

Ultra Wide Band を用いた高精度位置測位のための信号解析システムに関する一検討

波田 凌太郎[†] 作田 岬紀[†] 藤原 拓也[‡] 山口 隼平[‡] 木崎 一廣[‡]
 藤橋 卓也[‡] 渡辺 尚[‡] 猿渡 俊介[‡]
[†]大阪大学工学部 [‡]大阪大学大学院情報科学研究科

1 はじめに

Ultra Wide Band (UWB) とは、広帯域の周波数帯を利用する高精度位置測位に適した無線通信規格である。本技術をコンシューマデバイス向けに応用して数 cm 以内の高精度位置測位を達成する手法として XRLoc があげられる。しかしながら XRLoc では、電波の到着時刻および位相の測量誤差や Non Line of Sight (NLOS) 環境における直接波の減衰およびマルチパスによる測位精度低下が課題となる。本稿では、UWB を用いた位置測位の精度向上を実現する信号解析システムを提案する。実機評価を通じて、本手法が従来の XRLoc と比べて測量誤差を削減すると同時に NLOS 環境での測位精度改善に貢献することを示した。

2 背景

Extended Reality (XR) は、仮想空間と現実世界を統合して新たな体験を生み出す技術である。XR では、現実世界のオブジェクトを仮想空間に正確に反映させる必要があるため物体の正確な位置測位が不可欠となる。XR における高精度位置測位の実現を目的として、文献 [1] では UWB を用いた位置測位システムである XRLoc が提案されている。UWB とは広帯域の周波数帯を利用する高精度位置測位に適した無線通信規格であり、コンシューマデバイス市場においても Apple 社の AirTag をはじめとする紛失物検出や自動車のキーレスエントリーなどで応用されている。XRLoc では、対象物体のタグから送信される UWB パケットの到着時刻および位相に基づいて距離を算出することで対象物体を cm レベルで測位することに成功している。

しかしながら、XRLoc には測位精度の観点で 2 つの課題がある。1 つ目は、電波の到着時刻および位相の測量誤差である。XRLoc では、Qorvo 社の UWB チップである DW1000 に搭載された First Path Index (FPI) 検出機能を用いて電波の到着時刻および位相を測定することにより位置測位を行う。具体的には、6 台の DW1000 を時刻同期下で接続して各チップで得られる FPI の到着時刻と位相から任意のアンテナ間における到着時間差 (TDoA) と到着位相差 (PDoA) を算出して位置測位に応用する。文献 [1] によれば、XRLoc の位置測位精度は TDoA および PDoA の測量誤差によって左右される。XRLoc において UWB の中心周波数 3.5 GHz 帯を用いた場合の位置測位シミュレーションによれば、TDoA および PDoA の標準偏差が 150 ps, 5° であるときに位置測位精度が 1 cm となることが明らかになっている。XR におけるさらなる没入感の追求に向けて位置測位精度を向上させるうえで TDoA および PDoA の測量誤差をさらに抑える必要がある。

2 つ目は、NLOS 環境である。文献 [1] では、XRLoc においては人や物などの遮蔽物を含む NLOS 環境において精度が著しく低下することが報告されている。精度低下の原因として考えられるのが NLOS 環境において顕著となるマルチパスの影響である。XRLoc において DW1000 が電波の到着時刻および位相を測定する際に、NLOS 環境では直接波のパルスのレベルがマルチパスのパルスのレベルよりも低くなる可能性がある。参考として、図 1 (a), (b) に LOS および NLOS 環境で取得されるチャネルインパルス応答 (CIR) の例を示す。図 1 (a), (b) の横軸は時間 (ns) を、縦軸は受信 CIR の正規化した振幅を表している。図 1 (a) に示す LOS 環境で取得された CIR では直接波でのピークが顕著であるため直接波の正確な検出が可能となるが、図 1 (b) に示す NLOS 環境で取得された CIR では直接波が減衰することで反射波にピークが移ってしまい直接波の正確な検出が難しくなる。結果として、TDoA および PDoA を計測するうえで必要な直接波のピーク検出に誤差が生じるため正確な位置測位が困難となる。

本稿では、UWB を用いた位置測位の精度向上を実現する CIR 解析システムを提案する。DW1000 の後継機である DW3000 を用いた CIR の取得と信号解析によって、本手法が従来の XRLoc と比べて PDoA

および TDoA をより高精度に測定すると同時に位置測位精度の向上や NLOS 環境における測位精度の改善に貢献する。

3 提案手法

2 節であげた TDoA, PDoA の測量誤差および NLOS 環境による測位精度低下の問題を解決するために、本稿では UWB を用いた位置測位の精度向上を実現する信号解析システムを提案する。具体的には、複数の UWB アンテナで受信したパケットを連続的に 1 つの UWB モジュールに取り込み、得られる CIR の信号から TDoA と PDoA を取得する。

