

単一スピーカによる測距を可能にする 多重反射波からの時刻同期手法

村上 弘晃^{1,a)} 杉本 雅則^{2,b)} 川原 圭博^{1,c)}

概要: 本論文では, 単一のスピーカから送信される音響信号の多重反射波を用いたモバイルデバイスとの新たな時刻同期手法について述べる. 時刻同期手法では, 計測を通して得られた床と天井を介する多重反射波に関する知見に基づき, 直接波と1~3次の反射波が利用される. また, 直接波と各反射波の到来時間差に着目した多重反射波の到来区間推定を提案し, 同一の信号である直接波と多重反射波を特定する. 評価実験を通して, 90パーセンタイルでの同期誤差が416 μs 以下となることを確認し, 提案手法の有用性や限界を明らかにした.

Time Synchronization Method Using Multiple Reflected Signals to Enable Ranging with a Single Speaker

HIROAKI MURAKAMI^{1,a)} MASANORI SUGIMOTO^{2,b)} YOSHIHIRO KAWAHARA^{1,c)}

1. はじめに

本論文では, 単一スピーカを用いた新たな時刻同期手法について述べる.

屋内測位は屋内での活動を支援するための重要な技術である. 屋外の標準測位技術として, GNSS (Global Navigation Satellite System) があるが, 屋内では壁や天井による電波の遮蔽により, その利用が難しい. 高精度な屋内測位が可能な手法に, 音響信号を用いた測位 (音響測位) がある. 音響測位では, 屋内に設置した位置が既知の複数のスピーカから変調された音響信号を送信し, マイクロフォンで受信することで, 測位対象であるマイクروفンの位置を推定する. 商業施設や学校等の屋内施設には消防法に従い, 必ずスピーカが設置されている点や, スマートフォンを筆頭とする市販のモバイルデバイスには標準でマイクロフォンが搭載されている点が, 音響測位の利点と言える.

音響測位では, 送受信ノード間の伝搬時間 (Time of Arrival, ToA) や, 到来時間差 (Time Difference of Arrival, TDoA) に基づく測位方式が用いられている. ToA 方式では送受信ノード間の時刻同期を必要とする. しかし, スマートフォンを含む市販のモバイルデバイスでは, 送受信ノード間の正確な時刻同期を行うことが難しく, 時刻同期を必要としない TDoA 方式での測位が主流となっている. 一方で, ToA 方式は下記の点で TDoA 方式と比較し優れており, モバイルデバイスにおいても ToA 方式での測位が望まれる.

- 測位に必要なスピーカ数が少ない.
- 障害物による信号遮蔽に対して頑健である.
- 測位精度が高い.

屋内施設においては隣接するスピーカ数が少ない点, 実環境では障害物やユーザ自身による送信信号の遮蔽が頻繁に生じる点から, ToA 方式は実環境に即した測位手法と言える.

そこで本論文では, 単一の設置スピーカから送信される直接波に加え, 多重反射波を利用した, スピーカとモバイルデバイスのマイクロン間での時刻同期手法を提案する. 提案手法では, 3節で紹介する床と天井を複数回経由する多重反射波の特徴に着目し利用する.

¹ 東京大学 大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

² 北海道大学 大学院情報科学院
Graduate School of Information Science and Technology,
Hokkaido University

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

b) sugi@ist.hokudai.ac.jp

c) kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

本論文の貢献は下記の通りである。

- 床と天井を介する多重反射波に着目し、直接波と1～3次反射波を用いたスピーカとモバイルデバイス間の時刻同期手法を提案した。
- 到来時間差に着目した多重反射波の到来区間推定を提案し、同一の信号である直接波と多重反射波を特定した。
- 1台のスピーカとスマートフォンの搭載マイクロフォンを用いた評価実験により、90パーセントイル誤差が416 μs 以下となる同期性能が得られることを示した。

2. 関連研究

本節では、音響信号を用いた測位と測距、時刻同期に関連する技術に加え、本論文の重要な位置付けにある反射波を活用した関連技術について言及する。ここでは、主にモバイルコンピューティングに関する研究に重点を置く。

