

WPT-Robotの研究：屋内測位システムの高精度化に向けた有用なアンカーの選択方式の基礎検討

Mitsuhashi, Toshiya / 三橋, 俊哉

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026378>

WPT-Robot の研究：屋内測位システムの高精度化に向けた 有用なアンカーの選択方式の基礎検討

RESEARCH ON WPT-ROBOT: BASIC STUDY OF SELECTION SCHEME OF USEFUL ANCHORS
FOR HIGH ACCURACY INDOOR POSITIONING SYSTEM

三橋俊哉

Toshiya Mitsuhashi

指導教員 中村壮亮准教授

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

Indoor positioning, for which demand has been increasing in recent years, faces challenges for practical application due to many error factors such as multipath and noise. In this paper, we investigate a basic algorithm to select useful anchors and estimate their positions with the aim of improving the accuracy of the indoor positioning system in WPT-Robot. After showing the superiority of the anchor selection method over the all selection method by simulation, we conducted an actual experiment using the proposed method in a simulated office environment. As a result, stable positioning in 3D space was achieved, and the position estimation accuracy was demonstrated to be less than about 0.3 m.

Key Words : indoor positioning, UWB, anchor selection

1. はじめに

近年、倉庫内の物体の位置把握や屋内で活動する自律移動ロボットのナビゲーション用途に加え、ショッピング施設のマーケティングへの活用などと屋内測位の需要は高まっている。将来的には、WPT-Robot(Wireless Power Transfer-Robot) [1]への適応やドローンによる屋内作業の自動化への適応も考えられている。WPT-Robot とは、無線給電機能を搭載した自律移動ロボットを指し、生活空間内に存在する給電対象の電力を管理するロボットである。WPT-Robot は給電対象の電力管理を遂行するため、自律走行しながら給電対象の位置把握が必要となる。また、屋内におけるメンテナンス業務や巡回警備業務にドローンを活用することが期待されている [2]。具体的には、施設内のメンテナンス業務の効率化に始まり、人による高所作業の危険性の回避、巡回警備における人手不足の解消などが期待されている。屋内環境でドローンが自律飛行するには様々な課題があり、例えば飛行誤差が 30cm あるだけで壁や天井などへ衝突する可能性があり [2]、数十 cm の自己位置推定精度が要求される。従って、誤差数十 cm での位置推定を可能とする高精度な屋内測位技術が今後求められてくる。

測位技術として周知されている全地球測位システム (GPS : Global Positioning System) は、人工衛星からの電波を受信することによって位置推定が行われる。しかし、

屋内環境での測位においては、電波が届かないため高精度な位置推定が困難である。GPS が使えない屋内での測位には様々な手法 [3] が存在し、超広帯域無線通信 (UWB : Ultra Wide Band) 、RFID (Radio Frequency Identification) 、Wi-Fi、Bluetooth、カメラなどが挙げられるが、いずれの測位手法も一長一短で GPS のように広く普及するまでには至っていない。これらの中で著者らが注目する手法が、UWB 信号を用いた測位センサである。UWB は、6.5 ~ 10GHz にわたる広範囲な周波数帯域を使用する通信方式で、低消費電力であることやリアルタイムで数十 cm と非常に高い測位精度を誇るため、屋内環境における実用性を考慮したとき有力候補の 1 つである。

著者らが行った UWB 信号を用いた測位モジュールである電波タグの測距性能調査 [4] より、オフィス空間で行った測距実験結果は電波暗室で行った実験結果より約 30cm 長く測距されることが確認された。この結果から金属製の什器による影響によって系統誤差が生じた可能性があるが、再現性が不十分である可能性を考慮し、追加でのデータ取得を行った。その結果、測定場所によっては偶然誤差に加えて家電や什器などが原因と推測される系統誤差が生じることが確認された。

屋内測位に関する研究で、見通し外 (以降、NLOS) の状態にある測位モジュールに対処する研究は数多く存在する。IMU を用いて高精度化を目指す研究 [5] や事前に取

