

小口径下水管検査のための浮流型観測機の音波による位置モニタリングシステムのプロトタイプ実装

丸山 健斗¹ 近本 祐介¹ 堤 悠喜¹ 石原 進²

概要: 日本では下水管の老朽化が進んでおり, 早急に検査し, 補修, 交換する必要がある. そこで筆者らは, 小口径下水管を対象として浮流型観測機を用いた低コスト, 省労力の検査システムの開発を進めている. このシステムでは, まず, 検査員が浮流型観測機を管内に投入する. 観測機は管内を浮流しながら撮影を行い, あらかじめ一定間隔でマンホール直下に設置された中継装置に無線 LAN を介して映像を送信する. 中継装置はセルラ網等によりサーバへと映像を集約する. 検査員はこの映像を閲覧することで検査を実施する. 本システムでは, 検査の進捗確認のため, 管内を浮流する観測機の位置を検査員に通知する機能が重要となる. しかし, 既存研究において直径 200–250 mm の小口径下水管内では, 2.4–5 GHz 帯の IEEE802.11 無線 LAN による通信可能範囲が 8 m 程に限られることがわかっている. そのため, 無線 LAN を用いた位置推定手法では, AP の通信可能範囲外において観測機の位置を推定できない. 筆者らはこれまでの研究で, 小口径の管内では減衰が小さいという音波の特徴を利用した音波による位置推定手法を提案している. 1 台の PC に有線接続した 2 台のマイクとスピーカを用いた実験では, 実験可能最大距離である 19 m まで, 誤差 40 cm 程度での位置推定が可能であることを確認している. 本稿では, 同手法に基づいて, 下水管内を浮流する端末の位置を連続的に推定するシステムのプロトタイプの完装と動作実験について報告する. 小口径下水管内での実験の結果, 浮流速度 0.10 m/s で移動する条件で実験可能距離 19 m まで概ね誤差 2 m 以内で推定でき, カルマンフィルタ等の併用によりさらなる精度向上が可能な見通しが得られた.

Prototype Implementation of the Drifting Position Monitoring Using Sound Waves for the Drifting Observer for Sewer Pipe Inspection

KENTO MARUYAMA¹ YUSUKE CHIKAMOTO¹ YUKI TSUTSUMI¹ SUSUMU ISHIHARA²

1. はじめに

近年, 日本では深刻な下水管の老朽化が進んでおり, 早急な検査, 補修, 交換が求められている. 令和 2 年度においては, 全国に敷設された下水管の総延長が約 49 万 km に達しており, そのうち約 5% が, 国土交通省が定める標準耐用年数である 50 年を超過している [1]. 標準耐用年数を超える下水管の延長は今後も急速に増加すると予想され, 検査が間に合わず, 下水管の老朽化に起因した道路陥

没事故等につながる恐れがある. 現行の検査手法として, 目視 [2], ファイバースコープ [3], 有線自走式ロボット [4] 等を用いた検査手法がある. 目視検査は, 直径 800 mm 以上の下水管に対して行われ, 検査員が管内に入り, 直接目視によって異常箇所を確認する. この方法では, 異常箇所の詳細な位置を確認でき, 小さな異変でも発見できるが, 管内に充満する硫化水素等の有毒ガスやゲリラ豪雨による管内の急激な水位上昇による事故のリスクが高い. ファイバースコープやカメラ付き有線自走式ロボットを用いる手法では直径の狭い管でもリアルタイムに映像検査を行うことができ, 検査員への危険もない. しかし, これらは有線接続のためケーブルの長さによって一度に検査できる範囲が制限されるほかケーブルの取り回しが煩雑である.

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

² 静岡大学学術院工学領域
College of Engineering, Academic Institute, Shizuoka University

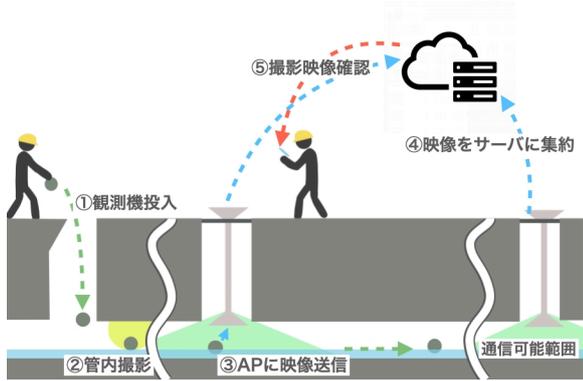


図 1 浮流無線観測機を用いた下水管検査システム

そこで、石原らは図 1 に示すように浮流型無線カメラを用いた、小口径下水管を対象として検査の低コスト、省力化のためのシステムを提案している [5]。本システムでは、検査員が下水管内にカメラや照明、バッテリーを搭載した浮流型観測機を投入する。観測機は管内の流れに沿って、上流から下流へと浮流する。マンホール直下には AP（アクセスポイント）が設置されており、AP は観測機が無線 LAN による通信可能範囲内まで到達した時、撮影した映像データを受け取る。そして、映像サーバへと中継する。集約された映像データは管内の位置情報と紐付けられ、検査員がサーバにアクセスし、映像を閲覧することで管内の状態や異常箇所を確認することができる。この手法では検査員が管内に入る必要がなく、危険性が少ない。また、観測機にはケーブルが不要で、検査範囲の制限がなく利便性も高い。