3.1 UWB パケットの受信

3 台の UWB アンテナを用いて干渉を抑制しながら UWB パケットを受信することで CIR の取得を行う。各アンテナが UWB パケットを受信したのち 1 台の UWB モジュールに対して送信する。各パケットを UWB モジュールに対して同時に送り込むと位置測位の手がかりとなる直接波同士が衝突してしまうため、アンテナごとに異なる遅延時間を設けて UWB モジュールにおける各パケットの到着時刻をずらす。アンテナごとの遅延時間は 20 ns とすることで、直接波同士の衝突を防ぐと同時にある直接波が別の反射波と干渉することを防ぐ。最終的に、UWB モジュールで各信号を合成して取り込むことによって受信信号の CIR を算出する。

3.2 信号解析による TDoA および PDoA の算出

3.1 節で取得した CIR を解析して TDoA および PDoA を算出する。得られた CIR をアップサンプリングしたのち振幅が最大となる点を 1 つ目のピークとして取得する。Delay Line によって 20 ns の遅延が生じることを考慮すればピークの前後 15 ns は別のピークは存在しないと仮定できるため、1 つ目のピーク前後 15 ns を検出範囲から除外したうえで次に振幅が大きい点を 2 つ目のピークとして検出する。同様に 2 つ目のピークの前後 15 ns を検出範囲から除外して 3 つ目のピークを検出する。上記のプロセスを通じて得られる 3 つのピークにおいて時刻と位相をそれぞれ取得する。取得された時刻と位相に基づいてアンテナ 3 本のうち任意の 2 アンテナ間で得られる TDoA および PDoA の算出を行う。各アンテナ間における TDoA および PDoA は以下の数式に基づいて得られる。

$$TDoA : T_{ij} = t_i - t_j - \delta_{ij} \tag{1}$$

$$PDoA : \theta_{ij} = \text{mod}(\theta(t_i) - \theta(t_j), 360) \tag{2}$$

ただし、 t_i は i 番目の受信アンテナによって得られた CIR 信号がピークとなる時刻を、 δ_{ij} は i 番目および j 番目のアンテナ間での遅延時間差を、 $\theta(t)$ は時刻 t における位相 (°) を表す。TDoA および PDoA の測定結果に基づいて UWB 信号を用いた高精度位置測位に寄与する。

4 実装

図 2 (a), (b) に実装した UWB 受信モジュールの概観とブロック図を示す。図 2 (a) に示すとおり、受信モジュールは 3 台からなる受信アンテナ、増幅器、遅延回路、マイクロコントローラ (MCU) からなる。より具体的には、図 2 (b) に示すパーツで構成されている。UWB パケットの受信アンテナ (Rx) として taoglas 社の UWC.20 を、増幅器 (LNA) として MACOM Technology Solutions 社の MAAM-011252 を、遅延回路 (delay line) として 4.5 m の同軸ケーブルを、電力分配器 (power divider) として TTM Technologies 社の PD6080J5050S2HF を、UWB モジュールとして Qorvo 社の QM33110WEVB を、MCU として Nordic Semiconductor 社の nRF52840 DK を用いた。あるタグから送信された UWB パケットを実装モジュールに搭載された 3 つの受信アンテナでほぼ同時に受信した。受信パケットはアンテナやケーブ

