

GNSSとUWBによる屋内外測位法の融合による位置検知

中川 豊¹・東野 武史¹

¹奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (〒630-0912 奈良県生駒市高山町8916番地の5)

概要:ヒトやモノの位置を測定するReal Time Location System (RTLS) には, Global Navigation Sattelite System (GNSS)衛星の電波を使用するものと, GNSS衛星の電波が届かない場所で使われるIndoor Positioning System (IPS: 屋内位置測位) などがある. IPSで活用されている通信規格の一つであるUWB (Ultra Wide Band) は, その広い帯域幅と短いパルスにより高い時間分解能をもち, 省電力で屋内環境での精密な測距と測位を可能にした. 本稿ではGNSSとUWBを融合することで屋内の位置をGNSSと互換する座標系に合わせる方法を示す. 提案法により屋内ナビゲーションやスマートビルディング, 救急救命, ユーザ参加型屋内ゲームなど多岐にわたる応用分野において, 新たな体験と可能性を提供することが可能になる.

キーワード RTLS, GNSS, IPS, UWB

1.はじめに

位置情報サービスlocation-based services (LBS)は,主にスマートフォンやタブレットなどの携帯機器に搭載されここ数年で急速に広まっている. UAV とUWBを融合した空中ロボットのローカライゼーションの精度を分析した研究なども見られる¹⁾. 著者らが提案する位置情報のプラットフォームでは,シームレスな測位を実現するために,従来の全地球航法衛星システム (GNSS) に超広帯域 (UWB) 屋内測位システムを追加し,2つの同期データを取得するデータフュージョンにより,ナビゲーションソリューションを継続的に地図上で提供することができる. 本稿では特に, UWB測位システムとその環境に対する挙動に注目する. 取得されたデータとリアルタイムの測位推定を詳細に分析・比較を行う. GNSSとUWBを融合した屋内/屋外歩行者ナビゲーションに関する研究はあるが, ToA (Time of Arrival) 測位を利用している²⁾. 一方著者らの提案する測位アルゴリズムは,到着時間差 (Time Difference of Arrival: TDoA)を算出・統合して高精度位置測位を行う手法で構成される. 実機での評価を通じて, UWB信号に用いたTDoA方式による測位に致命的な劣化を与えることなく実現し,地図アプリケーション上に表示可能であることを示す.

2. 提案手法

(1) GNSS座標系

GNSSの代表的なGPSで採用されている座標系はWGS-84と呼ばれる座標系である. WGS-84系は(X, Y, Z)で表され

る3軸の直交座標系で一般的には地球中心・地球固定 (ECEF: Earth Centered Earth Fixed)座標系に分類される. 主な座標系としてECEF座標と平面直角座標があるが,受信機(ユーザ)の位置を表すような場合は直交座標系よりも測地座標(緯度, 経度, 高度)で表したり,ある地点からの位置ベクトルとして表した方が便利な場合が多い. このため本稿では屋内測位において地図上,つまり測地座標で表現することとする. なお直交座標系と測地座標は相互に変換が可能である³⁾.

(2) 屋内座標と平面直角座標

屋内測位とはGNSSの電波が届かない施設内や地下街などでも現在地の情報を取得できる技術のことをいう. 屋内測位の主な手法にはWi-Fi, ビーコン, RFID, IMES, UWB, 地磁気, 音波, 歩行者自律航法, 可視光などがあり,位置情報の精度向上やスムーズな測位のために複数の手法を組み合わせる場合もある. 一般に屋内測位で得られた座標は任意の原点を基準にした座標であり,GNSS座標系とは互換しない. 一方,平面直角座標系は,日本国内を測量するために策定された系であり,位置・方向・距離を平面上に投影することで測量計算を簡易にする. 全国を19に区分した系をもつ. 屋内測位で得られたローカル座標を平面直角座標系に互換させることで,屋内座標をGNSSを使用するアプリケーションで直接利用可能となる.