得した大量のデータセットから強化学習を行い、距離誤差を予測し軽減する手法[6]など様々なアプローチがある中で、著者はアンカー選択法に注目している。Albaidhaniらの研究[7],[8]では、異なるアンカーグループで位置推定した結果を平均二乗誤差（MSE）で評価して最良の推定位置を屋内測位の結果として出力する手法を提案した。この手法の、大量のデータセットを使用しない点、システムの導入コストの削減ができる点、位置誤差が約0.25mの高精度な測位が可能なる点に著者は優位性があると考えている。

そこで本論文では、WPT-Robotを用いた自動電力管理システム[9]のための屋内測位機能の高精度化に向け、系統誤差を含まない有用なアンカーを選択し、推定対象の位置を求めるアルゴリズムの基礎検討を行った。シミュレータと実機実験にて屋内環境での測位精度を定量的に評価した。

2. 電波タグ式屋内測位システムとアンカー選択の必要性

(1) 屋内測位システムの概要

WPT-Robotは、屋内環境下で給電対象の位置推定と電池残量を把握することが必要となるため、電波タグを用いた屋内測位システムを開発した[9]。ここで、本研究での電波タグを用いた屋内測位システムの全体構成を図1に示す。本研究での測位環境は、環境側に4個以上のアンカーを配置し、測位対象にタグを取り付けることで構築される。中央管理サーバは通信コマンドをタグへ送信し、タグからUWB信号を用いて各アンカーとタグ間の距離情報（以降、センサ距離）とアンカーIDをZigbee通信で受信する。中央管理サーバは、タグから受信したセンサ距離をもとに測位対象の位置推定を最小二乗法により算出する。

(2) 電波タグの機能と測距原理

電波タグには環境側で測距を行う送信機のアンカーと、測位対象に取り付ける受信機のタグの2種類が存在する。アンカーには、測距を行うためUWB帯を使用した無線信号を発信する無線トランシーバモジュール（Decawave）と、そのUWB信号の制御を行うマイコン（Arduino）を搭載している。アンカーの基板サイズは34mm×34mmである。タグには、アンカーと同一のDecawave、各アンカーのIDに加えアンカーとタグとの間を測距したセンサ距離を得るためのArduino、加えて中央管理サーバの要求に応じてArduinoが取得したセンサ距離を送信するための無線通信モジュール（Xbee）を搭載している。Xbeeは、ZigBee規格に基づいた無線通信機能を有する小型モジュールで、無線LANやBluetoothと比較して消費電力が小さく、長時間の稼働が可能となる。タグの基板サイズは、スマートフォンといったモバイル機器にも搭載可能な大きさ50mm×100mmで作成している。また、これら電波タグへの電力供給はUSBケーブルを介して行う。

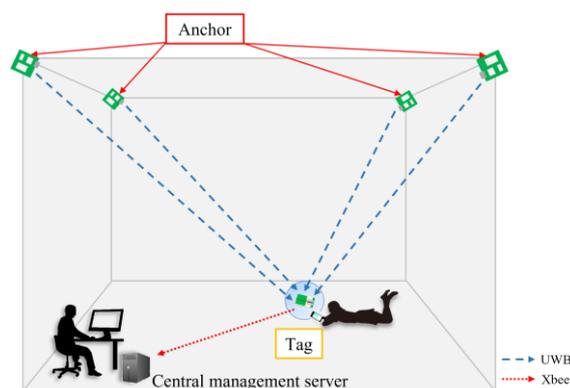


図1 屋内測位システムの概要

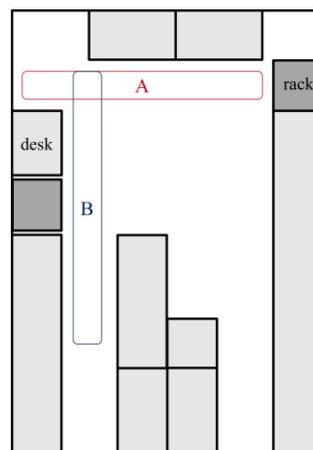


図2 誤差評価実験の環境図

著者はAltDS-TWR（Alternative Double-Sided Two-Way Ranging）方式[10], [11]に基づいた測距方式を導入し、各アンカーとタグ間の測距を行っている。本方式は双方向測距に基づいた測距方法であるため、アンカーとタグの高精度な時刻同期を必要としない。また、アンカーとタグとで1クロックに差異が生じる場合があるが、本手法であればその際の誤差を軽減することができる。電波タグにおけるTWR方式による測距は、測位対象となるタグから信号を送信し、アンカー側で距離を計測するアルゴリズムになっている。

