

# NLOS環境における音響センシングを用いた スマートフォン間測距手法

神鳥 勇貴\*<sup>1,a)</sup> 村上 弘晃\*<sup>2,b)</sup> 須崎 太久弥<sup>1</sup> 中村 将成<sup>1</sup> 渡邊 拓貴<sup>1</sup> 橋爪 宏達<sup>3</sup>  
杉本 雅則<sup>1,c)</sup>

受付日 2021年9月17日, 採録日 2022年3月9日

**概要:** 本論文では、見通し外 (non-line-of-sight, NLOS) 環境下における音響センシングを用いた複数のスマートフォン間での新たな測距手法について述べる。スマートフォン内蔵のスピーカやマイクロフォンを使用した音響ベースの測距手法は、高精度な測距に対するアプローチの1つである。これらの手法はスマートフォン間に障害物のない見通し内 (line-of-sight, LOS) 環境下で利用することは可能である。しかし、日常生活において、歩行者をはじめ多くの障害物が存在することは普通であり、NLOS環境は珍しいことではない。そこで我々はNLOS環境向けの測距システムを提案する。本手法は、直接波を使わず2つのスマートフォン間の距離を測定するために、屋内環境で生じる天井からの1次反射波を効率的に活用する。また、提案する測距手法に基づきLOS環境とNLOS環境を判別し、スマートフォン間の距離推定手法を適切に決定することが可能である。実験では、室内で2つのスマートフォンを使用し、複数の配置でそれらの距離を推定した。その結果、スマートフォン間の距離の90-percentile誤差は11.97cm以下となった。本論文では、提案手法の有効性と限界についても言及する。

キーワード: 測距, スマートフォン, 音響センシング, マルチパス

## A Ranging Method between Multiple Smartphones Using Acoustic Sensing in NLOS Environments

YUKI KANDORI\*<sup>1,a)</sup> HIROAKI MURAKAMI\*<sup>2,b)</sup> TAKUMI SUZAKI<sup>1</sup> MASANARI NAKAMURA<sup>1</sup>  
HIROKI WATANABE<sup>1</sup> HIROMICHI HASHIZUME<sup>3</sup> MASANORI SUGIMOTO<sup>1,c)</sup>

Received: September 17, 2021, Accepted: March 9, 2022

**Abstract:** In this paper, we describe a novel ranging method between multiple smartphones using acoustic sensing in non-line-of-sight (NLOS) environments. Acoustic-based ranging methods that use a smartphone built-in speaker and microphone represent one approach to high-accuracy ranging methods. These methods can be used in line-of-sight (LOS) environments where there are no obstacles between the smartphones. However, in daily life, there are usually many obstacles, including pedestrians, and NLOS environments are the norm rather than the exception. Therefore, we propose the ranging system for NLOS environments. To measure the distance between two smartphones without using a direct signal, this method efficiently uses the primary reflected signal from the ceiling in an indoor environment. It can also detect LOS and NLOS environments based on the proposed ranging method, and adapt the method used to estimate the distance between the smartphones. In our experiments, we used two smartphones in a room and estimated the distance between them for several placement configurations. In our results, we obtained 90th-percentile errors of less than 11.97 cm for the distances between the smartphones. In this paper, we also mention the effectiveness and limitations of the proposed method.

**Keywords:** ranging, smartphone, acoustic sensing, multipath

<sup>1</sup> 北海道大学大学院情報科学院  
Graduate School of Information Science and Technology,  
Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-0814, Japan

<sup>2</sup> 東京大学  
The University of Tokyo, Chiyoda, Tokyo 113-8656, Japan

<sup>3</sup> 国立情報学研究所  
National Institute of Informatics, Chiyoda, Tokyo 101-8430,  
Japan

a) yu-kandori@ist.hokudai.ac.jp

b) murakami@akg.t.u-tokyo.ac.jp

c) sugi@ist.hokudai.ac.jp

\* 等しい割合で貢献

The contributions are equal.

## 1. はじめに

近年のスマートデバイスやIoTの発展とともに、位置情報を用いたサービスやアプリケーションが増加している。スマートフォン間での測距手法は、ユーザ間の位置情報を知る有効な手段の1つであり、様々な応用が期待される。たとえば、イベントにおいて同じテーブルや限られた空間にいるユーザにのみ写真や資料などの情報を送信したい場合に、ユーザの個人情報を介すことなく、距離に基づく通信を実現する。また、近年はスマートフォンを用いたAR技術が発達しており、ユーザ相互の位置関係を利用したアプリケーションへの応用が期待できる。

スマートフォンの内蔵センサを用いた測距手法には、Bluetoothを用いる方式[1]と音響信号を用いる方式[2]がある。音響ベースの測距方式では、受信信号強度(RSSI)を利用するBluetoothベースの測距方式とは異なり、信号の到来時刻を利用するため、非常に高精度な測距が可能となる。BeepBeep[2]では、スマートフォン内蔵のスピーカとマイクロフォンを使用し、変調された音響信号をスマートフォン間で相互に送信する。スマートフォン間に障害物がない見通し内(Line-of-Sight, LOS)環境下であれば数cmの誤差で距離を測定することができる。しかし、障害物の多い屋内環境では、スマートフォン間が見通し外(non-line-of-sight, NLOS)環境となる状況が頻繁に発生する。

NLOS環境下では、他のスマートフォンから送信される音響信号を直接取得できないため、従来の方法ではスマートフォン間の距離を測定することはできなかった。そこで、我々はNLOS環境下で機能する音響ベースの基礎測距技術を提案する。信号の直接波を使わずに2台のスマートフォン間の距離を測定するために、天井に対しスマートフォンと対称な位置にもう1台のスマートフォン(鏡像スマートフォン)が存在すると仮定し、天井からの1次反射波を鏡像スマートフォンからの送信信号として利用する[3]。これにより、NLOS環境下では測定できないスマートフォン間の距離を算出する。また、LOS環境とNLOS環境では測距方法が異なるため、LOS環境かNLOS環境かを自動的に判別し、適切な方法でスマートフォン間の距離を推定する必要がある。これに対し我々は、提案する測距手法に基づくLOS/NLOS判別手法を提案する。提案する基礎測距技術の有効性を検証するために、ユーザがスマートフォンの画面を見えるように静止状態で所持していることを仮定し、スマートフォン上部に搭載された受話用のスピーカと上下部に搭載されたマイクロフォン、内蔵の加速度センサを用いて評価実験を行った。室内において複数の配置でスマートフォン間の測距を行った結果、90-percentile誤差が11.97cm以下であることを確認した。また、反射波による影響や測距誤差の要因について言及し、提案手法の有効性

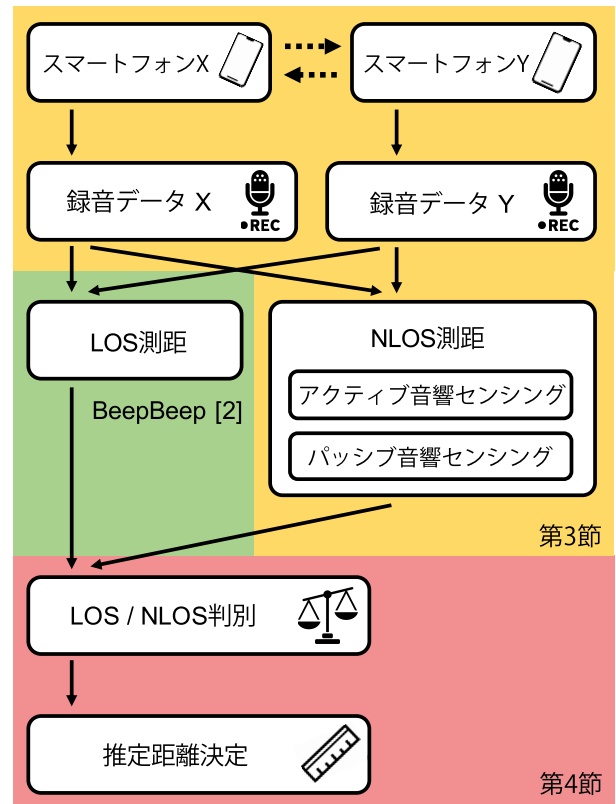


図1 提案手法のフローチャート  
 Fig. 1 Flowchart for the proposed method.