(3) UWBを用いた屋内測位

UWBは幅広い周波数帯を利用した無線通信規格である, 3.4~4.8GHzのローバンドから7.25~10.25GHzのハイバンドまでの周波数帯を使用する. UWBは電波の届く時間を

計測するため、設置台数が少なくても高精度な計測が可能である。UWBによる屋内測位の精度はデバイス間の距離をパルス波を用いて数cmから十数cmの精度で測距を行う事ができる^{4,5)}。UWBはナノ秒オーダーのインパルス信号であり、信号伝搬の往復時間から距離を推定する。また他の無線通信との干渉が少なく消費電力も少なくて済む、絶対位置を持つ複数の地上センサと移動端末がUWBで測距を行い、高精度に移動端末の位置を検知する位置検知システムが検討されている⁶⁾。

3. 実験方法

屋内と屋外での位置測位には、異なる技術が必要である。リアルタイム位置測位システム (RTLS) には、GNSS衛星からの電波を使用する屋外位置測位と、その電波が届かない屋内領域で使用される屋内位置測位がある。本稿ではGNSS測位によって得られた受信信号を前提にして、UWBによるTDoA方式を用いた測位について計算機シミュレーションと実測を行った^{7),8),9)}。

(1) 構成

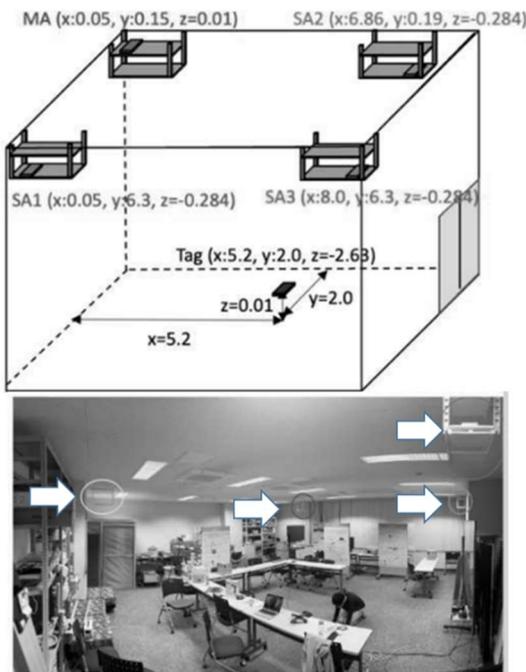


図 1 実験環境の構成

表 1 UWB モジュールの諸元

UWB module	LBUA0VG2BP
Standard, channel	IEEE802.15.4a, ch9
Wired interface	USB-serial
Wired bit rate [Mbps]	3

実験環境の構成を図1に示す。図1の上は所属研究室の天井に設置した4つのAnchorと、床の上10cmに設置したTagの配置状況を示す。各Anchor およびTag に示す数字は座標 (x, y, z ; 単位 m) であり原点を左上の隅とする。図1の下は実験環境の写真であり4つの矢印がAnchorである。実験に使用したUWBモジュールの諸元は表1のとおりである。

(2) UWBによる屋内測位の特徴

UWBはナノ秒オーダーのインパルス信号であり、通信の往復時間から伝搬距離を高精度に推定できる。この特長を活かし、絶対位置を持つ複数の地上センサと移動端末がUWBで測距を行い、高精度に移動端末の位置を検知する位置検知システムが検討されている¹⁰⁾。

(3) UWBを用いた屋内3次元測位

ToA 測位の場合、三次元空間の位置と、送受信機間の時計誤差の4個が未知数となる。このため、最低4個の距離観測値を使用して、重み付き最小自乗法により、これら4個の未知数の値を推定する。

一方、TDoA 測位では、3 個以上の送受信機間の距離差を使用して、三次元の位置を推定する。なお、TDoAでは送受信機間の時計誤差は、距離差算出の過程で相殺されるため、推定する必要がない。すなわち、TDoAでは、三次元空間の位置からなる3 個が未知数となる。また、距離差のみの観測の場合でも、TDoAでは測位可能である⁶⁾。

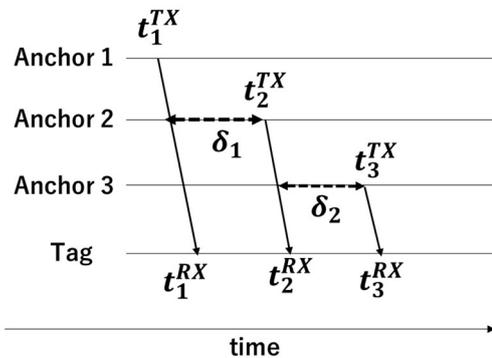


図 2 TDoA 方式におけるAnchorとTag間のメッセージング

図2に複数のAnchorとTag間のメッセージングを示す。Anchor群は、共通の時間軸で動作し、Tagの時間軸とは非同期である。送信時刻 t_1^{TX} を記録したAnchor1のメッセージは、TagとAnchor2で受ける。Anchor2は待機時間 δ_1 の後、送信時刻 t_2^{TX} を記録したメッセージを送信する。以上を繰り返すことで得られた時刻から、Anchor1とTag およびAnchor2とTagの間の伝搬にかかる時間差は、 $t_2^{RX} - t_1^{RX} - (t_2^{TX} - t_1^{TX})$ と表せる。簡単

