

Ultra Wide Bandを用いた3次元位置測位の高速化に関する基礎検討

作田 岬紀[†] 波田 凌太郎[†] 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

Extended Reality (XR) とは、現実世界と仮想空間を融合することで現実にはない世界を知覚可能にする技術である。XR では現実世界のオブジェクトを仮想空間内にマッピングする必要があるため現実世界にある物体の高精度な位置測位が求められる。本稿では、XR における位置測位の要件を満たすことを目的として Ultra Wide Band (UWB) を用いた 3 次元位置測位システムを提案する。シミュレーション評価を通じて、本手法がナイーブな手法と比較して精度を落とすことなく高速に位置測位を行うことを示した。

2 XR における 3 次元位置測位の要件

XR における 3 次元位置測位に求められる要件として以下の 3 つがあげられる。

1) モジュール設置の容易さ

コンシューマレベルでの使用を想定すると、最小限の労力で簡便にモジュールを設置できる必要がある。具体的には、テレビやサウンドバーといった一般的な電子機器に統合可能なサイズとしてモジュール自体が 1m 四方以内に収まることが求められる。

2) 高精度な位置測位

XR では現実世界のオブジェクトを仮想空間内にマッピングするうえで高精度な位置測位が必要である。とりわけ 1 つの部屋で XR アプリケーションの没入感を損なわないようにするためには cm レベルの位置測位精度を達成することが求められる。

3) 複数物体の低遅延位置測位

没入感を重んじる XR 体験では、人の体感速度と仮想空間における物体の更新速度が一致している必要がある。具体的には、人間の視認速度が約 60~80 Hz であることから提供する XR アプリケーションも同程度の速度で物体の位置情報を更新する必要がある [1]。

表 1 に、XR における 3 次元位置測位を実現しうる関連手法を示す。赤外線センサなどを用いる視覚センシングは、わずかな光や視覚的遮蔽に弱いため空間内の環境によって正確な位置測位を提供することが困難となる。加えてカメラベースのセンシングはユーザのプライバシーを侵害する可能性もある。音波を用いた位置測位システムは、使用可能な音波の周波数帯域が狭いことから複数物体の低遅延測位が難しい [2]。加えて、ユーザによるオーディオ再生を妨げるため XR の目的そのものである没入型体験の品質を損なうという課題もある。レーダを用いた位置測位システムは、測位対象の物体が遮蔽されている場合やレーダ反射断面積が小さい場合に高精度位置測位が困難となる。無線周波数を用いる RFID は、極めて小さい位相誤差によって cm レベルの測位精度を達成している [3]。しかしながら、高精度な位置測位に必要な RFID リーダの大きさは数メートルに及ぶためモジュールの容易な設置が困難となる。WiFi および BLE を用いた位置測位では、コンシューマ向けにモジュールの設置が容易である一方で cm レベルの精度を達成できていない [4]。

UWB を用いた位置測位手法として、2 次元平面上で上記 3 要件を同時に満たす XRLoc が提案されている [5]。XRLoc は、位置測位の対象となるタグと位置測位を行なうためのモジュールによって構成されており、モジュールは 1m 未満である。また、位置測位精度に関しても 3m×3m の空間に対して誤差の中央値で 1.5cm の精度を達成しており、10 個のタグの位置を 100 Hz で更新可能としている。

	視覚	音波	レーダ	RFID	WiFi/BLE	UWB
要件 1	✓	✓	✓	×	✓	✓
要件 2	×	✓	×	✓	✓	×
要件 3	✓	×	✓	✓	×	×

表 1: 3 次元位置測位における XR システムの要件と各手法の関係

しかしながら、XRLoc は 2 次元平面上におけるタグの位置測位のみに対応しており 3 次元空間を対象とした位置測位を考慮していないため、XR における 3 次元位置測位の精度と低遅延の要件を同時に満たさない。

3 提案手法

XR における 3 次元位置測位の 3 要件を同時に満たすことを目的として、本稿では UWB を用いた 3 次元位置測位システムを提案する。提案手法は、UWB 受信モジュール、位置探索アルゴリズムからなる。

