

## 角度情報を用いた BLE 測位の高精度化に関する検討

山見 悠人<sup>1</sup> 湯 素華<sup>1</sup>

**概要:** 近年, 様々なモノやセンサーは, 省電力で扱える Bluetooth Low Energy (BLE) を利用して位置を推定することが一般的になってきている. 高精度測位を行うために角度情報の併用が考えられるが, Bluetooth5.1 に標準化された信号の方位計測機能を利用した測位については, まだ細かく検討されていない. 角度情報を利用するためには, BLE の送受信機に複数のアンテナを搭載し, アンテナ間の位相差を求めなければならない. しかし, コストを抑えるために, BLE 受信機には複数のアンテナに対して受信モジュールが1つしかなく, 複数のアンテナからの信号を同時に受信できない. この問題を解決するために, 無変調の Constant Tone Extension (CTE) を通常の信号パケットの後続に追加することで, アンテナを切り替えてそれぞれの位相を取得可能にした. 本論文では, BLE 機器において角度情報を取得する際に必要不可欠な信号の位相差と CTE に関して, 位相差は線形回帰を用いることで角度の算出又は誤差の校正を検討し, CTE の長さ, スロット時間, 書き込み時間, アンテナ数などの様々なパラメータを変更することで精度の比較を行う. また, MUSIC 法を用いた角度推定についても検討する. 実験によって, 最適なパラメータ選択において, 角度測定誤差を  $5.7^\circ$  まで, 平均水平測位誤差を 25cm 程度に抑えることを確認できた.

## High precision BLE positioning by using angle information

YUTO YAMAMI<sup>1</sup> SUHUA TANG<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年, 国内の屋内位置情報サービスの市場規模は 2021 年度では 41 億 3000 万円, 2024 年度では 76 億 2400 万円になると予測されており, 今後も位置情報を扱った市場規模は拡大していく見通しとなっている[1]. その屋内での位置情報を利用したサービスとして, 道案内ナビゲーション, 屋内ロボット走行制御や倉庫の物流制御などがあり, 様々な場面において誤差が数 cm 程度となる高精度測位の必要性が高まってきている. しかし, 屋内は屋外とは異なり, 電波の障害となる壁や障害物が多く, 多数の測位用ビーコンを設置しなければならないため, 設置コストが高くなる傾向がある.

位置情報を提供する代表的な通信方法としては GPS や Wi-Fi, Bluetooth などがある[2][3][4]. GPS は見通しの良い屋外環境では測位精度が良いが, 屋内環境では精度は悪く, 電池消費も大きい. また Wi-Fi は電力消費が少なく, 屋内での測位精度も良好だが, 測位環境毎にビーコンの設置をしなければならず導入コストが高くなる. Bluetooth は使用デバイスの大きさや構造にあまり依存せず導入が可能であり, 屋内測位でのコストが低くなる. その中でも Bluetooth4.0 に新しく追加された Bluetooth Low Energy (BLE) ではより省電力で通信が可能であり, ビーコンも比較的安

価なため, スマートフォンやスマートウォッチ等のモバイル端末にも用いられている.

Wi-Fi や BLE を用いた測位システムでは, 一般的に受信信号強度 (RSSI) を用いた Fingerprinting, もしくは RSSI から距離を算出して三辺測量で位置を算出する[5]. しかし, RSSI だけでは高精度測位は満足できなく[8], 角度情報の併用が考えられている. Wi-Fi 信号の場合, 複数のアンテナを用いて角度を推定し, 測位に併用して測位精度を向上させることが示されている[14]. BLE の場合も同様に, Bluetooth5.1 に標準化された信号の方位計測機能を使用することで BLE 測位における角度情報の利用を図っている. しかし, この方位計測機能は比較的新しいため, これを利用した測位についてはまだ細かく検討されていない[9]. また, BLE において角度情報を取得するためには, 信号の位相差を取得しなければならず, サンプリング時刻差によって発生する位相差や通信電波の変調などの問題がある.

本論文では上記で示した問題を解決するために導入された CTE (Constant Tone Extension) について, それに関連する様々なパラメータを適切に選択すること, 線形回帰を利用した信号の位相差の取得, また MUSIC 法を用いた角度推定について検討することで, 角度精度, および, 角度を用いた測位精度の改善を目指す.

