

UWBアンテナとスマートフォンの融合により 配置の柔軟性を向上させた屋内測位システム

牧野 遥斗¹ 梶 克彦¹

概要：本研究では、従来のUWB屋内測位システムにおける「有線配線の必要性」「特定の通信インフラへの依存」「アンテナ側の設定の難しさ」という3つの運用課題を解決する、アンテナとモバイルデバイスを統合したUWB測位システムを提案する。本システムの特徴は以下の3点である。第一に、各アンテナにスマートフォンを接続し、Wi-Fi DirectおよびBLEによる無線通信を実現して、壁など阻まれた環境でも自由に置けるようにした。第二に、タブレット端末でシステム全体を統合管理し、通信手段を選ばず動作可能なポータブル構成とした。第三に、アンテナ側の設定項目をモバイル端末のGUIを用いて簡潔に登録出来るようにした。また、測位結果やアンテナ配置はタブレット端末上で直感的に可視化され、設置、調整、運用までの一連の作業を少ない手順で行えるようにした。本提案システムは、UWB測位本来の高精度を活かしつつ、導入負担を軽減し、環境変化にも柔軟に対応できる新しい屋内測位システムとして有効であると示す。

An indoor positioning system that enhances placement flexibility through the integration of UWB antennas and smartphones

1. はじめに

日本人の1日の生活時間の約9割は屋内で過ごすとされており、屋内の位置情報は人や物の効率的な管理、業務改善、行動分析など、多くの分野で活用されている。工場における作業員の動線管理、商業施設における顧客行動分析、病院での医療機器の追跡など、屋内測位技術の需要は年々高まっている。

屋内測位技術には様々な手法が存在する。それぞれの手法は、環境特性、予算制約、設置の容易さなどによって適用可能な条件が異なる。そのため、適切な測位手法を選定するには、各手法の特性を理解し、比較検討する必要がある。また、測位手法を比較検討する際には、各手法の精度を客観的に評価するための正解座標が必要となる。

その中で、現状で高精度とされているのはUWB(Ultra-Wideband)測位である。UWBは数十cm程度の高精度な測位が可能であるため、正解データとしての利用や、測位手法の一つとしての利用が期待される。

しかし、従来のUWBシステムには3つの運用上の課題が存在する。具体的には、有線配線の必要性、特定の通信イ

ンフラへの依存、およびアンテナ側の設定の難しさである。これらの課題により、UWBシステムの導入や運用が煩雑になり、様々な環境での利用が制限される。

本研究の目的はUWB測位システムにおける運用上の課題を解決し、様々な環境で容易にUWB測位を実施できる運用支援システムの構築である。そのアプローチとして、スマートフォンを利用した無線での制御を可能にし環境に依存しないアンテナの実装と、全体を一元的に管理して設置から計測を行うタブレットのシステムの提案を行う。そのため、UWBアンテナにスマートフォンを接続し、スマートフォンからの給電と通信機能を付加して外部リソースを必要としない構成を実現する。また、システム全体を統合的に管理するタブレット端末を導入し、UWBアンテナ・スマートフォン・タブレットの3要素からなる統合システムを構築する。これにより、インフラの整備されていない環境でも動作可能なポータブル構成が可能となり、設置からキャリブレーション、データ収集までの一連の手順を簡略化して操作性を向上させる。結果として、従来のUWBシステムが抱えていた運用上の負担を軽減し、研究者が様々な環境において高精度な測位データを容易に取得できる仕組みを実現した。システムの概要を図1に示す。

