

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

堤 悠喜¹ 立花 誠也¹ 近本 祐介¹ 石原 進²

概要：現行の下水管検査には作業時間が長い、費用が高い、危険等の問題がある。これらを解決するため、筆者らは省労力・低コスト・安全な検査が可能な、複数浮流無線カメラを用いた検査システムの開発を進めている。本システムでは、下水管内に放流された浮流カメラが撮影した映像を、いくつかのマンホールに設置したアクセスポイント（AP）を介して無線通信により集約サーバに回収し、映像データを解析して下水管内の障害箇所を検出するほか、現場の作業者に準リアルタイムで映像データを提供する。障害箇所を特定するためには、各映像フレームの撮影位置情報が必要であるが、広く屋外での測位に利用されている GNSS は地下では使えない。本システムでは、浮流カメラの放流地点・AP・マンホール等の既知のランドマークの位置通過時のタイムスタンプと映像フレームのタイムスタンプから撮影位置を推定する方法が検討されているが、この方法に利用されるランドマークの位置情報のうち、放流地点は位置推定の起点であるため、全ての浮流カメラで放流時刻が記録される必要がある。また、検査システムの開発・運用・維持のために複数の浮流カメラや AP などの時刻同期が必要である。撮影位置推定の実現・精度向上および検査システムの利便性向上のために、浮流カメラの時刻同期と放流時刻記録のためのシステムを設計し、プロトタイプ実装により動作を検証した。

1. はじめに

日本の深刻な下水管の老朽化に対応するため、早急な検査・補修・交換が求められている。2020年3月末において、全国の下水道管渠の総延長は約48万kmである。このうち、標準耐用年数である50年を経過した下水管の延長は約2.2万kmであり、総延長の約5%に相当する。この標準耐用年数を経過した老朽管の割合は、10年後には7.6万km（16%）、20年後には17万km（35%）と、急速に増加すると予想されている。また、管路施設に起因した道路陥没事故は、ここ数年は年間約3000件も発生している [1]。

現行の下水管検査手法には作業時間が長い、費用が高い、危険等の問題がある。現行の下水管検査手法として、目視 [2]、管口カメラ [3]、ファイバースコープ [4]、自走式有線ロボット [5] を用いた検査がある。これらの手法は、下水管内をリアルタイムに確認可能であるため、検査の確実性に優れる。しかし、費用が高い、危険などの問題を抱えている。近年、舟形カメラを用いた検査手法 [6][7] も開発されている。この方法は、金銭的・人的コストは低いが、カメラ回収時まで映像を確認できない。

石原らは前述の問題を克服する複数浮流無線カメラを用

いた下水管検査システムを提案している [8]。このシステムでは、下水管内を撮影しながら流れる浮流カメラの映像データをアクセスポイント（AP）が無線 LAN 通信で回収する。このデータはセルラ通信等を介してクラウド上の集約サーバに集められ、作業員は現場でこのデータを閲覧可能である。このシステムでは、検査のために現場に必要な作業は AP の設置と浮流カメラの放流・回収および映像の確認のみである。また、浮流カメラは安価に実装可能である。

この検査システムでは回収した映像データを集約サーバで解析し、損傷箇所を検出する。障害箇所を特定するためには、各映像フレームの撮影位置情報が必要である。しかし、広く屋外での測位に利用されている GNSS や、携帯電話、無線 LAN 基地局からの信号強度による手法は下水管内部では使えない。そこで、位置既知の AP 等からのパケット受信時のタイムスタンプとランドマークを含む映像フレームのタイムスタンプから撮影位置を推定する方法が提案されている [9]。この方法に利用されるランドマークの位置情報と時刻情報の一つに、位置推定の起点となる放流位置と放流時刻情報があるが、放流時刻の具体的な記録方法についてはこれまで開発されていなかった。また、検査システムの開発・運用・維持のために複数の機器の時刻同期が必要である。

¹ 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻

² 静岡大学大学院工学領域

下水道環境では、作業員は衛生・安全上の理由で防水の手袋を装備して作業する。また、浮流カメラは、下水管内を汚水とともに浮流するため、防水カプセルの中に格納されている。このような状態で、作業員が浮流カメラ放流時に浮流カメラの防水カプセルをあけ、浮流カメラを直接操作するのは困難である。このため、下水道環境で浮流カメラを遠隔操作し時刻同期・放流時刻記録させるための工夫が必要である。筆者らは、浮流カメラの時刻同期と放流時刻記録のためのシステムの開発を進めている [10]。

本稿の貢献は以下の2つにまとめられる。

- (1) 撮影位置推定の実現・精度向上および検査システムの利便性向上のために、作業現場で使用する浮流カメラの時刻同期と放流時刻記録のためのシステムを設計した。
- (2) 上記のシステムに関し、プロトタイプ実装により動作を検証した。

以下、2章で時刻同期の手法や技術を紹介する。3章では、石原らが提案している浮流無線カメラを用いた下水管検査システムについて詳細に説明し、検査システムの実用化に向けて残されている課題を述べる。4章では、浮流カメラの時刻同期と放流時刻の記録を可能とするシステムを提案し、5章でこの提案システムのための試作機の実装について説明する。6章でこの提案システムの動作検証について述べ、最後に7章で本稿をまとめる。

