

## 非同期動作による市販音響機器を用いた屋内測位手法

Indoor Localization Using Asynchronous  
Commercially-off-the-shelf Acoustic Devices豊岡 祐太<sup>1)</sup> 村上 弘晃<sup>2)</sup> 須崎 太久弥<sup>1)</sup> 中村 将成<sup>1)</sup> 渡邊 拓貴<sup>1)</sup>  
Yuta Toyooka Hiroaki Murakami Takumi Suzuki Masanari Nakamura Hiroki Watanabe橋爪 宏達<sup>3)</sup> 杉本 雅則<sup>1)</sup>  
Hiromichi Hashizume Masanori Sugimoto

## 1 はじめに

近年、スマートフォンなどのスマートデバイスの普及により、位置情報を使用したサービスが増えている。屋外の測位技術として、GNSS (Global Navigation Satellite System) が広く普及している。しかし、屋内では外壁により信号が遮断されるため、十分な測位精度で使用することができない。一方で、ショッピングモールや博物館内でのナビゲーションシステムなど屋内での測位技術の需要は高いものの、その手法については未だ確立されていない。そのため、可視光 [1], UWB (Ultra Wide Band) [2], Bluetooth[3], Wi-Fi[4] などを使用し、様々な屋内測位手法が提案されている。

屋内測位手法の一つに、音響信号を用いた手法がある。音響信号を用いた測位手法は測位精度が高く、また現在多くの人々が使用しているスマートフォンにはマイクロフォンが標準的に搭載されているため、屋内測位のための導入コストが小さいという利点がある [5]。

音響信号を用いた主な測位手法として、信号の伝搬遅延を用いた手法がある。スピーカーとマイクロフォン間の伝搬時間を利用する手法を ToA (Time of Arrival) と呼び、2 つのスピーカーから送信された信号の到来時間差を利用する手法を TDoA (Time Difference of Arrival) と呼ぶ。ToA 方式は測位精度が高い一方、スピーカーとマイクロフォン間の時刻同期を必要とする。そのため、スピーカーをアンカーとし、測位対象デバイスのマイクロフォンを使用して測位を行う場合、各アンカーごとに時刻同期のための追加デバイスが必要となる。

そこで我々は、アンカーとする複数台のスピーカーに加えて、スマートフォンやスマートスピーカー等のスピーカーとマイクロフォンを搭載するスマートデバイスを 1 台使用した、使用デバイスが非同期に動作する ToA 方式に基づく音響屋内測位手法を提案する。本手法では、スマートデバイスで音響信号を送受信することにより、測位対象とのクロック誤差を求めることで、非同期の測位を実現する。建物内に設置されたスピーカーに加えて、以前使用していたスマートフォンやスマー

トスピーカーなどの身近なデバイスを 1 台用意するだけで ToA 方式の測位を行うことができる。性能評価として複数の実験を行い、2m×2m×2.45m の屋内環境で 90th-Percentile 誤差 10.23cm 未満の精度で測位できることを確認した。

本論文の貢献は以下の通りである。

- スピーカーとマイクロフォンを搭載する市販音響機器を使用した、ToA 方式による非同期の音響測位手法を提案した。
- 室内環境にて複数の実験を行い、提案手法の有効性や限界を明らかにした。

## 2 関連研究

## 2.1 音響センシングに関する研究

音速 (約  $3 \times 10^2$  m/s) は光速 (約  $3 \times 10^8$  m/s) に比べてはるかに遅いため、信号の到来時刻を容易に測定することができる。また、スピーカーやマイクロフォンはスマートフォンに標準的に搭載されているため、導入コストが低い。これらの理由から、音響信号の伝搬遅延を利用した様々な測距、測位手法が存在する。BeepBeep[6] では、2 台のスマートフォン間でチャープ信号を送受信することにより、スマートフォン間のクロック誤差を求め、デバイス間の測距を実現している。Tan ら [7] は、BeepBeep を用いてアンカーとターゲット間の初期距離を求め、その後アンカーから定期的に音響信号を送信し、初期距離との差分を求めることで、移動するターゲットの測位を実現している。HyperEar[8] では、ターゲットから送信される音響信号をスマートフォンの 2 つのマイクで受信し、TDoA を用いてターゲットとスマートフォンの相対位置の測位を実現している。このとき、スマートフォンを空中で動かし、異なる 2 地点で録音することにより、3 辺測量の精度を向上させている。Acute[9] では、スマートフォンに内蔵されるスピーカからマイクロフォンに空気中を介して直接到来するチャープ信号に着目し、それらの距離から空気中の音の伝搬速度を正確に推定することにより、周囲の温度測定を実現している。