本システムでは、検査の進行状況を把握するために、観測機の現在の浮流位置を推定し、検査員に通知する機能が重要となる。しかし、AP が 2.4-5 GHz 帯の IEEE802.11 無線 LAN によって通信可能な範囲は直径 200-250 mm の下水管内において、最大約 8 m と限定される [6]。対してマンホールの間隔は数十 m あることが一般的である。従って、無線 LAN 通信の信号強度や信号到着時刻等を利用した位置推定技術では、検査範囲全体で観測機の位置を把握できない。

筆者らは、直径の狭い下水管内では地上と比較して長距離に伝播する性質のある音波を利用し、その伝播時間から観測機の位置を推定する手法を提案している。これまでの研究では、直径 200 mm の実験管内において、実験可能な最大距離である 19 m まで、位置推定が可能であることを確認している [7]。この結果は 1 台の PC に有線接続された 2 台のマイクとスピーカを用いた推定で得られたものであり、マイクとスピーカの位置は固定された状態であった。本稿では、下水管内を浮流しながら周期的に音響信号を送信する観測機端末と検査開始位置で信号を受信し、位置推定を行う位置推定端末からなる位置推定システムの実装と動作確認について報告する。また、実験結果に基づいて実環境により近い状態で位置推定が可能な範囲について検討

する。

以下、2 章では、非 GNSS 環境における位置推定技術等の関連技術を紹介し、3 章では想定する浮流型観測機の位置通知機能について詳細を説明する。4 章では、本稿で作成したプロトタイプの様と動作実験について説明する。5 章で、本稿のまとめを述べる。

2. 関連技術

本研究は、筆者らの提案する浮流型観測機を用いた下水管検査システムの検査対象となる範囲全体で浮流型観測機の位置推定を行い、推定結果を検査員に通知可能とすることを目的としている。位置を推定するのはいくつかのマンホールに一時的に設置される AP であり、AP はその推定結果をデータ集約用のサーバに送信する。上流側、下流側両方の AP で位置を推定することを想定する。下水管内において、少なくとも AP を設置するマンホール間距離（多くは 40 m 以下）の中間まで位置推定が可能な手法が必要である。浮流型観測機に位置取得のためのセンサ等の装置を取り付ける場合、観測機の浮流のために軽量であることに加え、低コストであることが望まれる。このような制約から非 GNSS 環境において多く用いられる既存の位置推定手法の多くが本稿で想定する環境では適用できない。本章では、その理由について説明する。さらに、本稿で利用する音響測位に関する関連研究を述べ、音響測位が小口径の下水管環境において効果的である理由も説明する。

2.1 非 GNSS 環境における位置推定手法

地中深くに埋設された管内では、GNSS 等の人工衛星からの電波を利用した位置推定が行えない。そのような非 GNSS 環境において、一般的に用いられる手法として Wi-Fi や Bluetooth 等の電波の伝播時間や信号強度を利用した位置推定手法がある [8]。川合らは、浮流型観測機が撮影した映像の撮影位置推定を目的に下水管内での IEEE802.11n 無線 LAN を用いた通信の受信信号強度から位置推定する手法を提案している [9]。しかしながら、直径 200-250 mm 程度の小口径下水管内では、2.4-5 GHz 帯の IEEE802.11 無線 LAN 電波通信の見通しが悪く、通信可能範囲が約 8 m 以下にとどまり、十分な範囲で位置推定を行うことができない。レーザー光を利用した測距手法では、レーザー光の減衰が小さいため長距離でも高精度の測距が可能である [10]。これを観測機あるいは AP に取り付けて測距する手法も考えられるが、20 m 程度まで測距可能な出力を持つレーザー測距計は重量が 200 g 程度と重く、高価であるため不適である。また、AP に搭載する場合は、浮流する観測機に対して常にレーザー光を照射するような機構が必要となるほか、観測機上の受光器の動きも調整する必要がある。これは、システムのコスト増加や複雑さにつながる。