(3) 有用なアンカー選択方式の必要性

本論文では前述した先行研究の追加実験として、研究室N415内の2つの測定場所で伝搬遅延時間の誤差評価を行った。測定場所となる環境図を図2に示す。図2の測定場所A、Bの2か所において、アンカーとタグのアンテナを正対させた状態で0.5m～3.5mまでの距離を0.5m刻みで行い、各地点で100回ずつ測距を行った。この一連の流れを3周して得られたセンサ距離の平均値と標準偏差を用いて誤差評価を行った。測定場所A、B実験結果をそれぞれ図3、4に示す。

図3、4ともに各測距地点における測距距離の平均値をプロットし、設定した真値の傾きを1に合わせる形で線形近似直線を点線で描いている。3.5m地点の測距距離の平均値は測定場所Aが4.443m、測定場所Bが4.918mと

差が 0.475m 生じた。この原因は、測定場所 B の 3.5m 地点の付近に設置されていたモニターや家電製品が影響したことで測定場所 A より 0.475m 大きい系統誤差が生じたと考えられる。

本評価実験の結果より、測定場所によってアンカーとタグとの間の NLOS の状態による系統誤差の乗り方が異なることが明らかになった。そこで、WPT-Robot に導入する屋内測位システムのために、NLOS 状態による影響を受けるアンカーを避けて推定位置を求めるアルゴリズムの基礎検討を行った。

3. 提案手法

(1) アンカー選択法

NLOS 状態による影響を受けるアンカーを避ける方法として、アンカー選択法を提案する。本手法のアルゴリズムを以下に示す。

アンカーを環境内に n 個設置して $nCn \sim nC5$ までの組み合わせで位置推定をしたのち、平均二乗誤差 MSE で評価する。系統誤差を含むアンカー、すなわち位置推定に悪影響を及ぼすアンカーが $n-5$ 個まで対応可能となる手法である。これは位置推定に必要な最小限のアンカー数が 4 個であることに起因しており、 $nC4$ で位置推定を行い MSE により評価した場合、偶然誤差に対する評価にしかかなりえないからである。MSE を電波タグに適応し、センサ距離を d_{Ai} 、アンカーの位置 p_{Ai} 、タグの推定位置 p_{tag} とすると MSE は以下で算出される。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\|p_{Ai} - p_{tag}\| - d_{Ai})^2 \quad (1)$$

(1)式は、最小二乗法により推定されたタグ座標値 p_{tag} から各アンカーの位置 p_{Ai} とのユークリッド距離を予測値とし、アンカーとタグ間の ToF により得られたセンサ距離 d_{Ai} を実際の値としている。MSE 値による評価は最小二乗法によるタグの推定位置の性能が適切か否かを評価することができる。

(2) 提案手法の屋内測位フロー

本論文における屋内測位システムの処理フローを図 5 に示す。中央管理サーバ内の処理プログラムのフローである。著者の先行研究[9]との相違点は、給電ループの開始から終了までのタグの位置推定の過程にある。先行研究[9]では、タグから受信したセンサ距離の最大値と最小値を除いたのち、窓幅が 10 個の移動平均にて求めた距離情報をもとに逐次計算法でタグの位置座標を推定していた。それに対して本論文では、Hampel フィルタによるセンサ距離の外れ値除去と補完を行い、最小二乗法でタグ位置を推定して MSE 値を導出後、最良の推定位置を求める流れとなる。