以下, 第 2 章では先行研究と目的, 第 3 章では検討方式

<sup>1</sup> 電気通信大学 大学院情報理工学研究所  
Graduate School of Informatics and Engineering,  
The University of Electro-communications

の手法について、第4章では検討方式における実験と結果について述べる。第5章では考察、第6章では結論と今後について述べる。

## 2. 先行研究と目的

### 2.1 BLE (Bluetooth Low Energy) [10]

BLE(Bluetooth Low Energy)は、2009年に発表されたBluetooth4.0に新しく追加された通信規格である。BLEの通信速度は数Mbps程度で、利用周波数は2.4GHz ISM帯という高い周波数であり、近距離での通信を想定されている。近年IoTの発達によって様々なモノやセンサーを長時間通信する頻度が高くなってきており、電力消費の問題が発生している。そこで、BLEではBluetoothの特徴をそのままに省電力で通信が可能になっており、以前と比べて約60%以上の消費電力を削減できることや、ビーコンが比較的安価なことから現在では様々な機器にBLEが導入されている。屋内環境では電波の障害となる壁や障害物が多く存在するため、屋外環境と比較して近接に大量のビーコンが必要になる。よってBLEの省電力な近接通信が可能でビーコンが比較的安価という特徴と合っている。

Bluetoothでは干渉が起きないようにチャンネルを切り替えながら通信を行う周波数ホッピング方式を導入されている。また、Bluetooth1.2から採用されたAFH(Adaptive Frequency Hopping)によって、他のデバイスが同様の2.4GHz帯を使用している際に、自動的に同じ周波数を避け、空いている周波数を使うことで安定した通信を行うことができる[9]。

以上より、これらのBLEの性質から3節以降で行う検討方式ではBLEで測定を行い、周波数ホッピング方式を用いて他の無線通信と干渉を起こさないようにする。

### 2.2 角度情報を用いた測位

#### 2.2.1 CTE (Constant Tone Extension)[5][9][12]

角度情報を利用するためには、複数アンテナによるアンテナ間の信号の位相差を求めなければならない。しかし、BLE機器にはコストを抑えるため複数のアンテナに対して受信モジュールが一つしかなく、複数のアンテナからの信号を同時に受信できない。また、従来のBLE信号の電波はデータの伝達のために変調が使われており、信号の位相は常に変化してしまう。そこで、これらの問題を解決するためにBLE機器の通信に用いられているのがBluetooth5.1から新しく定義された無変調のCTE(Constant Tone Extension)であり、図1のように通常のBLE信号の packetsの後続に追加されている[7]。また、パケットの長さを16 $\mu$ sから160 $\mu$ sに変更可能である。BLE機器はCTE期間中に特定のタイミングでアンテナを切り替えて、信号の位相角や振幅を表すIQサンプルを取得する。

CTEパケットは表1に示されているようにそれぞれ各4期間に分割されている。

表1 CTEの各期間の概要

	Guard Period	Reference Period	Switch slot	Sample slot
長さ	4 $\mu$ s	8 $\mu$ s	1 $\mu$ s or 2 $\mu$ s	1 $\mu$ s or 2 $\mu$ s
役割	干渉しないための時間間隔	IQサンプルを取得	アンテナ切り替え	IQサンプルを取得

Guard Periodは後続の信号パケットと干渉しないように時間間隔を設けるものである。Reference periodでは8つのIQサンプルが1 $\mu$ s間隔で収集される。Switch slotではアンテナの切り替えが行われ、次のSample slotではそのアンテナを経由して受信した信号のIQデータを取得するIQサンプリングを行う。それぞれ各期間の長さはGuard PeriodとReference periodが固定で4 $\mu$ sと8 $\mu$ sであり、Switch slotとSample slotの時間の長さは1 $\mu$ sか2 $\mu$ sのどちらかに選択可能で、スロット数も変更可能である。このスロットの長さやスロット数を変化させることで取得できる全体のIQサンプル数が増減する。