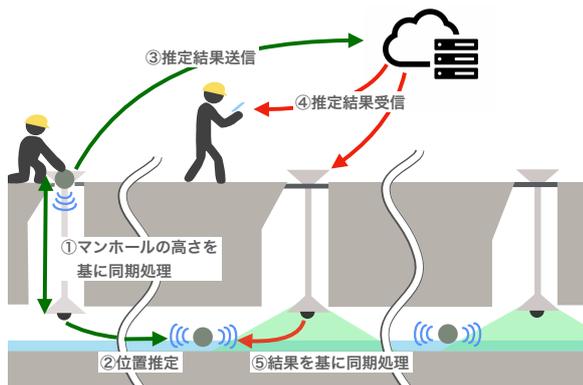


図 2 位置通知機能の利用イメージ

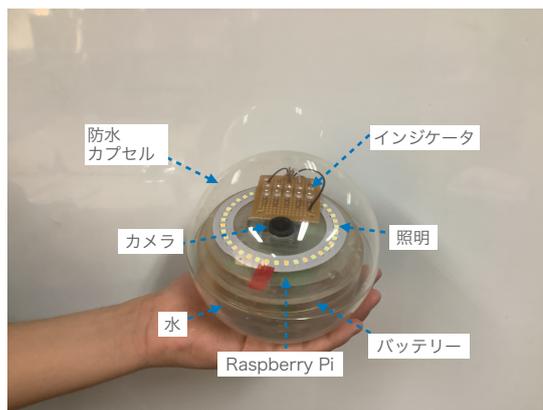


図 3 浮流型観測機の構成

2.2 音響測位手法

本稿では、音波を利用して位置推定する音響測位手法について検討する。音波は電波と比較して、伝播速度が非常に遅く、コンピュータクロックでも容易に到達遅延が計測でき、高い精度での測距が可能である。海中では電波よりも減衰が少なく長距離に伝播するため、無人海中探査機や海中生物の生態調査のための小型センサ等に用いられる [11][12]。[12]の研究では、魚の行動を追跡するために周期的に音響信号を発信する小型ピンガーを用いている。これはピンガーと受信機間での送信周期の同期を取ることによって信号の伝播時間から位置を推定する。この同期ピンガ手法は低コストかつ簡易的に実装が可能であり、利便性が高い。さらに、ピンガ自体も水中重量 2.7g と軽量である。しかしながら、音響測位は水中での活用事例が多く、筆者らの知る限り下水管環境においては活用された事例はない。

2.3 小口径管内における音波の伝播性質

音波は管口径に対して波長が十分に長ければ、自由空間中の球面波のように伝播するのではなく、反射等によって平面波のように伝播する性質がある。これにより自由空間よりも減衰が少なく長距離まで伝播する。この性質を利用して電波を用いずに長距離通信する伝声管という技術がある [13]。直径 4inch の真鍮製伝声管では、約 400ft の全長でも多少の誤りはあるものの明瞭に音声を取り取ることができるという報告もされている [14]。本稿の下水管検査システムは直径 200mm 程度の小口径下水管を検査対象としており、水位が半分ほどある環境は、上述の伝声管環境と類似しており、100m 程度まで音響信号を送信できると考えられる。筆者らの既存研究では、水位が約 5cm ある場合の方が、水のない場合と比較して、長距離でも明瞭に音響信号を認識でき、推定精度も向上することが確認できた。したがって、音波を用いて位置推定を行うことにより、電波よりも長距離での測距が可能であり、本稿の目的に対して効果的であると考えられる。

3. 音波を用いた小口径下水管内の端末位置推定

3.1 浮流型観測機を用いた

検査システムで求められる位置通知機能

本節では、浮流型観測機を用いた検査システムにおいて本研究が想定する下水管内浮流観測機の位置通知機能の利用イメージと要件について説明する。図 2 にその利用イメージを示す。浮流型観測機の位置を AP が推定するために、まず既知の位置において AP と観測機間で信号の初期送信時刻の同期を取る必要がある。その後、観測機は音響信号の送信をしながら浮流する。AP は観測機が送信する音響信号を逐次受信し、その伝播時間から現在の浮流位置を推定する。推定した結果は、サーバに送信され、検査員はサーバにアクセスすることで常に観測機の現在位置を知ることができる。また、後続の AP はこれまでの位置推定結果をもとに、観測機との同期をとり、前方の AP の位置推定可能な範囲外での推定処理を行う。これにより、検査範囲全体での位置推定が可能となる。これらの位置推定処理を行う間、AP と観測機は管内の映像撮影とそのデータの送受信を行う。

上述の機能を満たすためには、観測機の位置推定を少なくともマンホールの間隔距離まで行える必要がある。マンホール間の距離は現場での聞き取りから多くの場合 40m 以下であることがわかっているので、20m 付近まで位置推定できることが目標となる。追加の機材として観測機にはスピーカ、AP にはマイクと温度計が必要となる。これらの機材は小型で安価なものが市販されており、システムのコストを大幅に増加させることなく実装が可能である。浮流型観測機は図 3 に示すようにカメラや照明を搭載し、防水カプセルに覆われた構成を想定している [15]。管内のキズやズレ等の異常は管の上部に集中していることに着目し、観測機カプセル内の二重構造部分に水を入れてカメラが常に上向きになるような構造となっている。また、管内は撮影のための十分な光量が確保できないため、照明と電力確保のためのバッテリーも搭載する。電力量が大きいとバッテ

