

浮流型無線カメラによる下水管検査のための音ビーコンを基にした位置追跡手法：
インパルス応答測定に基づいた実現

メタデータ	言語: ja 出版者: 電子情報通信学会 公開日: 2023-12-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 丸山, 健斗, Pham V., Thanh, 立蔵, 洋介, 石原, 進 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/0002000148

浮流型無線カメラによる下水管検査のための 音ビーコンを基にした位置追跡手法

インパルス応答測定に基づいた実現

丸山 健斗[†] Thanh V. Pham^{††} 立蔵 洋介^{††} 石原 進^{††}

[†] 静岡大学大学院総合科学技術研究科 〒432-8651 浜松市中区城北 3-5-1

^{††} 静岡大学学術院工学領域

E-mail: †{maruyama.kento.17,pham.van.thanh,tatekura.yosuke,ishihara.susumu}@shizuoka.ac.jp

あらまし 日本に敷設された下水管の老朽化が進んでおり、低コストで簡易的に検査が可能な手法が求められている。そこで、筆者らは浮流型カメラを用いた検査システムを提案している。このシステムでは、観測機が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。中継装置はサーバへと映像を集約し、検査員がこの映像を閲覧することで検査が実施できる。このシステムでは、検査の進捗確認や映像と位置情報の紐付けのためにカメラの浮流位置を追跡する手法が重要となる。筆者らはこれまで管径が狭い管内で、電波と比較して長距離に伝播する音波を用いた音ビーコンを基にした長距離位置追跡手法を提案してきた。以前の手法では、2つの信号間の相関や遅延を算出できる相互相関法を用いて信号到着時刻を測定したが、その推定精度に課題があった。そこで、ノイズ耐性、推定精度向上を目的に、インパルス応答測定に基づいた信号検知手法の利用を試みた。直径 200 mm、全長 19 m の塩化ビニル製管内での録音データを用いた実験により、実験最大距離の 19 m まで 0.1 m 以下の誤差で測位が可能であることを確認した。

キーワード 下水管検査, センサーネットワーク, 音響測位, インパルス応答計測

A Sound Beacon-Based Object Tracking Method for Sewer Pipe Inspection Using Drifting Wireless Cameras Realization Based on Impulse Response Measurement

Kento MARUYAMA[†], Thanh V. PHAM^{††}, Yosuke TATEKURA^{††}, and Susumu ISHIHARA^{††}

[†] Faculty of Engineering, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, 432-8651 Japan

^{††} College of Engineering, Academic Institute, Shizuoka University

E-mail: †{maruyama.kento.17,pham.van.thanh,tatekura.yosuke,ishihara.susumu}@shizuoka.ac.jp

1. ま え が き

現在日本には、総延長約 49 万 km の下水管が設置されており、そのうち国土交通省が定める標準耐用年数を超過した管は約 3 万 km (総延長の約 6%) に及ぶ。この標準耐用年数を超える管の数は今後も急速に増加していく見込みである [1]。このように膨大に設置された下水管の全路線を、限られた予算で全て検査することは非常に困難である。そこで、より詳細な検査を行う前に、簡易かつ低コストで管内の状態を確認し、検査区間を絞り込める検査手法が求められている。

既存の下水管検査手法として、目視やファイバースコープ [2]、自走式有線ロボット [3] 等による検査がある。目視検査では、人が直接管内に入ることによって詳細な検査が可能であるが、管内には硫化水素等の有毒ガスが充満している可能性があり、人体へのリスクが伴う。また、ファイバースコープや自走式有線ロボット等の機材はカメラやロボットが有線接続されており、一度に検査可能な距離がケーブルの長さに制限されてしまう。これでは、検査にかかるコスト、所要時間が多くなってしまう。このように、既存の検査手法には、所要時間やコストの面で課題がある。

そこで、石原らは、小口径の下水管を対象として検査の省力化、低コスト化を目的に、浮流型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 [4] (図 1)。このシステムでは、検査員が下水管内にカプセル状の浮流無線カメラを投入する。無線カメラは、照明やバッテリー等の機材を搭載しており、上流から下流へと浮流しながら管内を撮影できる。いくつかのマンホール直下には、事前に AP (アクセスポイント) が設置されており、無線 LAN による通信が可能な範囲にカメラが到達した時に、AP が映像を受け取り、サーバへと中継する。サーバ内では、管のずれやひび、木の根の侵入等の異常箇所が自動検出され、検査員はこの映像から管内の状態を確認できる。この手法では、検査員がマンホール内に入る必要がなく、身体リスクが少ない。また、ケーブルが不要で比較的安価に実施可能なことから利便性が高い。