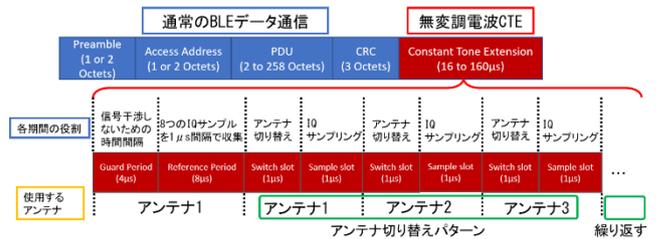


図1 CTEパケット

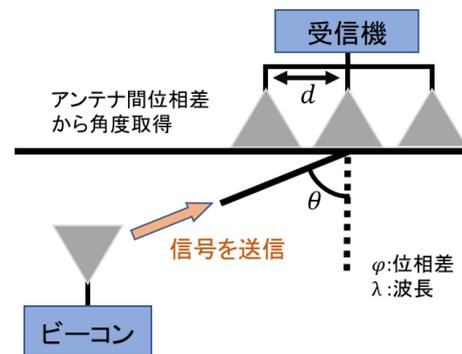


図2 AoAの取得

#### 2.2.2 角度算出方法[11]

従来の角度算出方法において、複数アンテナから信号の位相差を同時に取得可能な際に、図2のような信号の位相差を信号の到着角度であるAoA(Angle of Arrival)の取得できる。AoAは受信機から見たビーコンの角度であり、信号の波長を $\lambda$ 、アンテナ間の距離を $d$ 、アンテナ間の位相差

を  $\varphi (\varphi = 2\pi \cdot d \sin \theta / \lambda)$  とすると, AoA の角度  $\theta$  は(1)式のように表される.

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda \varphi}{2\pi d} \right). \quad (1)$$

### 2.2.3 角度情報を利用した位置測位[14]

図 3 のように 2 つの BLE ビーコンと 1 つの受信機を設置し, ビーコン間の距離  $L$ , 2.2.2 節から受信機から各ビーコンに対しての 2 つの AoA, つまり  $\theta_1, \theta_2$ , また, ビーコン間の距離  $L$  がわかるとき, 三角測量より送信機の位置  $(x, y)$  を算出することができる.

$$y = \frac{L}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}, \quad x = y \tan \theta_1. \quad (2)$$

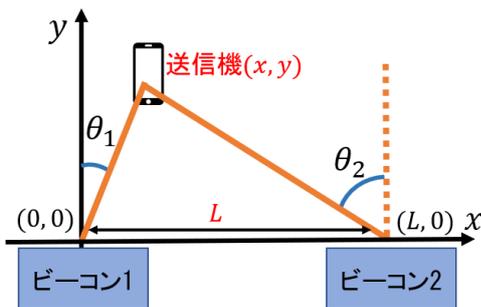


図 3 三角測量

### 2.2.4 角度算出の問題点

これらの先行研究の手法において角度情報を取得するためには, CTE の追加が必要不可欠である. しかし, 問題点が 2 つ存在する.

- (1) アンテナ間の位相差は通常, 受信した信号を複数のアンテナで同時に受信することで取得できるが, BLE 受信機の場合, RF モジュールが 1 つしかなく, 複数のアンテナに対して切り替えながら受信するため, 電波伝搬距離差によるアンテナ間の位相差の他に, 受信時刻差によるサンプリング位相差も余分に発生してしまい, (1)式から角度を直接算出することができない. 角度情報に必要な位相差はアンテナ間位相差になるが, その取得方法についてあまり議論されていない.
- (2) CTE は Bluetooth5.1 で標準化された比較的新しい機能なため, まだ細かく検討されておらず, CTE の長さや, スロットの長さ, アンテナ数, 測定時間が議論されていない. これらのパラメータを変更することで通信パケット数やアンテナの切り替え回数, IQ サンプル数が変化するため, 角度精度に影響を及ぼす可能性がある. よって, これらのパラメータによる角度の推定精度について調査が必要である.

## 3. 検討方式

### 3.1 概要

線形回帰を用いたアンテナ間の位相差を求める手法と, 様々なパラメータを調整することで, 角度情報を取得する際の最適な条件について検討する. また, MUSIC 法を用いた角度推定法や角度情報を用いた BLE 測位についても検討・評価する.

### 3.2 アンテナ間位相差の取得 (線形回帰)

#### 3.2.1 位相の時系列変化

2.2.4 節でも記したとおり, アンテナを切り替えて測定する際, アンテナ間の位相差の他にサンプリング時刻差によるサンプリング位相差も発生する. 1 サンプル遅れによるサンプリング位相差を  $\psi$  とし, アンテナ切り替えによって  $N$  サンプル遅れが発生すると, 各サンプルの位相は図 4 のような時系列で変化し, アンテナ間位相差  $\varphi$  とサンプリング位相差  $\psi$  で表せる. 従来の位相差の取得方法では, 図中の緑の枠のような, それぞれのアンテナで同時刻に取得された位相の差からアンテナ間位相差  $\varphi$  を直接求めることができる. 本検討方式では, 黄色の枠のような, 別の時刻でそれぞれ順番に各アンテナで位相を取得する.

