

迅速な UWB 測位環境の構築にむけたタグ配置の自動推定と外れ値対策

Automatic Estimation of Tag Placement and Outlier Mitigation for Rapid UWB Positioning Environment Construction

助川 豊樹[†]
Toyoki Sukegawa

小木曾 里樹[‡]
Satoki Ogiso

一刈 良介[‡]
Ryosuke Ichikari

佐藤 章博[‡]
Akihiro Sato

蔵田 武志[‡]
Takeshi Kurata

中平 勝子[†]
Katsuko T. Nakahira

1 はじめに

ナビゲーションシステムやデジタルツインの実装においては、位置情報が不可欠な要素となっている。屋外の測位には Global Navigation Satellite System (GNSS) が広く用いられるが、人工衛星からの電波を利用する性質上、屋内や地下などでは精度が大きく低下する。これに対し、屋内環境でも安定した測位が可能な手法として、Ultra Wide Band (UWB) を用いた測位技術が注目されている。UWB による屋内測位において、固定された UWB タグと測位対象との間で測定した距離から対象の位置を推定するには、設置された UWB タグの正確な座標を把握する必要がある。しかし、タグの設置数が多い場合や、高所などの危険な環境、測位環境が頻繁に変更されるような運用では、その都度これらの座標を手作業で計測・登録することは大きな負担となる。

この問題に対してタグ位置の自動推定を行うため多数の研究が行われている。UWB タグを対象とした研究では、慣性計測装置と UWB 送受信機を搭載した無人航空機を用いて UWB タグの位置を求める方法 [1]、カメラを搭載した専用端末から UWB タグの位置を求める方法 [2] などが提案されているが、いずれも専用設計の機器を用いている。他方、スマートフォンのような Commercial Off-The-Shelf (COTS) デバイスでは、これまで Bluetooth Low Energy (BLE) ピーコンを対象に Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) を行う方法 [3] などが提案されてきた。近年はスマートフォンにも UWB が搭載されはじめており、Visual Inertial Odometry (VIO) などと併せることで、COTS デバイスに搭載のセンサのみでも設置された UWB タグの位置を推定できる可能性がある。しかし、このような COTS デバイスでは、UWB 測距信号の品質の評価に用いられるチャネルインパルス応答などの詳細な情報を取得することが難しい。そのため、測距結果に外れ値が含まれていても、それを検出・除去することが難しい。本稿では UWB 測距結果の外れ値の影響を軽減し UWB タグ位置の推定精度を向上することを目的として、評価関数の最適化過程で外れ値を反復的に除去する手法を提案、実験により精度評価と誤差要因の分析を行う。

2 提案手法

本稿で想定する計測値および位置座標の概要を図 1 に示す。固定された UWB タグ j の座標 \mathbf{x}_j を推定するため、スマートフォンを持ち移動しながら VIO により得た時刻 t_i のスマートフォンの座標 $\mathbf{p}(t_i)$ および UWB による測距結果 $d_j(t_i)$ を用いる。ここで、 j は UWB タグの識別子、 i は時刻インデックスを表す。UWB により得られる測距値 $d_j(t_i)$ は測距誤差 ϵ_i を用いて式 (1) の通り表される。

$$d_j(t_i) = \|\mathbf{x}_j - \mathbf{p}(t_i)\| + \epsilon(t_i). \quad (1)$$

この関係に基づき、式 (2) に示す損失関数 $L_{\text{MAE}}(\mathbf{x}_j)$ を目的関数とし、UWB タグの座標 \mathbf{x}_j を決定変数として最適化する

ことで UWB タグの位置を推定する。

$$L_{\text{MAE}}(\mathbf{x}_j) = \frac{1}{N_t} \sum_{t_i \in T_j} \|\|\mathbf{x}_j - \mathbf{p}(t_i)\| - d_j(t_i)\|. \quad (2)$$

ここで、 T_j は計算対象とする測距データの観測時刻の集合、 N_t は T_j で観測されたデータの数である。また、本手法では、外れ値の影響を抑えるために、ロバスト性の高い損失関数として Mean Absolute Error (MAE) を採用している。

UWB 測距には、マルチパスなどに起因する外れ値が含まれるため、精度よく位置推定するには外れ値の対策が必要である。提案法では、損失関数 $L_{\text{MAE}}(\mathbf{x}_j)$ を最小化することで UWB タグの座標 \mathbf{x}_j を推定するが、外れ値の影響により最適化の精度が低下する可能性がある。このため、外れ値の除去と座標推定の最適化を反復的に行うロバストな推定手法を提案する。提案法は測距結果のうち外れ値がごく一部のみであることを想定し、外れ値を含むデータを用いてタグ位置 \mathbf{x}_j の推定と、これをもとに誤差の推定値を計算してフィッティングした誤差分布に基づく外れ値検出を反復的に繰り返す。手順は以下の通りである。