本システムでは、検査の進捗状況の確認や映像と位置情報の紐付けのために管内の浮流カメラの位置を追跡できる技術が重要となる。しかし、これまでの実験から、筆者らの検査対象であり、日本に最も敷設されている規格である直径 200 mm–250 mm の塩化ビニル管内では、2.4 GHz–5.0 GHz 帯の IEEE802.11n の無線 LAN を用いて通信を行った場合、通信可能範囲が最大約 8 m に限定されることがわかっている [5]。これに対して、マンホールの設置間隔は通常数十 m あることが一般的である。したがって、一般的な位置推定技術である GPS や無線 LAN 通信の信号強度 [5] や信号到着時刻を利用した位置推定技術で、検査範囲全体において浮流型観測機の位置を正しく測定できない。

筆者らは、これまで、直径の狭い下水管内では、地上と比較して長い距離を伝播する音波を利用して、浮流カメラの位置を長距離で追跡する手法を提案している。[6] の研究では、筆者らが提案してきた位置追跡手法のノイズ耐性向上を目的に、信号検知の方法として 2 つの信号間の相関を評価し、遅延を算出できる相互相関法を適用した。本手法の評価実験では、塩化ビニル製の直径 200 mm、全長 19 m の実験管内に、0.1 m/s の一定速度で浮流しながら、決められた周期で音の信号を送信する送信機と受信機に相当するマイクを設置して音源を取得した。この音源に対して位置推定処理を行い、19 m までの範囲で平均誤差 2.6 m の下で位置推定できることを確認した。

しかしながら、上述の相互相関法を適用した位置推定手法では、効果的な精度向上が得られなかった。この手法では、相互相関法の入力となる 2 つの信号の形状が類似しているほどより高精度な伝播時間の取得が可能である。相互相関法での 1 つの入力は受信信号であり、その評価対象となるもう一方の信号には元の送信波形や初期位置での受信波形、直前に受信した信号波形を利用することが考えられる。しかし、受信機と送信機間のお互いの距離の変化でも、反響音の影響や音場の変化により信号波形が著しく異なる管内環境では、受信信号の評価対象とする信号の選定が困難であった。また、実験では、試験的に得られたノイズの周波数帯域と使用スピーカーの性能を考慮して、比較的狭帯域の 1700 Hz–1800 Hz へと変化するチャープ信号を利用した。これは、信号の周波数を基に信号検知を行うような手法では、検知に十分な周波数帯域ではなかったと考えられる。

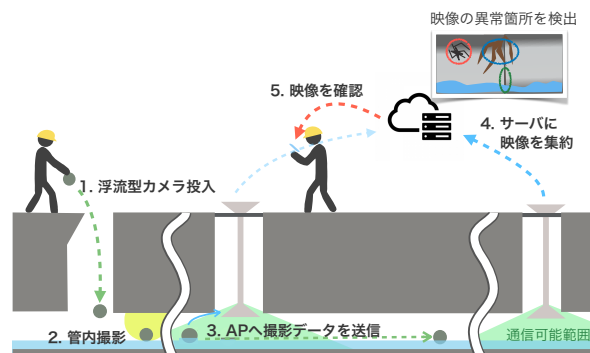


図 1 浮流型無線カメラを用いた下水管検査システム

そこで、本稿では、インパルスを時間軸上で引き伸ばすことで時間と共に周波数が上昇または下降する正弦波信号である Swept-sine 信号を利用したインパルス応答測定に基づく位置追跡手法を提案する。また、直径 200 mm 実験管内での実験による基礎性能評価の結果を報告する。

以下、2 章では、関連する音響測位手法や狭管内での音波伝播特性の研究について紹介し、3 章では、インパルス応答計測に基づいた位置推定手法について詳しく述べる。4 章では、本手法の評価のために行った基礎評価実験について報告する。5 章では、本稿のまとめを述べる。