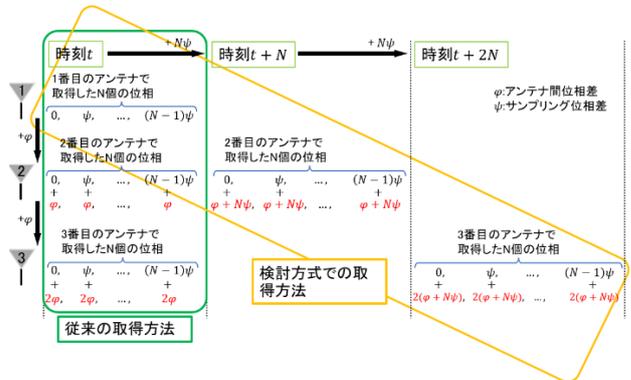


図 4 位相の時系列変化

一定間隔で取得される IQ サンプルの位相を位相接続法で位相が連続するように予備処理する. この位相が  $\psi$  と  $\varphi$  で表せるため, 下記の式が成り立つ.

$$\text{位相} = A_n \cdot \varphi + B_n \cdot \psi. \quad (3)$$

位相接続法で得られた連続位相とそれに対応する  $A_n$  と  $B_n$  を決めれば, 線形回帰によってアンテナ間位相差  $\varphi$  とサンプリング位相差  $\psi$  を求めることができる.

### 3.3 MUSIC 法を利用した角度推定

アンテナ間隔を  $d$ , アンテナ数を  $K$  とする, 一次元のアンテナアレイに, 信号が角度  $\theta_k$  で入射する際, アンテナ間の位相差は  $\varphi = 2\pi \cdot d \sin \theta_k / \lambda$  となり, 各アンテナにおける位相応答を表す方向ベクトル  $a(\theta_k)$  は, 以下の(4)式で表され

る.

$$a(\theta_k) = [1, \exp(-j\varphi), \dots, \exp(-j(K-1)\varphi)]^T. \quad (4)$$

また, 4.1.1 節で示す通り, 実際の測定で使用するアンテナ数は  $K=3$ , アンテナ切り替えによりサンプルは  $N=8$  個遅れ, 位相差が  $\varphi + N\psi$  となる.

$$a(\theta_k) = [1, \exp(-j(\varphi + N\psi)), \dots, \exp(-j(K-1)(\varphi + N\psi))]^T. \quad (5)$$

送信信号が  $x(t)$  の際, 受信ベクトル  $X(t)$  とその相関行列をそれぞれ以下の(6)式, (7)式のように定義する.

$$X(t) = x(t)a(\theta_k). \quad (6)$$

$$R_{xx} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X(t)X^H(t). \quad (7)$$

$R_{xx}$  の固有ベクトルを  $e_i (i = 1, 2, \dots, K)$  とする. そのうちの大きい  $M$  個が信号に相当し, 残りは雑音に相当する. これを利用して以下の(8)式から MUSIC スペクトラム  $S(\theta)$  を算出し, ピークに達する  $\theta$  が電波到来角度となる.

$$S(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=M+1}^K |a^H(\theta)e_i|^2}. \quad (8)$$

## 4. 実験結果

設定したパラメータ毎の各角度における真の角度との線形回帰で求めた角度誤差の平均値をまとめ, パラメータの変化による角度の精度について比較する. また, 最適パラメータによる角度情報から位置測位を行いその精度についても評価する.

### 4.1 実験環境

#### 4.1.1 実験機器

2.1 節で記した通り, Bluetooth の方位計測機能は比較的新しいため, 市販の BLE 機器にはまだほとんど実装されていない. そこで, 検討方式の実験機器として, 図 5 のような機器を測定に使用した. これらの機器は Bluetooth5.1 の方位計測機能を使用可能である TI (Texas Instruments) 社製の LAUNCHXL-CC26X2R1 と BOOSTXL-AoA である. LAUNCHXL-CC26X2R1 は 1 つの 2.4GHz ダイポールアンテナを搭載する送受信機となっており, BOOSTXL-AoA は 3 つの同様なアンテナを備えた 2 つのアンテナアレイがある. LAUNCHXL-CC26X2R1 は BLE ビーコン, つまり送信機として使用し, BOOSTXL-AoA は LAUNCHXL-CC26X2R1 と JSC ケーブルで繋ぎ合わせることで複数のアンテナを備えた受信機として利用する.