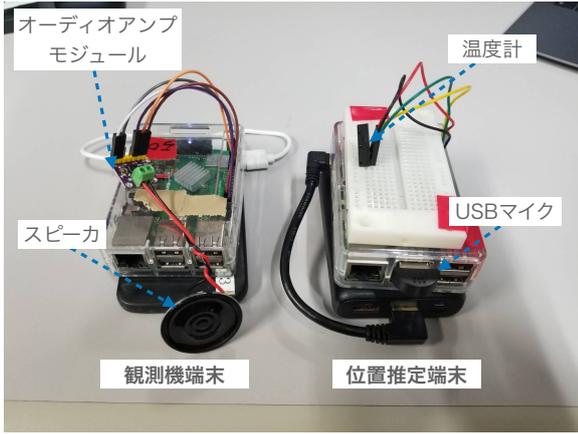


図 4 プロトタイプ端末

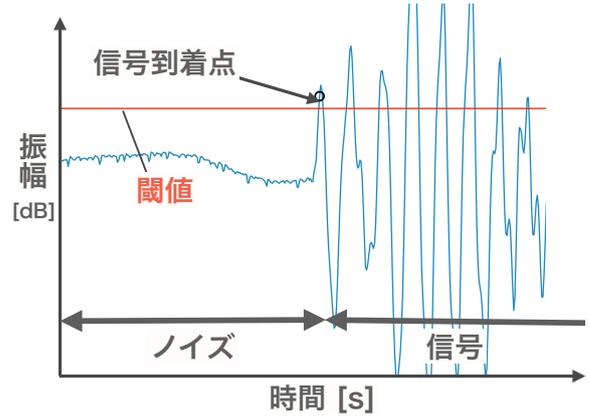


図 5 信号の検出方法

りもより大容量のものが必要になり、重量の増加につながる。そのため、観測機にスピーカを取り付ける場合、低電力での音量確保やカメラへの映り込み防止を考慮する必要がある。

3.2 音波の伝播時間を基にした端末位置推定手法

本節では、音波の伝播時間を基にした浮流端末の位置を推定する手法についてその原理について説明する。

● 推定距離の算出方法

まず、既知の距離 d において、受信端末と送信端末を固定しておく。受信端末では、最初に受信した信号の受信時刻 t_0^R から最初の音響信号の送信時刻 t_0^S を求める。この t_0^S は、音速 v を用いて、

$$t_0^S = t_0^R - \frac{d}{v} \quad (1)$$

と表される。

送信端末は任意の送信周期 τ で信号を送信しており、端末間の距離が変われば、音響信号の伝播時間も変化していく。ここで、 i 番目の受信信号の受信時刻を t_i^R とすると、音波が端末間を伝播する時間 Δt_i は、

$$\Delta t_i = t_i^R - t_0^S - \tau i \quad (2)$$

となる。

i 番目の信号が送信された時の端末間の距離 s_i は以下の式によって求めることができる。

$$s_i = \Delta t_i v \quad (3)$$

● 信号の検知不足への対策

(2) 式から、一度信号を検知できなかった場合、伝播時間の推定値に大きな誤差が起きることがわかる。受信端末が n 個の信号を受信できず、時刻 T_{i+n+1} において新たに信号を受信したとする。この時、

$$T_{i+n+1} = t_0^S + \tau(i+n+1) + s_{i+n+1}/v \quad (4)$$

となる。

検知できなかった信号の前後の二つの信号の受信時間差を $\Delta T = T_{i+n+1} - T_i$ とすると、距離 s_{i+n+1} は次式で表される。

$$s_{i+n+1} = (\Delta T - \tau(n+1)) \cdot v + s_i \quad (5)$$

(5) 式を n について解くと、

$$\begin{aligned} n &= (\Delta T - (s_{i+n+1} - s_i)/v)/\tau - 1 \\ &= (\Delta T - u \cdot \Delta T/v)/\tau - 1 \\ &= ((1 - u/v) \cdot \Delta T)/\tau - 1 \end{aligned}$$

となる。ただし、 u は送信端末と受信端末間の相対速度であり、 $u \ll v$ である。信号の抜けた回数 n は、

$$n = \lfloor (\Delta T/\tau) \rfloor - 1 \quad (6)$$

となる。(6) 式から、 n を求め、(5) 式に代入すれば、 $i+n+1$ 番目の信号受信時の距離 s_{i+n+1} を求めることができる。

4. プロトタイプの完装と動作実験

4.1 プロトタイプの完装

本稿で想定する位置通知機能では、検査開始から終了まで連続的に浮流型観測機の位置推定を行う。そのため、浮流しながら音波による位置推定が可能であるか確認する必要がある。そこで、図 4 のような、浮流しながら周期的に音響信号を送信する観測機端末と、信号を受信し 3.2 章で示した手法により位置推定を行う位置推定端末からなるシステムのプロトタイプを実装した。後者は AP に相当する。本節ではこのプロトタイプの仕様について説明する。