2. 関連研究

本章では、水中、埋設管内等の環境で音響測位を行う技術や直径の狭い管内での音波の伝播特性を示した先行研究について説明する。

2.1 既存の音響測位技術

水中においては、電波の減衰が大きいため、比較的長距離まで伝播する音波を用いて自立型無人潜水機 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 等の位置推定を行う技術が研究されている。[7] では、通常の AUV と比較して電力やコスト、ハードウェアサイズの制限が多い小型 AUV への搭載を目的として、小型かつ省電力で測位可能な位置推定システムを提案している。この手法では、地上に設置した単一の音響信号送信機と AUV に搭載したマイクアレイの間を伝播する音響ビーコンの一方移動時間を基に距離や方位角等の情報を取得する。同手法では、マイクアレイ上の複数のマイクで信号を受信した後、受信信号と送信信号である Swept-Sine 信号との間で畳み込みを行う。この演算により、得られた出力は、送信信号と受信信号の位相が最も一致する時刻で最大となり、伝播遅延が得られる。この伝播遅延と既知のビーコン送信周期から、ビーコンの一方移動時間を取得できる。複数のマイクから得られた一方移動時間をもとに、平均的に距離を推定する。同手法は、単一ビーコン送信機とマイクアレイのみからなる安価でシンプルな構成で実装でき、利便性が高い。また、受信信号と既知の送信信号との間のマッチングをとる手法は本稿で用いるインパルス応答計測に基づく位置推定手法に類似しており、筆者らの環境でも効果的であると考えられる。

下水管内において、音響エコーを用いて検査ロボットの自己

位置を推定するセンシング技術が研究されている [8]。この研究では、検査ロボットにマイクとスピーカを搭載し、反響音を基に、自己位置推定を行っている。同手法は、既知の位置にある複数の音波の反射面（管の両端やマンホール、接続管等）からの反響音をインパルス応答計測に基づいて検知し、その伝播時間から確率的にロボットの自己位置を推定する。この方法は、有線接続やスピーカ、マイク以外のセンシング機材が必要なく、ロボットの機動性確保やコストの減少につながる。同手法の評価のため、全長 28 m の管内に 2 m の接続管がある実験環境で行われた実験では、推定された確率分布のピーク位置と実際のロボット位置が完全に一致する精度で測位可能であることが確認されている。全長 75 m 程度の下水管環境を再現したシミュレーション実験でも、ロボット位置の推定精度が上述の実験と同程度であることを確認している。しかし、反響音と直接音を比較すると、反響音の伝播距離は単純に 2 倍であり、受信時の信号対雑音比 (SNR) は小さくなる。反響音を利用した同手法では、実環境で下水管上を走る車両のノイズや水流ノイズの影響が大きな誤差につながる可能性がある。筆者らのシステムでは、浮流カメラを浮流させるために、測位用の追加機材がより軽量で、電力消費が少ないことが好ましい。そのため、本研究では、浮流カメラにスピーカのみを搭載し、スピーカから送信される音響ビーコンの直接波を利用して、長距離測位を行うことを前提とする。また、上述の研究では、センシング時に検査ロボットが一時停止してから音響信号を送受信する前提であるが、筆者らの環境では、浮流カメラがセンシング時に一時停止することはできない。そのため、ドップラー効果による音響測位精度への影響なども検証する必要がある。

2.2 狭管内での音波の伝播特性

音波は下水管のような、音波の波長に比べて十分に小さい直径をもつ管内を伝播するとき、自由空間中のように球面波として伝播するのではなく、平面波のように伝播する性質がある。このため、減衰が小さく、自由空間中と比べて遠くまで伝播する。この性質を利用して音声で長距離通信を可能とする伝声管という技術がある。[9] では、伝声管内での音波伝播距離を試験的に調査している。この研究では、直径が 4 inch (約 10 cm) の真鍮製伝声管で 400 ft (約 122 m) 程度まで多少の聞き誤りがあるものの音声を明瞭に伝えられることが報告されている。