や限界について議論した。

本論文の貢献は以下の3点である。

- 天井からの1次反射波を活用したNLOS環境下で利用可能なスマートフォン間測距手法を、我々が知る限り初めて提案し、その有効性を報告した。
- 内蔵マイクロフォンと加速度センサを用いた、天井を介した1次反射波の識別手法を提案し、評価した。
- 提案する測距手法に基づいたLOS/NLOS判別手法を提案し、その評価を行った。

図1に提案手法のフローチャートを示す。本論文は文献[4]で発表した内容を再構成したものであり、その構成は以下のとおりである。2章では、関連手法と比較した、提案手法の新規性と実用性について言及する。3章では、NLOS環境における複数のスマートフォン間の測距手法を提案し、4章ではLOS/NLOS判別手法を提案する。5章では、実験設定と測距実験について説明する。6章では、提案手法の有用性と限界について述べ、7章で本論文の結論を述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 音響ベースのシステム

測距手法として、Bluetooth[5]や磁気センサー[6]のRSSIを用いた手法が提案されている。しかし、これらの測距には数メートルの誤差があり、応用範囲が限られてしまう。

一方で、スマートフォン間の距離を高精度に求める方法として、音響ベースのシステムが存在する。音響信号は伝搬時間が遅いため、デバイスのトラッキングや測位に適しており、その高精度化を追求した研究が数多く行われている。音響信号を用いる測位手法では、屋内に設置された複数のスピーカからの変調信号を受信することで位置を計算する。各スピーカからの受信信号の到来時間差 (TDoA) を利用する測位手法として、ASSIST [7] や ALPS [8] がある。これらの手法は屋内施設に多数のスピーカを設置する必要があり、測位用アンカーの追加コストがかかるといった欠点がある。

スマートフォンのみを利用した音響ベースの測距方式として、BeepBeep [2], SwordFight [9], Sonoloc [10] などがある。しかし、これらのシステムは、LOS 環境での使用を前提としており、NLOS 環境では使用できない。

### 2.2 マルチパスを利用したシステム

信号の反射波を利用するシステムは提案手法以外にも数多く存在する。近年、マルチパスとフロアプランを用いた測位研究が注目されており、1つのアンカーで機器の位置を推定できるシステム [3], [11] がある。これらは、アンカーの位置とフロアプランが既知である条件のもと実現される。

また、音響信号の反射波を利用したレーダーシステムも多数提案されている。BatMapper [12] や SAMS [13] は、スマートフォンから送信された反射波を用いて建物のフロアプランを生成する。同様に、BatTracker [14] は、反射波を用いてスマートフォンの相対位置を推定し、スマートフォンをトラッキングする。Shih ら [15] は、部屋の中央にトウイーターを設置し、反射波を含む受信信号の周波数特性の変化から、部屋の占有率を測定している。VoLoc [16] や Symphony [17] は、人の声の直接波とその壁からの反射波を、スマートスピーカを模したマイクアレーで受信し、人の大まかな位置を推定する。一方で、スマートフォン間の測距にマルチパスを適用し、NLOS 環境下でも高精度な測距を実現した手法は、我々が知る限り提案手法が初めてである。

## 3. NLOS 環境下における測距手法

### 3.1 LOS 環境下での測距

LOS 環境下で2台のスマートフォン  $X$ ,  $Y$  間の距離を推定できる BeepBeep [2] では、それぞれのスマートフォンから音響信号を送信し、もう一方のスマートフォンで受信する。このとき、スマートフォン  $X$  のマイクロフォンは、2つの音響信号を受信する。1つは、スマートフォン  $X$  のスピーカから送信される信号で、これを本論文ではアクティブ音響センシングと呼ぶ。もう1つは、スマートフォン  $Y$  のスピーカから送信される信号で、これをパッシブ音響セ

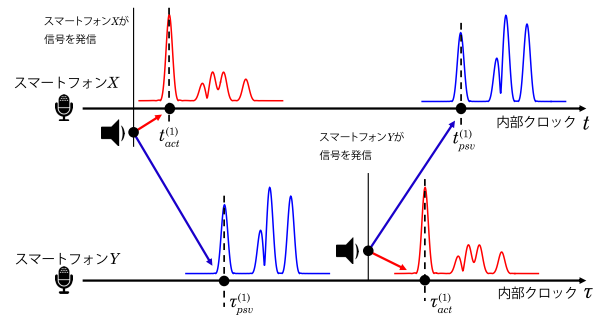


図 2 スマートフォン  $X$  および  $Y$  における信号送受信の時間的關係  
Fig. 2 Time relationship of signal transmission and reception in smartphones  $X$  and  $Y$ .

ンシングと呼ぶ。BeepBeep は、先に到着した直接波の到着時刻  $t_{act}^{(1)}$  と  $t_{psv}^{(1)}$  を用いて、LOS 環境における2台のスマートフォン間の距離  $d_{xy}^{los}$  を計算する (図 2)。同様に、スマートフォン  $Y$  については、音響センシングから得られた直接波の到着時刻  $\tau_{act}^{(1)}$  および  $\tau_{psv}^{(1)}$  が使用される。これにより、BeepBeep では、距離  $d_{xy}^{los}$  は次のように表される。

$$d_{xy}^{los} = \frac{c}{2} \cdot (t_{psv}^{(1)} - t_{act}^{(1)}) + (\tau_{act}^{(1)} - \tau_{psv}^{(1)}) + l_x + l_y \quad (1)$$

このとき、 $c$  は音響信号の伝搬速度、 $l_x$  はスマートフォン  $X$  内蔵のスピーカとマイクロフォン間の距離、 $l_y$  はスマートフォン  $Y$  内蔵のスピーカとマイクロフォン間の距離を表す。近年、多くのスマートフォンではスピーカとマイクロフォンが上部と下部にそれぞれ搭載されているが、本論文ではスマートフォン上部に搭載されたスピーカとマイクロフォンを用いて測距することを想定する。そのため、スピーカとマイクロフォン間の距離はきわめて近く、 $l_x \approx 0$ ,  $l_y \approx 0$  となる。

しかし、この測距手法はパッシブ音響センシングにおいて直接波が観測されない、すなわち  $t_{psv}^{(1)}$  および  $\tau_{psv}^{(1)}$  を使うことができない NLOS 環境下では機能しない。そこで、我々は BeepBeep では使われていない、アクティブおよびパッシブ音響センシングにおいて得られる反射波に着目した。