## 2.2 非同期測位に関する研究

これまでに信号の伝搬遅延を用いた使用デバイス間非同期の測位手法がいくつか提案されている。まず UWB を用いた手法を紹介する。UWB は専用機器を用意する必要があるが、幅広い周波数帯を利用することで、高精度な測位を行うことができる。PnPLOC[10] で

1) 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

2) 東京大学

The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

3) 独立行政法人 大学改革支援・学位授与機構

National Institution for Academic Degrees and Quality Enhancement of Higher Education

は、アンカー間で送受信される UWB 信号を、ターゲットも受信することにより、クロック同期の必要性を排除し、2241 m<sup>2</sup> の範囲内で 1~2 m レベルの同期不要な測位を実現している。VUloc[11] では、アンカー間の UWB による双方向通信をターゲットが傍受することにより、ターゲットとアンカー間の仮想的な双方向通信を行う V-TWR (Virtual Two-Way Ranging) を提案し、12 m×8 m の屋内環境で 90th-Percentile 誤差 15.7 cm の非同期な測位を実現している。Async-TDoA[12] では、複数のアンカーの他に UWB 信号を送受信するリファレンスを導入している。ターゲット、リファレンスから送信された信号をアンカーで受信し、受信時刻差を計測することにより、9.6 m×4.8 m の屋内環境で 90th-Percentile 誤差 15.0 cm の非同期の TDoA 測位を実現している。

次に音響信号を用いた非同期測位手法を紹介する。Whistle[13] では、ターゲットから送信された信号を複数のアンカーで受信後、そのうち一つのアンカーから信号を送信し、全アンカーで受信して、二つの信号の受信時刻差を求めることにより、9×9×4 m<sup>3</sup> の屋内環境で平均誤差 10~20 cm の非同期の TDoA 測位を実現している。Wang[14] らは、アンカー間の双方向通信を使用し、アンカー間のクロック誤差を求めることにより、10.67 m×7.76 m で 90th-Percentile 誤差 16.0 cm の非同期の TDoA 測位を実現している。Cai[15] らは、室内環境で静止しているユーザのスマートフォンで音響信号を送受信し、アンカーとして使用することで、固定アンカーを設置する必要がなく、7.8 m×5.0 m の屋内環境で 80th-Percentile 誤差 1.5 m の非同期測位を実現している。これまでアンカー間の信号の送受信などを利用した使用デバイス間非同期の TDoA による測位手法は提案されているが、使用デバイス間非同期の ToA による測位手法は提案されていない。

### 3 提案手法

#### 3.1 概要

本手法では、測位用のアンカーとして設置される最低 2 台のスピーカーに加え、スピーカーとマイクロフォンを搭載するスマートスピーカーなどの市販音響機器を 1 台利用することにより、スピーカーを含む全ての音響機器が非同期動作でのスマートフォンの 3 次元測位を可能にする (図 1)。本節以降では、測位対象となるスマートフォンを Target (device)  $T$ 、スピーカーとマイクロフォンを搭載するスマートデバイスを Reference (device)  $R$ 、複数台設置される測位用スピーカーを Anchor  $A_i$  ( $i \in \{1, 2, \dots\}$ ) と呼称する。

#### 3.2 測位原理

本手法では、Anchor  $A_i$  がスピーカー機能のみを有するのに対して、Target  $T$  と Reference  $R$  はスピーカーとマイクロフォンの両方の機能を有することを前提にする。また、 $T$ ,  $R$ ,  $A_i$  の位置をそれぞれ  $X(x, y, z)$ ,  $P_R(x'_R, y'_R, z'_R)$ ,  $P_{A_i}(x'_{A_i}, y'_{A_i}, z'_{A_i})$  とおき、 $P_R$  と  $P_{A_i}$  は既知とする。