[10] では、ガス管や水道管等を音波を利用してセンシング、モニタリングすることを目的に、管路内での音波の伝播特性モデルを提案している。論文では、実際に空気で満たされたアクリルパイプと水で満たされたスチールパイプ内で実験を行い、伝播特性モデルの精度を検証している。特に、直径 50 mm の空気で満たされたアクリルパイプで行った実験では、音波の減衰が 1 dB/m 程度であることを確認している。このように、音波の減衰が小さい狭下水管内では、伝播距離が制限されてしまう電波を利用した位置推定手法等と比較して、長い距離まで位置推定が可能であると考えられる。筆者らが行った予備実験では、実環境の直径 200 m の下水管内で 110 m 程度まで音響ビーコンを聞き取ることができ、同程度の距離までは位置推定が可能であると考えられる。

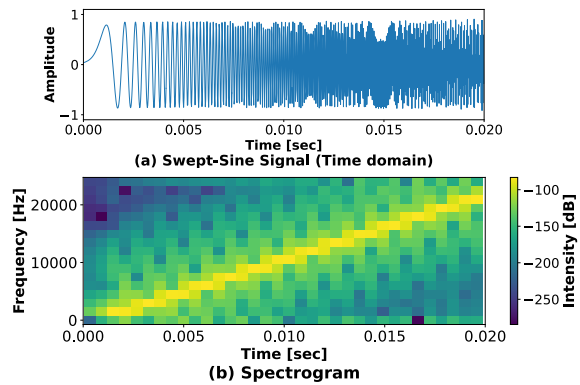


図 2 Swept-sine 信号の例

3. インパルス応答計測に基づく位置推定の原理

本章では、一般的なインパルス応答計測の手法について紹介し、次にその手法を応用して、位置追跡に適用する方法について説明する。

3.1 インパルス応答計測

離散時間における受信信号 $r[k]$ は、送信信号 $s[k]$ とインパルス応答 $h[k]$ の畳み込みによって、以下の式で表せる。

$$r[k] = s[k] * h[k] = \sum_{j=0}^k s[j]h[k-j] \quad (1)$$

ここで、 k は離散時間を表す。この節では、上述のインパルス応答 $h[k]$ を計測する方法について説明する。インパルス応答は、単位インパルスを入力したときの出力といえる。しかしながら、現実的には、スピーカ等の音源からこのようなインパルス信号を出力することは困難である。そこで、エネルギーの大きい信号をシステムに入力し、逆畳み込みによって伝達関数を推定し、そこからインパルス応答を得るクロススペクトル法が使われる [11]。

システムの伝達関数 $H[\omega]$ を求める逆畳み込みの式は、

$$H[\omega] = \frac{R[\omega]}{S[\omega]} \quad (2)$$

と表せる。ここで、 ω は離散周波数、 $R[\omega]$ 、 $S[\omega]$ はそれぞれ、 $r[k]$ 、 $s[k]$ の周波数領域での表現である。上式により得られた伝達関数を逆フーリエ変換することで、時間領域でのインパルス応答 $h[k]$ が得られる。

インパルス応答計測の入力信号としては、MLS (Maximum Length Sequence) 信号や IRS (Inverse Repeated Sequence) 信号、時間に伴って周波数が線形的に変化する Swept-Sine (Time Stretched Pulse, TSP とも呼ぶ) 信号等が用いられる [12]。Swept-Sine 信号はインパルスを時間軸上で引き伸ばしたものである。Swept-Sine 信号は一定時間内で大きなエネルギーを持っているので、この信号を用いたインパルス応答測定は、比較的ノイズ耐性が高い。本論文では Swept-Sine 信号を用いてインパルス応答を測定することとする。ここで、Swept-Sine 信号は周波数領域で以下の式で表される。

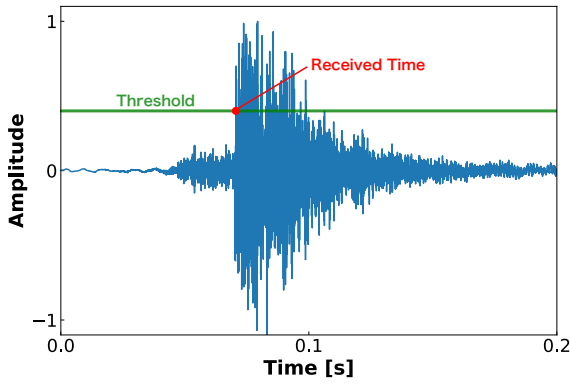


図3 計測されたインパルス応答の例

$$S(\omega) = \begin{cases} \exp(ja\omega^2) & \text{for } 0 \leq \omega \leq N/2 \\ \exp\{-ja(N-\omega)^2\} & \text{for } N/2 < \omega \leq (N-1) \end{cases} \quad (3)$$