2. 時刻同期の手法

2.1 センサネットワークにおける時刻同期技術

センサネットワークの時刻同期における代表的な手法として Reference Broadcast Synchronization (RBS) [11], Timing-sync Protocol for Sensor Networks (TPSN) [12], Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP) [13] が挙げられる。これらの手法では、送信側センサノードの MAC 層でのメディアアクセスに起因する遅延の変動を無視する工夫が組み込まれている。RBS は、送信センサがブロードキャストしたビーコンを各センサが受信した時刻を、受信センサ同士で相互比較することで時刻同期を実現する。TPSN や FTSP は、MAC 層でタイムスタンプを生成することで、RBS よりも高い精度の時刻同期を実現している。さらに、FTSP は MAC 層でタイムスタンプを TPSN よりも高い精度で生成する。この工夫により、FTSP をセンサネットワーク用の無線端末の一つである MICA Mote に実装した結果、 $1\mu\text{s}$ 程度の精度の時刻同期が確認されている [13]。しかし、TPSN や FTSP は MAC 層での実装が必要となる。

2.2 GNSS による時刻同期

Global Navigation Satellite System (GNSS) は、測位衛星から送信される信号をもとに地球上の位置を測定するシ

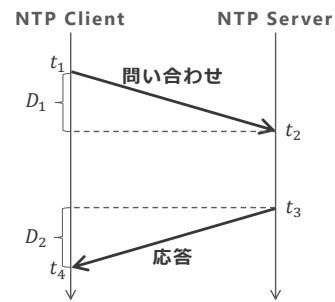


図1 NTPの時刻問い合わせと応答

ステムであるが、時刻同期にも利用されている。測位衛星からの信号を1台のアンテナで受信し測位する単独測位でも $0.1\mu\text{s}$ 程度と高精度な時刻同期ができる [14] が、専用の受信機が必要となり、消費電力も高い。また GNSS 衛星からの信号が届かない場所、例えば室内や地下では使用できない。

2.3 NTPによる時刻同期

Network Time Protocol (NTP) [15] は、インターネットに接続されたコンピュータの時刻同期に広く利用されているプロトコルである。本研究での時刻同期およびその検証では NTP を使用するため、NTP による時刻同期について概要を示す。

NTP version 4 では、ある機器 (NTP クライアント) が別の機器 (NTP サーバ) に対して時刻を合わせに行く場合、図1のように、NTP クライアントが NTP サーバに時刻を問い合わせ、NTP サーバが NTP クライアントに回答する。NTP クライアントは時刻問い合わせのための NTP パケットを時刻 t_1 に NTP サーバに送信する。この問い合わせを時刻 t_2 に受信した NTP サーバは、応答として新たな NTP パケットを時刻 t_3 に NTP クライアントに送信する。NTP クライアントはこの応答を時刻 t_4 に受信する。

NTP クライアントと NTP サーバの時刻ずれを Δ 、NTP クライアントから NTP サーバへの片側遅延を D_1 とすると、 t_1 と t_2 には次のような関係がある。

$$t_1 + \Delta + D_1 = t_2. \quad (1)$$

よって、 D_1 がわかれば Δ を求めることができる。 D_1 と、NTP サーバから NTP クライアントへの片側遅延 D_2 が同じであるとすれば、次のような式で NTP の計算による片側遅延 D が求まる。

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2}. \quad (2)$$

(1) 式、(2) 式より、 Δ は、

$$\Delta = t_2 - t_1 - D = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2}. \quad (3)$$

NTP クライアントは、この Δ だけ自身の時刻をずらすことで、NTP サーバの時刻に合わせることができる。

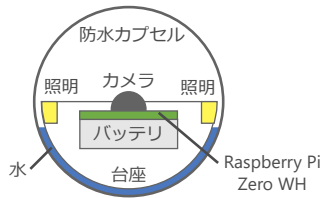


図2 試作浮流カメラの構造

実際には、様々な要因により片側遅延 D_1 と D_2 は同じにはならないことが多い。影響を与える要因としては、サーバ・クライアント間の通信経路が一致しないことによる伝搬遅延の変動や、キューイングや輻輳による遅延の変動、サーバおよびクライアントのスケジューリングなどによるアプリケーション遅延の変動などが挙げられる。

3. 浮流無線カメラを用いた下水管検査システム

本研究で前提とする石原らによる浮流無線カメラを用いた下水管検査システム [8] について、その概要を説明する。図3のように、本検査システムでは、下水管内に放流された浮流カメラが撮影した映像を、いくつかのマンホールに設置したアクセスポイント (AP) を介して無線通信により集約サーバに回収し、映像データを解析して下水管内の障害箇所を検出するほか、現場の作業者に準リアルタイムで映像データを提供する。