ToA 方式では、各 Anchor と Target との伝搬時間を求め、3 辺測量の原理により Target の位置を推定する。

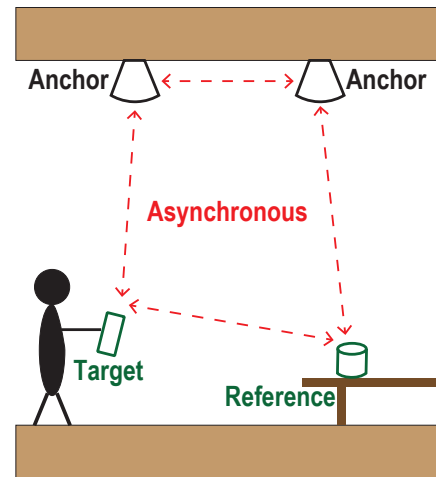


図 1: 提案手法の想定環境

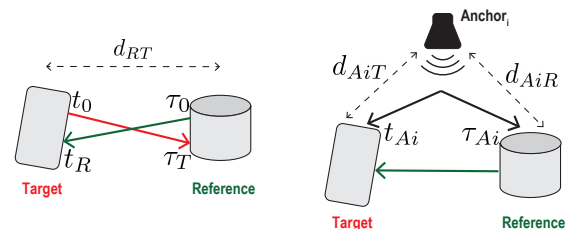


図 2: 提案手法の概要 (左:  $R$ - $T$  間の距離推定, 右:  $A_i$ - $T$  間の距離推定)

提案手法では、非同期に動作する 2 台以上の Anchor に対し、1 台の Reference を利用することで、ToA 方式による Target の測位を実現する。このとき、Target, Reference はスピーカーとマイクロフォンの両方を利用する。提案手法の概要を図 2 に示す。

非同期で動作する  $R$ - $T$  間のクロック誤差を  $\sigma$  とし、 $T$  のスピーカから送信され  $R$  のマイクロフォンで受信される信号を考える。  $T$  のスピーカから送信される信号の送信時刻を  $t_0$  とし、 $R$ ,  $T$  における受信時刻をそれぞれ  $\tau_T$ ,  $t_T$  とすると、BeepBeep[6] に基づき下記のように  $R$ - $T$  間の距離を表現できる。

$$\|P_R - X\| = c(\tau_T - t_0 + \sigma) \quad (1)$$

このとき、 $c$  は音速であり、 $\| \cdot \|$  はユークリッド距離である。また、 $T$  のスピーカから送信される信号は  $T$  のスピーカとマイクロフォン間の基線長  $l_T$  に相当する時刻だけ遅れて  $T$  のマイクロフォンに受信される。ゆえに、(1) 式は下記のように置き換えられる。

$$\|P_R - X\| = c\left(\tau_T - \left(t_T - \frac{l_T}{c}\right) + \sigma\right) \quad (2)$$

同様に、 $R$  のスピーカから送信され  $T$  のマイクロフォンで受信される信号を考える。  $R$  のスピーカから送信される信号の送信時刻を  $\tau_0$  とし、 $R$ ,  $T$  における受信時刻を

それぞれ  $\tau_R$ ,  $t_R$  とすると, 下記のように表現できる.

$$\begin{aligned}\|P_R - X\| &= c(t_R - \tau_0 - \sigma) \\ &= c\left(t_R - \left(\tau_R - \frac{l_R}{c}\right) - \sigma\right)\end{aligned}\quad (3)$$

このとき,  $l_R$  は  $R$  のスピーカとマイクロフォン間の基線長である.

(2) 式と (3) 式より,  $R$ - $T$  間のクロック誤差  $\sigma$  が下式で与えられる.

$$\sigma = \frac{(t_T + t_R) - (\tau_T + \tau_R)}{2} - \frac{l_T - l_R}{2c}\quad (4)$$

$R$ - $T$  間のクロック誤差  $\sigma$  は, 最初に推定することでドリフト誤差が大きくなるまで利用できる. そのため,  $\sigma$  の推定後は  $T$  から音響信号を送信する必要はない.

次に, Anchor  $A_i$  から送信され,  $R$  と  $T$  で受信される信号を考える. Anchor  $A_i$  から送信される信号の  $R$ ,  $T$  における受信時刻をそれぞれ  $\tau_{Ai}$ ,  $t_{Ai}$  とする. このとき,  $A_i$ - $R$  と  $A_i$ - $T$  間の到来時間差に着目すると, 下式が与えられる.

$$\|P_{Ai} - P_R\| - \|P_{Ai} - X\| = c(\tau_{Ai} - t_{Ai} + \sigma)$$

このとき,  $d_{AiR} = \|P_{Ai} - P_R\|$  であり,  $P_{Ai}$  と  $P_R$  が既知であるため,  $d_{AiR}$  も既知である. ゆえに,  $A_i$ - $T$  間の距離を ToA に基づく測距式として導出することができる.