または,

$$S(\omega) = \begin{cases} \exp(ja\omega^2) & \text{for } 0 \leq \omega \leq N/2 \\ S^*(N-\omega) & \text{for } N/2 < \omega \leq (N-1) \end{cases} \quad (4)$$

ただし,

$$a = \frac{4m\pi}{N^2} \quad (5)$$

である。ここで、 N はデータ数 (信号のサンプル長)、 m は信号の引き延ばし係数 (整数)、 S^* は S の共役複素数である。これを離散フーリエ逆変換し、時間領域で表した信号 $s[k]$ は、図2のように、時間に伴って0から表現可能な最大値まで周波数が増加していく信号となる。

3.2 インパルス応答計測の位置追跡への適用

本研究では、浮流カメラにビーコン送信機、APにビーコン受信機を設置することを前提とし、ビーコン送信機は決められた周期 τ 秒でビーコンを送信するものとする。また、送信機が i 番目に送信したビーコンから得られるインパルス応答 $h_i[k]$ は図3のように、ビーコンの到着時刻において、ピークを持つ。これに対して、閾値を設定し、 $h_i[k]$ の中で初めて閾値を超えた時刻をそのビーコンの受信時刻 t_i^R とする。

まず、受信機は送信機との時刻同期のために、ビーコンの送信開始時刻を既知の位置 d において、以下の式を用いて推定する。

$$\tilde{t}_0^R = t_0^R - d/v \quad (6)$$

ここで、 v は温度 T に依存する音速を表し、空気中では、 $v = 331.5 + 0.61T$ である。以上の式より、送信開始時刻がわかれば、以降の一定周期で送信されるビーコンの伝播時間を以下の式から求めることができる。

$$\tilde{\Delta t}_i = t_i^R - \tilde{t}_0^R - \tau \cdot i \quad (7)$$

最後に、

$$\tilde{d}_i = \tilde{\Delta t}_i v \quad (8)$$

の式より、 i 番目のビーコン送信時の送信機の位置を推定する。



図4 実験機材・実験管

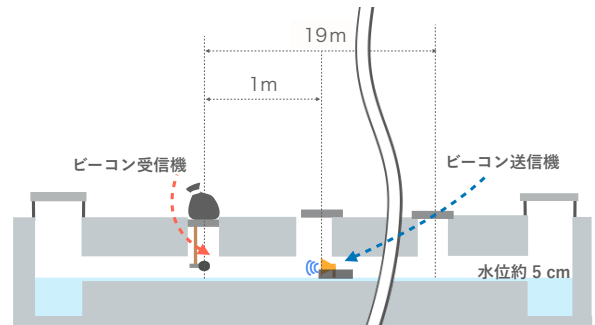


図5 実験環境

3.3 誤差の要因

上述の手法では、インパルス応答のピークを検出するための閾値はノイズフロアより十分高いことが重要である。計測されるインパルス応答は図3のような波形となり、インパルス応答のピークの前側に大きなノイズが現れる。これは信号送信時に現れる高長波歪みが影響し、ノイズとして現れている [13]。この高長波歪みやバックグラウンドノイズを誤検出しないように十分に大きい閾値を設定する必要がある。本手法では、計測されたインパルス応答を振幅の最大値が1.0となるように正規化し、この上で、閾値を振幅の最大値からの割合として設定することとする。

4. 評価実験

大学内の地中 (管底 400 mm) に設置された直径 200 mm、延長 22 m の塩化ビニル製管内で、浮流カメラ相当の音源からの音声を録音し、この音源に対して位置推定処理を行うことで、本手法の評価を行った。以下に2つの実験の評価方法と結果、考察を示す。

4.1 位置推定精度の評価実験

実験管には、1 m ごとに合計で 20 個の縦穴があり、縦穴の外側 (管の両端) には、現実環境と同じサイズのマンホールがある (図4)。下水管内には約 5 cm の水を張った。無指向性のピンマイク (YOGA, Clip Microphone EM-700) を図5に示す一番左側の縦穴に配置した。スピーカを搭載した音声送信用の端末を、縦穴のある位置の水上に固定し、送信周期 1 秒で 11 回のビーコン送信を行った。同様の操作を 1 m-19 m 地点の間に