2.1 音響信号を用いた測位・測距

ToA方式に基づく音響測位システム [1], [2] では、スピーカとマイクロフォン間における信号の伝搬時間に音速を乗じることで距離を算出し、三辺測量の原理で位置を計算する (図 1a)。ToA方式では、 N 次元座標を推定するためには N 台のスピーカを必要とする。そのため、2次元測位においては2台のスピーカを必要とするが、これはスピーカとマイクロフォンの高さが同一、もしくはマイクロフォンの高さが既知であることを前提とする。そのため、多くのケースでは2次元測位に対しても3台のスピーカを必要とする。ToA方式を用いる Active Bats [1] では、無線通信による時刻同期を行うために独自のデバイスを設計し、非常に高精度な測位を達成する。また、Zhengら [3] は、デバイス間で相互に信号を送受信することで往復の伝搬時間を計算し、距離を計算する。BeepBeep [4] は、スマートフォンに対してこの方法を適用し、スマートフォン間の距離を算出する。

TDoA方式に基づく音響測位システム [5], [6] では、複数のスピーカから同時に信号が送信され、その到来時間差から位置を計算する (図 1b)。スピーカとマイクロフォン間の時刻同期を必要としない TDoA方式では、 N 次元座標の推定に $N + 1$ 台のスピーカを必要とする。ToA方式と同様の理由で、2次元測位に対しても3次元測位と同様に4台のスピーカを必要とするケースが多い。時刻同期を必要としないため、モバイルデバイスを用いた多くの音響測位で広く利用される。TDoA方式では、2台のスピーカからの信号の到来時間差を利用するため、ToA方式とは異なり1台のスピーカから位置の推定や補正に利用可能な観測値を算出することができない。屋内施設に設置されているスピーカ数が限られていることや、障害物による信号の遮蔽を考えると、モバイルデバイスにおいても、ToA方式

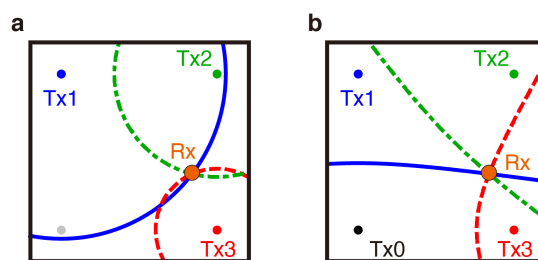


図 1 (a) ToA 方式と (b) TDoA 方式の概要

での測位が望まれる。

本論文では、無線通信機能やマイクロフォンを有する特別なスピーカを用いることなく、音響信号の送信を目的とする標準的なスピーカでの時刻同期手法を提案する。これにより、モバイルデバイスでの ToA 方式に基づく測位を可能とする。

2.2 時刻同期

分散システムの分野では、時間同期に焦点を当てた多くの研究がある [7], [8], [9]。時刻同期の有効な手法として、Network Time Protocol (NTP) があり、往復メッセージの遅延平均を利用して時刻を設定する。しかし、ミリ秒以下の精度を達成することは難しく、測位を目的とした時刻同期には不向きである [10]。そこで、Lazikら [10] は TDoA方式に基づく時刻同期手法を提案し、平均で 720 μs の同期誤差を達成した。この方式では最初の時刻同期フェーズに対し4台のスピーカが隣接する環境を必要とする。また、Sugimotoら [11] は最適に変調された LED 照明を用いたカメラベースの時刻同期手法を提案し、90パーセントイル誤差 17.4 μs 以内の非常に高精度な時刻同期を達成した。この手法は、スピーカと LED が一体となった機器を送信機とし、スマートフォンのマイクロフォンとカメラのみを用いた ToA 測位手法に拡張されている [12]。

提案手法では、90パーセントイル誤差 416 μs 以内の高精度な時刻同期を単一のスピーカのみを用いて達成する。

2.3 反射波を用いたセンシング

BatMapper [13] や SAMS [14] は、スマートフォンから送信される音響信号の反射波を用いてフロアマップを生成する。同様に、BatTracker [15] は、スマートフォンから送信される音響信号の反射波を用い、自身の相対位置を推定する。Oliverら [16] は、部屋の中央にツイーターを設置し、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計測する。

近年では、反射波とフロアプランに着目した測位手法にも注目が集まっている [17], [18]。SALMA [17] は ultra-wide bands (UWB) ベースの測位手法で、壁の1次反射波を利用し、1台の送信機のみでの2次元測位を実現した。この方法では送信機に4つの指向性アンテナを搭載するこ