¹ 愛知工業大学情報科学部

Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technology

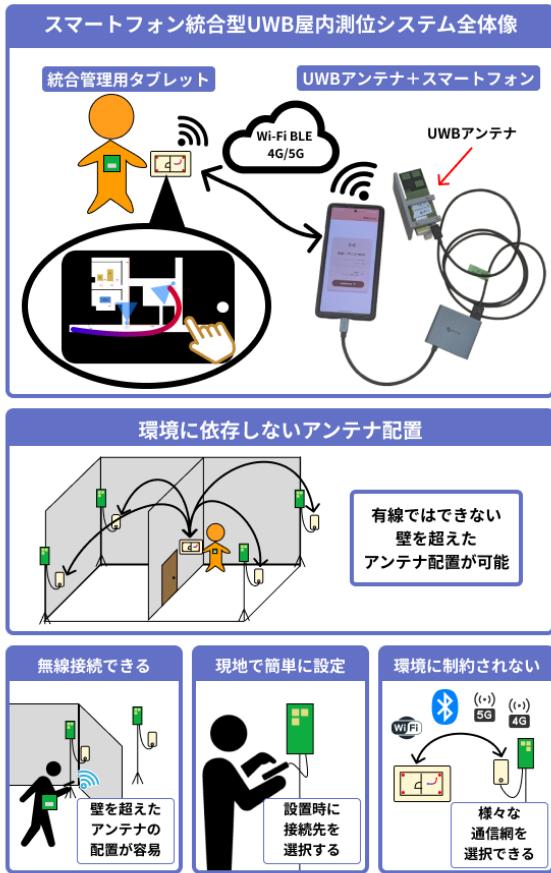


図 1 システム概要図

2. 関連研究

2.1 屋内測位手法に関する研究

屋内測位手法は、相対測位と絶対測位の2つに分類される[1]。相対測位は、初期位置または前回の位置からの相対的な変化量を測定して現在位置を推定する手法である。この手法は環境に計測機器を設置する必要がなく、デバイス単体で測位が可能であるという利点がある。一方、絶対測位は環境中に設置された固定的な計測機器を用いて絶対的な位置座標を直接測定する手法である。環境への計測機器の設置が必要となるが、計測機器からの距離や角度を直接測定するため、測定誤差が蓄積しにくいという特徴がある。

相対測位の代表的な手法として、PDR (Pedestrian Dead Reckoning: 歩行者自律航法)[2]がある。相対測位手法の利点は、特別なインフラを必要とせず、デバイスを測定対象に取り付けるだけで利用可能な点である。また、GPS信号が届かない屋内環境でも動作し、外部との通信が不要なため、プライバシーへの配慮が求められる環境でも適用できる。しかし、センサノイズや計算誤差が時間とともに蓄積されるため、ドリフトが発生しやすいという課題がある。特に長時間の使用や複雑な移動経路では、誤差の蓄積により測位精度が著しく低下する。そのため、相対測位のみで

は長期的な高精度測位が困難であり、定期的な位置補正や絶対測位手法との併用が必要となる[3]。

対して絶対測位は環境中に設置された固定的な計測機器（アンテナやビーコン）を用いて、測定対象の絶対的な位置座標を直接算出する手法である。計測機器からの距離や角度、受信信号強度などを測定し、三角測量やフィンガープリント法などの原理に基づいて位置を推定する。この手法の最大の利点は、相対測位と異なり測定誤差が時間経過で蓄積されない点である。そのため、ドリフトが発生せず、長期的に安定した測位精度を維持できる。また、初期位置の設定が不要であり、いつでも現在の絶対位置を取得できるため、システムの再起動や一時的な通信断後も即座に測位を再開できる。さらに、複数の測定対象を同時に追跡する場合でも、各対象の位置を独立して測定できるため、スケーラビリティに優れている。しかし、環境に計測機器（アンテナ、ビーコン、アクセスポイントなど）を設置する必要があるため、初期導入コストや設置作業の負担が発生する。本研究では、測定手法の比較検証を行うための正解データとして高精度な位置情報が求められる。長時間の連続測定においてもドリフトによる誤差蓄積を抑えるため、絶対測位手法を採用する。

絶対測位の具体的な手法として、カメラ測位、Wi-Fi測位、BLE測位、UWB測位があり、中でもUWB測位は高精度である。カメラ測位は、画像処理技術を用いて特徴点を抽出し、位置を推定する手法である。単眼カメラだけで、場所や規模を問わずリアルタイムかつ高精度に地図作成と自己位置推定(SLAM)を行った例もある[4]。この手法は高精度な測位が可能であるが、照明条件や視界の遮蔽に影響されやすく、プライバシーの懸念も存在する。Wi-FiやBLE(Bluetooth Low Energy)を用いた測位は、屋内位置推定における代表的な手法である。Wi-Fi測位は既存のインフラを活用でき、ディープラーニングを用いて環境ノイズを除去する研究など、広範囲での測位に向けた改善が進められている[5]。一方、BLE測位は専用のビーコンを利用するため、低消費電力かつ設置が容易であるという利点がある[6][7]。しかし、いずれの手法も主に三角測量やフィンガープリント法を利用するため、アクセスポイントの配置や環境の変化、フィンガープリントモデルの劣化等の影響を受けやすい。そのため、両手法ともに測位精度は数メートル程度に留まっており、より高精度な測位には課題が残る。UWB測位は、非常に広い帯域幅を利用する無線測位技術であり、数十cmの高精度な測位が可能である[8]。本研究では、測定手法の比較検証を行うための正解データとして高精度な位置情報が求められる。絶対測位の中でもUWBは他の手法と比較して測位精度が高く、ドリフトが発生しないという点で優れているため、UWB測位を採用する。