### 3.2 NLOS 環境下における測距モデルの提案

屋内では、天井や壁、障害物から反射した信号 (マルチパス) が発生し、測距誤差の原因となることが知られている。特に床や天井からの反射波は、壁とは異なり定常的に観測される。それに加え、本手法ではスマートフォン上部のスピーカを使用することと、スマートフォンの画面を上に向けて持つことを想定していることから、スピーカの指向性により天井からの反射波は床からの反射波と比べ大きく観測される可能性が高い。こうした理由から、我々は鏡像スピーカ [3] の概念を適用し、天井からの1次反射波を天井に対する鏡像スマートフォンからの信号として利用する。このとき、図 3 に示すように、天井に対し2つのス

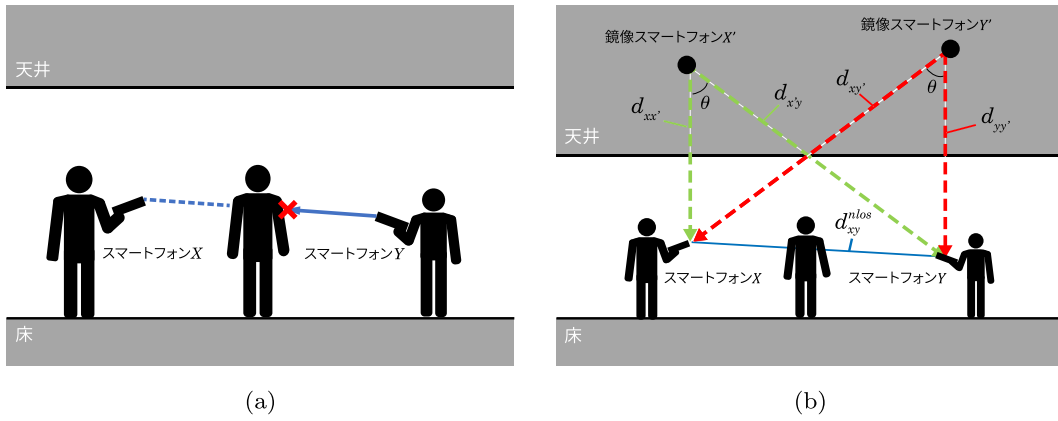


図 3 NLOS 環境下での測距における (a) 従来手法と (b) 提案手法の概要

Fig. 3 An overview of ranging in NLOS environments in: (a) conventional methods and (b) proposed method.

スマートフォン  $X$  および  $Y$  に対応する鏡像スマートフォン  $X'$  および  $Y'$  が生じる。

これによってスマートフォン  $X$  と  $X'$  間の距離  $d_{xx'}$ 、スマートフォン  $Y$  と  $Y'$  間の距離  $d_{yy'}$ 、そしてスマートフォン  $X$  と  $Y'$  間の距離  $d_{xy'} (= d_{x'y})$  を得ることができる。図 3 (b) に示される角度  $\theta$  を用いて、 $\cos \theta$  は以下の 2 通りの式で表される。

$$\cos \theta = \frac{d_{xx'}^2 + d_{x'y}^2 - d_{xy}^2}{2 \cdot d_{xx'} \cdot d_{x'y}}, \quad (2)$$

$$\cos \theta = \frac{d_{yy'}^2 + d_{x'y}^2 - d_{xy}^2}{2 \cdot d_{yy'} \cdot d_{x'y}} \quad (3)$$

これらの式を整理すると、障害物を無視したスマートフォン間の直線距離  $d_{xy}^{mlos}$  が以下のように得られる (図 3 (b))。

$$\begin{aligned} d_{xy}^{mlos} &= \sqrt{d_{xy'} d_{x'y} - d_{xx'} d_{yy'}} \\ &= \sqrt{d_{x'y}^2 - d_{xx'} d_{yy'}} \end{aligned} \quad (4)$$

したがって、 $d_{xx'}$ 、 $d_{yy'}$ 、 $d_{xy'}$  を得ることにより、NLOS 環境下では本来推定することができなかった  $d_{xy}^{mlos}$  を求めることが可能となる。

### 3.3 音響センシングの信号設計

本手法では送信信号として、ソナーやレーダに用いられるチャープ信号を用いる。以下が使用する線形チャープ信号  $s(t)$  である。

$$\begin{aligned} s(t) &= \sin \left( \phi_0 + 2\pi \left( f_0 t + \frac{k}{2} t^2 \right) \right), \quad (5) \\ k &= \frac{f_1 - f_0}{T} \end{aligned}$$

このとき、 $\phi_0$  は初期位相、 $f_0$  は開始周波数、 $f_1$  は終了周波数、 $T$  は  $f_0$  から  $f_1$  までのスイープ時間である。環境音のノイズや人間の声に含まれる音の周波数帯域を避けるため、使用する周波数帯域は 8–18 kHz とし、 $\phi_0 = 0$  とする。本手法では、

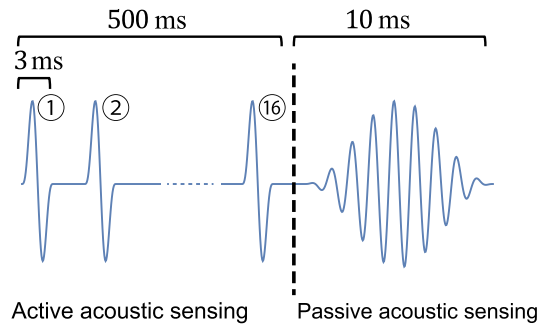


図 4 送信信号の概要

Fig. 4 Outline of the transmission signal.

スマートフォン  $X$  から  $f_0 = 8 \text{ kHz}$ 、 $f_1 = 13 \text{ kHz}$  のチャープを、スマートフォン  $Y$  から  $f_0 = 13 \text{ kHz}$ 、 $f_1 = 18 \text{ kHz}$  のチャープをそれぞれ発信するものとする。また、信号の大きな変化により生じるクリックノイズを抑制するため、ハン窓を適用する。本研究では、アクティブおよびパッシブ音響センシングに対し異なる信号を設計し (図 4)、各スマートフォンのマイクロフォンで受信された信号の時系列データと、スピーカから送信される各音響センシングの信号との自己相関を求めることで、包絡線を算出する。本論文では、目標検出基準値を超える包絡線のピークを信号の到来時刻として抽出する (図 5)。

本論文のアクティブ音響センシングでは、アクティブ音響センシングを用いた先行研究である BatMapper [12] の信号デザインを参考に、スマートフォン自身を介して受信される直接波と反射体を介して受信される反射波の重畳を避けるよう、スイープ時間を  $T = 3 \text{ ms}$  と設定する。これは、音速を  $c = 343.5 \text{ m/s}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) と仮定すると、スマートフォンと天井までの距離が  $\frac{cT}{2} \approx 0.5 \text{ m}$  以上であれば重畳を避けられるスイープ時間であり、多くの環境で適用可能な設定である。一方で、信号長を短く設計することで、アクティブ音響センシングにより得られる反射波の信号対雑音比 (SNR) が小さく、ノイズの影響を受けやすいこと

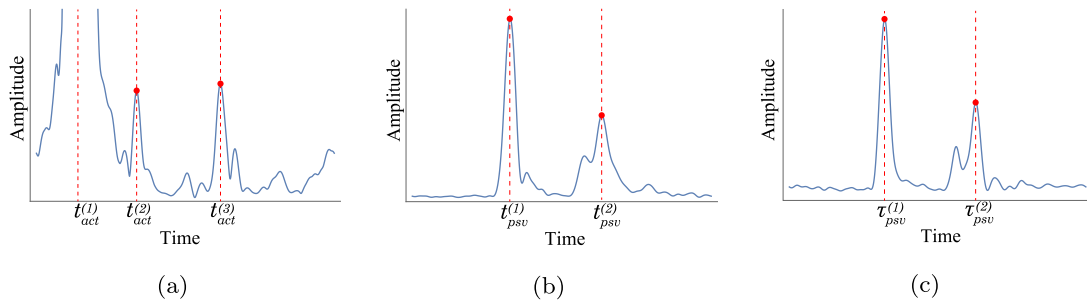


図 5 各音響センシングにて得られる包絡線と到来時刻：(a) スマートフォン X に対するアクティブ音響センシング, (b) スマートフォン X におけるパッシブ音響センシング, (c) スマートフォン Y におけるパッシブ音響センシング

Fig. 5 Envelope and arrival times obtained by: (a) active acoustic sensing for smartphone X, (b) passive acoustic sensing for smartphone X and (c) passive acoustic sensing for smartphone Y.