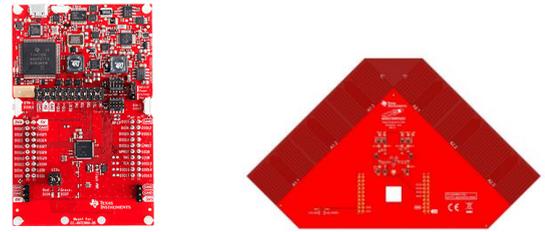


図 5 LAUNCHXL-CC26X2R1 (A) BOOSTXL-AoA (B)

#### 4.1.2 測定環境

電気通信大学の西 9 号館 301 号室で, 受信機や送信機, 給電するための PC の他に机や教壇, 椅子などが配置されている教室環境で測定を行った. 図 6 中の青の地点に受信機を固定で配置し, オレンジの地点には送信機を配置する. 送信機は測定角度が変更される度に位置を変えて配置する. 受信機と送信機間の距離は約 3m で配置し, 図中の  $\theta$  を測定角度として実験を行った.

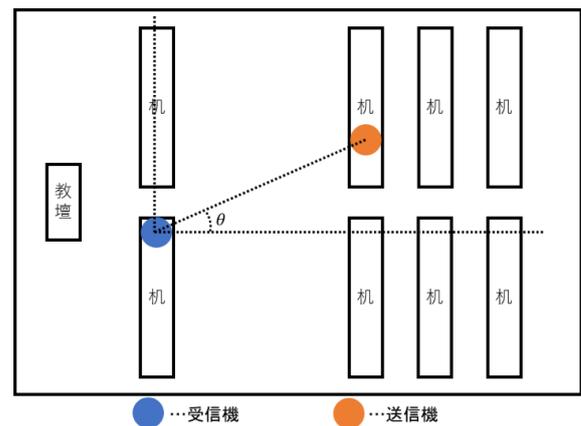


図 6 測定環境 (電気通信大学西 9 号館 301 号室)

### 4.2 測定方法と角度精度の評価

#### 4.2.1 測定方法

測定条件の設定として, CTE の長さを  $160\mu\text{s}$ , 各 Sample slot と Switch slot の長さを  $2\mu\text{s}$ , 書き込み時間を 60 秒, アンテナ数を 3 とした場合を初期設定とする. この初期設定から上記の項目を変更することで角度精度の比較を行う.

測定方法としては, 受信機や送信機 (ビーコン) を図 6 のように準備する. また, ハードウェアの制限で, 測定角度の範囲は 1 つのアンテナアレイに対して  $-50^\circ$  から  $50^\circ$  とする. 以後, 設定を変更する度に同様の作業を行う.

#### 4.2.2 角度精度の評価

角度精度の比較方法は, パケットにおけるアンテナ切り替え周期を  $a$ , 測定に使用できるパケット数を  $b$  とし,  $a \times b$  をアンテナ切り替え周期回数 (データ数) とすることで, (1)と(3)式で角度の平均値を算出する. そして,  $a$  と  $b$  などのパラメータの変化による角度計測精度の影響を調べ, 1 つずつパラメータの設定を変更していった際の最適な条件を

選択していき、以降の測定ではその選択したパラメータの設定で測定を行っていく。

### 4.3 パラメータ変化による角度精度

#### 4.3.1 CTE の長さ

まず、CTE の時間の長さを 40, 80, 120, 160 $\mu$ s のそれぞれに変更した際の角度精度を比較する。CTE の長さを変更した際、まずアンテナの切り替え回数が変わるため、1 つのパケットにおけるアンテナ切り替え周期 $a$ が変化し、また 1 つのパケットにおける書き込む IQ サンプルの量も変わるためパケット数 $b$ も変化する。表 2 は各 CTE の長ささと各データ量の関係であり、CTE 長さが 120 $\mu$ s のとき真の角度との誤差は一番小さくなる。また、CTE の長さが長くなればなるほど、アンテナ切り替え周期 $a$ が多くなり、パケット数 $b$ が少なくなっており、CTE の長さが 80 $\mu$ s のときに一番データ量 $a \times b$ が多くなっている。

表 2 CTE の長ささと各データ量の関係

CTE 長 ( $\mu$ s)	$a$	$b$	$a \times b$	誤差 (度)
40	3	65	195	9.0
80	8	30	240	8.1
120	13	12	156	7.8
160	18	6	108	9.8