3.1 浮流無線カメラの筐体

本検査システムには、防水・耐衝撃性に優れ、安価で、長時間稼働することが可能な浮流カメラが求められる。澤野らは図2のような、魚眼レンズが常に上を向く二重カプセル構造の浮流カメラを設計した [16][17]。図2のように、外側のカプセルに少量の水を入れ、そこに各機器を搭載した内側のカプセルを浮かせる。内側のカプセルには制御用コンピュータとカメラ、照明、バッテリー、姿勢推定のためのジャイロセンサが格納されている。カプセルは表面に傷がつきにくい透明耐熱樹脂製であるため、魚眼レンズカメラによる下水管内映像の撮影を阻害しない。浮流カメラの制御用コンピュータには市販の Raspberry Pi Zero WH を採用し、省電力で稼働できるようにしている。

3.2 複数浮流カメラを用いた映像データ回収プロトコル

口径 200 mm 程度の下水管内での 2.4 GHz・5 GHz IEEE 802.11n 無線 LAN 通信の通信距離は 5 m–10 m 程度にとどまる [18]。この短い通信可能時間の制約を補うため、石原らは、複数の浮流カメラを用いて映像データを回収するプロトコルを開発している [8][19][20]。このプロトコルでは図3のように、浮流カメラが各 AP からの信号を最初に受信できる位置で区切られた区間内の映像データを、複数台

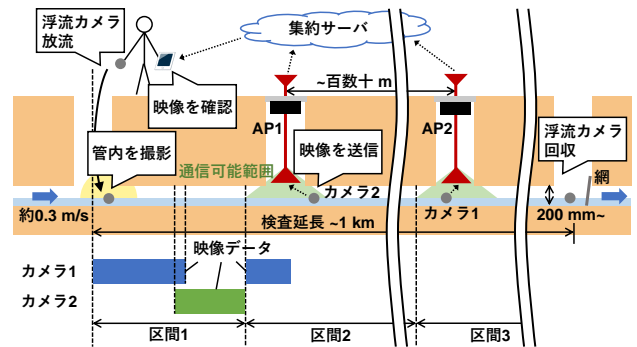


図3 浮流無線カメラを用いた下水管検査システム

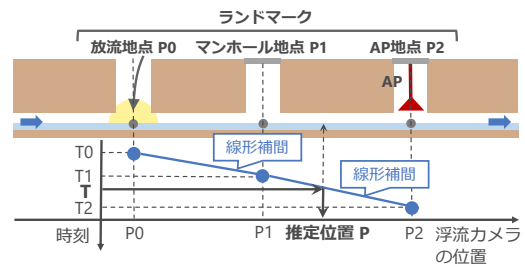


図4 映像フレームの撮影位置推定方法

の浮流カメラで分担して送信する。具体的には、AP が定期的にブロードキャストするビーコンパケットを浮流カメラが検出することで、浮流カメラは AP の通信可能範囲に到達したと判断し、送るべき映像データの選択と送信をする。ビーコンパケットには、AP と集約サーバが回収済みの映像データの区間情報と、ビーコンパケットを送信した AP の識別子、この AP に映像データを送信中の浮流カメラの識別子が含まれている。この映像データの回収済み区間の情報をもとに、浮流カメラは未回収区間の映像データを AP に送信する。また、隠れ端末問題による通信性能の悪化を避けるため、浮流カメラは他の浮流カメラが映像データを送信中であればデータ送信を控える。

3.3 映像フレームの撮影位置推定

本検査システムでは、複数の浮流カメラから AP 経由で回収した映像データを、集約サーバで画像処理等で解析し、下水管内の損傷箇所が写った映像フレームを検出する。このフレームが撮影された位置の情報をもとに損傷箇所を特定する。損傷部の位置の特定を実現するには、下水管内映像の撮影位置推定が必要である。

近本らは、浮流カメラの放流地点・AP・マンホール等の既知の位置からのパケット受信時のタイムスタンプと、ランドマークを含む映像フレームのタイムスタンプから撮影位置を推定する方法を提案している [9]。これら既知の位置とタイムスタンプの関係が得られれば、図4のように、線形補間をすることで各映像フレームの撮影位置を推定できる。

3.4 システムの実用化に向けた課題

3.4.1 機器の時刻同期

一般的に、コンピュータの内部時計は時間経過とともに正しい時刻から少しずつずれる。コンピュータの内部時計は、OSがハードウェアクロック（クォーツ時計）をもとにコンピュータのメモリ上にデータとして存在するシステムクロックを調節している。クォーツ時計は、電圧をかけると一定周期で振動するという水晶の性質を利用して時刻を更新するが、この水晶の品質のばらつきにより、水晶ごとに振動周期にずれが生じ、合わせて時計もずれる。特に、浮流カメラは安価に実装することが望まれるため、浮流カメラのクォーツ時計の進みのずれも大きくなっていくことが予想される。また、安価なコンピュータであれば、そもそもハードウェアクロックが存在しない場合もある。この場合、電源オフだった時間だけコンピュータの時刻が遅れる。

しかし、複数の機器からなるシステムの開発や動作検証にあたっては、全ての機器の時刻が同期していることが望ましい。全ての機器の時刻同期がされていれば、ログから各機器の動作を追跡・検証できる。また、ネットワークに接続されているコンピュータは定期的に他のコンピュータに時刻問い合わせをすることで時刻を修正しているが、本検査システムでは、浮流カメラがネットワークに接続する時間はAPとの通信可能時間のみである。この通信可能時間はなるべく映像データ送信に使いたいため、浮流カメラがネットワークに接続する機会を別に用意するなどの工夫が必要である。