を確認している。そのため、同じ信号を 0.5 秒間に 16 回送信し、ノンコヒーレントアベレージング [18] により処理することで、ノイズの分散を小さくし、目標検出基準値に従う反射波の検出性能を向上させる。

相手のスマートフォンから送信された信号を受信するパッシブ音響センシングでは、信号デザインにおいて、アクティブ音響センシングとは異なり反射波の重畳による影響を考慮する必要がない。そこで、スイープ時間を十分に長くすることで自己相関時の SNR を高くする。本論文のパッシブ音響センシングでは Murakami らの手法 [3] を参考に  $T = 10 \text{ ms}$  と設定した。

本手法では、スマートフォン上部に搭載された受話用スピーカと、上部に搭載されたマイクロフォンを利用する。加えて、アクティブ音響センシングでは、信号の特定のために、スマートフォン下部に搭載されたマイクロフォンと加速度センサが併用される。近年、多くのスマートフォンでは 2 つ以上のマイクロフォンおよび加速度センサが標準で装備されている。

### 3.4 アクティブ音響センシング

アクティブ音響センシングは、2 つの距離  $d_{xx'}$  および  $d_{yy'}$  を得るために用いられる。これらは同様の手順で求めることができるので、本節では  $d_{xx'}$  を例として説明する。

図 5 (a) はスマートフォン X のアクティブ音響センシングにより得られた包絡線を示しており、強度が最大である最初のピークがスマートフォン X 自身が発信した信号の直接波である。よって、その到来時刻  $t_{act}^{(1)}$  をスマートフォン X からの信号の発信時刻として用いる。2 番目以降に観測されるピークは天井をはじめとする反射体からの反射波であり、それらの到来時刻を  $t_{act}^{(i)}$  とする。もしスマートフォン X' からの信号の到来時刻  $t_{act}^{x'}$  を抽出することができれば、距離  $d_{xx'}$  を以下のように表せる。

$$d_{xx'} = c(t_{act}^{x'} - t_{act}^{(1)}) \quad (6)$$

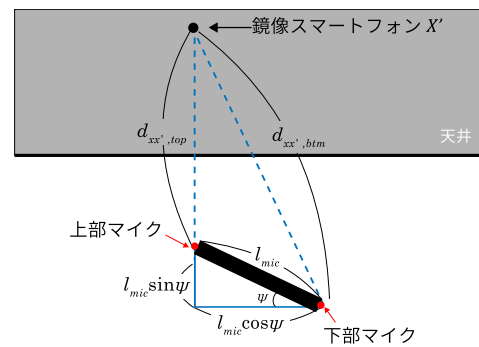


図 6 天井の鏡像スマートフォン X' のスピーカとスマートフォン X の 2 つの内蔵マイクロフォンの位置関係

Fig. 6 Positional relationship between the speaker in the ceiling mirror-image smartphone X' and the two built-in microphones in smartphone X.

図 5 (a) に示されるように複数の到来時刻  $t_{act}^{(i)}$  が観測されており、その中から到来時刻  $t_{act}^{x'}$  を一意に決定する必要がある。そのため、アクティブ音響センシングでは、スマートフォンに搭載されている 2 つのマイクロフォンおよび加速度センサを用いて到来時刻を特定する。

図 6 はスマートフォン X' のスピーカと、スマートフォン X の 2 つのマイクロフォンの位置関係を示しており、これに対し、次のような関係式を考える。

$$\begin{aligned} d_{xx',btm}^2 &= (d_{xx',top} + l_{mic} \sin \psi)^2 + (l_{mic} \cos \psi)^2 \\ &= d_{xx',top}^2 + 2l_{mic}d_{xx',top} \sin \psi + l_{mic}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

このとき、 $d_{xx',top}$  は鏡像スピーカと上部マイクロフォンの距離、 $d_{xx',btm}$  は鏡像スピーカと下部マイクロフォンの距離、 $l_{mic}$  はマイクロフォン間の距離、 $\psi$  はスマートフォンのピッチ角である。式 (7) を整理すると、ピッチ角  $\psi$  は以下のように表現できる。

$$\psi = \sin^{-1} \left( \frac{d_{xx',btm}^2 - d_{xx',top}^2 - l_{mic}^2}{2l_{mic}d_{xx',top}} \right) \quad (8)$$

各マイクロフォンにおいて複数の到来時刻  $t_{act}^{(i)}$  が得られ、

$d_{xx',top}$  および  $d_{xx',btm}$  の候補を求めることができる。これにより、ピッチ角の候補  $\psi^{(j)}$  ( $j \in \{1, 2, \dots\}$ ) が得られる。

ここで、端末の座標系における3次元の加速度データを  $\mathbf{a}_{acc} = [a_x, a_y, a_z]$  とする。  $g$  を重力加速度とすると、ピッチ角  $\psi_{acc}$  は以下のように与えられる。

$$\psi_{acc} = \sin^{-1} \left( \frac{a_y}{g} \right) \quad (9)$$

天井からの1次反射波を用いて推定された  $\psi^{(j)}$  は、  $\psi_{acc}$  と近い値をとる。そこで、式(10)を満たす  $\psi^{(j)}$  に対応する  $d_{xx',top}^{(j)}$  を  $d_{xx'}$  と考える。

$$\min_{j \in \{0, 1, 2, \dots\}} |\psi^{(j)} - \psi_{acc}| \quad (10)$$

### 3.5 パッシブ音響センシング

本手法では、BeepBeepの概念を用いて距離  $d_{xy'}$  を推定する。図5(b)および図5(c)はそれぞれスマートフォンXおよびYでのパッシブ音響センシングにより得られる包絡線を示している。BeepBeepは  $d_{xy}$  を求めるためにパッシブ音響センシングにおける直接波の到来時刻を使用するが、NLOS環境下では直接波を受信することはできない。これに対し、本研究では、式(1)を基に直接波の到来時刻  $t_{psv}^{(1)}$ ,  $\tau_{psv}^{(1)}$  を鏡像スマートフォンY', X'からの信号の到来時刻  $t_{psv}^{y'}$ ,  $\tau_{psv}^{x'}$  にそれぞれ置き換えることで  $d_{xy'}$  を求める。したがって、距離  $d_{xy'}$  は次のように表すことができる。

$$d_{xy'} = \frac{c}{2} \cdot (t_{psv}^{y'} - t_{act}^{(1)}) + (\tau_{psv}^{x'} - \tau_{act}^{(1)}) + l_x + l_y \quad (11)$$