2.2 UWB 測位システムの設置と運用に関する研究

UWB 測位システムは、通常ネットワークや電源などの環境に依存するため、環境に固定して計測を行う。そのため、設置場所の移動に制限がかかり、様々な環境での検証が困難となる。この課題を解決するため、Raspberry Pi や ESP32 などのマイコンを用いて UWB モジュールに無線通信機能を付加する手法が提案されている [9][10]。しかし、これらのシステムはファームウェアの書き込みやプログラミングの知識が必要であり、専門知識を持たないユーザーにとっては導入障壁が高い。また、携帯性や操作性にも課題がある。

UWB 測位システムを様々な環境で検証するためには、アンテナの設置と取り外しを繰り返し行う必要がある。そのため、再利用可能で携帯性の高いシステム構成が求められる。この課題に対して、障害物のある環境での UWB センサ配置最適化アルゴリズムが提案されており、NLOS 効果を考慮した配置により測位精度を向上させている [11]。こうした手法では、専用機材やパソコンベースのソフトウェアを用いてアンテナ配置の最適化を行っている。しかし、現場での設置作業や設定変更には対応しておらず、研究者が容易に利用できるシステムとはなっていない。

3. UWB 屋内測位の運用支援システム

3.1 要求システム要件の抽出

1 章で示した本研究の背景や 2 章で示した関連研究などから、従来の UWB 測位システムにおける運用上の課題を分析し、以下の 3 つのシステム要件を抽出した。

設置の複雑さ：UWB の電波は直進性が強いため、遮蔽物を回避してアンテナを適切に配置する必要がある。従来のシステムは各アンテナを有線で接続するため、実験環境の配線ルートに強く依存し、設置作業が煩雑であった。そのため、壁の向こう側を含むフロア全体を一つの環境として連続的な測位ができなかった。結果として、フロア全体のような広い環境であっても、壁の向こう側を含めたシムレスな測位環境を構築できなかった。

運用における機動性の課題：従来の UWB システムは、電源およびネットワーク配線が必須であるため、環境構築に多大な工数を要していた。そのため、必要な時に短時間で設置し、計測終了後に直ちに撤去するような、「スポット的な利用」が困難であった。結果として、一時的な検証や、機材を移動させながらの繰り返し計測といった、機動的な運用を行う上で大きな障壁となっていた。

アンテナ側の設定：従来の UWB システムでは、各アンテナの設定を専用ソフトウェアで行う必要があり、専門知識が求められた。設定項目も多岐にわたり、初心者には操作が難しい場合が多い。また、環境が変わるとたびに再設定が必要となり、運用負担が大きい。これにより、システムの導入や運用が煩雑になり、ユーザビリティが低下していた。

表 1 デバイスの評価指標比較

評価指標	スマートフォン	ESP32	RaspberryPi
無線接続	Wi-Fi, BT, セルラー	Wi-Fi, BT	Wi-Fi, BT
操作性	内蔵タッチ パネル	外部ボタン/ ディスプレイ	外部ボタン/ ディスプレイ
内蔵電源	○	×	×
価格 (円)	32,000~	620~	9,000~
ソフト配布	アーリストア から配布	ソースから ビルト	ソースから ビルト

