” ACM Comput. Surveys, vol. 48, no. 4, p. 53, 2016.
- [14] 川合健斗, 島田彩加, 武居悠樹, 石原進, “無線 LAN 受信信号強度を用いた鉄筋コンクリート製下水管内における自己位置推定に関する基礎検討,” 情報処理学会第 81 回全国大会, vol.1, pp79-80, (2019).
- [15] F. Bellard and ffmpeg contributors: FFmpeg - A complete, cross-platform solution to record, convert and stream audio and video. <https://ffmpeg.org> (2021/5/10 確認)
- [16] 日本ヒューム協会: 技術資料 ヒューム管設計施工要覧 https://www.hume-pipe.org/data/hp_manual_all.pdf (2021/5/10 確認)