とで、部屋の4つの側壁からの反射波を特定する。また、Murakamiら[18]は複数のスピーカを設置することが難しい廊下環境に着目し、1台のスピーカのみを用いた3次元測位手法を提案した。廊下の側壁と床の1次反射波を利用し、スマートフォンの2つのマイクロフォンで反射波を特定する。

本論文では、床と天井を複数回経由する多重反射波を用いた時刻同期手法を提案する。我々の知る限り、本論文は2次以上の多重反射波をセンシングに活用する初めての取り組みである。

3. 床と天井を介する多重反射波の特徴

ToA や TDoA に基づく音響測位や測距では、マイクロフォンに受信された直接波のみを利用する。しかし、近年では床や壁を介した1次反射波は十分な信号強度をもつため、積極的に測位へ利用しようとする研究が増加している。音響信号の強度は距離の二乗に反比例することが知られており、複数の反射体を経由する多重反射波は、伝搬距離が伸びるにつれ十分な信号強度が得られなくなると考えられる。そのため、2次や3次反射波のような多重反射波の利用は想定されていない。本節では、実験により得られた多重反射波の知見について述べ、提案する時刻同期手法に対して、床と天井を介する多重反射波が十分に利用可能であることを示す。

スピーカからの送信信号には、ソナーやレーダー[19]で使用さ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。

$$s(t) = \sin 2\pi(f_0 t + \frac{k}{2} t^2), \quad (1)$$

$$k = \frac{f_1 - f_0}{T}$$

このとき、 f_0 を開始周波数、 f_1 を終了周波数とし、 T を f_0 から f_1 までの遷移時間とする。本論文では、 $f_0 = 4$ kHz、 $f_1 = 10$ kHz、 $T = 20$ ms とする。また、スピーカからチャープ信号を送信する際に生じるクリッキングノイズ[6]の影響を避けるために、送信信号に対してハン窓を乗じる。計測環境は5.1項と同じである。

図2は送信信号と録音データとの相互相関で算出される包絡線であり、各ピークは直接波や反射波の到来時刻に対応する。図2aは、スピーカとマイクロフォン間の xy 平面での距離が1mの場合の包絡線を示しており、床と天井を介する2次、3次反射波がピークとして観測可能であることがわかる。また、図2bは、スピーカとマイクロフォン間の xy 平面での距離が5mの場合の包絡線であり、床と天井の2次、3次反射波が直接波や床の1次反射波よりも大きな信号強度をもつことが確認できる。これは、音響信号の強度は距離の二乗に反比例するという性質に加えて、下記の性質が影響しているためと考察される。

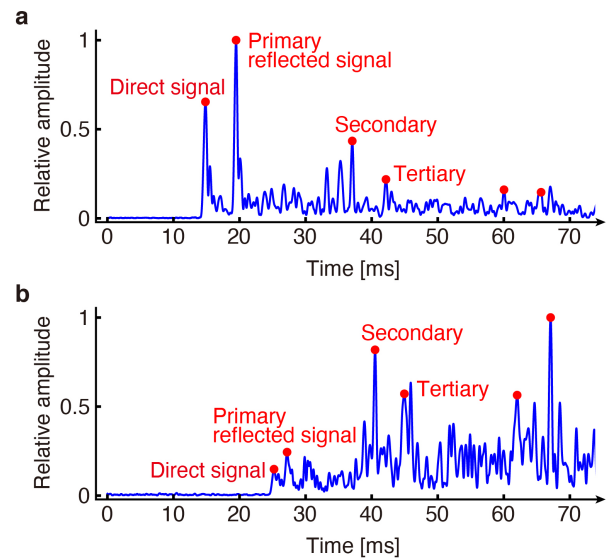


図2 スピーカとマイクロフォンが(a) 近接している場合と(b) 遠隔している場合における、送信信号と録音データとの相互相関で算出される包絡線

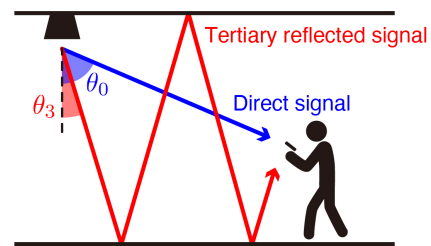


図3 直接波の放射角 θ_0 と床と天井を介する3次反射波の放射角 θ_3 の関係

- 反射波の信号強度は反射体の素材や面積に影響を受け、反射体の面積が大きいほど信号強度は大きくなる。そのため、反射体の面積が大きい床や天井を介する反射波の信号強度は大きくなる傾向がある。
- 多くのスピーカは床に面するように設置される。そのため、スピーカは床に対して強い指向性を持ち、放射角が大きくなるほど送信される音響信号の強度は減衰する。図3は直接波の放射角 θ_0 と床と天井を介する3次反射波の放射角 θ_3 との関係を示しており、床と天井を経由する回数が多い多重反射波ほど放射角が小さくなるのがわかる。