使用するスピーカの指向性を考慮すると、NLOS環境下では多くの場合天井からの1次反射波の強度が最も大きくなることを実験的に確認している。これは3.1節にて述べたように、天井方向に指向性を持つスマートフォン上部のスピーカを使用しているためである。ゆえに本論文では、受信信号のうち強度が最大となる時刻  $t_{psv}^{(i)}$  および  $\tau_{psv}^{(j)}$  を信号の受信時刻  $t_{psv}^{y'}$  および  $\tau_{psv}^{x'}$  として用いる。

## 4. LOS/NLOS 判別

提案手法では、LOS/NLOS環境にかかわらず測距が機能する必要がある。そこで、本章では提案した測距手法に基づいたLOS/NLOS判別手法について説明する。LOS環境とNLOS環境で受信した信号の違いは、パッシブ音響センシングにおいて直接波が観測されたかどうかであり、測定環境がLOSかNLOSかによって受信時刻の解釈が変化する。

しかしながら、反射波も同じ信号であるため、最初に到来するピークを確認しそれが直接波か判断するのは難しい。よって我々はまず測定環境がLOSであると仮定する。このとき、図7が示すように、最初のピークは相手スマー

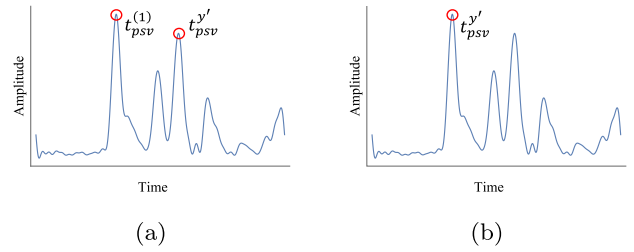


図7 (a) LOS環境と(b) NLOS環境を想定したときのパッシブ音響センシングで観測された信号の到来時刻

Fig. 7 Arrival time observed during passive acoustic sensing assuming: (a) an LOS environment and (b) an NLOS environment.

トフォンから送信された直接波の到来時刻  $t_{psv}^{(1)}$  ( $\tau_{psv}^{(1)}$ ) であり、2番目以降のピークのうち強度が最大のものが1次反射波の到来時刻  $t_{psv}^{y'}$  ( $\tau_{psv}^{x'}$ ) であると決定できる。これにより、式(1)および(4)から  $\tilde{d}_{xy}^{los}$  および  $\tilde{d}_{xy}^{nlos}$  をそれぞれ得ることができる。LOS環境であるならばこれらは同じ値となるため、以下の条件を満たす場合に環境がLOSであると考える。

$$|\tilde{d}_{xy}^{los} - \tilde{d}_{xy}^{nlos}| < \beta \quad (12)$$

5.2節の実験より、理想的なNLOS環境下での測距精度は10cm前後であることが分かっている。また、同様の実験から理想的なLOS環境下での精度が1cm未満であることが確認されており、これらの差にマージンを含めた  $\beta = 20$  cm を閾値として設定した。

環境がLOS環境であると判定した場合、上記の手法で得られた  $\tilde{d}_{xy}^{los}$  をスマートフォン間の距離  $d_{xy}$  として用いる。環境がNLOS環境と判定された場合、3章で説明した手法を用いて距離  $d_{xy}$  を求める。

## 5. 評価実験

### 5.1 実験設定

本論文では、ユーザがスマートフォンの画面を見えるように静止状態で所持していることを仮定し、複数の状況を想定した評価実験を行った。実験には、2台のスマートフォン Samsung Galaxy S10 plus を使用した。スマートフォンで録音するときのサンプリングレートは48kHzに設定した。実験では、スマートフォンに内蔵された上下のマイクロフォンで信号を録音した。録音された実験データには環境ノイズが含まれており、これらのデータに対してオフラインで提案手法が適用された。

### 5.2 測距性能

#### 5.2.1 パラメータ

提案手法の測距性能を調査するため、3つのパラメータを変化させ、測距実験を屋内で実施した。

- 障害物 – スマートフォン間の障害物の大きさによる

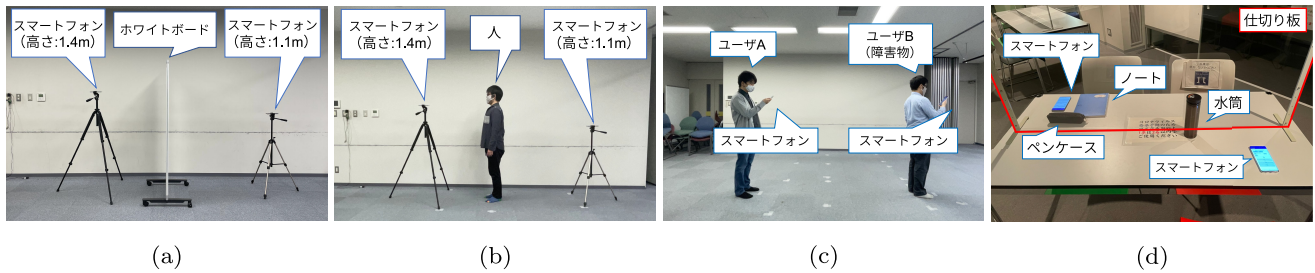


図 8 実験環境：(a) ホワイトボードを障害物とした場合、(b) 人が障害物として間に立っている場合、(c) ユーザ自身が障害物になっている場合、(d) スマートフォンがテーブルに置かれ、カップやティッシュケースなどの物体が障害物となっている場合

Fig. 8 Measurement environments where: (a) a whiteboard is installed as an obstacle, (b) a standing person represents an obstacle, (c) the user is an obstacle and (d) smartphones are placed on a desktop, where a cup, tissue case and other items act as obstacles.

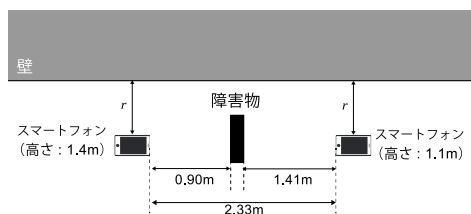


図 9 実験環境の俯瞰図

Fig. 9 Overhead view of the experimental environment.

影響を調査するため、反射面の大きいホワイトボードと反射面の小さい人を障害物として用いた (図 8(a), 図 8(b)).

- 壁との距離 – スマートフォンと室内の最も近くにある壁との距離  $r$  を 0.7, 1.7, 2.7m の 3 通りに変化させた (図 9 参照).
- ピッチ角 – スマートフォンのピッチ角  $\psi$  を  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  に変化させた.

図 9 はスマートフォンの高さが 1.1m と 1.4m の実験環境を示している. 室内の天井は床に対し平行で、天井高は 2.5m である. スマートフォン間の距離はすべて 2.33m で固定とし、上記のパラメータを変化させながら、24 種類の測定をそれぞれ 200 回ずつ行った.

### 5.2.2 結果

壁までの距離  $r$  と障害物の種類によって分類した推定距離の累積誤差関数を図 10 に示す. スマートフォンと壁との距離が遠い  $r = 1.7, 2.7m$  の場合、90th-percentile 誤差が 11.97cm 以下になることを確認した. 一方、スマートフォンと壁との距離が近い  $r = 0.7m$  の場合は、ほぼすべてのケースで距離が正しく推定されなかった.