4.1.1 使用機材

AP および浮流観測機に相当する端末は、Raspberry Pi 3B+ をベースに作成した。観測機端末には、小型スピーカ (RS PRO, 754-2090) とオーディオアンプモジュール (SODIAL, Max98357) を取り付けた。小型スピーカの性能は最大音圧レベル 104 dB、定格出力は 1 W で、直径 36 mm、高さは 4.8 mm である。このスピーカには十分な音量を確

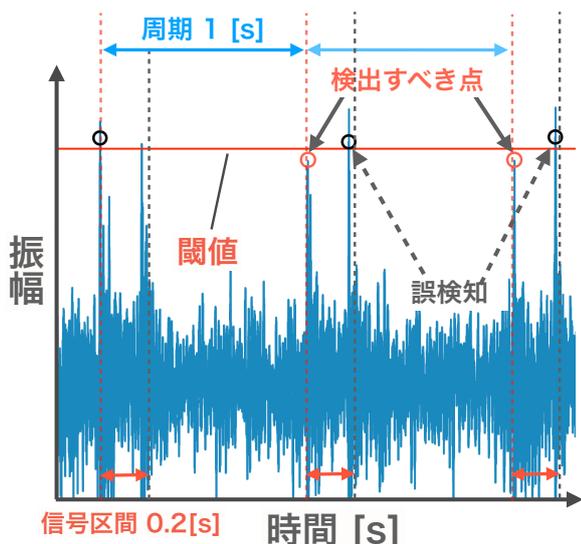


図 6 信号の誤検知の例

保するために、カプセルで覆う等の防水加工は行っていない。オーディオアンプモジュールは Raspberry Pi 3B+からのデジタル信号をアナログ信号に変換する機能を有する。これらはコストが低く、観測機が浮流するのに十分軽量である。また、位置推定端末には小型 USB マイク (Adafruit, 3367) と温度センサ (Pimoroni, COM1700) を搭載した。温度センサの性能は計測精度 $\pm 0.5 [^{\circ}\text{C}]$ である。両端末とも下水管内に設置するため、電源は充電電池から供給する。

4.1.2 機能

本稿で実装したプロトタイプ機能について詳細に説明する。観測機端末は浮流開始から終了までの間、 τ 周期で音響信号を送信し続ける。この観測機端末の送信周期は位置推定端末において既知であるものとする。位置推定端末は、図 5 のような波形を受信しており、サンプル値が設定した閾値よりも高くなる点を信号到着時刻とする。位置推定端末の起動時には、温度センサからの値を基に音速を補正する処理が行われる。位置推定端末が閾値を超える最初の信号を検出するとその送信時刻を算出し、その後、信号を検出する度に (3) 式から、位置を推定する。位置推定端末では、信号を一度検出した場合、既知の送信周期 τ と微小時間 ϵ を基に、一定時間 $\tau - \epsilon$ の間は信号判定を行わない。これにより、前後の信号の間に交じるノイズの誤検知を防いでいる。

4.1.3 位置推定誤差の要因

本手法において、誤差の要因となる因子について説明する。

送信周期のずれ

式 (2) は、観測機端末が正確な周期で信号を送信することを前提としている。この送信間隔の正確さは、観測機端末のコンピュータクロックの精度に依存する。これは、1 周期ごとに送信周期が $\pm \tilde{\tau}$ ずれるとすると、位置推定の誤差 e^D は

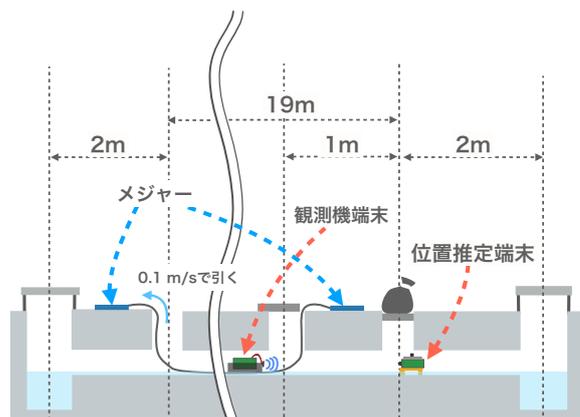


図 7 実験環境

$$e^D = \pm \tilde{\tau} v i$$

となる。したがって観測機端末に対応する周期のずれは

$$\tilde{\tau} = \pm \frac{e^D}{v i}$$

となる。

音速を約 340 m/s、位置推定端末が送信周期 1 秒で、20 m 地点まで 70 回程度信号を受信したとすると、この要因による許容できる推定値の誤差を 0.10 m とした時、許容できる周期ずれは、0.004 ms となる。

音波の減衰

位置推定を行う端末間の距離が遠くなるほど、音響信号の減衰は大きくなる。図 6 にこの誤差が起きる実例を示す。この図では、音源と位置推定端末の距離を 18 m 程度離し、音源から長さ 0.2 秒間の音響信号を 1 秒周期で 3 回送信した時の位置推定端末の受信波形を示している。位置推定端末が検出すべき点は信号区間の始端部分であるが、図内の 2 回目、3 回目の信号受信時には、音響信号の減衰により始端部分が閾値を超えていないことがわかる。その結果、スピーカの通電が途切れた時に発するノイズを信号として認識している。これが位置推定の誤差につながる。