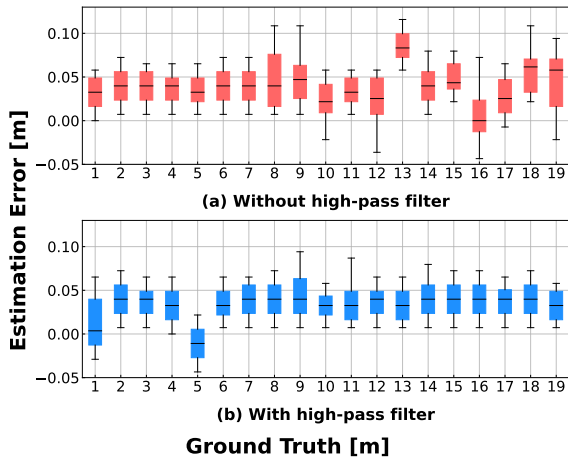


図6 実験での位置推定誤差

ある 19 個の縦穴で繰り返して、録音した。サンプリング周波数を 48 kHz とした。ピーコンとして用いた Swept-Sine 信号の信号長は 2^{13} のサンプル長、つまり、約 0.17 秒とした。位置推定処理では、送信周期 1 秒に合わせて、1 秒ごとにインパルス応答計測処理を行った。これにより、各ピーコンに対応するインパルス応答が得られる。ピーク検出用の閾値はノイズを誤検知せず、誤差が少ない値を試行錯誤的に決定した。具体的には各インパルス応答の最大値の 20% とした。最初に計測したインパルス応答から得られた信号到着時刻を初期受信時刻とし、これを既知の距離 d とともに、式 (6) に与えることで、送信開始時刻を推定した。その後計測された 10 個分のピーコンのインパルス応答から推定される距離を得た。

各測定位置における推定位置の誤差を図 6 に示す。同図 (a) はインパルス応答計測により得られた位置推定結果であり、(b) は計測により得られたインパルス応答に対して、低周波ノイズを除去するためにハイパスフィルタ（通過帯域 3000 Hz 以上）を適用した場合の推定誤差を示している。二つの結果を比べるとハイパスフィルタ適用後の方が、誤差が比較的小さくなっており、0.1 m 以下を下回っている。これらの結果は筆者らの相互相関法を用いた手法 [6] での平均誤差 2.6 m を大きく下回っている。

4.2 信号長の精度への影響の評価

送信信号に利用する Swept-Sine 信号では、信号長が長いほど、信号全体のエネルギーが大きくなり、SNR が向上する特徴がある。しかし、信号長が長ければ信号の送信間隔も長くせざるを得ないので、位置センシングの頻度が小さくなる。また、信号長が長くなれば、信号送信中の音源の移動距離が大きくなるので、位置の推定誤差が大きくなると予想される。そこで、最適な信号長を考察するため、信号長の変化による影響を評価した。実験環境は上述の実験と同様である。送信機は各地点で、異なる 5 つの信号長の信号を周期 2 秒で 11 回ずつ送信した。

Swept-Sine 信号の信号長は離散フーリエ変換等の処理のしやすさから 2^n の長さで決定されることが多い。そこで、本実験では、 $2^{12}, 2^{13}, 2^{14}, 2^{15}, 2^{16}$ のサンプル長を持つ信号を利用した。送信機、受信機のサンプリングレートは共に 48 kHz であるた