- 時刻 $t_i \in T_j$ に対して式 (2) を最小化、 \mathbf{x}_j を推定する。
- (a) で推定した値 $\hat{\mathbf{x}}_j$ を用いて、 $t_i \in T_j$ に対し測距誤差の推定値 $\hat{\epsilon}(t_i) = \|\|\hat{\mathbf{x}}_j - \mathbf{p}(t_i)\| - d_j(t_i)\|$ を求める。
- $\hat{\epsilon}(t_i)$, $t_i \in T_j$ の分布に正規分布をフィッティングし、平均 μ_j と標準偏差 σ_j を求める。
- 誤差 $\hat{\epsilon}(t_i)$, $t_i \in T_j$ のうち平均 μ_j から $\alpha\sigma$ 以上離れているデータを外れ値とみなす。外れ値が存在する場合、当該データの時刻を集合 T_j から除去し、(a) へ戻り再度計算を行う。

ここで α は任意の閾値である。

3 実験

本実験では UWB タグ (Type2BP EVK, 村田製作所) を 1 台環境中へ設置したうえで、UWB 計測用スマートフォン (Pixel

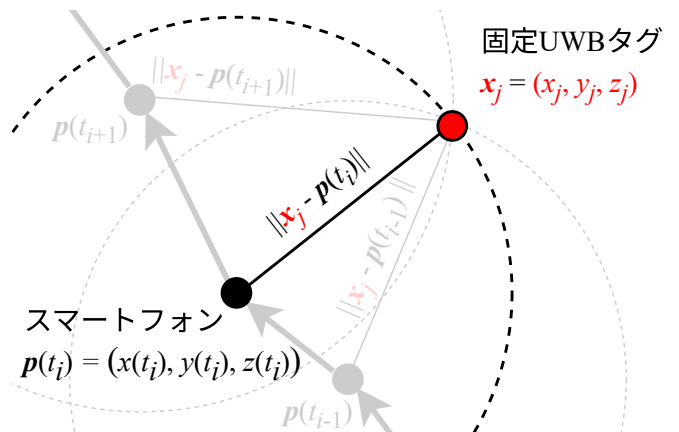
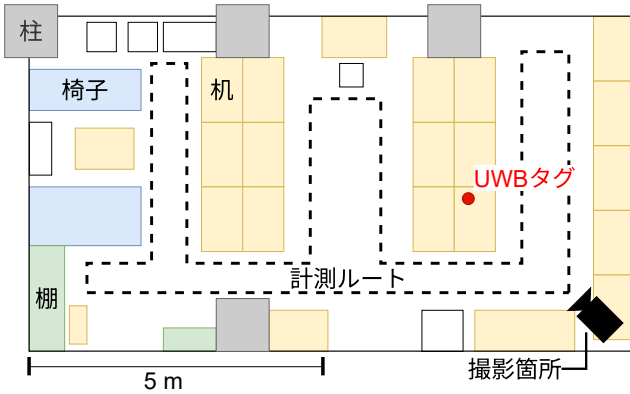


図1 提案法で用いる位置座標と距離の関係

[†] 長岡技術科学大学

[‡] 産業技術総合研究所



(a) 移動経路



(b) 実際の写真

図2 実験環境の概略

8 Pro, Google) 及び位置座標計測用スマートフォン (iPhone 13 Pro) の2台を重ねて固定し、環境中を移動した。UWB タグと UWB 計測用スマートフォンは Two-way ranging により約 5 Hz で測距を行った。各時刻でのスマートフォンの位置座標 $\mathbf{p}(t)$ として、位置座標計測用スマートフォンを用いて ARKit で得た情報を、UWB 計測用スマートフォンのうち UWB アンテナの位置座標に座標変換をして使用した。

実験は図2に示す長岡技術科学大学 総合研究棟6階の一室にて実施した。部屋の大きさは、短辺約6m、長辺約10m、高さ約2.7mである。UWB タグは図(a)のとおり設置した。UWB タグは高さ約70cmの机の上に設置した高さ約8cmの紙製の箱の上に設置した。

計測者は、図2の破線によって示した計測ルートに従って移動し、時計回り・反時計回りの2通りの経路に対して、それぞれ以下の手順で計測を実施した。まず、スマートフォンを保持する高さとして「腰元(高さ約90cm)」、「胸元(高さ約140cm)」、「頭上(高さ約230cm)」の3種類を設定した。これらの高さに対して、「下から順に(腰元→胸元→頭上)」、または「上から順に(頭上→胸元→腰元)」という2通りの計測を行った。各順序において、3つの高さごとに1周ずつ歩行しながら計測を行い、計3周分のデータを取得した。この手順を時計回り・反時計回りの2通りと、高さの保持順2通りの組み合わせ計4条件に対し、各一回ずつ計測を行った。

提案手法の評価のために、損失関数として MAE を用いた場合と、式(3)で表される Mean Squared Error(MSE) を用いた場合を比較対象とする。

$$L_{\text{MSE}}(\mathbf{x}_j) = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} (\|\mathbf{x}_j - \mathbf{p}_i\| - d_i)^2. \quad (3)$$