温度

音速 v は温度に依存し、 $v = 331.5 + 0.61T$ の式で求める。温度に $\pm \tilde{T} [^{\circ}\text{C}]$ の誤差があり、音波の伝播時間が Δt の時、推定位置の誤差 e^T [m] は、

$$e^T = 0.61 \Delta t \tilde{T}$$

となる。これは、使用した温度センサの精度から $\tilde{T} = \pm 0.5$ とすると、10 m 地点では、 $e^T = 0.009$ [m] となる。

4.2 動作実験

プロトタイプによって位置推定が可能な距離や精度を検

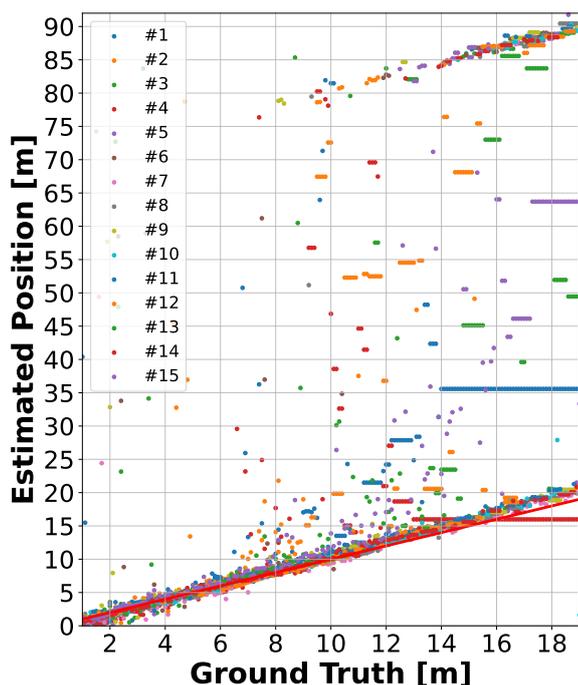


図 8 直径 200 mm 塩化ビニル管内位置推定の結果

証するために、下水管内において実験を行った。本章では、その方法や結果について述べる。

4.2.1 実験方法

実験は大学内の地中（管底 400 mm）に敷設された直径 200 mm、延長 23 m の塩化ビニル製管内で行った（図 7）。実験管に、1 m 間隔で 20 個設けられた縦穴のうち右端のものに位置推定端末を設置した。観測機端末を最初、位置推定端末の左隣の縦穴に設置しておき、初期送信時刻の推定を開始させた。下水管内には約 5 cm の水を張り、観測機端末は両端にメジャーがついた容器に入れて浮遊させた。これを観測機の音響信号に合わせて 10 cm ずつ、引っ張ることで流速 0.1 m/s で浮流させた。これにより、1-19 m までの間隔で位置推定実験を行った。これまでの研究で実際の下水管内での観測機の流速は 0.3 m/s 程度であることがわかっているが、今回の実験では観測機の実際の位置を正確にするため、それよりも遅い流速を設定した。実験中、両端の縦穴以外は、土嚢を被せることで地中と同等の環境を模擬した。

観測機端末は 1 秒ごとに、1,760 Hz、長さ 0.2 秒の正弦波音響信号を送信する。この信号の音量は音源から 5 cm 離して騒音計で計測した音圧の最大値が 100 dB となるように調整した。位置推定端末では、サンプリング周波数 44.1 kHz で録音をした。信号受信判定のための閾値の設定にあたり実験管内を一度録音し、この波形からノイズを誤検知しない程度の値に閾値を設定した。4.1.2 章で説明し