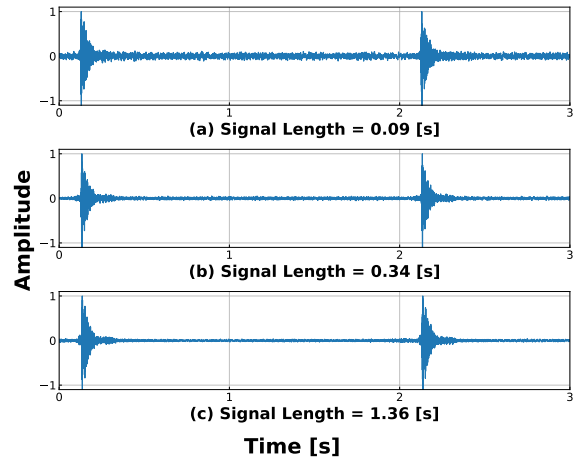


図7 13 m 地点における信号長ごとのインパルス応答測定結果

め、時間単位での信号長はそれぞれ約 0.09 秒、0.17 秒、0.34 秒、0.68 秒、1.36 秒となる。閾値は試行錯誤的にそれぞれの音源に対して良好な結果が得られた値を設定した。具体的には、それぞれインパルス応答の最大値の 60%、60%、60%、20%、30% と設定した。以上の条件の下、録音した音源に対して位置推定処理を行った。

図 7 は、上述の条件で 13 m 地点で計測されたインパルス応答の波形を信号長ごとに示したものである。各インパルス応答の最大値を 1 としたときのノイズレベルの平均割合はそれぞれの信号長において、0.031、0.015、0.010 となり、信号長が長くなるほどノイズが小さくなった。これは、信号長が大きい方が信号内のエネルギーも大きく、インパルス応答の振幅が大きく現れたためである。さらに、図中のインパルス応答ピークの前側に高長波歪みによるノイズが現れている。これは信号長が長い方が、大きく現れている。図 8 に、信号長ごとの位置推定結果を示す。信号長 0.09 秒では、距離が長い場合に SNR が小さくなり、閾値によるインパルス応答ピークの検出が失敗することがあった。グラフに現れている外れ値はこれによるものである。

以上の結果から、信号長が長い方が、ノイズ耐性が向上し、インパルス応答の計測精度が良いことがわかった。しかし、信号が長くなるほど、必然的にセンシング間隔も長くなる。これまでの研究から、実環境では直径 200 mm の管内では浮流カメラは平均的に 0.3 m/s 程度で移動することがわかっている [4]。つまり、1 秒周期でセンシングすることでおおよそ 0.3 m ごとに映像と位置情報の紐付けが可能であると考えられる。このセンシング間隔の実用性を考慮すると、1 秒周期で信号全体を送信できない、あるいは送信できても十分な残響時間を得られない信号長は適さないと考える。そのため、十分に信号送信ができ、推定誤差が比較的小さかった信号長 0.17 s–0.34 s の信号を利用するのが適当であると考えられる。

実験結果の中では、高長波歪みによるノイズを誤検知したケースが見られた。周波数が時間に応じて高くなる Swept-Sine 信号を使ってインパルス応答計測をした場合、高長波歪みによるノイズは、インパルス応答の前側に現れることがわかって

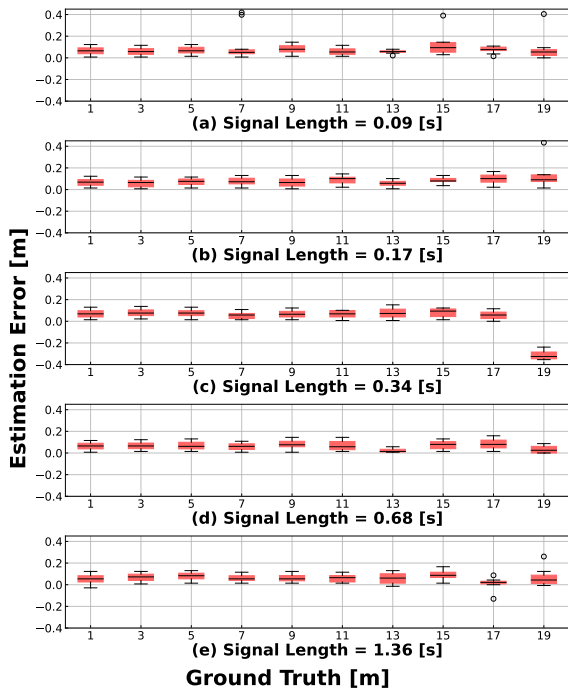


図8 信号長ごとの位置推定誤差

いる[13]。しかし、送信信号を周波数が時間に応じて低くなる Swept-Sine 信号にした場合は、インパルス応答の後側に高長波歪みの影響が現れるため、本手法でのピーク検出には影響しない可能性がある。今後、これらの信号の選定も工夫する必要がある。