さらに、MAE, MSE それぞれの損失関数に対して、外れ値除去の有無を変え、合計4通りの条件で比較を行う。なお、MSE を用いる場合においても、前節で述べた外れ値除去手順における最適化処理を式(3)に置き換えることで、同様の処理を適用している。外れ値除去の閾値は $\alpha = 3$ として実施した。

表1 各手法における推定誤差 (単位: m)

	外れ値除去なし					外れ値除去あり				
	RT	RB	LT	LB	平均	RT	RB	LT	LB	平均
MAE	0.058	0.060	0.134	0.192	0.111	0.044	0.065	0.135	0.185	0.107
MSE	0.079	0.087	0.173	0.191	0.133	0.069	0.087	0.113	0.153	0.106

4 結果・考察

計測条件ごとの誤差傾向を示す。4通りの計測データは、「時計回り・上から順(RT)」、「時計回り・下から順(RB)」、「反時計回り・上から順(LT)」、「反時計回り・下から順(LB)」とする。実測した UWB タグの座標を \mathbf{x}_j とし、計測データの各サンプルに対して、 $\|\mathbf{x}_j - \mathbf{p}_i\| - d_i$ の式で測距誤差を算出した。その誤差分布に対し正規分布をフィッティングした結果、平均 μ と標準偏差 σ は、RT で $(\mu, \sigma) = (-0.06 \text{ m}, 0.29 \text{ m})$ 、RB で $(\mu, \sigma) = (-0.07 \text{ m}, 0.27 \text{ m})$ 、LT で $(\mu, \sigma) = (-0.08 \text{ m}, 0.35 \text{ m})$ 、LB で $(\mu, \sigma) = (0.10 \text{ m}, 0.40 \text{ m})$ となった。また、反時計回りの LT と LB には、時計回りの RT と RB にはない 2 m から 3 m 程度の大きい外れ値が含まれていた。

それぞれのデータに対する推定誤差について、MAE および MSE を損失関数とした場合の結果を、外れ値除去の有無ごとに表1に示す。提案手法による外れ値除去の有無で推定誤差の変化を比較すると、MAE においては平均誤差が 0.111 m から 0.107 m とわずかながらも減少し、MSE では 0.133 m から 0.106 m へと比較的大きく減少され、推定精度が向上した。MSE がより精度向上したのは、MSE は大きな誤差に対して敏感な指標であるため、外れ値除去の効果により顕著に表れたものと考えられる。特に LT と LB の条件は大きな外れ値が含まれていたこともあり、それぞれ 0.173 m, 0.191 m と比較的大きい推定誤差が、外れ値除去を適用することで、それぞれ 0.113 m, 0.153 m に縮小した。反対に、RT と RB の条件のような大きな外れ値が含まれない場合や、もともとの性質として外れ値にロバストな MAE に対しては、大きな精度向上や変化は見られなかった。このような計測条件による外れ値のような不正確な測距結果は、主に環境に置かれた障害物、及びその中で移動した計測者自身による遮蔽によるものと考えられる。いずれの計測条件でも、本実験では最も低い位置でスマートフォンを保持した場合、机の上に置かれた障害物により遮蔽されるため、外れ値が生じる場合やそもそも測距できない場合が発生していたと考えられる。また、スマートフォンを体の正面に持ち時計回りに回る場合に比べ、反時計回りに回る場合のほうが体によって UWB タグとスマートフォンの直接波がより多く遮蔽されていたと考えられる。

5 まとめ

本稿では、スマートフォンの座標を既知として計測した測距データから、UWB タグの位置推定と外れ値除去手法の提案および評価を行った。4通りの条件で十数 cm の測距誤差が確認された。外れ値除去は MAE では効果が薄い一方、MSE では外れ値を含むデータで顕著な精度向上が得られた。ただし、本研究は計測条件ごとに1回ずつのデータ取得にとどまり、再現性評価や環境・設置位置の多様性は不足している。また、外れ値除去の閾値は $\alpha = 3$ の一設定に限られ、他手法との比較検討は今後の課題である。

【謝辞】 本研究の一部は科研費 MEXT/JSPS(22K12284, 代表: 岐阜工業高等専門学校・小川信之, 23K11334, 代表: 長岡技術科学大学・中平勝子) 及び内閣府が実施する「研究開発成果の社会実装への橋渡しプログラム (BRIDGE) /AI × ロボット・サービス分野の実践的グローバル研究」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Qin Shi, Sihao Zhao, Xiaowei Cui, Minguan Lu, and Mengdi Jia. Anchor self-localization algorithm based on uwb ranging and inertial measurements. *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 24, pp. 728–737, 2019.
- [2] Bo Gao, Baowang Lian, Dongjia Wang, and Chengkai Tang. Low drift visual inertial odometry with uwb aided for indoor localization. *IET Communications*, Vol. 16, No. 19, pp. 1083–1093, 2022.
- [3] 佐藤章博, 中島円, 神武直彦. スマートフォンを持つ歩行観測者による range-only slam を用いた ble ビーコン位置推定手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 62, No. 1, pp. 275–291, 2021.