表 2 から CTE の長さが 80 $\mu$ s と 120 $\mu$ s のとき、角度誤差にほとんど差が無く、80 $\mu$ s の方がより短い時間で多くのデータを計測できるため、CTE の長さが 80 $\mu$ s のときが最適な条件だと思われる。以後、CTE の長さを 80 $\mu$ s にして測定を行う。

#### 4.3.2 スロットの長さ

次に CTE の長さを 80 $\mu$ s に設定した際の各スロットの長さを考える。2.2.1 節で記した通り、Sample slot と Switch slot は、1 $\mu$ s か 2 $\mu$ s の長さに調節することができる。スロットの長さを変更すると、アンテナの切り替えタイミングとサンプリング期間が変わるため、CTE パケット中のアンテナ切り替え周期回数 $a$ が変化する。表 3 はスロットの長ささと各データ量の関係であり、スロットの長さが 1 $\mu$ s の時に誤差が小さくなる。また、アンテナの切り替え間隔が半分になるため、アンテナ切り替え周期 $a$ も約 2 倍に増えるが、1 つのパケットにおける書き込む IQ サンプルのデータ量が増加するため、パケット量 $b$ は少し減少する。

表 3 スロットの長ささと各データ量の関係

スロット ( $\mu$ s)	$a$	$b$	$a \times b$	誤差 (度)
1	16	25	400	6.3
2	8	30	240	8.1

全体のデータ量 $a \times b$ を比較した際にスロットの長さが 1 $\mu$ s の方が多くなり、また誤差も小さくなっていることから、スロットの長さが 1 $\mu$ s のときが最適な条件だと思われる。以後の測定では CTE の長さが 80 $\mu$ s、スロットの長さが 1 $\mu$ s の条件で実験を行う。

#### 4.3.3 アンテナ数

アンテナの切り替えパターンはアンテナの切り替え先を必ず隣のアンテナにするように設定する。つまり、アンテナ切り替え時に毎回同じアンテナ間位相差が発生するようにする。表 4 はアンテナ数と各データ量の関係であり、アンテナ数が 2 の場合にデータ量 $a \times b$ が多くなる一方、誤差はアンテナ数 3 と比べて大きくなっている。

表 4 アンテナ数と各データ量の関係

アンテナ数	$a$	$b$	$a \times b$	誤差 (度)
2	33	25	825	7.1
3	16	25	400	6.3

実際にはアンテナ数が少なくなればなるほど、アンテナ切り替え周期 $a$ の数は多くなるが、1 周期におけるアンテナ切り替え回数は少なくなる。そのため、アンテナ数 3 よりアンテナ数 2 の方がアンテナの切り替え回数が多くなることは無く、CTE の長さが同じ場合は必ず同数になる。アンテナ数が異なる際にアンテナ切り替え一周期での信号の位相差の取得回数が増えるため、アンテナ数 2 の場合には位相差の取得回数が少なくなり、誤差が多くなると思われる。以上の理由から以後の測定ではアンテナ数を 3 にして測定を行っていく。

#### 4.3.4 書き込み時間

最後に、CTE の長さを 80 $\mu$ s、スロットの長さを 1 $\mu$ s、アンテナ数を 3 とした際、書き込み時間を変更した際の角度精度を比較する。書き込み時間は取得した IQ サンプルをファイルに書き込むための時間である。そのため、実際は測定するデバイスの性能に依存しており、本実験では受信機に給電している PC の性能に依存する。この時間の長さによって CTE を送信する回数が増えるため、使用できるパケット数 $b$ も増減する。また、アンテナ切り替え周期 $a$ については変わらない。

表 5 書き込み時間と各データ量の関係

書き込み時間 (s)	$a$	$b$	$a \times b$	誤差 (度)
20	16	8	128	10.3
60	16	25	400	6.3
120	16	60	960	5.7

表 5 は書き込み時間と各データ量の関係を示す。書き込み時間が長くなるほどパケット数  $b$  が多くなり、120 秒のときに角度誤差を  $5.7^\circ$  まで抑えることができる。よって可能ならばできるだけ書き込み時間を長くするのが最適と思われる。しかし、実際には測定している対象が長い時間静止状態にあるとは考えられず、もし測定時間が 120 秒の場合は測定対象が動いてしまうため、測定が困難になると思われる。この動作する測定対象の際の測定時間については 5.2 節で議論する。