3.2 スマートフォンを利用した設置の複雑さと運用における機動性の向上

スマートフォンを利用した設置の複雑さと運用における機動性の向上をするために、各 UWB アンテナにスマートフォンを接続し、Wi-Fi Direct および BLE による無線通信を実現する。なぜならば、スマートフォンは無線通信機能と内蔵電源を備えており、外部のネットワークや電源に依存しないためである。これにより、壁などで遮られた環境でも自由にアンテナを配置できるようにする。表 1 にスマートフォン、ESP32、RaspberryPi の各デバイスの評価指標比較を示す。すべてのデバイスにおいて Wi-Fi および Bluetooth 通信が可能であるが、スマートフォンは内蔵タッチパネルや内蔵電源を備えており、操作性や携帯性に優れている。また、USB ハブとモバイルバッテリーを組み合わせて、スマートフォンへの給電が可能となり、長時間の運用にも対応できる。スマートフォンは他のデバイスに比べて価格が高いが、無線接続、操作性、内蔵電源、ソフト配布の各評価指標において優れている。また、スマートフォンはアーリストアからソフトウェアを配布できるため、ユーザーがソースコードからビルトする必要がなく、導入が容易である。そのため、本研究ではスマートフォンを選定した(図 2)。



図 2 UWB アンテナに接続されたスマートフォン

3.3 アンテナ側の設定の解決

アンテナの配置やタブレットとのペアリングなどを行う

ために、アンテナ側の設定項目をモバイル端末の GUI を用いて簡潔に登録できるようにする。なぜならば、アンテナの設定をするときに PC などを利用して設定を書き込む必要がなくなり、専門知識がなくても直感的に操作できるシステムを実現できるためである。これにより、アンテナ側ではアンテナ名の設定とタブレットとのペアリングを行うのみで、その他の設定はタブレット側で一括して行える構成とする(図 3)。複数のアンテナを現地で設置する際にも、各アンテナの設定を設定画面から一元管理できるため、運用負担を軽減できる。



図 3 設定画面のスクリーンショット

3.4 統合管理用タブレット

システム全体を統合管理するために、iPad を用いたポータブル構成を実現する。なぜならば、現地でのフロアマップの登録、アンテナ配置の可視化、測位データのリアルタイム表示などを一元的に管理でき、操作性と携帯性に優れているためである。iPad は Wi-Fi および Bluetooth 通信機能を備えており、スマートフォンと容易に接続できる。また、タッチパネルを備えているため、直感的な操作が可能である。さらに、バッテリー駆動であるため、インフラ環境のない場所でも動作可能である。また、MacOS と iPad のクロスプラットフォーム開発環境である SwiftUI を用いて、iPad と Mac の両方で動作するアプリケーションの開発を行う。これにより、研究者は携帯性が高い iPad で現地での設置・運用を行い、Mac で詳細なデータ解析や設定変更を行える(図 4)。



図 4 iPad を用いたシステム統合管理

3.5 通信の流れ

本システムにおいて、スマートフォンとタブレット間の通信は Nearby Connections API を用いて実現する。この通信経路を含むシステム全体の流れを図 5 に示す。UWB アンテナとスマートフォン間は USB 有線接続のシリアル通信で接続し、UWB 測位データをスマートフォンに送信する。スマートフォンと iPad 間は前述の通り Nearby Connections API で接続し、測位データを iPad に送信する。iPad は受信した測位データを統合管理し、リアルタイムに可視化する。これにより、インフラ環境のない場所でもシステム全体が連携して動作可能となる。

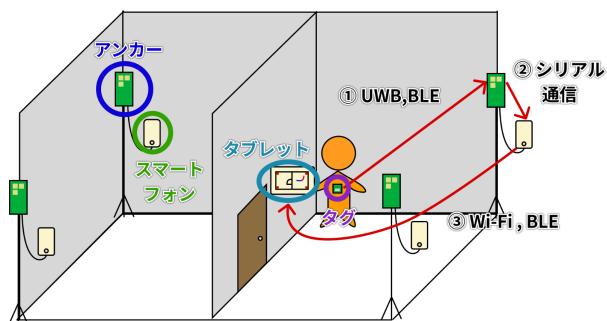


図 5 システム全体の通信の流れ

Nearby Connections API を選定した理由は、既存の無線通信技術におけるトレードオフを解消するためである。表 2 に無線通信技術の評価指標比較を示す。Wi-Fi Direct は広範囲での通信が可能であるが、接続の確立や管理が複雑である。Bluetooth は低消費電力であり、接続が容易であるが、通信距離が短い。セルラー通信は広範囲での通信が可能であるが、通信コストが高く、インフラ環境に依存する。