3.4.2 複数浮流カメラの放流時刻の記録

浮流カメラの放流位置・放流時刻情報は、近本らの手法 [9] での映像フレームの撮影位置推定の起点となる情報であるため、記録される必要がある。しかしながら、作業員が浮流カメラを放流した時刻を浮流カメラ自身が得る方法は今まで開発されていなかった。APからのRSSIによるAP直下通過時刻の推定に関しては、[21][22]で下水管内でのRSSI測定実験に基づく検討が行われている。マンホール直下で撮影された映像フレームを検出する方法に関しては [23] で示されている。

4. 時刻同期と放流時刻記録システムの設計

複数浮流無線カメラを用いた下水管検査システムにおいて、作業現場で簡単な操作で防水カプセルを開けることなく全ての浮流カメラの時刻同期と放流時刻の記録を可能とするシステムを設計する。

4.1 本提案システムの機能要件

浮流カメラと制御端末を使用して全ての浮流カメラの時刻同期と放流時刻記録をするために、本提案システムに求められる機能要件を挙げる。

- 時刻同期が完了した浮流カメラを下水に放流するため、時刻同期の完了を浮流カメラから作業員に伝えられる。
- 既に時刻同期が完了した浮流カメラに悪影響を与えることなく、時刻同期が完了しなかった浮流カメラに再度時刻同期させることができる。
- 時刻同期されたタイムスタンプをログに記録するため、放流より前に時刻同期を行う。
- 現場の作業員が手袋をしたままで作業でき、防水仕様の浮流カメラの筐体を開く必要がない。
- 時刻同期が完了した複数の浮流カメラのうち、作業員が放流したい浮流カメラのみに放流時刻の記録を指示できる。
- 放流時刻をできるだけ正確に記録するために、作業員が浮流カメラを放流するタイミングと浮流カメラに時刻が記録されるタイミングを合わせやすいこと。
- 放流したい浮流カメラとは別の浮流カメラに作業員が誤って指示をしてしまう可能性があるため、放流時刻の記録の指示をキャンセルする機能、およびキャンセルするための時間的猶予があることが望ましい。

4.2 本提案システムの全体像

前述の要件を達成するため、以下のように提案システムを設計した。提案する時刻同期、放流時刻記録システムは、本システムと複数の浮流無線カメラに加え、防水で手袋をしていても操作が容易な外部の制御端末から構成される。これを用いて、時刻同期と、放流開始のイベント記録を行う。制御端末ではNTPサーバが動作している。一方、浮流カメラ側では制御端末からのコマンド待ち受け用のサーバプログラムが動作している。制御端末で時刻同期のボタンが押されると、制御コマンドが複数の浮流カメラにアドホックモードの無線LANでブロードキャストされ、これを受けて浮流カメラ側からNTPによる時刻同期が制御端末に向けて行われる。作業員は制御端末の操作で放流する浮流カメラを指定して放流開始コマンドを送る。すると指定された浮流端末にカウントダウン表示がされるので、それにタイミングを合わせて作業員が浮流カメラを放流する。カウント0となったタイミングが浮流カメラ側に記録される。

4.3 制御端末の設計

下水管検査の現場の環境に対応するため、制御端末は、防水・防塵仕様で、作業員が片手で操作できる小型かつ軽量で、手袋を装着していても操作できる必要がある。制御用端末は泥や汚水などで汚れやすいマンホールでの作業で使用されるため、防水・防塵仕様であるものとする。作業員は防水の手袋をして操作するため、なるべく操作が単純であることが望まれる。

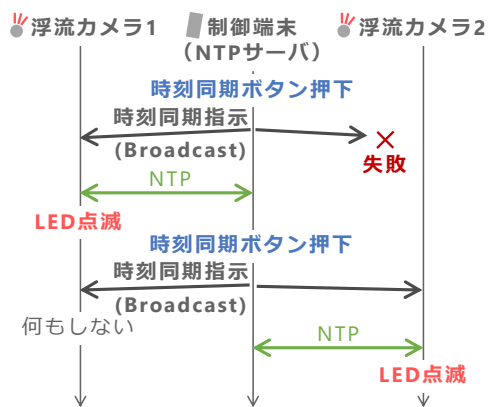


図 5 時刻同期

この制御用端末は無線 LAN インターフェースと、操作ボタン、ディスプレイあるいは LED 等の視覚的インタフェースを有する。浮流カメラには既に無線 LAN 通信用のモジュールが搭載されているため、制御端末は浮流カメラとアドホックモードで無線 LAN 通信をする。制御端末はインターネットへの接続性を持ち、インターネットを介して NTP[15] で全ての AP と時刻同期されている。制御端末から全ての浮流カメラにブロードキャストで一斉に制御メッセージを送信するため、トランスポート層プロトコルには UDP を用いる。