本論文では、直接波に加え、床を介する1次反射波、床と天井を介する2次、3次反射波に着目し、スピーカとスマートフォン間の時刻同期手法を提案する。以降で述べられる n 次反射波 ($n \in \{0, 1, 2, 3\}$) は床と天井を介する反射波のみを指すこととする。また、直接波は反射体を1度も経由しない0次反射波として表現する。

4. 時刻同期手法

4.1 基本原理

ToA 方式に基づく測位では、送信ノードであるスピーカと受信ノードであるマイクロフォン間の時刻同期を必要とする。これは送信ノードと受信ノードのクロックが異なるため、受信ノードのクロックにおいて、どのタイミングでスピーカから信号が送信されたかを知る必要があることを意味する。本論文ではマイクロフォンのサンプリングレートに基づくクロックにおける送信時刻を推定し、これを達成する。

屋内の設置スピーカから送信され、床や天井を介して反射される信号を、床や天井の鏡像位置にあるスピーカからの信号と捉える「鏡像スピーカ」の概念 [18] を利用する (図 4)。屋内に設置されたスピーカの位置を $P_0 = (x', y', z')$ とし、 n 次反射波 ($n \in \{0, 1, 2, 3\}$) で生成される n 次の鏡像スピーカの位置を $P_n = (x', y', z'_n)$ と定める。 n 次の鏡像スピーカの x, y 座標は常に (x', y') であり、高さ z'_n は下式で求められる。

$$z'_n = (-1)^n z' + \frac{1}{2} \left((2n - 1)(-1)^n + 1 \right) h \quad (2)$$

このとき、 h は床から天井までの高さであり、設置スピーカが天井に埋め込まれている場合には z' と h は同じ値をとる。

モバイルデバイスに搭載されたマイクロフォンの座標を $X = (x, y, z)$ とし、スピーカから信号が送信された時刻を t 、音速を c とすると、 n 次の鏡像スピーカとモバイルデバイス間の距離は下記のように表現できる。

$$\begin{aligned} \|P_n - X\| &= \sqrt{d^2 + (z'_n - z)^2} = c(t_n - t), \quad (3) \\ d &= \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2} \end{aligned}$$

このとき、 t_n は n 次の鏡像スピーカから送信された信号の到来時刻である。

式 (4) に最小二乗法を適用することで、送信時刻 t 、 xy 平面におけるスピーカとモバイルデバイス間の距離 d 、モバイルデバイスの高さ z を算出する。

$$\begin{aligned} J &= \sum_{n=0}^3 r_n(t, d, z)^2, \quad (4) \\ r_n(t, d, z) &= \sqrt{d^2 + (z'_n - z)^2} - c(t_n - t) \end{aligned}$$

4.2 信号の検出

3 節で算出される包絡線に対し、外れ値を除去するため、 m 次平滑化を行う。本稿では、サンプリングレート 48 kHz に対し $m = 11$ とした。また、Cell Averaging Constant False Alarm Rate (CA-CFAR) 処理 [20] を適用することで、直接波や多重反射波の到来時刻の候補となるピークを算出する。

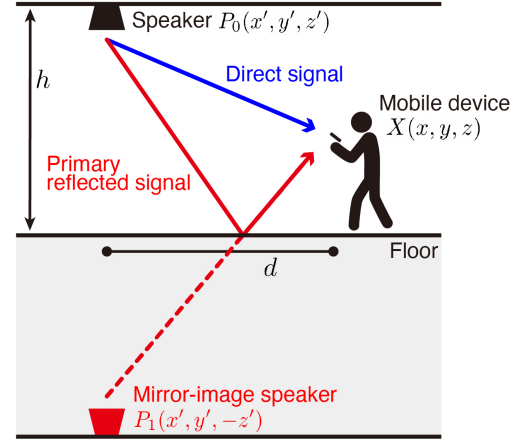


図 4 時刻同期手法の概要

算出されたピークの時刻をそれぞれ τ_i ($i \in \{0, 1, 2, \dots\}$) と定義するとき、最初に観測されるピーク τ_0 を直接波の到来時刻 t_0 と考えることができる。