Nearby Connections API は、Google が提供する近距離無線通信のための API であり、Bluetooth と Wi-Fi Direct を状況に応じて自動的に組み合わせられる。この API を採用して、Bluetooth を用いた容易な接続確立と、Wi-Fi Direct を用いた広範囲で低遅延な通信の両立が可能となる。結果として、本システムに求められる通信基盤として最適な性能を実現している。

表 2 無線通信技術の評価指標比較

評価指標	Wi-Fi (Wi-Fi Direct)	BLE	セルラー	Nearby Connections
通信距離	100m	10m	数 km	100m+10m (Wi-Fi+BLE)
通信方式	c/s, (p2p)	p2p	c/s	p2p

3.6 システム動作フロー

提案システムの設置から屋内測位開始までの一連の動作フローを図 6 に示す。本システムは、測位環境のフロアマップ登録およびアンテナ位置設定を行った後、アンテナの設

置、タブレットとのペアリング、キャリブレーションを経て、屋内測位を開始する構成となっている。以下に、提案システムの設置から屋内測位開始までの詳細な流れを示す。

- (1) フロアマップの登録：iPad 上で測位環境のフロアマップを登録する。フロアマップは画像ファイルとして iPad に取り込み、測位環境のレイアウトを視覚的に把握できるようにする。あわせて、フロアのスケールや階層構造などの基本的な建物情報を設定する。
- (2) フロアマップへのアンテナ位置の設定：登録したフロアマップ上に各アンテナの位置を設定する。タッチ操作によりアンテナのアイコンをドラッグアンドドロップして、実際の設置位置に対応した配置を容易に行う。
- (3) アンテナの設置：UWB アンテナを測位環境に設置する。各アンテナには制御用のスマートフォンが接続されており、BLE 通信を用いてタブレットから無線制御を行う。アンテナの設置場所は自由度が高く、壁などによって見通しが遮られる環境においても設置が可能である。
- (4) アンテナとタブレットのペアリング：iPad 上で各アンテナとタブレットのペアリングを行う。アンテナ名を選択し、ペアリング操作を実行して接続を確立する。
- (5) キャリブレーションの実行：iPad 上でキャリブレーションを実行する。キャリブレーションでは、ユーザーが正解座標を指定して実際に正解座標にたち位置情報を取得して、正しいアンテナの角度情報・位置情報を変更して測位精度の向上を図る。
- (6) 屋内測位の開始：iPad 上で屋内測位を開始する。タブレットは各アンテナから送信される測位データをリアルタイムに受信し、推定されたユーザー位置をフロアマップ上に表示する。



図 6 システム動作フローの概要図

4. 評価実験

提案システムの有効性を検証するため、運用実験を実施した。本実験では、システムの設置から屋内測位開始までの一連の流れを評価し、操作性および携帯性について検証した。

4.1 実験環境

実験は愛知工業大学 14 号館 5 階のフロアにて実施した。実験環境の概要を図 7 に示す。実験では、4 台の UWB アンテナを使用し、各アンテナにスマートフォンを接続した構成で運用を行った。統合管理端末として iPad を使用し、Nearby Connections API を介してシステム全体を制御した。

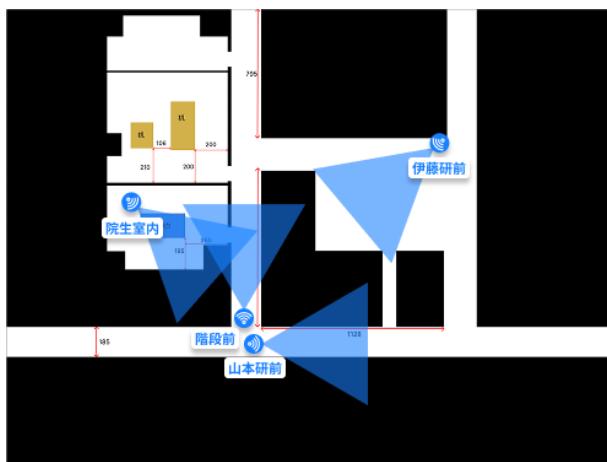


図 7 実験環境の概要図

4.2 実験方法

被験者として、UWB 測位の経験がない大学生 4 名に協力を依頼した。各被験者には、以下に示す提案システムの運用手順を事前に説明を行い、システムの設置から屋内測位開始までの一連の作業を実施してもらった。