4.4 浮流カメラ側の機能の設計

制御端末からのメッセージの受信などを作業員に伝えるため、浮流カメラに LED 等の視覚的インタフェースを追加する。浮流カメラの防水・耐衝撃性の問題から、外側の防水カプセル表面に取り付けることはできないため、内側の台座表面に取り付ける。例えば、照明用 LED と魚眼レンズが取り付けられている面に照明用 LED とは別の色の LED を取り付けることが考えられる。

浮流カメラ側では、制御端末からのコマンドを待ち受けるサーバプログラムが動いている。このプログラムは、受信したコマンドに応じて、NTP による時刻同期処理の実行、放流時刻の記録、浮流カメラの視覚的インタフェースの操作を行う。

4.5 時刻同期の動作

浮流カメラ放流時に全ての浮流カメラを時刻同期させるための操作は以下の通りである (図 5)。

- (1) 作業員は制御端末と全ての浮流カメラを起動させた後、制御端末の時刻同期用ボタンを押す。
- (2) 浮流カメラは起動後、無線 LAN のアドホックモードでメッセージの到着を待ち受ける。
- (3) 時刻同期用ボタンが押されると、制御端末は時刻同期メッセージをブロードキャストし、各浮流カメラとの時刻同期処理を開始する。

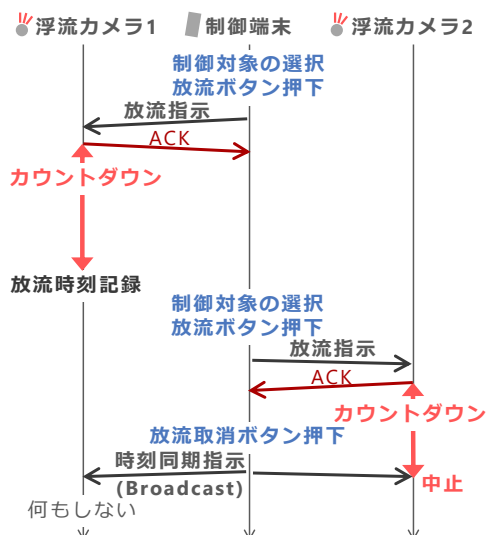


図 6 放流時刻記録

- (4) 各浮流カメラは、時刻同期メッセージを受け取ると、制御端末上で動作している NTP サーバに対して ntpdate などの NTP クライアントコマンドを用いて時刻を問い合わせることで時刻同期を行う。

- (5) 時刻同期が完了すると、各浮流カメラは LED 表示等により、作業員に時刻同期完了を伝える。

一定時間待っても時刻同期が完了しない場合、作業員は制御端末の時刻同期用ボタンをもう一度押す。ただし、浮流カメラは時刻同期完了後、一定の期間は再度時刻同期をしない。これは、時刻同期が完了しているのであれば、再度時刻同期のために時刻を問い合わせ、通信量を増大させる必要がないためである。ただし、浮流カメラの時計の進みは時刻同期完了後から少しずつずれていくため、この時刻ずれが許容できないほど大きくなると推測される時間が経過した場合、制御端末の操作により再度時刻同期を行う。

4.6 放流時刻記録の動作

本提案システムでは以下の手順で浮流カメラの放流時刻を記録する (図 6)。

- (1) 作業員はこれから放流する浮流カメラを選び、放流開始ボタンを押す。
- (2) 浮流カメラは時刻同期完了後、放流開始メッセージの到着を待ち受ける。
- (3) 放流開始ボタンが押されると、制御端末は指定された浮流カメラに放流開始メッセージを送信する。
- (4) 放流開始メッセージを受信した浮流カメラは、放流開始までのカウントダウンを開始し、LED 表示等により作業員にカウントを伝える。
- (5) このカウントが 0 になったとき、作業員は浮流カメラを下水に放流する。
- (6) 浮流カメラは、カウントが 0 になるとその時の自らのタイムスタンプを放流時刻としてログに記録する。

放流開始指示後、作業員が放流したい浮流カメラがカウントダウンを開始しない場合、あるいは作業員が誤って放流開始指示をした場合、作業員は制御端末のカウントダウン中止用ボタンを押す。このボタンが押されると、制御端末はカウントダウン中止メッセージをブロードキャストする。このメッセージを受信した浮流カメラは、カウントダウンの最中であればカウントダウンを中止する。カウントダウン中止後、作業員は放流したい浮流カメラを選び、再度放流開始指示をする。また、放流開始メッセージ受信後に浮流カメラが制御端末に送信する確認応答（ACK）を制御端末が一定期間内に受信できなかった場合、制御端末はACKを受信できるまで一定回数メッセージを再送する。

作業員が誤って放流開始ボタンを連続で押しすぎて、複数の浮流カメラに放流開始メッセージを送信してしまった場合に備えて、カウントダウン中止メッセージはブロードキャストで送信されることとする。他の対処法として、連続で押せないボタンを物理的に用意することや、一度ボタン入力を検出したら一定時間入力を受け付けないように設計することなどが考えられるが、カウントダウン中止メッセージをブロードキャストするほうが実装が簡単である。また、カウントダウン中止メッセージをブロードキャストする設計であれば、放流開始カウントダウンを開始しているが、作業員や制御端末が現在認知できていない浮流カメラのカウントダウンを中止させることもできる。

