

# 低周波単発音を用いた距離計測法

瀬島 紀夫\* 地主 弘幸\*\* 筒本 和広\*\*\*

沖 俊任\*\*\*\* 三谷 康夫\*\*\*\*\*

Distance Measurement Method Using Low-Frequency Single-Shot Sound

Norio SESHIMA\* Hiroyuki JINUSHI\*\* Kazuhiro TSUTSUMOTO\*\*\*

Toshitaka OKI\*\*\*\* Yasuo MITANI\*\*\*\*\*

## ABSTRACT

The measurement of the distance to an object is basic and important in various engineering fields. Distance measurement methods have been developed using laser light, ultrasonic waves, microwave radar, and GPS, etc. Each method has advantages and disadvantages, and the distance is measured using an appropriate method according to its measurement purpose. Of these methods, two measurement methods using laser light and ultrasonic waves are very often used. For the purpose of the distance measurement using audible low-frequency sound, we propose a measurement method to determine the distance to a target by using the sound speed and the propagation delay time between a sound source and a target. In this study, a distance measurement method using low-frequency single-shot sound is used to enable distance measurement in a room or the woods where there are obstacles that are difficult to measure with a usual ultrasonic range finder or laser range finder. We consider a method of measuring the distance from the sound propagation time between two microphones without using the reflected wave from the object. The effectiveness of this method is experimentally confirmed by applying it to the actual measurement.

キーワード： 距離計測、低周波単発音、合成余弦波、伝搬時間

## 1. 緒言

対象物までの距離は、工学的分野において基本的かつ重要な情報である。従来の距離計測の手法には、レーザ光、超音波、マイクロ波レーダ、GPSなどを用いたものがある。それぞれの手法には、一長一短があり、目的に応じて適切な手法を用いて距離を計測している。中でも、レーザ光や超音波を用いた手法がしばしば用いられる。レーザ光は、通常の光と比べて極めて鋭い指向性を持っている。また、伝搬速度はおよそ $3.0 \times 10^8$ [m/s]であり、音速と比べて

---

\*大学教育センター兼任教員・共同利用センター講師      \*\*大学教育センター教授

\*\*\*人間文化学部教授      \*\*\*\*工学部准教授      \*\*\*\*\*工学部教授

極めて速い。レーザ光を用いたレーザ距離計は、空気による距離減衰が小さく、0.05[m]から250[m]程度の距離計測が可能である。しかし、液面やガラス面では、レーザ光の透過作用により計測が不可能になる。また、レーザ光を利用しているため、視覚障害の危険性があるため、人間の目に照射しないように考慮しなければならない。

音響信号を用いた距離計測には、主に超音波が用いられている。通常、人間が耳で聴くことのできる周波数の範囲は、20[Hz]から20000[Hz]であり、これを可聴音という。超音波を用いた計測手法は、波長が短いため分解能が良く、可聴音に多く存在する環境騒音の影響を受けにくいこと、比較的安価に構成することができることの二つのメリットがあるため、広く利用されている。また、レーザ光やカメラでは計測が難しい暗所の中やガラス面までの距離、液面の高さなどを計測することができるため、工業用の計測にも利用されている。しかし、超音波は波長が短く、空気による距離減衰が大きいため、製品化されている40[kHz]前後の超音波を用いた距離計では、20[m]以上の距離計測は困難な場合も生じる。また、指向性が鋭く、対象物を直線で見通せる状況でしか距離計測できない。以上に加えて、出力の際に耳障りな立ち上がり音がともなうことや、実際に人間の耳では超音波を感知することができないことから、超音波音暴露の危険性が指摘されている。

一方、可聴音を用いると、送信信号を工夫すれば耳障りでない音での距離計測が可能である。誤って大きな音を出した場合でも、すぐに気付くことができるため、暴露の危険性を小さくできる。可聴音を用いた距離計測には、10[kHz]程度の周波数帯に基づく定在波を利用する手法<sup>1</sup>、楽音などの広帯域の周波数帯を利用して周波数重みを用いる手法<sup>2</sup>がすでに提案されている。いずれも連続音を用いており、測定距離の分解能を0.01[m]程度確保するために、周波数帯として利用することができる範囲は、500[Hz]から10[kHz]である。可聴音は超音波と比べて、周波数が低いため、空気による距離減衰が小さく、長距離計測が可能である<sup>3</sup>。しかし、環境騒音の影響を受けやすいというデメリットがある。例えば、人間の声に近い400[Hz]から500[Hz]程度の音響信号を用いると、人間の話し声が聴こえる空間での距離計測が困難になる。