提案された測距モデルでは、アクティブおよびパッシブ音響センシングが用いられている.  $r = 0.7m$  において、アクティブ音響センシングとパッシブ音響センシングのどちらにも問題があるのかを調べるために、それぞれのセンシングで推定された距離の正解率を算出する. 本論文では、推

定距離の誤差が 5cm 以下であることを正解とし、正解率は  $N_{cor}/N \cdot 100\%$  で表される. このとき、 $N$  は試行回数、 $N_{cor}$  はその中で距離が正しく推定された回数である.

図 11 は、 $r = 0.7, 1.7, 2.7m$  の位置でアクティブ音響センシングにより推定した  $d_{xx'}$  と  $d_{yy'}$  の正解率を示している. これは、アクティブ音響センシングにおいて、提案式 (7) から (10) を用いて天井からの 1 次反射波を求められるかを示している. その結果、 $r = 0.7m$ ,  $\psi = 0^\circ$  の場合の  $d_{xx'}$  と  $d_{yy'}$  が正しく推定できないケースがあることが分かった.

図 12 は、パッシブ音響センシングによって推定した  $d_{xy'}$  の正解率を示したものであり、 $r = 0.7m$  の  $d_{xy'}$  を正しく推定できないことを確認した. この問題については、6.1 節で述べる.

### 5.3 LOS/NLOS 判別の信頼性

本節では、提案した LOS/NLOS 判別手法がどれだけ効果的に機能するかを調べる. 実験環境としては、5.2 節での測距に最適な条件である、 $r = 2.7m$ ,  $\psi = 0^\circ$  の環境を用いた. この実験は、スマートフォンの間に人がいる NLOS 環境と、スマートフォンの間に障害物がない LOS 環境の 2 つの環境で実施した.

図 13 は提案する LOS/NLOS 判別アルゴリズムで算出された、各環境における推定距離の累積誤差関数である. ほとんどの場合で提案手法が正しく動作することが確認でき、90th-percentile 誤差はそれぞれ 6.37mm, 39.2mm 以下であることを確認した.

### 5.4 スケーラビリティ

NLOS 環境での測距方法の有効性を明らかにするため、2 つの現実的な状況で実験を実施した (図 8(c), 図 8(d)):

- Case 1: 2 人のユーザが同じ方向を向いており、ユーザ自身が障害物となった場合
- Case 2: ユーザがスマートフォンを机の上に置いてお

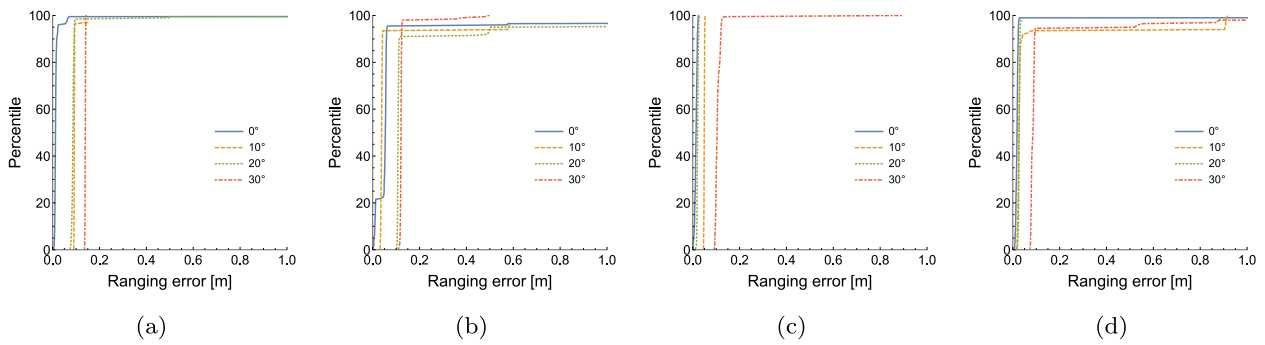


図 10 (a)  $r = 1.7$  m で障害物がホワイトボードの場合、(b)  $r = 1.7$  m で障害物が人の場合、(c)  $r = 2.7$  m で障害物がホワイトボードの場合、(d)  $r = 2.7$  m で障害物が人の場合における測距の累積誤差関数

Fig. 10 Cumulative error function for ranging with: (a)  $r = 1.7$  m and whiteboard, (b)  $r = 1.7$  m and person, (c)  $r = 2.7$  m and whiteboard, and (d)  $r = 2.7$  m and person.

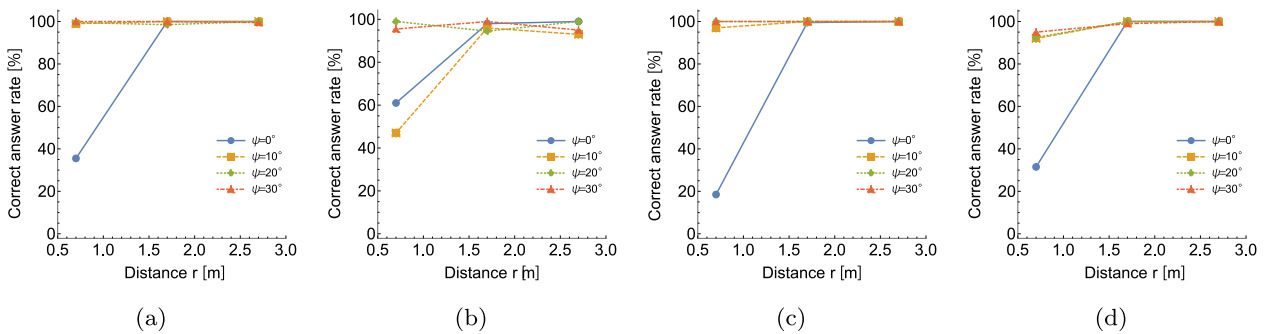


図 11 (a) 障害物がホワイトボードの場合と (b) 障害物が人の場合に、スマートフォン X におけるアクティブ音響センシングで推定した  $d_{xx'}$  の正解率、(c) 障害物がホワイトボードの場合と (d) 障害物が人の場合に、スマートフォン Y におけるアクティブ音響センシングで推定した  $d_{yy'}$  の正解率

Fig. 11 Correct answer rate of  $d_{xx'}$  estimated by active acoustic sensing by smartphone X with (a) whiteboard and (b) person, and of  $d_{yy'}$  estimated by active acoustic sensing by smartphone Y with (c) whiteboard and (d) person.

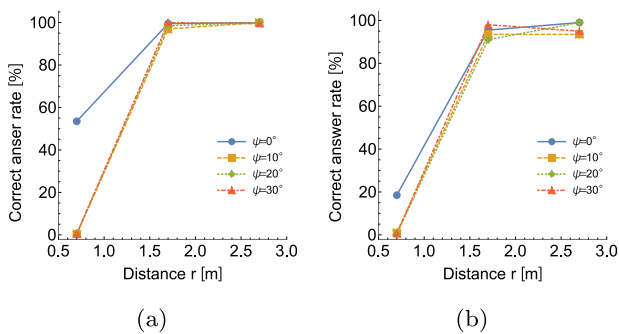


図 12 障害物が (a) ホワイトボードの場合と (b) 人の場合にパッシブ音響センシングで推定した  $d_{xy'}$  の正解率

Fig. 12 Correct answer rate of  $d_{xy'}$  estimated by passive acoustic sensing with (a) whiteboard and (b) person.