3.1 UWB 受信モジュール

図 1 に UWB 受信モジュールの全体像を示す。空間内に配置されたタグから送信される UWB パケットを本モジュールで受信して信号解析を行うことによって高精度位置測位を図る。図 1 に示すとおり、アンテナ 6 本を 25 cm 間隔で同一平面上に L 字に配置する。2 節の要件 1 で述べた UWB モジュールが 1m 四方以内に収まることを考慮して、アンテナは横方向に 4 つと縦方向に 2 つ並べる。本配置によってテレビやサウンドバーなどの一般的な電子機器に容易に組み込むことが可能となる。各受信アンテナは 1 台ずつマイクロコントローラ (MCU) に接続すると同時に、各 MCU を共通のクロックにつなぐことで MCU 間の時刻同期をとりながら受信パケットのデータを高精度に収集する。各アンテナで UWB パケットを受信して MCU を介して受信パケットの Channel Impulse Response (CIR) を PC に取り込むことで信号解析を可能にする。

3.2 位置探索アルゴリズム

取得された CIR から到着位相差 (PD_oA) および到着時間差 (TD_oA) を算出し、空間上の各点の尤度計算を行ったうえで、最尤推定法に基づいたタグ位置推定を行う。6 アンテナのうち任意の 2 アンテナで得られる CIR から PD_oA および TD_oA を算出する。PD_oA および TD_oA は以下の数式に基づいて得られる。

$$PD_{oA} : \hat{\theta}_{ij} = \text{mod} \left(2\pi \left(\frac{|\vec{p} - \vec{x}_i|}{\lambda} - \frac{|\vec{p} - \vec{x}_j|}{\lambda} \right), 2\pi \right) \quad (1)$$

$$TD_{oA} : \hat{t}_{ij} = \frac{|\vec{p} - \vec{x}_i|}{c} - \frac{|\vec{p} - \vec{x}_j|}{c} \quad (2)$$

\vec{p} はタグの位置、 \vec{x}_i はアンテナの位置、 c は光速、 λ は信号の波長を示す。さらに、空間上の任意の点の尤度 L は以下の数式に基づいて得られる。

$$L = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^k |\Sigma|}} \exp \left(-\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mu)^T \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mu) \right) \quad (3)$$

k は誤差ベクトルの次元数、 \mathbf{x} は PD_oA と TD_oA の誤差を結合した誤差ベクトル、 μ は多変量正規分布の平均ベクトル、 Σ は共分散行列を示す。

図 2 (a), (b) に、PD_oA または TD_oA を用いてタグの位置を推定するうえでの尤度分布を例示する。図 2 (a), (b) において、赤いひし形は各受信アンテナを表しており 25 cm 間隔に 5 つ並んでいる。位置測位の

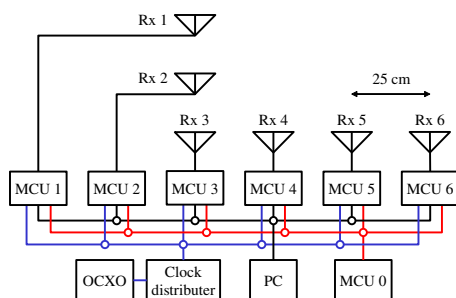


図 1: 受信アンテナのブロック図

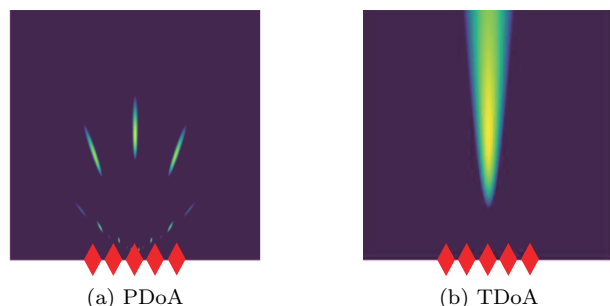


図 2: 各手法による推定位置の尤度

		時間の標準偏差 [ps]				
		50	100	150	200	300
位相の標準偏差 [°]	2	260	260	260	263	263
	3	258	263	271	267	266
	4	258	264	270	270	294
	5	264	266	283	292	289

表 2: 平均実行時間 [s]

		時間の標準偏差 [ps]				
		50	100	150	200	300
位相の標準偏差 [°]	2	1.0	0.7	0.9	0.5	0.9
	3	1.0	0.6	0.8	0.6	0.3
	4	0.9	0.7	0.5	0.2	0.2
	5	0.9	0.6	0.6	0.2	0.3