本研究では、比較的長距離にも対応し、音波の反射、定在波ならびに周囲の環境騒音の影響を抑止できるように、低周波単発音を用いた距離計測法を考察する。低周波音の回折効果により、一般的な超音波距離計やレーザ距離計が計測困難である障害物の存在する場合でも、距離計測が可能な手法を提案する。

## 2. 音波による距離計測

2点間の距離は、音速と伝搬時間が分かれば容易に推定できる。ここで、音速に目を向ける。気温 $T$  [°C]、気圧 $H$  [hPa]、その時の飽和水蒸気圧を $p$  [hPa]とすると、水蒸気を含む空気中の伝搬速度 $V$  [m/s]は次式で表される<sup>4</sup>。

$$V = \frac{V'}{\sqrt{1 - \frac{p}{H} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma} - 0.622 \right)}} \quad (1)$$

ここで、 $V'$ は乾燥空気中における音速であり、気温 $T$ により次式で算出される。通常は、この気温 $T$ のみを考慮した次式が用いられる。

$$V' = 331.45 + 0.607T \quad (2)$$

また、 $\gamma_w$ は水蒸気の定圧比熱と定積比熱の比熱比であり、1.33である。 $\gamma$ は乾燥空気の比熱比であり、1.403である。なお、飽和水蒸気圧 $p$ [hPa]は、次式のTetensの式より求めることができる。

$$p = 6.11 \times 10^{aT/(b+T)} \quad (3)$$

水蒸気の主成分は水であることから、 $a = 7.5$ 、 $b = 237.3$ である。

### 3. 音源の生成と暗騒音抑制フィルタ

本研究では、二つのマイクロホン間の音の伝搬時間より、距離を計測する手法を考察する。単一周波数の連続音を採用した場合、室内での測定では、反射音、残響音や室の構造による定在波などが発生し、屋外においても地面や建物からの反射の影響がある。超音波を用いた距離計と同等以上の計測精度を確立するため、前述のように温度以外にも、湿度と気圧を考慮し、測定ごとに気温と気圧を測定する。本実験では、スピーカから発生した単発音を計測地点に置かれたマイクロホンで測定し、その音波の伝搬時間を計測する。音響分野で周知のように、連続した正弦波などを音源として用いると、定在波などの室による影響を受ける。通常、定在波の影響を小さくするために、帯域音響信号が用いられる。

これらのことを考慮して単発音を採用する。残響や反射波、それにとまなう定在波などの影響を小さくするため、低周波域である50[Hz]から100[Hz]までの余弦波を合成した音波を採用する。これにより、100[Hz]の単発正弦波音を用いた距離計測より、測定精度が向上することを実験的に確認している<sup>5</sup>。この原因として、二つのことが挙げられる。一つ目は50[Hz]から100[Hz]の合成余弦波音は、低い周波数成分をもつ帯域信号となっているため、反射による定在波や残響による影響を小さくできることである。二つ目は、余弦波による受信信号の立ち上がり特性が向上したことである。定在波の影響を小さくするという目的と波形の立ち上がり特性を急峻にして音波の伝搬時間の計測を明確にするため、50[Hz]の1周期分を基本波として100[Hz]までの余弦波の和で合成した入力信号 $f(t)$ を単発音として、次式のように採用する。ここで、 $t$ [sec]は時刻を表し、 $A$ は任意の定数である。