#### 4.4 位置測位精度

3.4.3 節より真の位置を  $(x_1, y_1)$  とし、座標毎に三角測量を実行することで送信機の位置  $(x, y)$  を算出する。

$$\text{水平測位誤差} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}. \quad (9)$$

(9)式より真の位置との水平測位誤差を計算し、受信機とビーコンの距離が 3~5m の場合、8 か所でそれぞれ 3 回の測定による平均水平測位誤差が約 25cm になったことがわかった。

### 5. 考察

#### 5.1 各パラメータと精度の関係

4.3 節より、各パラメータにおけるアンテナ切り替え周期数  $a$  とパケット数  $b$ 、精度がどのように変化するか確認できた。また、今回の測定では使用できるパケットすべてを利用して角度を求めており、パケット数が極端に少ない場合、若しくは使用するパケット数を減らした場合に角度誤差が大きくなることがわかった。これは 4.3.4 節において、パケット数だけが変化した際の結果からも推測することができる。そのため、実際に角度を求めて位置を推定するためには、ある程度のパケット数が必要である。しかし、CTE の長さやスロットの長さの変更ではパケット数を増やすことが可能だが、アンテナ切り替え周期  $a$  も変わってしまうため、結果的に全体のデータ数が減ってしまう。そこで、書き込み時間の変更によるパケット数  $b$  の増減が角度誤差に多く影響を与えると考えられる。

#### 5.2 書き込み時間と測定時間

4.3.4 節より、書き込み時間の変更におけるパケット数の変化が誤差に影響を与えると示したが、実際に角度を測定して位置を推定する場合、測定対象が長時間静止している状態は考えられない。そこで、書き込み時間ではなく、同数のパケット数を使用する際の送信時間を考える。CTE を使用しない 1 つの BLE パケットにおけるデータ量最大の送信時間は  $708\mu\text{s}$  であり[15]、今回の最適条件として設定した CTE の時間  $80\mu\text{s}$  を加えると 1 パケットにおける送信

時間は約  $788\mu\text{s}$  になる。表 5 より、書き込み時間 120 秒の際のパケット数  $b$  は 60 のため、パケット数  $b$  が 60 のときの送信時間は約  $47\text{ms}$  程度となり、書き込み時間 120 秒と比較しても十分短い時間であると考えられる。また、測定対象を秒速 1m で歩く歩行者と想定した際に、測定時間を 100ms とすると、歩行者は測定時間の間に 10cm 進み、送信機（歩行者）とビーコンの間の距離が 3m だとすると、角度は約  $1.9^\circ$  変化する。そこで、測定距離よってどの程度角度が変化するかを調査するために、図 7 のように測定時間が 100ms の際の受信機と送信機との距離と測定中の角度変化の関係についてグラフ化した。グラフから受信機と送信機との距離が約 6m 以上遠くなると角度変化が 1 度未満に抑えられることがわかった。以上より、理想的な測定では測定時間を 100ms 以下にすることで十分なパケット数を確保でき、また移動している対象もほとんど誤差がなく角度を測定することが可能であると考えられる。

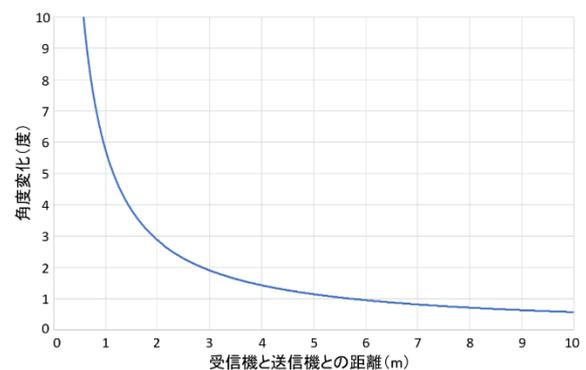


図 7 測定時間 100ms における送信機と受信機の距離と角度変化の関係

### 6. おわりに

本論文では、屋内測位の精度を改善するために利用される角度情報について、多くのデバイスに搭載されている BLE を使用し、その角度情報の算出に用いられる信号の位相差の取得方法と取得に関する様々なパラメータの選択手法を検討した。

検討方式では、角度情報を取得する際に必要となる信号の位相差において、BLE ではアンテナ間の位相差の他に、サンプリング位相差も発生する問題に対して、IQ データの位相を位相継続法によって予備処理し、線形回帰を用いることで位相差を求めた。また、BLE の角度情報取得の際に用いられる CTE について、CTE 自身の長さや各スロットの長さ、また、アンテナ数やファイルへの書き込み時間などの各パラメータの調整を行うことで、角度精度の誤差を比較し、適切なパラメータ選択について検討した。