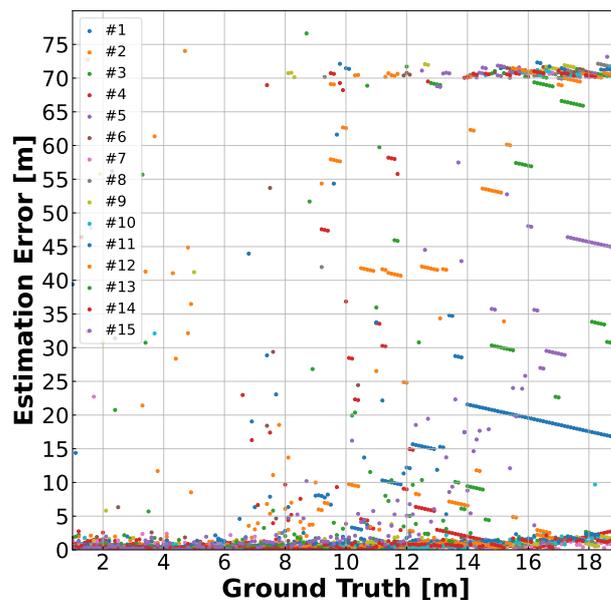


図 9 位置推定結果の誤差

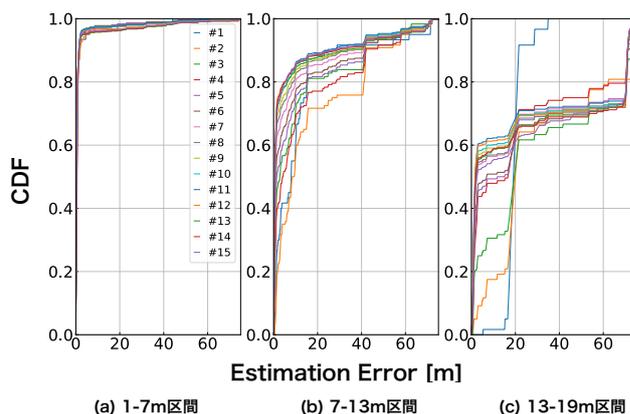


図 10 位置推定の誤差の CDF

(a)1-7 m 区間, (b)7-13 m 区間, (c)13-19 m 区間

た、 ϵ は 0.01 s とした。距離の推定処理は、録音後のデータに対してオフライン処理で行った。同様の条件で 15 回の動作実験を行った。

4.2.2 実験結果

図 8 に 15 回の動作実験により、推定された距離と真値の関係を示す。同色のプロットは 1 度の試行で得られた結果である。図中の赤線は、推定誤差が 0 となる基準線であり、プロットが赤線に近いほど、誤差が少なく推定ができていくことになる。同じ推定値が連続している部分が見えるが、これは、信号を受信できなかった時間帯は以前に推定した結果を単純に保持しているためである。この連なりが途中で途切れている部分は、何度か信号を検知できなかった場合でも、再び信号を検知し、位置推定を再開できていることがわかる。2 回の試行においては、14 m 付近か

ら全く信号を検知できなくなることがあった。

図9に、推定誤差と真値の関係を示す。また、端末間距離の違いと誤差の分布の関係を示すため、図10に各区間(1m-7m, 7m-13m, 13m-19m)での推定誤差のCDFを示す。二つの図から、推定誤差の大部分は2m以下に収まっていることがわかる。推定誤差が2m以下となるのは、全体のうち、71.5%である。誤差70m付近にはいくつかのプロットが集中的に分布していることもわかる。図11に、ある一度の試行で観測機端末がそれぞれ(a)6m, (b)12m, (c)18m地点付近を浮流している時に位置推定端末が録音した音声の波形を示す。縦軸は受信波形の最初のピーク値を1とした相対値で表している。(a), (b)においては、正確に音響信号の始端を検出できているが、(c)では、3回目の信号を検出できず、4回目の信号区間の始端ではなく、後方にある信号の極大点(スピーカノイズ)を検出してしまっている。

4.2.3 考察

位置推定結果で得られた誤差の要因としては4.1.3章にあげた因子が考えられる。位置推定端末は通常であれば、信号の始端を検知しているが、信号が減衰し、所望信号の始端では閾値を下回るにもかかわらず、スピーカの通電が途切れる時に発する電気的なノイズ音が閾値を上回ることによって4.2.2章で述べたような誤検知が起きている。この誤検知によって検知する時刻が信号の長さ約0.2秒分遅れ、これによって推定結果の誤差は70m程度になる。各試行における誤差のいくつかは70m付近に分布しているのはこれが要因であると考えられる。これらの誤差は観測機のおおよその浮流速度0.3m/sを考慮すると明らかに大きな誤差である。そのため、前回の推定結果と比較して明らかに大きな誤差となった時は、前回の推定結果を保持するように変更すると、推定誤差は減少すると考えられる。また、4.2.2章で述べた14m付近から信号を検知できなくなったケースでは、スピーカが水面に接してしまい、十分な音量が確保できなかったことが原因と考えられる。他のケースでも、遠距離では信号が閾値を下回り、認識できないケースがいくつか見られた。これらは、今回利用した信号が1,760Hzであることを考慮して、ローパスフィルタをかけ、ノイズを排除した状態で閾値を下げると防ぐことができると考えられる。以上の結果から、19m付近までは、誤差2m以内で、検査員への浮流型観測機の位置通知が可能であり、観測機が浮流する場合でも音波による位置推定が有効であるといえる。

5. まとめ

本稿では、浮流型観測機を用いた小口径下水管検査システムにおいて音波の伝播時間を利用した端末位置推定システムの完装と実験結果について報告した。以前の報告では、1台のPCに有線接続された2台のマイクとスピーカを下