4.3 多重反射波の候補の選定

直接波は最初に到来する信号であるため比較的容易に検出できるのに対し、すべての反射波は直接波と同一の信号であり、反射波の特定は難しい。そこで本項では、直接波と n 次の反射波との到来時間差に着目し、 n 次の反射波の到来区間を限定する。これにより、複数存在する反射波の候補を削減する。

4.3.1 1次反射波の到来区間

直接波と1次反射波の到達時間差は、 xy 平面に対してモバイルデバイスがスピーカに近づくと増加し、遠ざかると減少する。モバイルデバイスがスピーカと1次の鏡像スピーカに対して直線上に並ぶ場合、すなわちスピーカの真下に位置したときに、到来時間差は最大値 $2z/c$ をとる [18]。ゆえに、1次反射波の到来時刻 t_1 は下式を満たす。

$$t_0 < t_1 \leq t_0 + \frac{2z}{c} \quad (5)$$

このとき、モバイルデバイスの高さ z の範囲を $z_{min} < z < z_{max}$ とすると、到来時刻 t_1 の範囲は下記のように置き換えられ、式 (6) を満たすすべての τ_i を t_1 の候補 $t_1^{(j)}$ ($j \in \{1, 2, \dots\}$) とする。

$$t_0 < t_1 < t_0 + \frac{2z_{max}}{c} \quad (6)$$

モバイルデバイスの高さ z は床よりも高く、設置スピーカよりも低いと仮定でき、一般に $0 < z < z'$ と考えることができる。また、モバイルデバイスをもつユーザの身長等を考慮し、 z の範囲を限定することでより短い区間での候補の算出が可能となる。

4.3.2 2次反射波の到来区間

直接波と2次反射波の到来時間差を考えると、下記の関係式が与えられる。

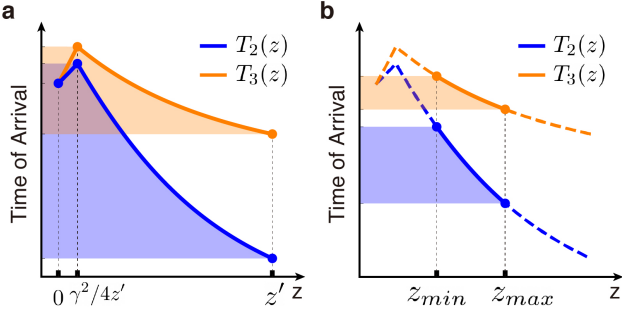


図5 (a) $0 < z < z'$ と (b) $z_{min} < z < z_{max}$ における $T_2(z)$ と $T_3(z)$ のグラフの概形

$$c(t_2 - t_0) = \sqrt{d^2 + (z'_2 - z)^2} - \sqrt{d^2 + (z' - z)^2}$$

$$t_2 = \frac{1}{c} \left(\sqrt{d^2 + (z'_2 - z)^2} - \sqrt{d^2 + (z' - z)^2} \right) + t_0 \quad (7)$$

z' , z'_2 , t_0 は既知であるため、到来時刻 t_2 は変数 d , z で定まることがわかる。

4.3.1 項で求められる任意の候補 $t_1^{(j)}$ を 1 次反射波の到来時刻と仮定すると、直接波と 1 次反射波の到来時間差より、 d と z の関係式を導出することができる。

$$c(t_1^{(j)} - t_0) = \sqrt{d^2 + (z'_1 - z)^2} - \sqrt{d^2 + (z' - z)^2} \quad (8)$$

$z'_1 = -z'$ より式 (8) を整理すると、

$$d^2 = \alpha z^2 - \beta \quad (9)$$

このとき、

$$\alpha = \frac{4z'^2 - \gamma^2}{\gamma^2}, \quad \beta = \frac{4z'^2 - \gamma^2}{4}, \quad \gamma = c(t_1^{(j)} - t_0)$$

式 (7) と式 (9) より、 t_2 は z に従う関数として表現することができる。

$$T_2(z) = \frac{1}{c} \left(\sqrt{\alpha z^2 - \beta + (z'_2 - z)^2} - \sqrt{\alpha z^2 - \beta + (z' - z)^2} \right) + t_0 \quad (10)$$