表 3: 正解点を含む尤度集合の特定率

対象とする平面を 1mm 間隔のグリッドに分割し, PDoA または TDoA に基づいて算出した尤度が高い点の色が明るく表示されている. 図 2 (a) に示すとおり, アンテナペアごとに得られる PDoA に基づく尤度を算出することでタグの位置の候補点が出現する. しかしながら, 算出される尤度分布を PDoA のみで 1 つに限定するためにはアンテナ間隔を信号の半波長以下に狭めるかアンテナ本数を増やす必要が生じる. 本制約下で候補点を絞るために, 図 2 (b) に示す TDoA に基づいた尤度を算出して PDoA に基づく尤度と足し合わせる. TDoA による尤度分布はアンテナ間隔を広げることで狭まるため, この手法によって XR システムの要件を満たしたうえで尤度の分布を限定し高精度位置測位を行うことが可能となる. 本手順を通じてタグの位置を一意に推定し高精度位置測位を図る.

全空間を対象とする最尤推定における効率的な探索方法として, 尤度計算を行う座標を限定する手法をとる. 空間内において探索範囲を絞り込むために空間の中心に位置する xy , yz , zx 平面上で PDoA, TDoA に基づいた尤度計算を行う. 平面上での尤度計算に基づいて空間内での尤度が高い座標を近似的に算出し, 近似点の周辺で妥当となる探索範囲の決定を行う. 本ステップにより, タグが存在しうる空間の候補を計算量の少ない平面での探索から抽出できる. 最終的に, 候補となる空間内に存在する全座標に対して尤度計算を行うことによって, 最も高い尤度が算出された座標をタグの位置として推定する.

4 評価

提案手法を用いた位置測位の遅延および精度に関する性能を, 3次元空間シミュレーションを用いて評価した. 遅延に関する性能についてはシミュレーションの実行時間を, 精度に関する性能についてはシミュレーション上での推定精度を軸として評価した. 信号周波数として, UWB のチャネル 9 に対応する中心周波数 7987.2 MHz, 周波数帯域幅 499.2 MHz を用いた. 位置測位の対象とする空間を $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$ の xyz 空間とし, 正解点の位置を空間の中心である (1500, 1500, 1500) mm とした. 実環境におけるノイズや MCU 間の時刻同期誤差によって生じる位相と時間の誤差を考慮し, 位相と時間の誤差を正規分布に従う乱数で生成してそれぞれ PDoA と TDoA に加えた. 正規分布の平均は位相・時間ともに 0° , 0ps として, 位相の標準偏差を 2, 3, 4, 5° , 時間の標準偏差を 50, 100, 150, 200, 300 ps とした. シミュレーションはいずれのケースも 20 回行った. 受信アンテナについては, 6 つのアンテナを 3次元探索範囲内の (1250, 3000, 1000), (1500, 3000, 1000), (1750, 3000, 1000), (1000, 3000, 1000), (1000, 3000, 1250), (1000, 3000, 1500) mm に配置した.

4.1 実行時間

提案手法を用いた位置測位のシミュレーション実行時間を評価した. 実行時間に対する性能評価について, メモリ容量 128 GB, 10 コアの Intel® Core™ i9-10850K CPU @ 3.60 GHz を用いた. 比較手法として, 空間内すべての点で尤度を計算して位置測位を行うナイーブな手法を採用した.

表 2 に, 位相と時間それぞれの標準偏差における提案手法の平均実行時間を示す. 表 2 より, 平均で 269s, 最短で位相標準偏差 2° , 時間標準偏差 50, 100, 150 ps において 260s, 最大で位相標準偏差 4° , 時間標準偏差 300 ps において 294s であった. 比較手法における実行時間は $9.52 \times 10^5\text{s}$ であったため, 提案手法はナイーブな手法と比べておよそ 10^3 倍高速に実行が可能であることがわかる. 加えて提案手法における実行時間の標準偏差は 12s であったことから, 探索の対象となる空間の数の変動が少なく実行時間が安定していることが示された.