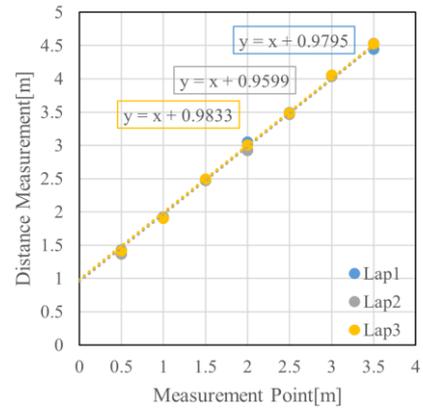


図 3 測定場所 A におけるセンサ距離

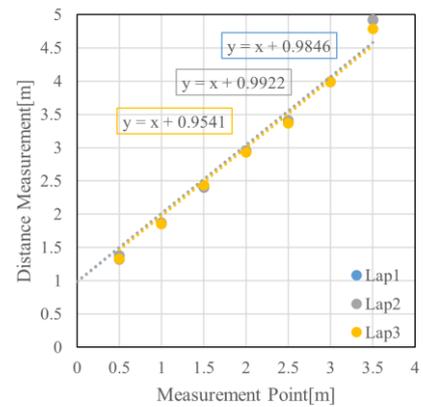


図 4 測定場所 B におけるセンサ距離

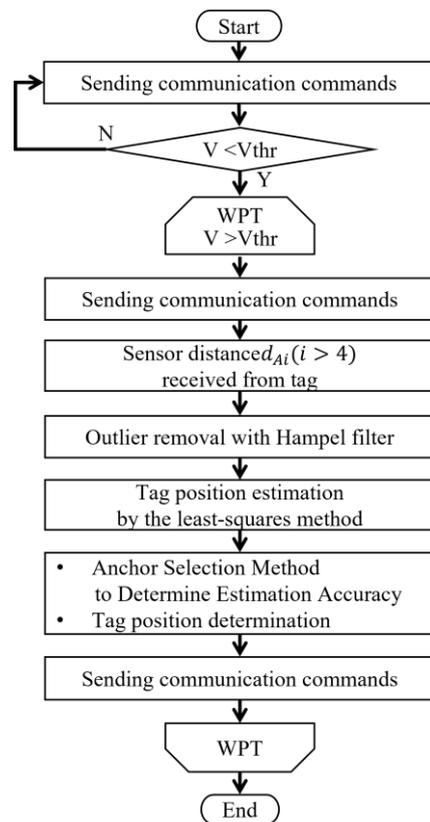


図 5 提案手法の屋内測位フロー

4. 実験

(1) シミュレーション

本シミュレーションは、アンカー総数を増やしすべてのアンカーを選択する全選択法と本論文で提案するアンカー選択法とを定量的に比較検討する。これは、アンカー選択法を導入せずとも環境内のアンカー総数を単に増加させて位置推定を行った方が測位精度の向上を期待できる可能性があるため、それを検証することが目的である。シミュレーション環境を図 6 に示す。シミュレーション動作環境は python3.7 でアンカー $An(n=0\sim 9)$ を計 10 個配置した。各アンカーには偶然誤差として $\sigma = 0.05$ のガウシアンノイズを、A3 には系統誤差 0.9m を乗せた。ここで、偶然誤差における標準偏差 $\sigma=0.05$ は、実際に電波タグの測距統計より求めたものである。全選択法ではすべてのアンカー数 $n=5\sim 10$ において 100 回ずつ、アンカー選択法では nCm ($m=n-1$) で $n=6\sim 10$ において 100 回ずつ位置推定を行った。その位置推定結果から得られる x, y, z 座標と MSE 値で定量的な評価を行った。

全選択法とアンカー選択法のシミュレーション結果を図 7、8 に示す。図 7 より、全選択法においてアンカー数 n が多いほどタグ推定座標 (x, y, z) いずれの位置推定精度も高まるが、 $n=8$ を超えると位置推定精度が漸近してくることが読み取れる。特に、 y, z 座標に焦点を当てると $n=6$ 以上の推定位置の変化量は約 0.1m 以内にとどまっていた。従って、環境内のアンカー数を増やすことによって位置推定精度が必ずしも向上するとは限らず、それに伴う設置コストの上昇も懸念される。以上より、位置推定精度と設置コストの関係から $n=6, 7$ 個程度の設置が妥当だと考えられる。図 8 は、アンカー選択法により系統誤差を含む A3 を除いた推定位置とそれ以外の組み合わせにおける推定位置と MSE 値を比較した結果である。その結果、アンカー総数 $n=6\sim 10$ のすべてにおいて、A3 を除いたアンカーの組み合わせでの位置推定精度が最も高くなり、真値との誤差も 0.01m 以内に収まった。従って、設置コストや測位精度の高さの観点から、単にアンカー総数を増加して測位を行う手法よりもアンカー選択法の方が優位性が示された。ただし、アンカー選択法は位置推定に悪影響を及ぼすアンカーの個数が $n-5$ 個まで対応可能となる。