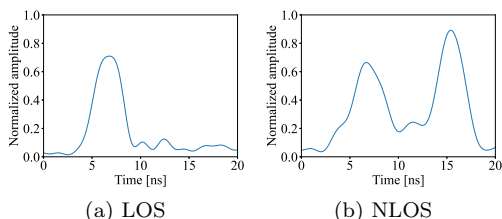


図 1: 各環境における CIR の例

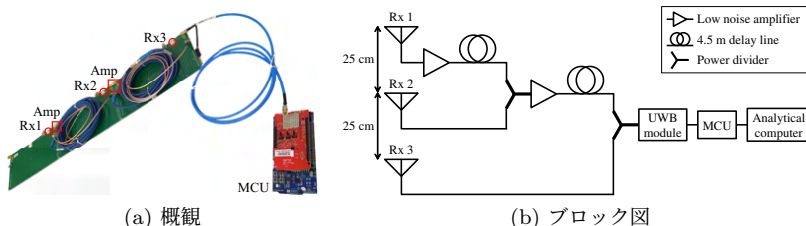


図 2: 実装した UWB 受信モジュール

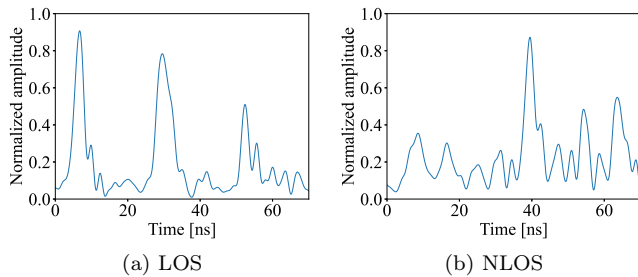


図 3: 3つの受信アンテナで取得した CIR 信号

ルのノイズによって減衰するため増幅器を用いて強度を高めた。各受信アンテナで取得された UWB パケットを UWB モジュールに対して同時に送り込むとパケットの衝突が生じるため、アンテナ間に 4.5 m の同軸ケーブルを挿入して約 20 ns ずつ異なる遅延をアンテナごとに加えた。上記の手順を経て、各アンテナでほぼ同時に受信される複数の UWB パケットを 20 ns ごとに 1 台の UWB モジュールで順次処理することで複数アンテナを用いた TDoA および PDoA の正確な算出を行う機構を実装した。

UWB モジュールの制御プログラムを MCU にビルドするうえで文献 [3, 4, 5] の手順に基づいた。UWB モジュールで CIR の値を取得するためのプログラムを作成して MCU にビルドを行った。逐次受信される UWB パケットを本プログラムを入力することで複素数値の CIR を算出した。本実装で用いた QM33110WEVB は 1 ns ごとに CIR のサンプリングを行うため、1 GHz で複素数値の CIR が得られた。データの解像度を高めるために、得られた CIR を解析用コンピュータで 64 倍にアップサンプリングした。アップサンプリングされた CIR を解析することで任意の 2 アンテナ間における TDoA および PDoA を測定して位置測定を行った。

5 評価

3 節で提案した信号解析システムを 4 節で述べた実機を用いて評価した。UWB 受信モジュールにおける UWB 信号の周波数として、チャンネル 9 に対応する中心周波数 7987.2 MHz、周波数帯域幅 499.2 MHz を使用した。UWB パケットの送信には、4 節で用いた UWB モジュールおよび制御用 MCU と同様に QM33110WEVB および nRF52840 DK を使用した。本モジュールで UWB パケットを送信するにあたって、文献 [3, 4, 5] の手順に基づいて制御プログラムを MCU にビルドした。UWB パケットは 25 ms ごとに合計で 1000 回送信した。UWB パケットの受信には、4 節で実装した受信モジュールを使用した。電波暗室内で送信アンテナおよび受信アンテナが 1 m 離れるように設置して LOS 環境と NLOS 環境の 2 種類で CIR の取得を行った。NLOS 環境の構築にあたっては、送受信アンテナ間に 50 cm 四方の電子基板を設置した。

5.1 CIR 信号の出力結果

提案システムを用いた UWB パケットの受信によって得られる CIR 信号の評価を行った。図 3 (a), (b) に、LOS 環境および NLOS 環境において受信したパケットの CIR 信号を示す。図 3 (a), (b) の横軸は時間 (ns) を、縦軸は受信した CIR 信号の振幅を正規化した値を表している。図 3 (a) では、3 つの受信アンテナを用いて取得した 3 つのピークが独立して現れたことがわかる。加えて、各ピークが約 20 ns ごとに現れていることから、3 つのアンテナで得られた CIR 信号が遅延回路によってそれぞれ遅れたのち各パケットを干渉することなく受信することに成功したとされる。図 3 (b) では、NLOS 環境下で減衰した直接波と反射波が混在した CIR 信号の取得が確認できる。本結果より、今後 NLOS 環境での高精度位置測定に向けた CIR 信号の解析が可能となることを示した。

5.2 TDoA および PDoA の測定結果

提案システムを用いた CIR 信号の解析に関する評価を行った。得られた 1000 個のパケットによる CIR 信号のピークを検出して TDoA および PDoA の算出を行った。比較手法として、文献 [1] の XRLoc を用いた。具体的には、XRLoc では受信アンテナである DW1000 を 20 cm 間隔で直線状に 6 本配置している。6 本のうち隣接する 3 本のアンテナを選択して任意のアンテナ間での TDoA および PDoA を算出した。

表 1 (a), (b) に、比較手法である XRLoc および提案手法を用いて算出した各受信アンテナ間の TDoA および PDoA の標準偏差を示す。なお XRLoc は、チャンネル 1 に対応する中心周波数 3494.4 MHz、周波数帯域幅 499.2 MHz の UWB 信号を使用しているため、提案手法とは使用している周波数が異なる。本来では周波数帯の違いによるノイズを考慮した TDoA および PDoA の計算が必要となるが、表 1 ではノイズを考慮せずに得た標準偏差の値を示す。TDoA の標準偏差については、XRLoc と比較して任意のアンテナ間で誤差の改善がみられる。文献 [1] によれば、1 cm の位置測定精度を達成するために必要な TDoA の標準偏差が 3.5 GHz 帯におけるシミュレーションで 150 ps 以内であることから、TDoA に関しては提案システムが高精度位置測定に寄与すること