4.2 最尤点の特定精度

提案手法を用いたシミュレーションでの最尤点の特定精度を評価した. 比較手法として, 正解点を中心に $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ を探索範囲とする手法を用いた. 比較手法の探索範囲内に最尤点が存在する場合に, 提案手法による測位結果が最尤点と一致する割合を求めた. シミュレーションを実施したすべての位相・時間の標準偏差において一致した割合は 1.0 であった. 本結果から, 計算量を削減するために平面探索を用いる本提

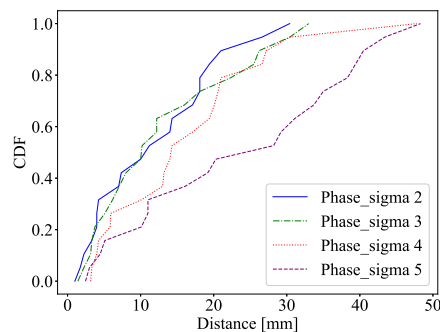


図 3: 位置推定誤差

案手法によって 3次元空間内における最尤点を正しく特定できていることが示された.

4.3 位置測位精度

提案手法を用いたシミュレーションでの位置測位精度を評価した. 評価項目の 1 つ目として, 正解点を含む尤度集合の特定率を評価した. 表 3 に正解点を含む尤度集合の特定率を示す. 時間の標準偏差が 50 ps の場合は, すべての位相の標準偏差に対して 0.9 以上の割合で正解点を含む尤度集合を特定できていることから, 50 ps においては TDoA による尤度の限定が十分に行えていることが分かる. 加えて, 位相・時間ともに標準偏差が増加するほど測位精度が低くなることが確認された. 一般に PDoA のみを用いた場合は位相の標準偏差が大きくなることで尤度の分布幅が多くなり, TDoA のみを用いた際は時間の標準偏差が大きくなることで尤度の分布幅が大きくなる. 本性質に起因し, PDoA, TDoA の両方を用いた本手法においても位相・時間の標準偏差が大きい場合で尤度集合を限定できず正解点からずれた点を推定してしまっていることが分かる.

評価項目の 2 つ目として, 評価項目の 1 つ目で正解点を含む尤度集合を特定した場合において正解点からの推定誤差を位相の標準偏差ごとに評価した. 時間の標準偏差は 50 ps で固定した. 図 3 に位置推定誤差を示す. 図 3 の横軸は推定誤差を, 縦軸は累積分布関数 (CDF) を, 凡例は位相の標準偏差を表す. 図 3 より, 標準偏差が増加するほど推定誤差が増加することが確認された. 誤差の中央値については, 2° , 3° において 10 mm を下回っており, 90 パーセントイルについては, 2° , 3° , 4° において 30 mm を下回っていた.

5 おわりに

本稿では, XR システムの要件を満たす UWB を用いた 3次元位置測位システムを提案した. 高速化手法では空間全探索の手法と比較して, 測位精度を落とさずに高速なシミュレーションの実行が可能であることを示した. 本稿では, 基礎検討として高速化手法を提案したが, 実測位に用いる際は低遅延の位置測位を実現するために, 今後の課題として ms レベルでの位置推定を行う手法を考案することが挙げられる. また, 評価の節では位置と位相の標準偏差にシステムの位置測位精度が依存することが確認されたため, 時間および位相の標準偏差の減少や, L 字型のアンテナ配置の他にも最適な配置の発見に注力し, より測位精度の高いシステム開発に向けて研究を進めていく.

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] Michael Deering, "The limits of human vision," in *International Immersive Projection Technology Workshop*, pp. 1–6, 1998.
- [2] Manni Liu, Linsong Cheng, Kun Qian, Jiliang Wang, Jin Wang, and Yunhao Liu, "Indoor acoustic localization: A survey," *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 10, pp. 1–24, 2020.
- [3] Zhihong Luo, Qiping Zhang, Yunfei Ma, Manish Singh, and Fadel Adib, "3D backscatter localization for fine-grained robotics," in *USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI)*, pp. 765–782, 2019.
- [4] Elahe Soltanaghaei, Avinash Kalyanaraman, and Kamin Whitehouse, "Multipath triangulation: Decimeter-level WiFi localization and orientation with a single unaided receiver," in *ACM International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, pp. 376–388, 2018.
- [5] 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.