$$f(t) = A \left( \sum_{f_i=50}^{100} \cos 2\pi f_i t \right) \quad (4)$$

また、音波の計測にはコンデンサマイクロホンを使用する。測定距離の基準値としてレーザ距離計(測定誤差 $\pm 1.0$ [mm])を採用する。合成波は数値計算の結果をwav形式の音源ファイルに変換し、PCからアンプを通してスピーカに印加する。Fig.1に合成余弦波の波形を示す。本実験で用いる単発音の周波数範囲は50[Hz]から100[Hz]であるものの、アンプやスピーカの過渡特性により実際のスピーカから発生している信号をスペクトル解析すると、50[Hz]から200[Hz]までが主成分であることを確認している。従って、暗騒音の影響を考慮して、50[Hz]から200[Hz]までの周波数範囲を通過させるバンドパスフィルタを採用する。フィルタの特性には広く用いられるバターワースを採用する。バターワースの特徴として、通過域が平坦であり構成が比較的簡単であるため採用した。

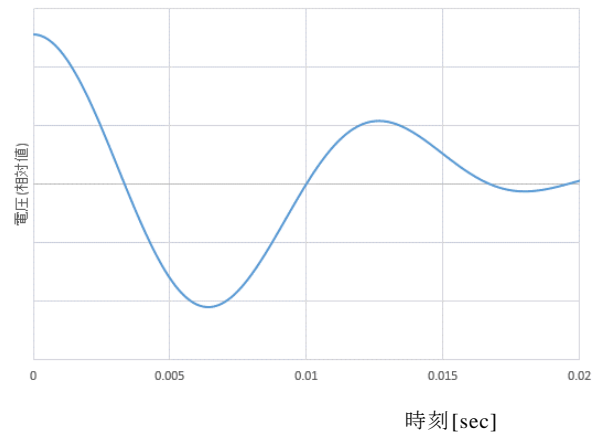


Fig.1 The generated synthetic cosine wave

#### 4. 実験的考察

前述の合成余弦波音を用いて、2 台のマイクロホンで音の伝搬時間を検出する。マイクロホンの検出電圧を測定した結果の一例を Fig.2 に示す。ここで、マイクロホン A はスピーカ側のマイクロホン、マイクロホン B は受信側のマイクロホンである。この時、測定距離は 3[m] に設定している。以下、このようにして音の伝搬時間を測定する。

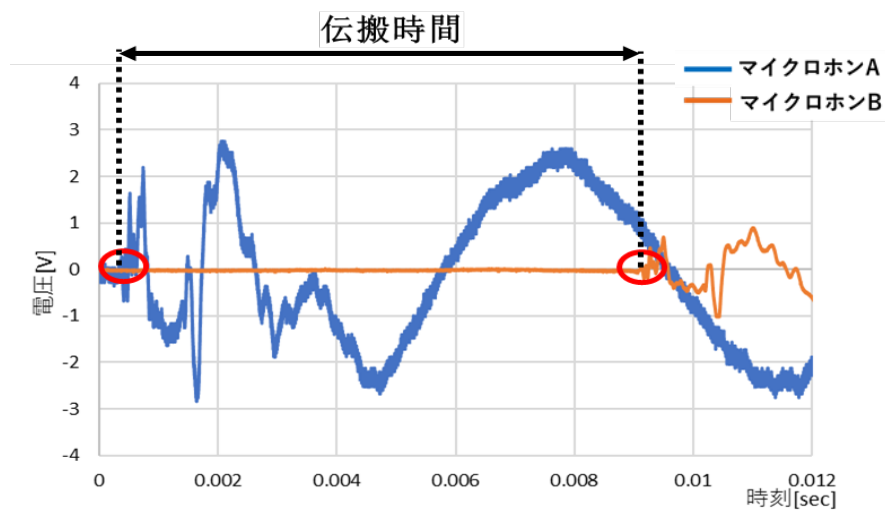


Fig.2 Example of the sound propagation waves

基礎実験として、比較的長距離での計測実験を行った。計測距離を変えて10回ずつ実験を行った。計測距離は10[m]、20[m]、30[m]とした。比較的長い計測距離を考慮して、有線ではなくFM変調の無線装置を用いて音波を送受信させた。Fig.3に実験装置の配置を示す。測定結果の一例として、Table 1に30[m]の場合の実験結果を示す。更に、Table 2に計測距離が10[m]、20[m]、30[m]の各場合についての誤差平均と二乗平均平方根誤差を示す。