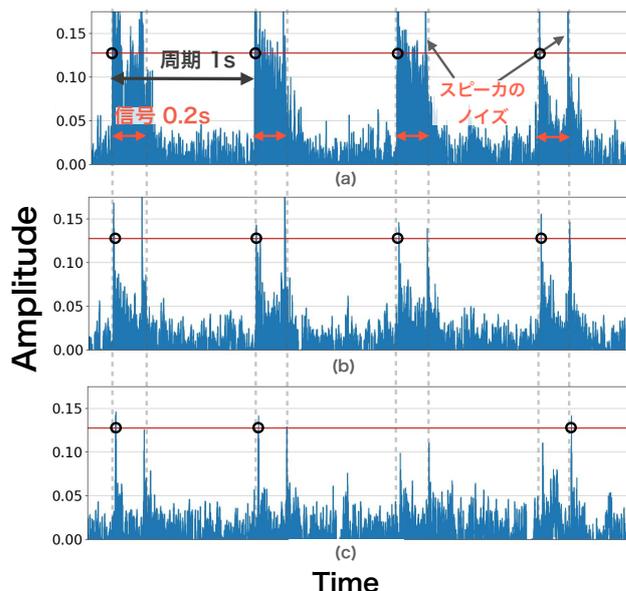


図11 位置推定端末の録音波形
(a)6m地点, (b)12m地点, (c)18m地点

水管内に固定した条件での実験により、同システムにおける位置推定精度を明らかにしたが、本稿において報告したプロトタイプシステムでは、音源とマイクは別の機器上にあり、音源を載せた浮流型観測機を移動させながら測定を行っている。直径200mmの小口径下水管における実験の結果、実験可能な最大距離19mまで音響信号を受信でき、推定結果のフィルタリングをしない状態で誤差2m程度で推定が可能であることがわかった。ただし、移動速度より推定される位置の範囲等の情報を利用し、カルマンフィルタやローパスフィルタを適用することにより、誤差を軽減できる見込みがある。実環境においては、浮流速度が速くなることや管壁の劣化や木根、ゴミ等の障害物があること、ノイズ特性が下水管の設置場所によって変化すること等の要因が推定可能距離に影響を与える可能性がある。今後実環境での検証を行う予定である。浮流型観測機へのスピーカの搭載方法や信号検知方法の改良等にも取り組む予定である。また、推定可能距離を延長するために、複数のAPで協調して位置推定を行う等の対策を検討している。

謝辞

本研究は科学科研究費補助金21K18746の助成に基づくものである。

参考文献

- [1] 国土交通省: 下水道, 下水道の維持管理, https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html (2022/5/7 確認)
- [2] 市川建設株式会社: 下水道管路施設の点検・調査「視覚調査」とは?, 土木と下水道メンテナンス企業, <https://ichikawa-kensetsu.com/post-1521/>

- (2022/5/7 確認)
- [3] 東芝テリー株式会社: ハードケーブルカメラシステム, AS7850 <https://www.toshiba-teli.co.jp/products/inspection-camera/as7850.htm>
(2021/12/20 確認)
- [4] 株式会社キュー・アイ: 管内検査カメラ, <https://www.qi-inc.com/products/snake-camera/>
(2021/12/9 確認)
- [5] 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.
- [6] 石原 進, 澤野 弘明: “無線浮流型観測機による省力型下水管検査: 小口径下水管内無線通信と映像撮影技術”, 検査技術, Vol. 24, No. 3, pp. 57–64 (2019).
- [7] 丸山 健斗, 近本 祐介, 堤 悠喜, 立花 誠也, 石原 進: “音波による小口径下水管内における浮流型観測機の位置推定に関する検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 121, No. 333, pp. 70–74, 2022.
- [8] 趙 晨, 竹添 明生: “AOA 方式を利用した屋内測位システムとその事例紹介,” 一般社団法人日本建設機械施工協会誌, Vol. 71, No. 4, pp. 45–50, 2019.
- [9] 川合 健斗, 島田 彩加, 武田 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.
- [10] オプテックス・エフエー (OPTEX FA): 距離センサ, 各種製品,
https://www.optex-fa.jp/products/dst_sensor/dt50/index02.html#series_default_go
(2022/5/21 確認)
- [11] T. Maki, T. Matsuda, T. Sakamaki, T. Ura and J. Kojima: “Navigation Method for Underwater Vehicles Based on Mutual Acoustical Positioning With a Single Seafloor Station,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 38, No. 1, pp. 167–177, 2013.
- [12] 韓 軍, 宮本 佳則, 浜田 悦之, 中村 善彦: “魚の行動解析のための同期法超音波ピンガー追跡システム,” 日本水産学会誌, Vol. 61, No. 3, pp. 369–374 1995.
- [13] 阪上 公博: “伝声管 (連載企画 音の博物館)” 日本音響学会誌, Vol. 64, No. 4, pp. 261, 2008.
- [14] E. A. Eckhardt, et al.: “Transmission of Sound Through Voice Tubes”, Technologic Papers of the Bureau of Standards, Vol. 21, No. 333, pp. 163–193, 1926.
- [15] 澤野 弘明, 清水 竣太, 國保 有香, 石原 進: “下水管スクリーニング検査のための浮流型カメラと映像処理に関するプラクティスの報告,” 情報処理学会論文誌, Vol. 3, No. 2, pp. 22–31, 2022.