り、カップやティッシュケースといった物体が障害物となっている場合

なお、Case1 の環境は 5.2 節と同様である。また、Case2 の環境において天井は床に対して平行であり、天井高は

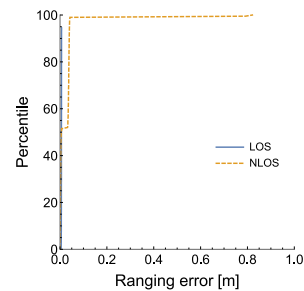


図 13 LOS 環境と NLOS 環境における測距の累積誤差関数

Fig. 13 Cumulative error function for ranging in the LOS and NLOS environments.

2.65 m、机の高さは 0.74 m であった。実験はそれぞれ 200 回ずつ実施した。

各ケースにおける推定距離の累積誤差関数を図 14 に示す。90th-percentile 誤差はそれぞれ 16.0 cm, 20.8 cm 以下であることを確認し、現実的な環境下でも本測距手法が機能することを明らかにした。



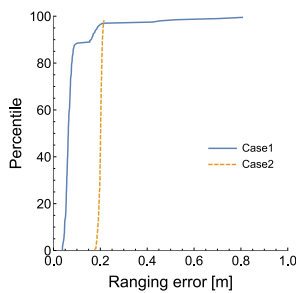


図 14 2つの現実的な状況における測距の累積誤差関数

Fig. 14 Cumulative error function for ranging in two realistic cases.

## 6. 考察

### 6.1 壁からの反射波による影響

#### 6.1.1 アクティブ音響センシング

5.2 節では、図 11 より、 $r = 0.7\text{ m}$ 、 $\psi = 0^\circ$  の実験環境では、アクティブ音響センシングが正しく動作しないことを確認した。3.4 節では、アクティブ音響センシングでの到来時刻  $t_{act}^x$  と  $\tau_{act}^y$  の取得方法を提案している。しかし、スマートフォンの天井に対する角度と壁に対する角度が近い場合、 $t_{act}^x$  と  $\tau_{act}^y$  を正しく推定することが困難であり、これは本手法の限界である。実験ではスマートフォンを壁と平行に設置しているが、スマートフォンに搭載された2つのマイクロフォンはサイドフレームと平行ではなく、スマートフォンの壁に対する角度は  $2.7^\circ$  となっている。手動での設置による誤差も含まれているため、 $r = 0.7\text{ m}$ 、 $\psi = 0^\circ$  のすべての実験と、 $r = 0.7\text{ m}$ 、 $\psi = 10^\circ$  の一部の実験でアクティブ音響センシングが正しく動作しなかった。ユーザがスマートフォンを所持していることを考えると、スマートフォンの天井に対する角度と壁に対する角度が常に近い状態になることは少なく、今後スマートフォンの揺れや移動を考慮したアルゴリズムを検討することで、より頑健な信号特定手法を検討する予定である。

一方、 $r = 1.7\text{ m}$  と  $r = 2.7\text{ m}$  の実験では、スマートフォンの角度にかかわらず、アクティブ音響センシングが正常に動作した。これは、壁までの距離が十分にがあるため、アクティブ音響センシングが壁からの反射波の影響をほとんど受けないためであると考えられる。

#### 6.1.2 パッシブ音響センシング

本論文では、音響信号の送信に天井に対して強い指向性を持つスマートフォンの上部スピーカを使用している。そのため、パッシブ音響センシングでは、最も振幅の大きいピークを到来時刻  $t_{psv}^y$  と  $\tau_{psv}^x$  として決定する。しかし、図 12 より、最大の振幅を持つ到来時刻を用いて推定した距離  $d_{xy}$  は、 $r = 0.7\text{ m}$  ではほとんどの場合正しくないことが確認された。これはスマートフォンから壁までの距離が短い場合、壁からの1次反射波の振幅が最も大きくなるためである。

一方で、壁までの距離が短い場合には、アクティブ音響センシングでもパッシブ音響センシングでも壁からの1次反射波を受信でき、提案した測距モデルが適用可能であることを確認した。そこで今後の課題として、パッシブ音響センシングにおける到来時刻  $t_{psv}^y$ 、 $\tau_{psv}^x$  をよりロバストに検出する手法を開発し、壁からの1次反射波をより効果的に利用する予定である。

### 6.2 測距誤差の要因

図 10 より、スマートフォンのピッチ角が大きくなるほど測距誤差が大きくなることが確認された。これはスピーカの指向性が天井からの1次反射波のSNRを低下させていることに起因していると考えられる。

また図 14 の Case 2 では、他の実験に比べて測距誤差が大きいことを確認した。このケースでは他の実験と異なり、スマートフォンがテーブルの上に設置されているため、スマートフォンから天井までの距離が長くなっている。そのため天井からの1次反射波のSNRが低下し、測距誤差が大きくなっていると考えられる。

### 6.3 LOS/NLOS 判別におけるパラメータの依存性

本手法では、条件式 (12) を用いて、測定環境が LOS か NLOS かを判断している。5.3 節より、理想環境では LOS 環境と NLOS 環境の誤判別がわずかであり、現状の  $\beta = 20\text{ cm}$  で十分動作することが確認された。しかしながら、5.2 節や 5.4 節の実験結果より、スマートフォンのピッチ角やスマートフォンと天井との距離が大きい場合、提案手法の測距誤差が大きくなることが確認された。特に 5.4 節の Case 2 では測距誤差が  $20\text{ cm}$  に近づいており、このようなSNRが低下する環境では  $\beta$  をより大きな数値に設定する必要があると考えられる。スマートフォンのピッチ角やスマートフォンと天井との距離はスマートフォンに内蔵された加速度センサやアクティブ音響センシングの値によって推定することが可能であるため、これらの値を用いて天井が高い場合などでは適応的に閾値を変えることで、よりロバストに判別を行えるよう手法を改善することが今後の課題の1つである。

### 6.4 BeepBeep との比較

図 13 より、LOS 環境下で機能する BeepBeep の測距誤差よりも、NLOS 環境下で機能する提案手法の方が測距誤差が大きくなっていることを確認できる。提案手法では、アクティブ音響センシングで得られた  $d_{xx'}$  と  $d_{yy'}$ 、パッシブ音響センシングで得られた  $d_{xy'}$  を用いて、NLOS 環境下でのスマートフォン間の距離  $d_{xy}^{nlos}$  を推定するため、測距誤差はこれら3つの値の誤差によって累積される。これが BeepBeep よりも測距誤差が大きくなってしまいう主要因と考えられる。

## 6.5 限界と展望

### 6.5.1 天井の形状

本論文では、一般的な平らな天井を想定し、3.2節における図3(b)の幾何学的性質に基づき式(4)を導出している。一方で、様々な天井に対し本手法の適用を考えると、傾斜がついている天井やドーム形状の天井などへの対応を検討する必要がある。特に、ドームのような丸みを帯びた形状の天井での適用は難しいと考えられ、これは本手法の限界であり、今後の課題である。

### 6.5.2 測定範囲

実験より、スマートフォン間の距離が最大2.4mのNLOS環境下で測距ができることを確認している。このときのSNRは十分高いものであり、測定環境よりも長い距離での測距が可能であると考えられる。一方で、これは天井との距離やスマートフォンのスピーカ・マイク性能と密接に関係し、一概に論じることはできず、今後の課題として明らかにしたい。

また、本手法で利用される天井の1次反射波は、直接波と比較し、SNRが低下するといった欠点がある。受信される信号のSNRはスピーカやマイクの指向性にも影響を受けるが、NLOS環境における本手法の測定範囲はLOS環境における測定範囲よりも小さくなると考えられる。