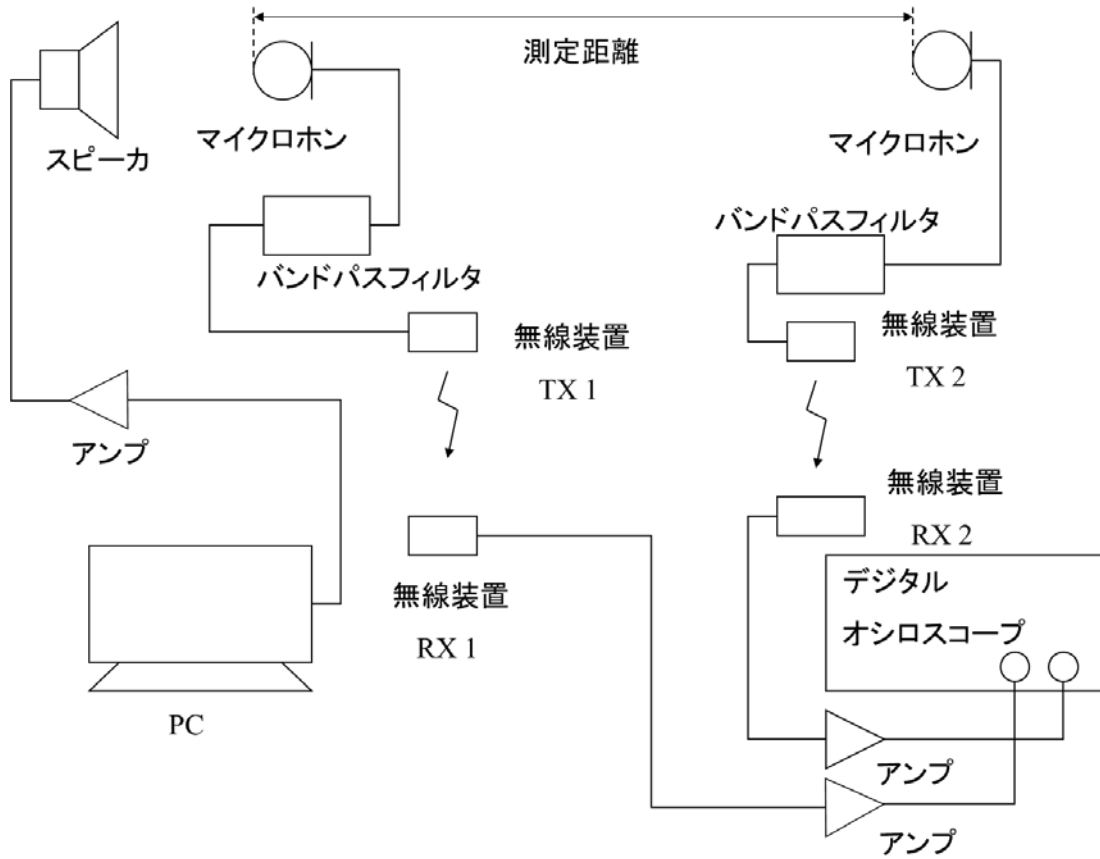


Fig.3 An arrangement of experimental apparatus

Table 1 Measured distances at 30[m]

	気温 [°C]	気圧 [hPa]	音速 [m/s]	伝搬時間 [msec]	測定値 [m]	誤差 [m]
1	25.5	1003.2	348.78	85.74	29.905	-0.095
2	25.6	1003.2	348.86	85.94	29.981	-0.019
3	25.6	1003.2	348.86	85.72	29.904	-0.096
4	25.6	1003.2	348.86	85.74	29.911	-0.089
5	25.6	1003.2	348.86	86.14	30.050	0.050
6	25.6	1003.2	348.86	86.22	30.078	0.078
7	25.6	1003.2	348.86	86.16	30.057	0.057
8	25.7	1003.2	348.93	85.80	29.938	-0.062
9	25.7	1003.2	348.93	86.08	30.036	0.036
10	25.7	1003.2	348.93	85.80	29.938	0.062