提案システムの設置から屋内測位開始までの流れを以下に示す。

- (1) フロアマップの登録：あらかじめ用意された測位環境のフロアマップと建物の大きさや名前等を iPad 上で登録する。
- (2) フロアマップへのアンテナ位置の設定：フロアマップ上に各アンテナの位置を設定する。壁に仕切られた環境でも動作する状況を想定し、部屋の中と廊下に分散してアンテナを配置する。
- (3) アンテナの設置：あらかじめ UWB アンテナとスマートフォンが一体化された機材を測位環境に設置する。
- (4) アンテナとタブレットのペアリング：iPad 上で各アンテナとペアリングを行う。アンテナ名を選択し、ペアリ

ングボタンを押して接続を完了する。

(5) キャリブレーションの実行：キャリブレーション実行時は、フロアマップからわかる特徴的な 5~6 箇所の正解位置情報を iPad 上に入力し、実際に移動しデータを取得して最小二乗法を用いたキャリブレーションを実行する。

(6) 屋内測位の開始：実際に屋内測位を開始し、あらかじめ指定された経路を歩行し、測位データがリアルタイムに表示されたか確認する。

実験では以下の項目を計測した。目的は、提案システムの設置から屋内測位開始までの一連の流れにおける操作性および携帯性の評価である。

- 各作業工程の所要時間
- 設置から測位開始までの総所要時間

また、実験終了後に被験者に対してアンケートを実施し、システムの操作性、携帯性、および総合的な使いやすさについて 5 段階評価（1：非常に悪い～5：非常に良い）で回答を求めた。

4.3 実験結果

4.3.1 所要時間の計測結果

各被験者の作業工程別所要時間を表 3 に示す。設置から測位開始までの平均総所要時間は約 25 分であった。

表 3 作業工程別所要時間 (分:秒)

作業工程	被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D	平均
フロアマップの登録	0:11	0:26	0:25	0:30	0:23
アンテナ位置の設定	2:04	3:09	1:52	2:34	2:25
アンテナの設置	6:04	2:24	1:59	3:12	3:25
ペアリング	1:10	2:09	2:22	2:46	2:07
キャリブレーション	10:45	14:07	11:45	17:34	13:33
屋内測位の開始	2:00	3:46	2:43	4:04	3:08
総所要時間	22:14	26:01	21:06	30:40	25:00

4.3.2 アンケート結果

被験者に対するアンケート結果を表 4 に示す。全体として、システムの操作性および携帯性について高い評価を得た。

表 4 アンケート結果 (5 段階評価)

評価項目	被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D	平均
操作性	4	4	5	4	4.25
携帯性	4	5	4	5	4.50
設置の容易さ	4	5	5	5	4.75
総合的な使いやすさ	3	5	4	4	4.00

被験者からは以下のコメントが得られた。

良かった点：

- 「UI が直感的で操作しやすく、進行度の表示がわかりやすかった」

改善点：

- 「キャリブレーション時の正解情報の入力に手間がか

かった」

- ・「通信の安定性や位置表示の仕方に改善の余地がある」
- ・「より正確なフロアマップの作成が必要である」

4.4 考察

実験結果より、提案システムの有効性が以下の三点から確認された。第一に、設置から測位までの総所要時間が平均 25 分であり、専門知識を持たない初心者でも短時間でシステムを運用できると確認された。この時間短縮は、UWB アンテナとスマートフォンを統合した効果が大きいと考えられる。従来の UWB システムでは、各アンテナへの電源供給とネットワーク接続のために有線配線の敷設が必要であり、設置作業の大部分を占めていた。提案システムでは、スマートフォンの内蔵電源と無線通信機能を活用して配線作業を完全に排除し、アンテナの設置工程を平均約 3 分 25 秒に短縮できた。また、壁などで遮られた環境でも電源やネットワーク配線のルートに制約されないため、自由にアンテナを配置できるようになった。さらに、スマートフォンの GUI と統括されたタブレット端末を活用した直感的な操作インターフェースが有効に機能していると考えられる。第二に、アンケート結果において操作性および携帯性の評価が高く、提案システムが従来システムの課題であった「設置の複雑さ」「インフラの制約」「アンテナ側の設定の難しさ」を軽減できた。第三に、被験者からのコメントにおいて、専門知識不要での運用、携帯性、および可視化機能が評価されており、本研究で設定したシステム要件が適切に満たされた。以上の結果から、提案システムは UWB 測位システムの運用支援に有効であり、研究者が様々な環境で容易に高精度な測位データを取得するための支援ツールとして活用できる。