$$\begin{aligned}\|P_{Ai} - X\| &= \|P_{Ai} - P_R\| - c(\tau_{Ai} - t_{Ai} + \sigma) \\ &= d_{AiR} - c(\tau_{Ai} - t_{Ai} + \sigma)\end{aligned}\quad (5)$$

(3) 式と (5) 式を用いて, 下記の関数  $f$  が最小となる Target  $T$  の座標  $(x, y, z)$  を最小二乗法により求め, 位置を推定する.

$$f(x, y, z) = g(x, y, z)^2 + \sum_{i=1}^n h_i(x, y, z)^2\quad (6)$$

このとき,  $n$  は Anchor の台数であり,  $g$  と  $h_i$  は以下の通りである.

$$\begin{aligned}g(x, y, z) &= \|P_R - X\| - c\left(t_R - \left(\tau_R - \frac{l_R}{c}\right) - \sigma\right) \\ &= \sqrt{(x'_R - x)^2 + (y'_R - y)^2 + (z'_R - z)^2} \\ &\quad - c\left(t_R - \left(\tau_R - \frac{l_R}{c}\right) - \sigma\right),\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}h_i(x, y, z) &= \|P_{Ai} - X\| + c(\tau_{Ai} - t_{Ai} + \sigma) - \alpha \\ &= \sqrt{(x'_{Ai} - x)^2 + (y'_{Ai} - y)^2 + (z'_{Ai} - z)^2} \\ &\quad + c(\tau_{Ai} - t_{Ai} + \sigma) - d_{AiR}.\end{aligned}\quad (8)$$

### 3.3 信号設計

全てのデバイスから送信する信号として, 一般的にソナー及びレーダーで使用されるチャープ信号を利用する. チャープ信号は時間とともに周波数が増加もしくはは

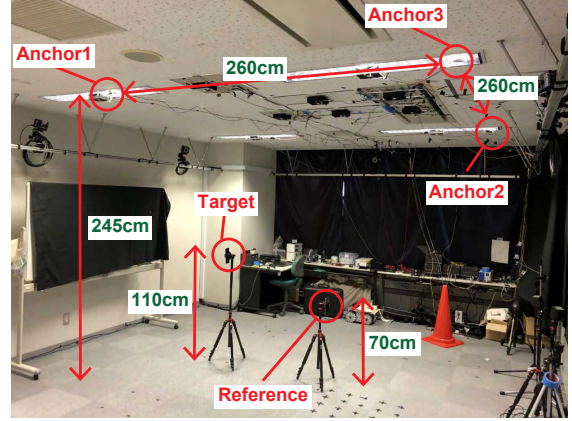


図3: 実験環境

表1: 使用するチャープ信号の開始及び終了周波数

	Target	Reference	Anchor1	Anchor2	Anchor3
開始周波数 $f_0$ [kHz]	2	5	8	11	14
終了周波数 $f_1$ [kHz]	4	7	10	13	16

減少する信号のことで, 音響測位で良く用いられる. 以下が使用する線形チャープ  $s(t)$  である.

$$s(t) = \sin(2\pi(f_0 t + \frac{k}{2} t^2))\quad (9)$$

$$k = \frac{f_1 - f_0}{T}\quad (10)$$

ここで,  $j$  は虚数単位,  $f_0$  は開始周波数,  $f_1$  は終端周波数,  $T$  は信号長である. 各デバイスごとの送信信号を判別するために, 送信信号の周波数帯域の違いにより送信デバイスを区別する FDM (Frequency Division Multiplexing) を用いる. また, 送信信号のノイズを軽減させるためにハン窓を乗じた.

Target, Reference のマイクロフォンで受信した音声データに対し, 参照信号

$$e(t) = \exp(j2\pi(f_0 t + \frac{k}{2} t^2))\quad (11)$$

を用いた整合フィルタをかける.

$$c(t) = \int_t^{t+T} a(\tau)e(\tau - t)d\tau\quad (12)$$

ここで,  $a$  は受信信号である.  $c(t)$  の絶対値のピーク値を求めることにより, 信号  $s$  の受信時刻を求めることができる.