のためクロック周波数 オフセットを無視した。

Tagで到着時間差を観測した後、ガウス・ニュートン法 (GN) を用いて測位解を算出する。GN法ではアンカーの配置による二乗誤差の勾配の分布形状や雑音を含む観測値を入力とすることで、不確定な跳躍が測位解に発生することが知られる。そこで、反復計算に用いる初期値として直前の測位解を採用することで、応答時間を短縮した。さらに、反復計算中の修正ベクトルの大きさを監視し、跳躍・収束・その他の3つの状態に分ける。跳躍が発生した時に初期座標に変位量を付加して反復計算を再開することでその発生を抑制した。

(3) ローカル座標と平面直角座標の融合

GNSSで得られる座標値は、一般には地球の重心に原点を置いたWGS84座標系が使用されており、地球の重心を原点とする三次元直交座標で表現する。しかし、近似した回転楕円体を採用しなければならないほどの広大な屋内領域を対象にすることはないため、本稿では平面直角座標系を採用する。本稿ではまず、屋内測位の原点となるAnchorのGNSS座標系における座標を定め、平面直交座標に変換する。さらにUWBで求めた屋内測位のローカル座標(x₂, y₂)を平面直角座標に変換したのち地理座標で表現する。

ここで、平面直角座標とローカル座標の軸が一致しない場合は、適当な回転と対称変換を施す必要がある。図1に示す実験環境におけるローカル座標は、真西方向にx軸、真南方向にy軸を設定したため、平面直角座標系（真北方向にx軸、真東方向にy軸）に合わせるには、90度回転の後、x軸のみ対称変換を行うか、y軸のみ対称変換の後、-90度の回転を行うかの二通りの方法がある。後者を数式で表現する。原点の平面直角座標を(x₁, y₁)とし、屋内測位で得られた座標を(x₂, y₂)とすると、変換後の平面直角座標(x₃, y₃)は以下の式で表される。

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$\theta = -\frac{\pi}{2}$ とすると

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} y_2 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

4. 屋内測位結果と地図座標での表現

図3にUWBを用いた屋内測位の測位結果例を示す。細かな偏差はみられるものの、Tagが部屋内を一周する様子がわかる。GN法においては、不確定な跳躍によって得られた測位解を排除している。図4にローカル座標に座標変換を処理を与えて、平面図に表示した。実験室内を1