一方で、本実験を通じていくつかの課題も明らかとなった。まず、デバイス間のペアリングに失敗した場合、操作のやり直しが必要となり、ユーザーの操作感に悪影響を及ぼす可能性があった。また、キャリブレーション手法において最小二乗法のみを用いているため、センシング開始後の測位精度が低下する場合があるほか、キャリブレーションに要する時間が長くなるという課題が確認された。さらに、使用するフロアマップ自体の精度や視認性が低い場合や、アンテナの位置と正解座標に誤差が生じ、結果としてセンシング時の測位精度に影響を及ぼす可能性があった。以上より、ペアリング処理の安定化、キャリブレーション手法の改善、およびフロアマップの精度・表現方法の向上が、今後の課題として挙げられる。

5. おわりに

本研究では、UWB 測位システムの運用における課題を解決するための運用支援システムを構築した。従来システムの課題分析から 3 つのシステム要件を導出し、それぞれ

に対する解決策を実現した。第一に、各 UWB アンテナにスマートフォンを接続して、通信機能を付加し、有線接続を必要としない無線制御を実現した。第二に、タブレット端末でシステム全体を統合管理して、ネットワーク環境のない場所でも動作可能なポータブル構成を実現した。第三に、モバイル端末の GUI を活用して、設置からキャリブレーション、データ収集までの一連の流れを簡略化し、専門知識がなくても直感的に操作できるシステムを実現した。

今後の課題として、キャリブレーション精度とスピードのさらなる向上が挙げられる。また、複数フロアや広範囲な環境での動作を行えるようにするためセルラー通信を使用したシステムの作成を検討する。さらに、フィンガープリントや PDR などの他の測位手法との統合により、より柔軟で高精度な測位システムの構築を目指す。

参考文献

- [1] J. Liu, Z. Yang, S. Zlatanova, S. Li, and B. Yu, "Indoor localization methods for smartphones with multi-source sensors fusion: Tasks, challenges, strategies, and perspectives," *Sensors*, vol. 25, no. 6, p. 1806, 2025.
- [2] L. Wu, S. Guo, L. Han, and A. B. Cekderi, "Indoor positioning method for pedestrian dead reckoning based on multi-source sensors," *Measurement*, vol. 229, p. 114416, 2024.
- [3] W. Pan, Y. Yang, Z. Zhu, and B. Zhang, "Floor-plan-assisted fusion positioning using Bluetooth and pedestrian dead reckoning," in *Proceedings of the 2025 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pp. 726–731, IEEE, 2025.
- [4] R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel, and J. D. Tardós, "ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 5, pp. 1147–1163, 2015.
- [5] M. Abbas, M. Elhamshary, H. Rizk, M. Torki, and M. Youssef, "WiDeep: WiFi-based accurate and robust indoor localization system using deep learning," in *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp. 1–10, 2019.
- [6] 山下陸, 西山勇毅, 小松寛弥, 川原圭博, "BLE ピーコンを用いた屋内位置推定システムの設計と実装," 情報処理学会論文誌, vol. 61, no. 8, pp. 1377–1388, 2020.
- [7] P. Spachos and K. N. Plataniotis, "BLE beacons for indoor positioning at an interactive IoT-based smart museum," *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 3483–3493, 2020.
- [8] J. Li and F. Zhang, "Ultra-Wideband positioning technology: Exploring TWR, TDoA, and PDoA methods for precise ranging and positioning," in *Wideband Wave-Propagating Components for Wireless RF Communications* (M. Alibakhshikani, ed.), ch. 7, London: IntechOpen, 2024.
- [9] S. Krebs and T. Herter, "Ultra-Wideband positioning system based on ESP32 and DWM3000 modules," *arXiv preprint arXiv:2403.10194*, 2024.
- [10] W. Zhao, A. Goudar, and A. P. Schoellig, "Finding the right place: Sensor placement for UWB time difference of arrival localization in cluttered indoor environments," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 3,

pp. 6075–6082, 2022.

- [11] L. Kramarić, M. Muštra, and T. Radišić, “The influence of Ultra-Wideband anchor placement on localization accuracy,” *Sensors*, vol. 25, no. 16, p. 5115, 2025.