## 4 評価実験

### 4.1 実験設定

提案手法の有効性を明らかにするために, 評価実験を図3の実験環境で行った. Target, Reference として Samsung 社の Galaxy S10 Plus を使用し, Anchor として Fostex 社の FT200D を使用した. 各デバイスの位置の真値を取得するために, MotionAnalysis 社の Mac3D System を使用した. 実験ではスマートフォンのマイク

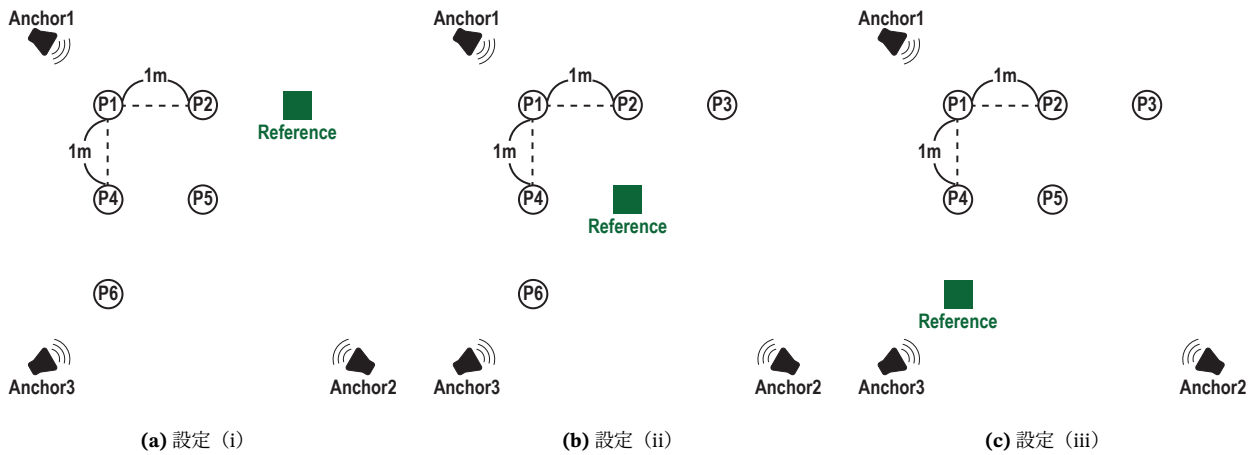


図 4: 実験における計測箇所

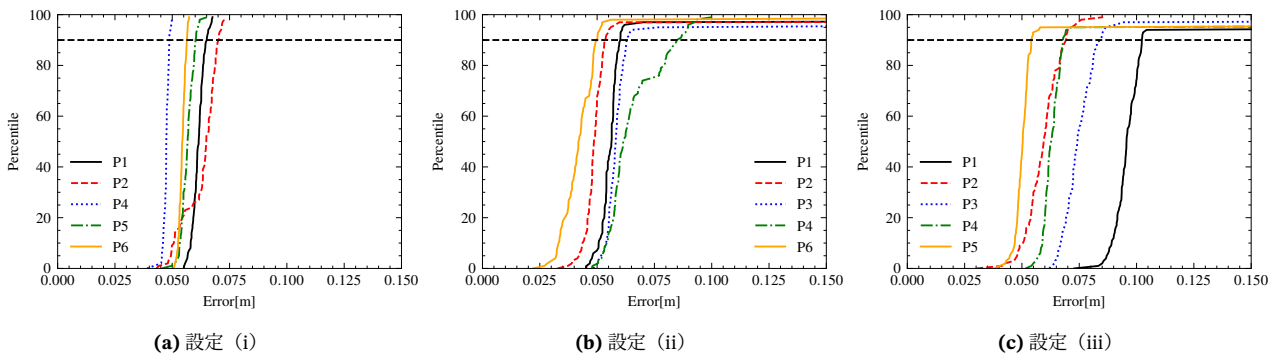


図 5: Target の設置位置ごとの測位誤差の累積分布関数

表 2: Target の設置位置ごとの測位誤差の平均値, 90th-Percentile 値

(a) 設定 (i)

T の設置位置	平均値 [m]	90th-Percentile 値 [m]
P1	0.0614	0.0650
P2	0.0627	0.0697
P4	0.0473	0.0487
P5	0.0566	0.0601
P6	0.0544	0.0563

(b) 設定 (ii)

T の設置位置	平均値 [m]	90th-Percentile 値 [m]
P1	0.0627	0.0597
P2	0.0878	0.0531
P4	0.0681	0.0628
P5	0.0656	0.0844
P6	0.0438	0.0492

(c) 設定 (iii)

T の設置位置	平均値 [m]	90th-Percentile 値 [m]
P1	0.1389	0.1023
P2	0.0592	0.0687
P4	0.1032	0.0827
P5	0.0954	0.0679
P6	0.1015	0.0540