周し、部屋のドア付近に滞在していることがわかる(破線部分)。 図5に地図表示アプリケーションで表示した例を示す。

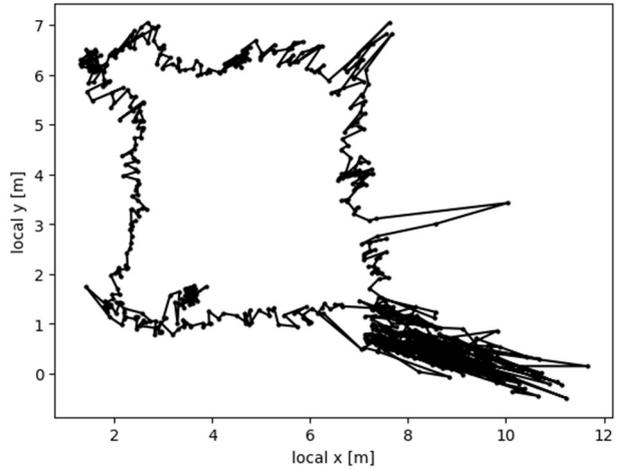


図 3 測位結果例

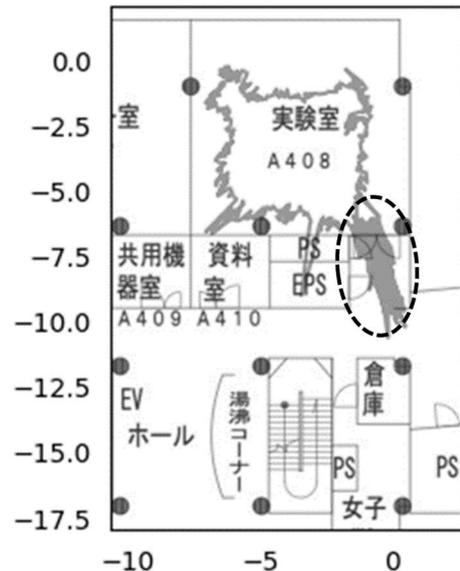


図 4 平面図への表示結果

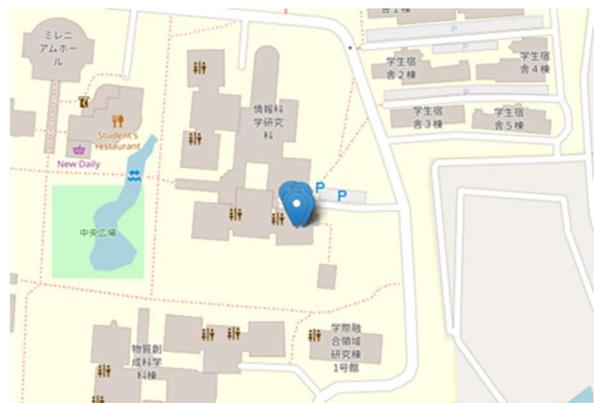


図 4 地図アプリへの表示, Leaflet©OpenStreetMap

5. まとめ

既存の一般的な屋内位置推定手法は、あらかじめ屋内環境のサイトサーベイを行い、その環境の信号強度マップなどを作成しておく必要があるため、その導入コストは非常に大きい。対して本研究では、モバイル端末のGNSS および UWB電波送受信機を用いることで、事前のサイトサーベイの必要がなく、特定の環境に依存しない正確な測位とナビゲーションを実行する手法を提案した。UWB 測位システムは、コストと信号伝送の両方の面で多くの利点があるため例えば、屋内と屋外の両方の限られた環境での視覚障害者向けの歩行者ナビゲーションなどの分野 図 5 地図アプリへの表示 Leaflet©OpenStreetMap

4. 今後の研究課題

本研究では測位解をGN法を用いて推定した。今後さらにカルマンフィルタ(KF)を適用し、精度を評価する予定である。本稿では位置推定の際に高さ方向は考慮しなかった。今後高さ方向を考慮した位置推定を行うことも検討している。またインパルス方式 UWBはIEEEのBAN規格にも採択されており体装着型の心電計や脈拍計など医療分野での生体計測データ収集のための通信インフラとしての期待が大きい。すでにスマートフォンにも搭載されはじめており災害時に対象空間での人体検知などの有効性の検証も検討している。

参考文献

- 1) Queralta, J. P., Almansa, C. M., Schiano, F., Floreano, D., & Westerlund, T. (2020, October). Uwb-based system for uav localization in gnss-denied environments: Characterization and dataset. In 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 4521-4528). IEEE.
- 2) Di Pietra, Vincenzo, Paolo Dabove, and Marco Piras. "Loosely coupled GNSS and UWB with INS integration for indoor/outdoor pedestrian navigation." *Sensors* 20.21 (2020): 6292.
- 3) 杉本, 尾崎[編著], GPSハンドブック, 朝倉書店, 2010
- 4) 立本航平, 北之馬貴正, & 滝沢泰久. (2022). IR-UWB を用いた SmartFinder に関する精度検証と考察. 研究報告マルチメディア通信と分散処理 (DPS), 2022(25), 1-9.
- 5) 森流星, 北之馬貴正, 川田千尋, & 滝沢泰久. (2020). IR-UWB を用いた集約型自己組織化ノード位置推定方式とその実装評価. 情報処理学会論文誌, 61(7), 1238-1248.
- 6) 梅田周作, 平明徳, 栗田明, & 佐野裕康. (2021, August). UWB を活用した位置検知システムの位置検知頻度改善法. In IEICE
- 7) 徳永凜 (奈良先端大) ほか, ガウス・ニュートン法による IR-UWB を用いた動的測位, 電子情報通信学会, 2024 年総合大会
- 8) 依岡寛人 (奈良先端大) ほか, ガウス・ニュートン法による IR-UWB を用いた静的 3 次元測位, 電子情報通信学会, 2024 年総合大会
- 9) 中村康一郎(奈良先端大)ほか, カルマンフィルタによる IR-UWB 高精度測位, 電子情報通信学会 2024 年総合大会
- 10) 小菅義夫, 古賀禎, 宮崎裕己, 秋田学, & 稲葉敬之. (2015). TOA 測位と TDOA 測位の関連. 電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報, 114(397), 79-84.