Table 2 Measured errors and RMSE

計測距離 [m]	測定平均 [m]	誤差平均 [m]	二乗平均 平方根誤差 [m]	平均誤差率 [%]
10	10.013	0.013	0.032	0.1
20	20.001	0.012	0.043	0.0
30	29.980	-0.068	0.069	-0.1

以上の結果から、計測距離が長くなっても測定誤差がそれほど大きくないことが分かる。一般に市販されている超音波距離計の誤差率が $\pm 0.5[\%]$ である。本実験では例えば、10[m]の計測の誤差平均は1.3[mm]と非常に小さく、誤差率は0.1[%]であった。全体を通して、誤差率の平均値は、 $\pm 0.1[\%]$ 以内と小さく、直線距離の測定では精度の良い測定が可能であることを確認した。

次に、回折音場での実験を行った。本実験では、Fig.4に示されるように、マイクロホン2台の間に遮音塀を設置した。レーザ距離計を用いて、マイクロホン間の距離を3[m]に設定した。この状況で、10回実験を行った。製作した遮音塀自体の遮音性能は10[dB]以上であるため、遮音性能は十分である。遮音塀を透過する音の影響は小さく、直接的な伝搬経路としては遮音塀による回折現象を考慮することになる。音場解析の一つである音線法の考え方を採用する。音波が最も早く到達するのは、最短距離の遮音塀の上を回折する場合である。音波が遮音塀の上を回折して伝搬する直線距離は、3.290[m]である。音源からの直線距離を計測すべき距離とした。本実験での実験結果をTable 3に示す。誤差平均と二乗平均平方根誤差は0.04[m]程度となった。この結果より遮音塀などの障害物が存在する場合、本手法では、音波が障害物を回折して伝搬する直線距離を計測していることがうかがえる。

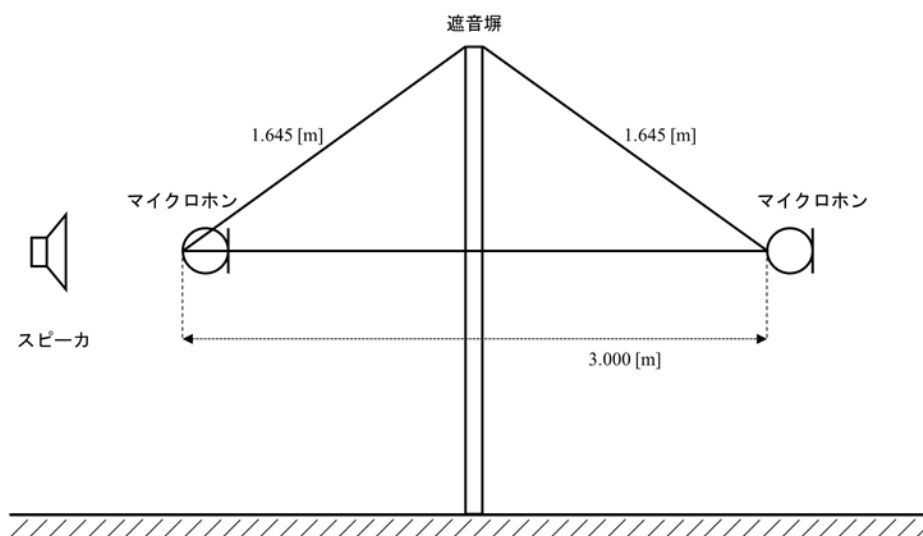


Fig.4 Actual experiment of sound insulation barrier

Table 3 The experimental results for sound insulation barrier

計測距離 [m]	測定平均 [m]	誤差平均 [m]	二乗平均 平方根誤差 [m]
3.290	3.327	0.037	0.041

更に、より実環境に近い状況で、実験室内での距離計測をした。実験の状況をFig.5に示す。実験室には、棚や机などの障害物が配置されている。音波が伝搬する直線距離は7.428[m]であり、この距離を測定距離とする。この状況で10回実験を行った。実験結果をTable 4に示す。誤差は0.02[m]程度となった。