ロフォンで録音した音声データをオフラインで解析し測位を行った。なお、スマートフォンのサンプリング周波数は 48 kHz で、アップサンプリング処理により 4 倍の 192 kHz としている。各計測での室温は 20 度、音速を  $c = 343.5 \text{ m/s}$  とした。

## 4.2 T, R の設置位置による性能評価

### 4.2.1 概要

本手法の実環境への適用を考えると、ユーザである Target に加え、スマートスピーカ等の音響機器を利用する Reference も移動することが考えられる。Target と Reference の設置位置に応じた提案手法の測位性能を評価するため 6 つの計測箇所を用意し、Reference を全ての Anchor との距離が長くなるような位置に設置した場合 (設定 (i)), 3 つの Anchor と等距離となる位置に設置した場合 (設定 (ii)), 一つの Anchor に近い位置に設置した場合 (設定 (iii)) の 3 つに場合分けし、各設定において Reference が設置されていない計 5 点に Target を設置し、それぞれの設置位置で 100 回ずつ計測を行った。計測箇所を図 4 に示す。使用するチャープ信号の信号長は 0.1 s とし、掃引周波数帯域を表 1 のように設定する。

### 4.2.2 実験結果

3 つの設定における、Target の設置位置ごとの測位誤差の累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution

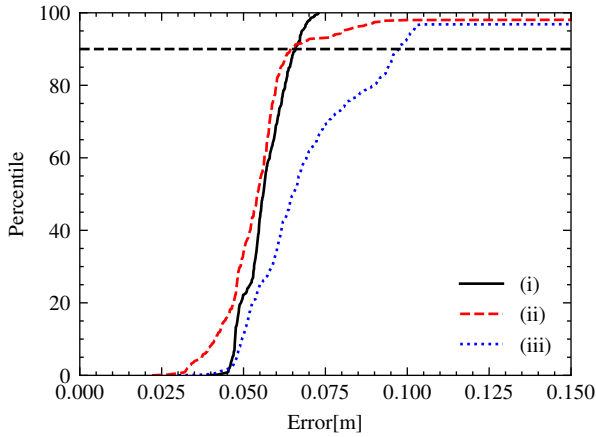


図 6: 設定ごとの測位誤差の累積分布関数

表 3: 設定ごとの測位誤差の平均値, 90th-Percentile 値

設定	平均値 [m]	90th-Percentile 値 [m]
設定 (i)	0.0565	0.0659
設定 (ii)	0.0656	0.0643
設定 (iii)	0.0996	0.0972

表 4: 使用するチャープ信号の開始及び終了周波数

	Target	Anchor1	Anchor2	Anchor3	Reference Anchor4
開始周波数 $f_0$ [kHz]	2	11	14	17	5
終了周波数 $f_1$ [kHz]	4	13	16	19	7

Function) を図 5 に, 測位誤差の平均値, 90th-Percentile 値を表 2 に示す. 設定 (iii) の P1 の場合を除き, 90th-Percentile 値 10 cm 以内の測位誤差となった. Target の設置位置による性能の違いについては 5.1 節で考察する.

設定ごとの測位誤差の累積分布関数を図 6 に, 測位誤差の平均値, 90th-Percentile 値を表 3 に示す. 設定 (i), 設定 (ii) では同様の測位誤差となり, 設定 (iii) の場合他の設定に比べて誤差が大きくなった. Reference の設置位置による性能の違いについては 5.1 節で考察する.

### 4.3 既存手法と提案手法の性能比較

#### 4.3.1 概要

提案手法と Async-TDoA[12] を再現した手法, 4 つの Anchor 間を時刻同期させた, Reference を使用しない一般的な TDoA 手法の性能を比較した. 同期 TDoA 手法の 4 つ目の Anchor は, 提案手法の Reference と同じ位置に設置するために, 三脚で 70cm の高さに固定した. 提案手法, Async-TDoA の Target, Reference の設置位置は 4.2 節の設定 (iii) と同様である. 同期 TDoA 手法は 4 つ目の Anchor  $A_4$  を提案手法の Reference と同じ位置に設置し (図 7), Target も提案手法と同じ計 5 か所で計測を行った. 使用するチャープ信号の信号長は 0.1 s とし, 掃引周波数帯域を表 4 のように設定する.

#### 4.3.2 実験結果

手法ごとの測位誤差の累積分布関数を図 8 に示す. また, 測位誤差の平均値, 90th-Percentile 値を表 5 に示す. 提案手法と既存手法の性能の違いについて 5.2 節で考察する.