これより、 $t_1^{(j)}$ と z の区間に応じて、2 次反射波の到来区間を定めることができる。図 5a は、 $0 < z < z'$ における $T_2(z)$ のグラフの概形であり、到来時刻 t_2 の区間は下記のように与えられる。

$$\min_z T_2(z) < t_2 < \max_z T_2(z) \quad (11)$$

式 (11) を満たすすべての τ_i を t_2 の候補 $t_2^{(k)}$ ($k \in \{1, 2, \dots\}$) とする。また、図 5b より、 z の区間を短くすることで、2 次反射波の到来区間を限定できることがわかる。

4.3.3 3 次反射波の到来区間

4.3.2 項と同様に、1 次反射波の到来時刻を $t_1^{(j)}$ と仮定すると、 t_3 を z に従う関数として表現することができる。

$$T_3(z) = \frac{1}{c} \left(\sqrt{\alpha z^2 - \beta + (z'_3 - z)^2} - \sqrt{\alpha z^2 - \beta + (z' - z)^2} \right) + t_0 \quad (12)$$

図 5 は $T_3(z)$ のグラフの概形であり、式 (13) を満たすすべての τ_i を t_3 の候補 $t_3^{(l)}$ ($l \in \{1, 2, \dots\}$) とする。

$$\min_z T_3(z) < t_3 < \max_z T_3(z) \quad (13)$$

4.4 送信時刻の推定

4.3 項より得られる n 次反射波の到来時刻の候補の組合せを $C^{(i)} = \{t_0, t_1^{(j)}, t_2^{(k)}, t_3^{(l)}\}$ ($i \in \{1, 2, \dots\}$) とする。このとき、 $t_2^{(k)}$ と $t_3^{(l)}$ は 4.3 項に基づき、 $t_1^{(j)}$ を用いて算出される区間に対応する値であり、 $t_0 < t_1^{(j)} < t_2^{(k)} < t_3^{(l)}$ を満たすものとする。

すべての候補 $C^{(i)}$ に対して、式 (4) の最小二乗法により $t^{(i)}$, $d^{(i)}$, $z^{(i)}$ に加え、残差平方和 $J^{(i)}$ を算出する。提案手法では 3 つの未知数に対して、4 つの到来時刻を用いた方程式を利用する。そのため、異なる到来時刻の組合せに対しては残差平方和が大きくなり、正しい到来時刻の組合せに対しては残差平方和が小さくなる。ゆえに、残差平方和 $J^{(i)}$ が最小となる組合せ $C^{(i)} = \{t_0, t_1^{(j)}, t_2^{(k)}, t_3^{(l)}\}$ を正しい到来時刻の組合せとし、対応する $t^{(i)}$ を送信時刻の推定結果とする。

5. 評価実験

5.1 実験設定

本実験は、天井高 $h = 3.98$ m の部屋で実施され、 $z' = 2.06$ m の位置に床を面するようにスピーカが設置された。モバイルデバイスの高さは $z = 0.9$ m で三脚に固定され、スピーカとモバイルデバイス間の xy 平面における距離 d が 1, 3, 5 m の位置でそれぞれ評価された。

送信スピーカとして屋内施設での非常用放送設備で利用される TOA CM-2330、モバイルデバイスとして Google Pixel 5、オーディオアンプに ROLAND RUBIX24 を用いた。音響信号はオーディオアンプを介して PC から送信され、チャープ信号は 1s 間に 2 回送信された。また、スマートフォンの上部に搭載されたマイクロフォンを利用し、マイクロフォンのサンプリングレートは 48 kHz とした。計測は気温 20 度 (音速 $c = 343.5$ m/s) において計測回数が 100 回となるように実施された。実験はマイクロフォンの録音データをオフラインで解析し評価された。

5.2 実験結果

提案手法では、送信時刻 t に加え、スピーカとモバイルデバイス間の xy 平面における距離 d とモバイルデバイスの高さ z が推定される。そのため、各推定誤差に対する累積密度分布をそれぞれ示す (図 6)。

図 6a は同期誤差の累積密度分布である。 $d = 1, 3, 5$ m における 90 パーセンタイル誤差はそれぞれ 289, 416, 187 μ s であった。距離 d が遠いほど系統誤差が小さくなる傾向がある一方で、偶然誤差が大きくなることが確認できる。