	Rx 1 & 2	Rx 1 & 3	Rx 2 & 3
TDoA の標準偏差 [ns]	0.15	0.14	0.11
PDoA の標準偏差 [°]	4.62	4.97	3.23

(a) 比較手法 (XRLoc)

	Rx 1 & 2	Rx 1 & 3	Rx 2 & 3
TDoA の標準偏差 [ns]	0.06	0.09	0.08
PDoA の標準偏差 [°]	1.69	2.80	2.82

(b) 提案手法

表 1: TDoA および PDoA の誤差

が示唆される。PDoA の標準偏差について XRLoc と比較したところ、任意のアンテナ間で誤差の改善がみられた。Rx 1 および Rx 2 間、Rx 1 および Rx 3 間と比べると、Rx 2 および Rx 3 間における誤差は大きく減少しなかった。同様に文献 [1] によれば、1 cm の位置測定精度を達成するために求められる PDoA の標準偏差が 3.5 GHz 帯におけるシミュレーションで 5° 以内であることから、PDoA に関しても TDoA と同様に提案システムが高精度位置測定に寄与することが示唆される。

6 議論

5.2 節において、提案システムを用いた PDoA の計測では標準偏差に改善の余地が見つかった。PDoA に起因する位置測定誤差を小さくするための手法として考えられるのが受信アンテナを増やすことである。受信アンテナを増やすことで、各アンテナ間の PDoA における誤差が平均化されるため位置測定精度の向上に寄与する。

提案手法における受信アンテナの数を増加させたときの UWB パケットの受信可否および CIR 信号の取得についての追加評価を行った。3 節に基づいて 4 節では UWB 受信モジュールのアンテナ数を 3 つとしていた。本実機でアンテナ、増幅器、遅延回路、および電力分配器を新たに連結させることで受信アンテナを 4 つおよび 5 つに拡張した実機を用意した。本実験は 5 節と同様の実験環境で行った。

実験結果として、受信アンテナが 4 つまたは 5 つの場合に CIR 信号を UWB モジュールで取得することはできなかった。考えられる原因として、アンテナ間で 20 ns ごとの遅延時間を設ける場合に 3 つの UWB パケットまでは直接波と反射波における干渉の影響が小さい一方で 4 つ以上の UWB パケットに関しては干渉の影響が大きくなることで CIR 信号の波形が崩れてしまうことがあげられる。解決策として、現在提案している受信モジュールのサイズ要件を満たす範囲内で遅延回路の距離を伸ばして遅延時間を 20 ns より大きくすること、わずかな遅延時間で発生してしまう CIR 信号の干渉を抑制する信号解析手法を提案することがあげられる。

7 おわりに

本稿では、コンシューマデバイス向けの UWB を用いた位置測定手法の精度を向上するための信号解析システムを提案した。本システムを用いた実験評価を通じて、複数の受信アンテナを利用した UWB パケットの受信が可能となること、受信電波に基づく TDoA と PDoA が提案手法によって高精度に測定可能となること、NLOS 環境での高精度位置測定に向けた CIR 信号の解析が可能となることを示した。今後の課題として、さらにアンテナの本数を増やして TDoA および PDoA の正確な測定を可能にすること、Apple の AirTag や Samsung の SmartTag+ といったコンシューマデバイスと本システムの相互接続性を検証すること、NLOS 環境における CIR の解析とその信号処理方法についての検討を通じてコンシューマデバイス向けの UWB 位置測定精度を改善することがあげられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (22KJ2186, 23H00470, 23H01000) および JST さきがけ (課題番号: JPMJPR2032) の支援の下で行った。

参考文献

[1] Aditya Arun, Shunsuke Saruwatari, Sureel Shah, and Dinesh Bharadia, "XRLoc: Accurate UWB Localization for XR Systems," in *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. 1–15, 2023.
 [2] Yifeng Cao, Ashutosh Dhekne, and Mostafa Ammar, "ITrackU: tracking a pen-like instrument via UWB-IMU fusion," in *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, pp. 453–466, 2021.
 [3] "DWM3000EVB を用いた UWB 位置測定① ~セットアップ編~, " <https://qiita.com/tukurida/items/e17481a2f9a9c7532dc1> (2023/12/10 参照).
 [4] "DWM3000EVB を用いた UWB 位置測定② ~PC デモ編~, " <https://qiita.com/tukurida/items/9ebd68ab97daff315d7e> (2023/12/10 参照).
 [5] "DWM3000EVB を用いた CIR の取得," <https://qiita.com/hadamaluku/items/2386edd9861da42f269b> (2024/1/9 参照).