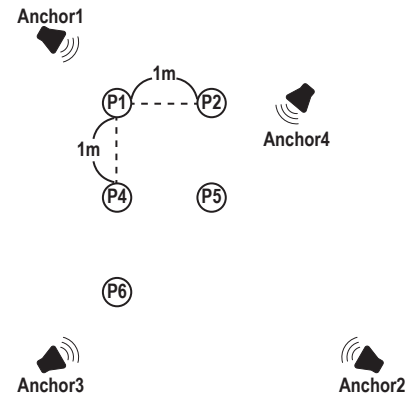


図 7: 比較手法の Target の設置位置

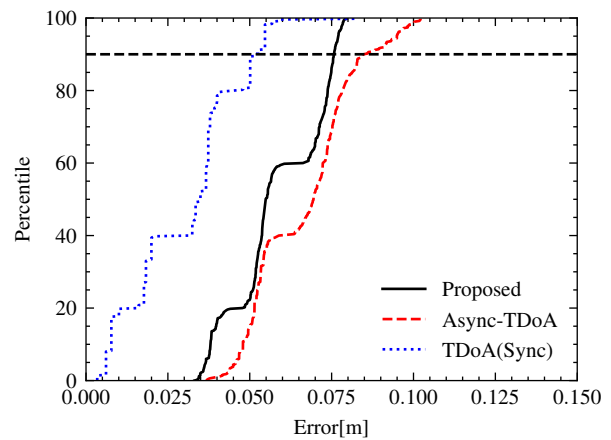


図 8: 各手法ごとの測位誤差の累積分布関数

表 5: 各手法ごとの測位誤差の平均値, 90th-Percentile 値

測位手法	平均値 [m]	90th-Percentile 値 [m]
提案手法	0.0584	0.0756
Async-TDoA	0.0666	0.0844
TDoA (Sync)	0.0303	0.0523

## 5 考察

### 5.1 提案手法の性能

#### 5.1.1 Target の設置位置による性能の違い

4.2 節で Target の設置位置による測位誤差を求めた (図 5a, 5b, 5c). 設定 (i), 設定 (ii) では Target の設置位置による測位誤差の違いは小さいが, 設定 (iii) では測位誤差の違いが大きい. これは, 設定 (iii) において Reference と Anchor の配置のバランスが悪く, Target の設置位置ごとに DoP (Dilution of Precision) が大きく異なることが原因であると考えられる.

#### 5.1.2 Reference の設置位置による性能の違い

4.2 節で Reference の設置位置による測位誤差を求めた (図 6). 設定 (i), 設定 (ii) では同程度の測位誤差となり, 設定 (iii) では他の 2 つの設定と比べて測位誤差が大きくなった. 設定 (i) の測位誤差が小さくなった原因として, Reference を一つの Anchor としてみなした場合, 設定 (i) の Anchor 配置が 3 つの設定の中で最も適切であるためと考えられる. Reference, Anchor1,

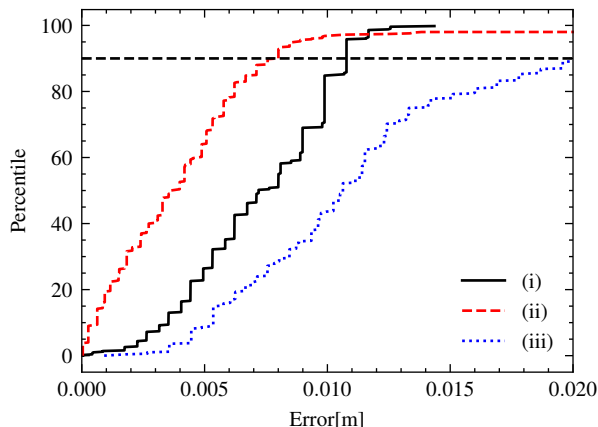


図9: 設定ごとの T-R の測距誤差の累積分布関数

Anchor2 について, Target を P2 に設置した場合の 3 次元精度劣化率 (PDOP: Position Dilution of Precision) を計算すると, 設定 (i) で 4.14, 設定 (ii) で 4.50, 設定 (iii) で 12.97 となり, 設定 (i) が一番小さい。

また, 設定 (ii) の測位誤差が小さい原因として, T-R の測距誤差が小さいことがあげられる。設定ごとの T-R の測距誤差は図 9 に示す通りで, 設定 (ii) の測距誤差が最も小さいことが確認できる。T-R の測距性能は時刻同期性能に直結するため, 測位精度に対する影響は大きい。