5. 時刻同期と放流時刻記録システムのプロトタイプ実装

5.1 制御端末のプロトタイプ実装

図7のような、プラスチックケース（縦100×横65×高さ35 [cm]）に Raspberry Pi Zero WH と基板、バッテリーを格納した制御端末のプロトタイプを実装した。制御端末の制御用コンピュータとして、Raspberry Pi Zero WH を使用した。通信には Raspberry Pi Zero WH 内蔵無線 LAN モジュールを使用した。制御端末では Raspberry Pi 用の公式 Linux 系オペレーティングシステムである Raspberry Pi OS が動いている。この OS 上で、Python で実装した制御端末用の時刻同期・放流時刻記録のためのプログラムが動いている。このプログラムは、制御端末の起動と同時に起動する。

制御端末用の基板には、浮流カメラにメッセージを送信するための操作ボタン3つと、メッセージを送る浮流カメラを一意に識別する ID を表示させるための7セグメント LED、この ID を増減し送信先を切り替えるためのボタン1つを搭載したこれらのボタンの入力は、Raspberry Pi Zero WH の GPIO から得た。この入力を前述の制御端末用のプログラムで受け取り、押されたボタンによって時刻同期メッセージ、放流開始メッセージ、放流取消メッセージを浮流カメラに送信する。放流開始メッセージの送信先



図7 制御端末

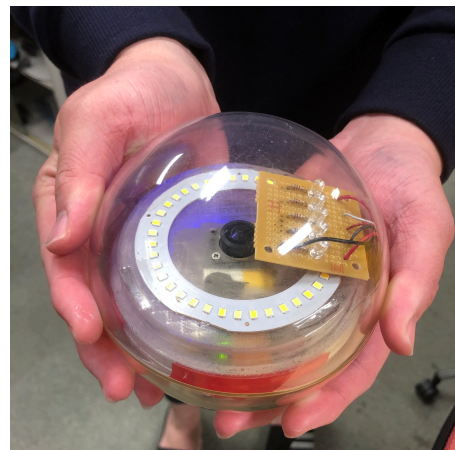


図8 浮流カメラ

の浮流カメラの選択については、7セグメント LED に表示された ID に基づき送信先の浮流カメラを選んだ。この ID は事前に全ての浮流カメラの IP アドレスと紐付けられている。

5.2 浮流カメラのプロトタイプ実装

澤野らが設計した図2を参考に図8のような浮流カメラを試作した。浮流カメラの Raspberry Pi OS 上で、Python で実装した、制御端末からのコマンドを待ち受ける浮流カメラ用プログラムが動作している。浮流カメラ用の基板には、浮流カメラの視覚的インタフェースとして、LED を5つ搭載した。これらの LED の ON/OFF は、浮流カメラ用プログラムから Raspberry Pi Zero WH の GPIO により操作した。カウントダウン表示は、基板の5つの LED により表現した。カウントが n であれば $n-1$ 個の LED を点灯、1つの LED を点滅させる。ただし、カウント0では全ての LED を点灯させる。

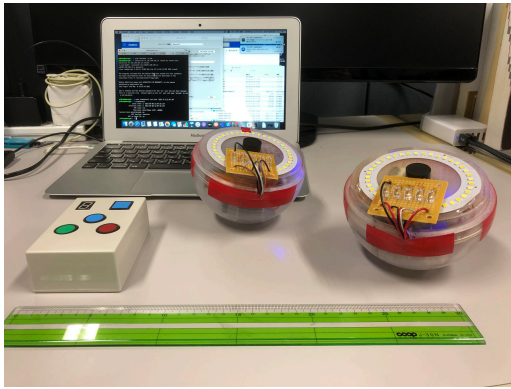


図 9 時刻同期の検証環境

6. 時刻同期と放流時刻記録システムの動作検証

機器間の時刻同期の精度と、浮流カメラの放流時刻が正しく記録されているかを検証する。

6.1 時刻同期の動作検証

図 9 のように、研究室内で、本提案システムの通り、制御端末のボタンを押すことで浮流カメラ相当の機器（以下、単に浮流カメラ）2 台に対して時刻同期メッセージを送信し、浮流カメラ 2 台の時刻同期を行った。無線 LAN 通信には IEEE 802.11n を使用し、チャンネル 1（中心周波数 2.412 GHz）で、アドホックモードで通信した。同一チャンネルを使用する他のアクセスポイントが存在している。本システムによる浮流カメラ 2 台と制御端末の時刻同期精度を調べるため、時刻同期完了の直後に、浮流カメラそれぞれから制御端末に対して NTP により時刻問い合わせを送信させ、制御端末からの応答を受信させた。この応答をもとに制御端末と浮流カメラの時刻のずれと片側遅延を算出し、記録した。具体的には、浮流カメラそれぞれで実際には時刻更新を行わないデバッグモードで ntpdate を実行し、制御端末と NTP パケットをやりとりした。この一連の操作を 10 回繰り返した。