Fig.5 Actual scene of experiment

Table 4 The experimental results

計測距離 [m]	測定平均 [m]	誤差平均 [m]	二乗平均 平方根誤差 [m]
7.428	7.411	-0.017	0.022

## 5. 結言

本研究では、低周波音を用いた距離計測について考察した。測定精度をなるべく良くするための測定系を構築した。壁や地面による反射や定在波の影響を小さくすることを目的に、音源の選定を行った。音源には50[Hz]から100[Hz]の単発合成余弦波音を用意し、アンプを介してスピーカから発生させた。波形の立ち上がり特性が良い単発合成余弦波音を用いることにより、測定精度を向上させることができることを確認している。

また、暗騒音による影響を小さくするため、帯域フィルタを導入した。アンプとスピーカ

の過渡応答により、実際のスピーカから発生している音の主成分が、50[Hz]から200[Hz]であった。従って、50[Hz]から200[Hz]を通過域とするバンドパスフィルタを採用した。本手法の有効性を確認するため、屋内で10[m]、20[m]、30[m]の距離計測を行った。全体を通して、誤差率の平均値は $\pm 0.1$ [%]以内と小さく、一般的な超音波距離計の精度(誤差率 $\pm 0.5$ [%])より良い精度を得ることができた。また、40[kHz]前後の超音波を用いる一般的な超音波距離計の最大計測可能距離は約20[m]であることから、一般的な超音波距離計よりも比較的長距離でも精度良く計測できる手法であることを確認した。

続いて、障害物などにより直線で見通せない場合の距離計測への適用により、本手法の有効性を確認した。すなわち、マイクロホン2台の間に遮音屏がある場合の距離計測を行った。遮音屏が存在する場合、音波が障害物を回折して伝搬する最短の直線距離を計測していることがうかがわれる。超音波距離計やレーザ距離計では測定困難な、障害物が存在する場合でも、距離計測が可能であることが確認できた。最後に、実環境を想定した実験を行った。その一例として、棚や机などが並べられている実験室で距離計測実験を行った。測定結果から、回折による直線距離が計測できた。これにより本手法では、棚や机などの障害物が存在する場合でも距離計測が可能であることが確認できた。

現在にいたるまで、様々な距離計測の手法が提案されてきた。本手法で用いた低周波音は主に、空気の吸音による距離減衰が小さいこと、音の回折効果が大きいことの二つの特長がある。本研究では、この特長を活かした距離計測法を考察した。直線で見通せない距離でも低周波音の回折効果により、数十センチメートルの誤差の範囲内で距離計測が可能であることが分かった。本手法は、一例として介護ロボットや災害用ロボットが、屋内や山の中などの障害物の中を移動する際の距離計測に役立つものとする。本手法を用いて、受信点側のマイクロホンをロボット(例えば中央部)に装着して、送信側を基準点として距離を計測することが可能である。また、本手法の距離計測法とマイクロホンアレイ等を利用したロボットの方位推定法を併用すれば、ロボットの位置が推定できることになる。さらに、長距離計測の場合、アンプやスピーカの出力音響パワーを大きくしなければならない。これらが、本研究を基盤とした今後の研究課題として挙げられる。

最後に、本研究に多大の援助を頂いた中村優一氏と川島雄太氏に感謝の意を表す。音源として合成余弦波を採用し、計測精度の向上を図ることができた。この合成余弦波の導入に関して、近畿大学教授の中迫 昇先生からご助言を頂いた。中迫教授に深謝の意を表す。

## 参考文献

- 1 中迫昇、上保徹志、篠原智博：「可聴音を用いた位相干渉に基づく対象物までの距離計測－音響測距法の原理と進展－」、*IECIE Fundamentals Review vol.9, No.4 (2016)*.
- 2 高尾麻衣子、干場功太郎、中臺一博：「可聴音を用いた周波数選択に基づく距離推定法の実環境利用に向けた評価」、*JSAI Technical Report SIG-Challenge-049-5 (11/25)*.
- 3 飯田一博：『音響工学基礎論』、コロナ社 (2013).
- 4 国立天文台：『理科年表』、平成22年(机上版)、丸善出版 (2009).
- 5 三谷康夫、中村優一、岩佐勇輝：「単発音を用いた距離計測」、平成31年電気学会全国大会論文集、1-041 (2019).