各パラメータの選択による精度の評価を行うために、実際のマルチパス波が発生する屋内環境で測定を行った。Bluetooth の方位計測機能は比較的新しいため、実験機器は

市販の BLE 機器ではなく、TI 社製の LAUNCHXL-CC26X2R1 と BOOSTXL-AoA を組み合わせて送信機と受信機として測定をし、その結果を比較・評価した。各パラメータの選択による角度誤差については、初期設定の選択より約  $4.1^\circ$  の改善が見込まれ、最良の選択では角度誤差を約  $5.7^\circ$  まで抑えられることが確認できた。

今後は、検討方式である MUSIC 法を用いた角度算出の実装や受信信号強度である RSSI 情報を利用した測位を併用することでより良い位置精度が得られると考えられる。

## 参考文献

- [1] 株式会社矢野経済研究所, “屋内位置情報ソリューション市場に関する調査を実施,” 2022.1,  
[https://www.yano.co.jp/press-release/show/press\\_id/2900](https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2900)
- [2] iRidge, 位置情報関連技術, 2014.4,  
<https://iridge.jp/blog/201404/4893/>
- [3] Vincent W. Zheng, Yu Zheng, Xing Xie, and Qiang Yang, “Collaborative Location and Activity Recommendations with GPS History Data,” *Proceedings of the 19<sup>th</sup> international conference on World wide web*, April 2010.
- [4] Qiang Yang, Sinno Jialin Pan, and Vincent Wenchen Zheng, “Estimating Location Using Wi-Fi,” *IEEE Intelligent Systems*, Vol.23, No.1, pp. 8-13, February 2008.
- [5] Davide Giovanelli and Elisabetta Farella, “RSSI or Time-of-flight for Bluetooth Low Energy based localization? An experimental evaluation,” 11<sup>th</sup> IFIP Wireless and Mobile Networking Conference, Sep 2018.
- [6] Ruofeng Liu, Zhimeng Yin, Wenchao Jiang, and Tian He, “WiBeacon: Expanding BLE Location-based Services via WiFi,” *ACM MobiCom '21*, October 25–29, 2021, New Orleans, LA, USA.
- [7] Marco Cominelli, Paul Patras, and Francesco Gringoli, “Dead on Arrival: An Empirical Study of The Bluetooth 5.1 Positioning System,” *WiNTECH '19*, October 25, 2019.
- [8] Naoki Nakajima, Suhua Tang, Tomohiko Ogishi, and Sadao Obana, “Improving precision of BLE-based indoor positioning by using multiple wearable devices,” in *MUSICAL '16*, 2016.
- [9] Pradeep Sambu and Myounggyu Won, “An Experimental Study on Direction Finding of Bluetooth5.1: Indoor vs Outdoor,” *arXiv.2103.04121*, March 2021.
- [10] 国土交通省, “屋内測位のための BLE ビーコン設置に関するガイドライン”, 2018.2,  
<https://www.gsi.go.jp/common/000198740.pdf>
- [11] Tech Web, “AFH (Adaptive Frequency Hopping),” 2016.11,  
<https://techweb.rohm.co.jp/iot/knowledge/iot02/s-iot02/03-s-iot02/1969>
- [12] TI, Bluetooth Low Energy Angle of Arrival (AoA) for locator devices, 2022.5,  
[https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=AOSUfCXmKNaUAY6wny0b2w\\_\\_pTTHBmu\\_\\_LATEST](https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=AOSUfCXmKNaUAY6wny0b2w__pTTHBmu__LATEST)
- [13] MathWorks, “Bluetooth Location and Direction Finding”, 2022.1,  
<https://jp.mathworks.com/help/comm/ug/bluetooth-direction-finding.html?lang=en>
- [14] Wataru Komamiya, Suhua Tang, and Sadao Obana, “Precise angle estimation by jointly using spatial/temporal change of channel state information and its application in pedestrian positioning,” *IEEE Access*, vol.9, pp. 59420-59431, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3073000, Apr. 2021.
- [15] The Interrupt Community, Chris Coleman, “A Practical Guide to BLE Throughput” 2019.11,  
<https://interrupt.memfault.com/blog/ble-throughput-primer>