図 10, 図 11 に、複数浮流カメラの時刻同期の完了の直後に計測した、浮流カメラ相当の機器と制御端末の間の時刻ずれと片側遅延を示す。図 10 より、浮流カメラ 1, 2 と制御端末間の時刻ずれの分布は -2ms から 2ms の間である。よって、浮流カメラと制御端末の間の時刻ずれは、おおよそ 4ms 程度の誤差に収まっていると言える。図 11 より、浮流カメラ 1, 2 と制御端末間の片側遅延の分布は 30ms から 40ms の間である。以上より、NTP が実現可能な時刻同期の精度と同程度の時刻同期ができたと考えられる。

6.2 放流時刻記録の動作検証

作業員は、浮流カメラが LED で表示するカウントが 0 になったとき、つまり浮流カメラを放流するべき時刻で浮

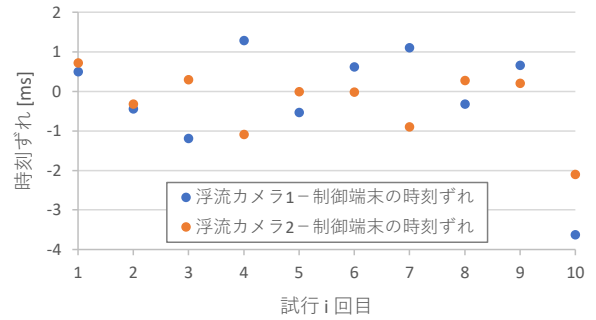


図 10 浮流カメラと制御端末間の時刻ずれ

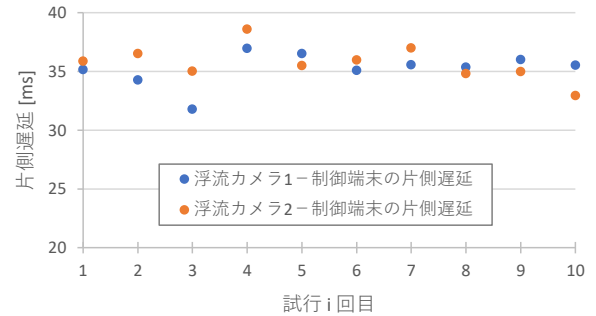


図 11 浮流カメラと制御端末間の片側遅延

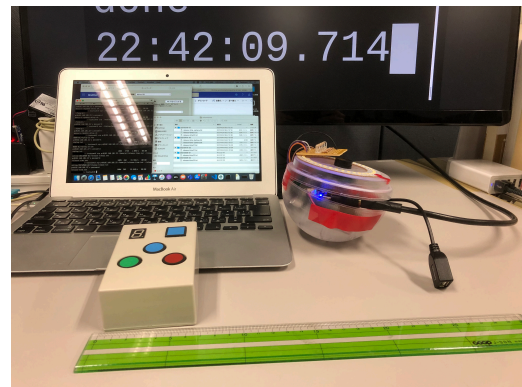


図 12 放流時刻記録の検証環境

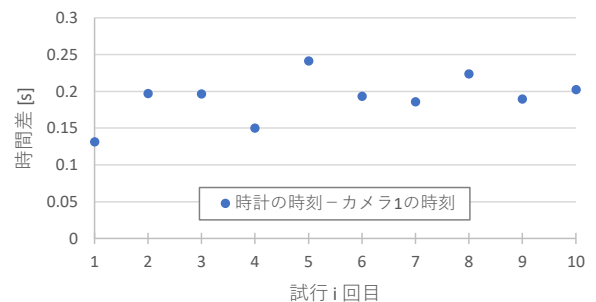


図 13 時計の時刻と浮流カメラの時刻の時間差

流カメラを放流する。浮流カメラで動いている浮流カメラ用プログラムは、自身が保持しているカウントが 0 になるとその時の自らのタイムスタンプを放流時刻として記録する。そこで、放流時刻が正しく記録されていることを、浮流カメラを放流するべき時刻と、浮流カメラ用プログラムが記録した放流時刻のずれを計測することで検証した。

図 12 のように、研究室内で検証を行った。浮流カメラの LED がカウント 0 を示した時刻を得るため、カメラ (240 fps) で浮流カメラの LED の変化と時計と一緒にビデオ撮影した。この時計は、浮流カメラとケーブルで接続された 60 fps のモニタに浮流カメラの内部時計の時刻を表示させたものである。撮影した映像から、放流までのカウントが 0 のときの映像フレームを LED の点灯を参考にして目視で探し、この映像フレームに写った時計の時刻を、浮流カメラを放流するべき時刻とした。

(1) 浮流カメラに対して制御端末で放流開始メッセージを送信する。

(2) 放流開始メッセージを受信した浮流カメラの LED の変化を、時計と一緒にカメラでビデオ撮影する。

この一連の作業を 10 回行い、浮流カメラ上で動くプログラムが記録したタイムスタンプと、映像フレームに写った時計の時刻を比較した。なお、無線 LAN 通信には IEEE 802.11n を使用し、チャンネル 1 で、アドホックモードで通信した。