5. まとめ

浮流型カメラを用いた小口径下水管検査システムにおいて、音波の伝播時間を基にした追跡手法にインパルス応答測定法を適用した手法の効果と精度について評価した。以前、筆者らが提案した浮流カメラの追跡手法では、2つの信号間の相関と遅延を算出する相互相関法を用いて、各音響ビーコンの伝播時間を求めていた。しかし、この手法では、相互相関法の入力とする受信信号とそれに対する評価信号の選定が困難であり、効果的な精度が得られなかった。そこで、送信信号として広帯域の Swept-Sine 信号を利用し、各ビーコンからインパルス応答を測定、そのインパルス応答のピーク時刻を信号到着時刻とする手法を提案した。本手法を用いて小口径下水管内で録音した音源データを基に位置推定実験を行ったところ、19 m までの範囲で、0.1 m 以下の誤差で位置推定が可能であることがわかった。この精度は以前の手法と比較して、大きく向上されており、実用上十分である。

今回の実験では、実験管内の各地点にマイクを固定して、音源を取得したが、実用場面では音源は 0.3 m/s で移動しながらビーコンを送信する。この状況はドップラー効果等の誤差要因を生む。今後は音源を浮流させて評価を行う必要がある。また、今後はより長く、水流や道路交通等の様々なノイズが混ざる実環境において評価を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、JST、CREST、JPMJCR21D2 の支援

を受けたものである。

文 献

- [1] 下水道：下水道の維持管理 - 国土交通省, https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html (Accessed on 10/23/2023)
- [2] Fiberscope.net: Drain camera VIPER, <https://www.fiberscope.net/portable-push-camera-video-inspection-pipe-drain-sewer-cctv/> (Accessed on 10/23/2023)
- [3] Proteus: Proteus Systems - Minicam, <https://www.minicam.co.uk/systems/crawlers/proteus/> (Accessed on 10/23/2023)
- [4] S. Ishihara, Z. Liu, S. Tachibana and T. Yasuda, "Implementation of video data transmission protocol for a narrow sewer pipe screening system using drifting wireless cameras," International Conference on Information Networking (ICOIN), pp. 384–389, 2020.
- [5] T. Nagashima, Y. Tanaka, and S. Ishihara, "Measurement of Wireless LAN Characteristics in Sewer Pipes for Sewer Inspection Systems Using Drifting Wireless Sensor Nodes," IEICE Trans. Commun., Vol. E9 9.B, No. 9, pp. 1989–1997, 2016.
- [6] 丸山健斗, Thanh V. Pham, 石原進, "浮流型無線カメラによる下水管検査のための音ビーコンを基にした位置追跡手法～相互相関法を用いた実現～," 信学技報, Vol. 123, No. 31, pp. 9–14, 2023.
- [7] N. R. Rypkema, E. M. Fischell and H. Schmidt, "One-way travel-time inverted ultra-short baseline localization for low-cost autonomous underwater vehicles," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 4920–4926, 2017.
- [8] W. Rob, Y. Yicheng, H. Kirill, and A. Sean, "Acoustic Echo Sensing for Robot Localization in Buried Pipe Networks," TechRxiv, Preprint, 2023.
- [9] E. A. Eckhardt, V. L. Chrisler, P. P. Quayle, and M. J. Evans, "Transmission of Sound Through Voice Tubes," Technologic Papers of the Bureau of Standards, Vol. 21, No. 333, pp. 163–193, 1926.
- [10] L. Jing, Z. Li, Y. Li and R. D. Murch, "Channel Characterization of Acoustic Waveguides Consisting of Straight Gas and Water Pipelines," IEEE Access, Vol. 6, pp. 6807–6819, 2018.
- [11] 羽入敏樹, "室内音響におけるインパルス応答測定と評価," 日本音響学会誌, Vol. 76, No. 3, pp. 156–163, 2020.
- [12] S. Guy-Bart, E. J. Jacques, and A. Dominique, "Comparison of different impulse response measurement techniques," Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 50, No. 4, pp. 249–262, 2002.
- [13] 金田豊, "インパルス応答測定信号と測定誤差," 日本音響学会誌, Vol. 69, No. 10, pp. 549–554, 2013.