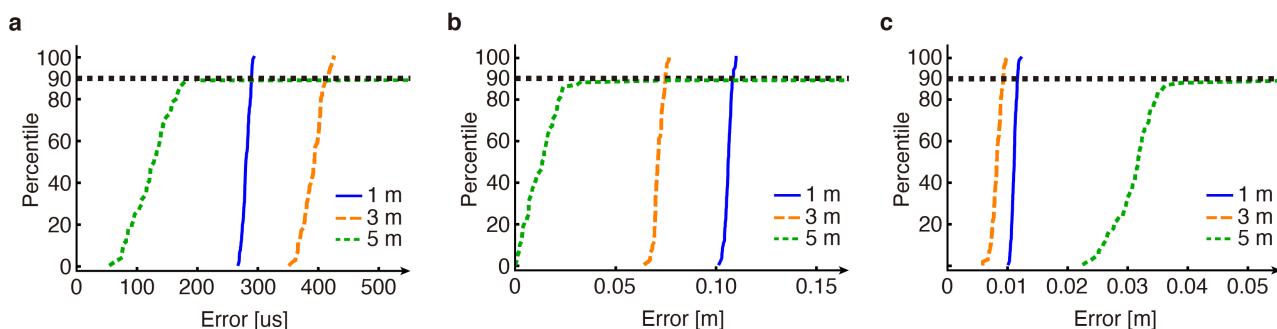


図6 (a) 送信時刻 t と (b) スピーカとモバイルデバイス間の xy 平面における距離 d , (c) モバイルデバイスの高さ z の推定誤差に対する累積密度関数

図6bはスピーカとモバイルデバイス間の xy 平面における距離誤差の累積密度分布である。 $d = 1, 3, 5$ m における90パーセンタイル誤差はそれぞれ0.11, 0.07, 0.07 mであった。距離 d が遠いほど系統誤差が小さくなり、偶然誤差が大きくなることがわかる。

図6cはモバイルデバイスの高さの測距誤差の累積密度分布である。 $d = 1, 3, 5$ m における90パーセンタイル誤差はそれぞれ0.01, 0.01, 0.06 mであった。また距離 d が遠いほど、系統誤差が大きくなる傾向があり、偶然誤差も大きくなることを確認できる。

6. 限界と今後の展望

6.1 距離が誤差に及ぼす影響

5.2項より t , d , z はいずれも、スピーカとモバイルデバイス間の距離が遠いほど、偶然誤差が大きくなることがわかる。これは距離が離れるほど Signal-to-Noise Ratio (SNR) が悪化するためと考えられる。

一方で、 t と d は距離が離れるほど系統誤差が小さくなる傾向があるのに対し、 z は距離が離れるほど系統誤差が大きくなる傾向がある。提案手法で利用する n 次の鏡像スピーカの幾何学的な配置が1つの要因として考えられ、詳細な調査については今後の課題としたい。

6.2 障害物に対する頑健性

本実験は壁の反射波も観測される部屋で実施されており、実験結果より異なる反射波が生じる環境においても提案手法が十分に機能していることが確認できる。今後は人や家具のような障害物がある環境に対しても実験を実施し、提案手法の有効性や限界を明らかにする予定である。

一方でスピーカとユーザ間に固定の障害物が設置されている環境での利用は難しく、本手法の限界である。

6.3 4次以降の反射波の活用

提案手法では直接波に加えて、床と天井を介する1~3次反射波を利用する。一方で、スピーカとモバイルデバイス間の距離が遠い場合には、4次や5次の反射波も十分な

信号強度で観測されている(図2b)。そのため、4次以降の反射波の活用についても今後検討したい。

7. まとめ

本論文では、モバイルデバイスの測位として主流であるTDoA方式と比較し優位な点の多いToA方式での測位を実現するためのスピーカとモバイルデバイス間での時刻同期手法を提案した。提案手法ではスピーカから送信される直接波に加え、床と天井を介する1~3次の反射波を利用し、スピーカからの送信時刻を推定することで時刻同期を実現した。また、直接波と1~3次反射波の到来時間差に着目し、各反射波の到来区間を推定することで同一の信号である直接波と多重反射波を特定した。評価実験を通して、90パーセンタイルでの同期誤差が416 μ s以下となることを確認し、測位に十分な同期性能があることを明らかにした。今後は、障害物に対する頑健性や4次以降の反射波の活用等について検討していく。