図 13 に、作業員が浮流カメラを放流するべき時刻と、浮流カメラ上で動くプログラムが記録した放流時刻を計測し、比較した結果を示す。比較した結果、浮流カメラを放流するべき時刻と、浮流カメラ用プログラムが記録した放流時刻のずれの分布は 0.1s から 0.3s の間である。よって、おおよそ 0.3s 以下のずれで放流時刻が記録されていると言える。放流時刻記録のずれ約 0.3s は流速 0.3m/s 程度の下水管内では誤差 0.09m 程度に相当する。よって、実用上問題のない範囲で複数浮流カメラの放流時刻記録ができたと考えられる。

7. まとめ

短時間・低コスト・安全な検査を可能にする複数浮流無線カメラを用いた下水管検査システムにおいて、撮影位置推定の実現・精度向上および検査システムの利便性向上のために、浮流カメラの時刻同期と放流時刻記録のためのシステムを設計し、プロトタイプ実装により動作検証を行った。本システムでは簡単な操作の制御端末を用いた無線 LAN 経由での処理により、浮流カメラの防水カプセルをあけることなく時刻同期と放流時刻の記録が可能である。研究室内での動作検証の結果、浮流カメラと制御端末間の時刻ずれは、数 ms 程度の誤差に収まっていることが確認できた。また、浮流カメラを放流するべき時刻と、浮流カメラ用プログラムが記録した放流時刻のずれは 0.5s 以下となり、流速 0.3m/s 程度の下水管内では誤差 0.15m 程度に収まることが確認できた。よって、実用上問題のない範囲で複数浮流カメラの時刻同期と放流時刻記録ができたと考える。今後は、実験用模擬下水管および実下水管環境での動作検証を予定している。

参考文献

- [1] 国土交通省. 下水道:下水道の維持管理. 入手先 <<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd.sewage.tk.000135.html>>. (参照 2021-03-26).
- [2] 株式会社東利. 調査・分析 | 事業内容. 入手先 <<http://www.tohri-net.co.jp/field/survey-analysis/>>. (参照 2021-01-31).
- [3] 株式会社カンツール. 管口カメラ 一覧. 入手先 <<https://kantool.co.jp/product.category/manhole-camera/>>. (参照 2021-02-01).
- [4] 東芝テリー株式会社. カメラスコープ HS3040 / HS3100. 入手先 <<https://www.toshiba-teli.co.jp/products/inspection-camera/hs3000.htm>>. (参照 2021-02-01).
- [5] 株式会社キュー・アイ. 管内検査カメラ. 入手先 <<https://www.qi-inc.com/products/snake-camera/>>. (参照 2021-02-01).
- [6] 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.
- [7] SGC 下水道センター. ストリーム・カメラ システム. 入手先 <<http://www.wink-sgc.co.jp/pdf/stream.pdf>>. (参照 2021-01-31).
- [8] 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. In *2020 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 384-389. IEEE, 2020.
- [9] 近本祐介, 立花誠也, 堤悠喜, 石原進. 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, pp. 16-21, 2021.
- [10] 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映像データの撮影時刻と位置情報の管理方法. 第 83 回全国大会講演論文集, Vol. 2021, No. 1, pp. 213-214, 2021.
- [11] Jeremy Elson, Lewis Girod, and Deborah Estrin. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, Vol. 36, No. SI, pp. 147-163, 2002.
- [12] Saurabh Ganeriwal, Ram Kumar, and Mani B Srivastava. Timing-sync protocol for sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 138-149, 2003.
- [13] Miklós Maróti, Branislav Kusy, Gyula Simon, and Akos Lédeczi. The flooding time synchronization protocol. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 39-49, 2004.
- [14] 土屋淳, 辻宏道. GNSS 測定の基礎. 社団法人 日本測量協会, 第 1 版, 3 2012.
- [15] Jim Martin, Jack Burbank, William Kasch, and Professor David L. Mills. Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification. RFC 5905, June 2010.
- [16] 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機体の照明設計と映像回転補正の実装. 画像電子学会研究会講演予稿, Vol. 17.04, pp. 87-90, 2018.
- [17] 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 & コンピュータグラフィックス). 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 43, No. 9, pp. 21-24, 2019.
- [18] Taiki Nagashima, Yudai Tanaka, and Susumu Ishihara. Measurement of wireless LAN characteristics in sewer

pipes for sewer inspection systems using drifting wireless sensor nodes. *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 99, No. 9, pp. 1989–1997, 2016.

- [19] 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 B, Vol. 100, No. 12, pp. 1004–1013, 2017.
- [20] 武居悠樹, 西島達哉, 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のための改良と実装. 情報処理学会, 研究報告モバイルコンピューティングとパーベイスンシステム (MBL), Vol. 2019, No. 41, pp. 1–6, 2019.
- [21] 武居悠樹, 住山真, 西島達哉, 劉志, 石原進. 直径 200mm 下水管内における浮流無線 LAN 端末の詳細位置推定. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2018 論文集, Vol. 2018, pp. 166–171, 2018.
- [22] 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. 第 81 回全国大会講演論文集, Vol. 2019, No. 1, pp. 79–80, 2019.
- [23] 清水竣太, 前田拓磨, 澤野弘明, 石原進. 下水管映像分割のためのマンホール検出方法の提案. 第 80 回全国大会講演論文集, Vol. 2018, No. 1, pp. 459–460, 2018.