以上より, 測位誤差を小さくするためには, Reference を Target の測位対象エリアに近く, DoP の値が小さくなる位置に設置することが望まれる。

## 5.2 提案手法と既存手法の性能の違い

4.3 節にて, 提案手法と Async-TDoA, 4 つの Anchor 間を同期させた TDoA 手法との性能の比較を行った (図 8)。提案手法はアンカー間での時刻同期を必要とする TDoA 方式と比較し測位誤差は 90th-Percentile で 2.3 cm 程度しか変わらず, 同程度の性能で測位を行えることを確認した。また, 提案手法は, Async-TDoA よりも測位誤差が小さいことを確認できる。これは測位精度が ToA 測位よりも TDoA 測位の方が大きいことが原因であると考えられる。

## 6 おわりに

本稿では, 使用デバイス間完全非同期のスマートフォンの音響屋内測位手法を提案した。提案手法では, 複数台のスピーカーの他にスピーカーとマイクロフォンを搭載したスマートデバイスを利用した非同期測位方式を考案した。評価実験において, 屋内実験環境で最大 90th-Percentile 誤差 10.23cm での測位が行えることを確認した。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 22H01038 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] Shang Ma, Qiong Liu, and Phillip C.-Y. Sheu. Foglight: Visible light-enabled indoor localization system for low-power

iot devices. *IEEE Internet Things J*, 5(1):175–185, 2018.

- [2] Alwin Poulose and Dong Seog Han. Uwb indoor localization using deep learning lstm networks. *Applied Sciences*, 10(18), 2020.
- [3] Masayuki Murata, Dragan Ahmetovic, Daisuke Sato, Hironobu Takagi, Kris M. Kitani, and Chieko Asakawa. Smartphone-based indoor localization for blind navigation across building complexes. In *Proceedings of IEEE PerCom 2018*, pages 1–10, 2018.
- [4] Weixing Xue, Weining Qiu, Xianghong Hua, and Kegen Yu. Improved wi-fi rssi measurement for indoor localization. *IEEE Sens J*, 17(7):2224–2230, 2017.
- [5] Joaquín Aparicio, Fernando J. Alvarez, Alvaro Hernandez, and Sverre Holm. A survey on acoustic positioning systems for location-based services. *IEEE Trans Instrum Meas*, 71:1–36, 2022.
- [6] 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 ACM SenSys 2007*, pages 1–14, 2007.
- [7] Caiming Tan, Xinhua Zhu, Yan Su, Yu Wang, Zhiqiang Wu, and Dongbing Gu. A low-cost centimeter-level acoustic localization system without time synchronization. *Measurement*, 78:73–82, 2016.
- [8] Hongzi Zhu, Yuxiao Zhang, Zifan Liu, Shan Chang, and Yingying Chen. Hyperear: Indoor remote object finding with a single phone. In *Proceedings of IEEE ICDCS 2019*, pages 678–687, 2019.
- [9] Chao Cai, Zhe Chen, Henglin Pu, Liyuan Ye, Menglan Hu, and Jun Luo. Acute: Acoustic thermometer empowered by a single smartphone. In *Proceedings of ACM SenSys 2020*, pages 28–41, 2020.
- [10] Haige Chen and Ashutosh Dhekne. Pnploc: Uwb based plug play indoor localization. In *Proceedings of IPIN 2022*, pages 1–8, 2022.
- [11] Jing Yang, BaiShun Dong, and Jiliang Wang. Vuloc: Accurate uwb localization for countless targets without synchronization. *PACM IMWUT*, 6(3), 2022.
- [12] Yuan Xue, Wei Su, Hongchao Wang, Dong Yang, and Jian Ma. A model on indoor localization system based on the time difference without synchronization. *IEEE Access*, 6:34179–34189, 2018.
- [13] Bin Xu, Ran Yu, Guodong Sun, and Zheng Yang. Whistle: Synchronization-free tdoa for localization. In *Proceedings of ICDCS 2011*, pages 760–769, 2011.
- [14] Yu-Ting Wang, Jun Li, Rong Zheng, and Dongmei Zhao. Arabis: An asynchronous acoustic indoor positioning system for mobile devices. In *Proceedings of IPIN 2017*, pages 1–8, 2017.
- [15] Chao Cai, Menglan Hu, Doudou Cao, Xiaoqiang Ma, Qingxia Li, and Jiangchuan Liu. Self-deployable indoor localization with acoustic-enabled iot devices exploiting participatory sensing. *IEEE Internet Things J*, 6(3):5297–5311, 2019.