### 6.5.3 ユーザの移動

ユーザが移動することを仮定するとき、ドップラーシフトなど移動時特有の影響が発生し、測距誤差が増加することが考えられる。ユーザの移動が測距にどのように影響するかは現時点で未検証であり、問題の抽出および解決に今後取り組む予定である。

## 7. おわりに

本論文では、天井からの1次反射波を利用して鏡像スマートフォンを生成し、NLOS環境下では実測できないスマートフォン間の距離を算出する手法を提案した。加えて、提案手法の実用性を高めるために、LOS/NLOS判別手法を提案した。室内で2台のスマートフォンを使い、様々な配置で測距実験を行った。理想環境下における測距時の90th-percentile誤差は11.97cm以下であり、LOS環境下と比較すると測距性能は低下するが、本来測距ができないNLOS環境下においても高精度な測距が可能であることを確認した。また、実験に基づく議論により、提案手法の有効性を明らかにした。

今後は、パッシブ音響センシングにおける到来時刻のロバストな検出方法の開発や、壁からの1次反射波の使い分けなどを計画している。また本論文では、ユーザが静止している環境下での距離を測定したが、今後はユーザが移動する環境下でも測定し、その問題点の洗い出しと解決に着手したいと考えている。

謝辞 本研究はJSPS科研費JP19H04222, 20K21781お

よび立石科学技術振興財団の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Kurita, J., Sugawara, T. and Ohkusa, Y.: Effectiveness of COCOA, a COVID-19 contact notification application, in Japan, *medRxiv* (2020).
- [2] Peng, C., Shen, G., Zhang, Y., Li, Y. and Tan, K.: BeepBeep: A high accuracy acoustic ranging system using cots mobile devices, *Proc. 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.1–14, ACM (2007).
- [3] Murakami, H., Suzaki, T., Nakamura, M., Hashizume, H. and Sugimoto, M.: Five Degrees-of-freedom Pose-estimation Method for Smartphones using a Single Acoustic Anchor, *IEEE Sensors Journal* (2020).
- [4] Murakami, H., Kandori, Y., Suzaki, T., Nakamura, M., Watanabe, H., Hashizume, H. and Sugimoto, M.: NL-Beep: A Ranging System between Multiple Smartphones Using Acoustic Sensing in NLOS Environments, *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp.1–8, IEEE (2021).
- [5] Liu, S., Jiang, Y. and Striegel, A.: Face-to-face proximity estimation using bluetooth on smartphones, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.13, No.4, pp.811–823 (2013).
- [6] Bian, S., Zhou, B. and Lukowicz, P.: Social distance monitor with a wearable magnetic field proximity sensor, *Sensors*, Vol.20, No.18, p.5101 (2020).
- [7] Höflinger, F., Zhang, R., Hoppe, J., Bannoura, A., Reindl, L.M., Wendeberg, J., Bühner, M. and Schindelbauer, C.: Acoustic self-calibrating system for indoor smartphone tracking (assist), *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp.1–9, IEEE (2012).
- [8] Lazik, P., Rajagopal, N., Shih, O., Sinopoli, B. and Rowe, A.: ALPS: A bluetooth and ultrasound platform for mapping and localization, *Proc. 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.73–84, ACM (2015).
- [9] Zhang, Z., Chu, D., Chen, X. and Moscibroda, T.: Swordfight: Enabling a new class of phone-to-phone action games on commodity phones, *Proc. 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp.1–14 (2012).
- [10] Erdélyi, V., Le, T.-K., Bhattacharjee, B., Druschel, P. and Ono, N.: Sonoloc: Scalable positioning of commodity mobile devices, *Proc. 16th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp.136–149, ACM (2018).
- [11] Großwindhager, B., Rath, M., Kulmer, J., Bakr, M.S., Boano, C.A., Witrissal, K. and Römer, K.: SALMA: UWB-based Single-Anchor Localization System using Multipath Assistance, *Proc. 16th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.132–144, ACM (2018).
- [12] Zhou, B., Elbadry, M., Gao, R. and Ye, F.: BatMapper: Acoustic Sensing Based Indoor Floor Plan Construction Using Smartphones, *Proc. 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp.42–55, ACM (2017).
- [13] Pradhan, S., Baig, G., Mao, W., Qiu, L., Chen, G. and Yang, B.: Smartphone-based Acoustic Indoor Space Mapping, *Proc. ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol.2, No.2, p.75 (2018).
- [14] Zhou, B., Elbadry, M., Gao, R. and Ye, F.: BatTracker:

High precision infrastructure-free mobile device tracking in indoor environments, *Proc. 15th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, pp.1–14 (2017).

- [15] Shih, O. and Rowe, A.: Occupancy estimation using ultrasonic chirps, *Proc. ACM/IEEE 6th International Conference on Cyber-Physical Systems*, pp.149–158, ACM (2015).
- [16] Shen, S., Chen, D., Wei, Y.-L., Yang, Z. and Choudhury, R.R.: Voice localization using nearby wall reflections, *Proc. 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.1–14 (2020).
- [17] Wang, W., Li, J., He, Y. and Liu, Y.: Symphony: Localizing multiple acoustic sources with a single microphone array, *Proc. 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.82–94 (2020).
- [18] Rompelman, O. and Ros, H.: Coherent averaging technique: A tutorial review Part 1: Noise reduction and the equivalent filter, *Journal of Biomedical Engineering*, Vol.8, No.1, pp.24–29 (1986).



神鳥 勇貴

2021年北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科卒業。現在、同大学大学院情報科学院情報理工学コース修士課程在学中。屋内音響測位システムに関する研究に従事。



村上 弘晃 (正会員)

2016年北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科卒業。2018年同大学大学院情報科学研究科修士課程修了。2021年同大学大学院情報科学研究科博士課程修了。博士(情報科学)。同年より東京大学工学系研究科特任研究員となり、現在に至る。ユビキタスコンピューティング、モバイルコンピューティングの研究に従事。



須崎 太久弥

2020年北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科卒業。現在、同大学大学院情報科学院情報理工学コース修士課程在学中。屋内音響測位システムに関する研究に従事。



中村 将成 (正会員)

2014年北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科卒業。2016年同大学大学院情報科学研究科情報理工学専攻修士課程修了。2018年同大学院情報科学研究科情報理工学専攻博士課程修了。博士(情報科学)。2016年三菱電機株式会社情報技術総合研究所研究員。2020年より北海道大学助教となり、現在に至る。



渡邊 拓貴 (正会員)

2012年神戸大学工学部電気電子工学科卒業。2014年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2017年同大学院工学研究科博士後期課程修了。同年より北海道大学大学院情報科学研究科助教、現在に至る。博士(工学)。ウェアラブルコンピューティング、ユビキタスコンピューティングの研究に従事。ACM会員。



橋爪 宏達 (正会員)

1984年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年より東京大学助手(文献情報センター)。1986年学術情報センター助教授。1989~1990年までペンシルバニア大学客員助教授。1990年文部省学術調査官(併任)。1998年学術情報センター教授。2000年国立情報学研究所教授。2002年より総合研究大学院大学教授を併任し、現在に至る。



杉本 雅則 (正会員)

1990年東京大学工学部航空学科卒業。1995年同大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。同年学術情報センター(現、国立情報学研究所)助手。1999年東京大学助教授。2012年より北海道大学教授となり、現在に至る。