参考文献

- [1] Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggles, Andy Ward, and Paul Webster. The anatomy of a context-aware application. *Wireless Networks*, 8(2/3):187–197, 2002.
- [2] B. Maag R. Lim and L. Thiele. Time-of-flight aware time synchronization for wireless embedded systems. In *Proc. EWSN '16*, pages 149–158, Graz, Austria, 2016.
- [3] Zheng Sun, Rick Farley, Telis Kaleas, Judy Ellis, and Kiran Chikkappa. Cortina: Collaborative context-aware indoor positioning employing rss and rtot techniques. In *2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, pages 340–343. IEEE, 2011.
- [4] Chunyi Peng, Guobin Shen, Yongguang Zhang, Yanlin Li, and Kun Tan. Beepbeep: a high accuracy acoustic ranging system using cots mobile devices. In *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 1–14. ACM, 2007.
- [5] Fabian Höflinger, Rui Zhang, Joachim Hoppe, Amir Bannoura, Leonhard M Reindl, Johannes Wendeberg, Manuel Bühner, and Christian Schindelbauer. Acoustic self-calibrating system for indoor smartphone tracking (assist). In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2012 International Conference on*, pages 1–9.

- IEEE, 2012.
- [6] Patrick Lazik and Anthony Rowe. Indoor pseudo-ranging of mobile devices using ultrasonic chirps. In *Proceedings of the 10th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, pages 99–112. ACM, 2012.
 - [7] David L Mills. Internet time synchronization: the network time protocol. *IEEE Transactions on communications*, 39(10):1482–1493, 1991.
 - [8] Flaviu Cristian. Probabilistic clock synchronization. *Distributed computing*, 3(3):146–158, 1989.
 - [9] Hermann Kopetz and Wilhelm Ochsenreiter. Clock synchronization in distributed real-time systems. *IEEE Transactions on Computers*, 100(8):933–940, 1987.
 - [10] Patrick Lazik, Niranjini Rajagopal, Bruno Sinopoli, and Anthony Rowe. Ultrasonic time synchronization and ranging on smartphones. In *21st IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pages 108–118. IEEE, 2015.
 - [11] Masanori Sugimoto, Hayato Kumaki, Takayuki Akiyama, and Hiromichi Hashizume. Optimally modulated illumination for rapid and accurate time synchronization. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65(2):505–516, 2016.
 - [12] Takayuki Akiyama, Masanori Sugimoto, and Hiromichi Hashizume. Time-of-arrival-based indoor smartphone localization using light-synchronized acoustic waves. *IEEE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 100(9):2001–2012, 2017.
 - [13] Bing Zhou, Mohammed Elbadry, Ruipeng Gao, and Fan Ye. Batmapper: Acoustic sensing based indoor floor plan construction using smartphones. In *Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pages 42–55. ACM, 2017.
 - [14] Swadhin Pradhan, Ghufan Baig, Wenguang Mao, Lili Qiu, Guohai Chen, and Bo Yang. Smartphone-based acoustic indoor space mapping. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2(2):75, 2018.
 - [15] Bing Zhou, Mohammed Elbadry, Ruipeng Gao, and Fan Ye. Battracker: High precision infrastructure-free mobile device tracking in indoor environments. 2017.
 - [16] Oliver Shih and Anthony Rowe. Occupancy estimation using ultrasonic chirps. In *Proceedings of the ACM/IEEE Sixth International Conference on Cyber-Physical Systems*, pages 149–158. ACM, 2015.
 - [17] Bernhard Großwindhager, Michael Rath, Josef Kulmer, Mustafa S Bakr, Carlo Alberto Boano, Klaus Witrissal, and Kay Römer. Salma: Uwb-based single-anchor localization system using multipath assistance. In *Proceedings of the 16th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 132–144. ACM, 2018.
 - [18] Hiroaki Murakami, Takumi Suzaki, Masanari Nakamura, Hiromichi Hashizume, and Masanori Sugimoto. Five degrees-of-freedom pose-estimation method for smartphones using a single acoustic anchor. *IEEE Sensors Journal*, 2020.
 - [19] John R Klauder, AC Price, Sidney Darlington, and Walter J Albersheim. The theory and design of chirp radars. *Bell System Technical Journal*, 39(4):745–808, 1960.
 - [20] Merrill I Skolnik. Introduction to radar. *Radar handbook*, 2:21, 1962.