(2) アンカー選択法の実機実験

本実験では、オフィス空間での運用を想定した環境下でタグの位置推定を行った。実験環境図とアンカー $An(n=5\sim 10)$ とタグ Tag の座標値及びセンサ距離 d の真値をそれぞれ図 9、表 1 に示す。図 9 は、法政大学小金井キャンパス北館 4 階 N415 であり、緑色の点がアンカー、オレンジ色の点が測位対象となるタグの設置位置を表している。N415 は縦×横×高さ=7.00m×4.87m× 2.64m で、金属製の什器と棚が図 9 のように配置され、アンカー A5 と A6 の間には厚さ 0.07m の金属製のパーテーションで遮られていた。表 1 に示す真値は、ボッシュ株式会社のレ

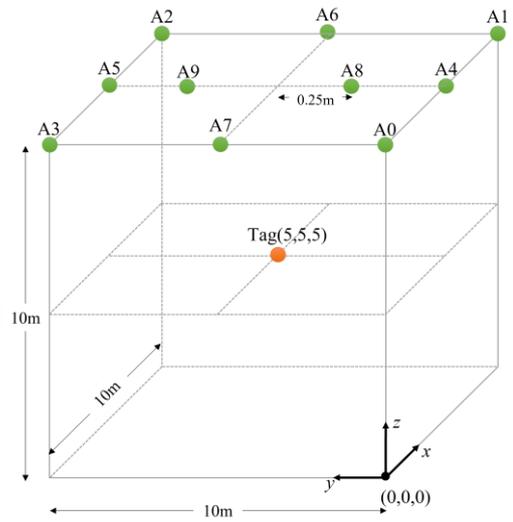


図 6 シミュレーション環境

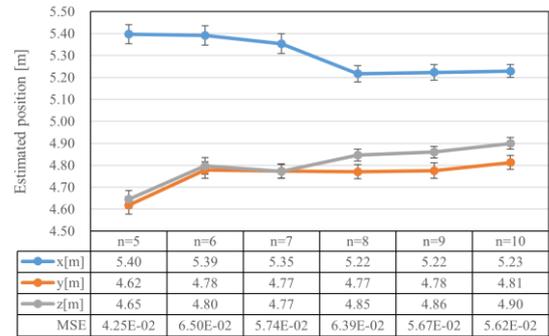


図 7 全選択法でのシミュレーション結果

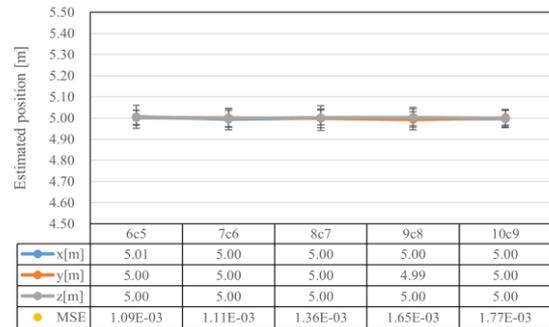


図 8 アンカー選択法でのシミュレーション結果

ーザー距離計 GLM 50-27 CG を三脚に固定して実測した値である。ただし、A6 のセンサ距離については NLOS 状態となる配置によりレーザー距離計を用いることができなかつたため、A6 と Tag の位置から三平方の定理により算出した値を真値とした。実験内容として位置推定回数は 150 回で、アンカー A3 にもみ隙間のあるアルミケースを被せる形で囲いをした。これは、A3 にもみ系統誤差を乗せるためであり、アンカーをアルミケースで囲うことで 0.5m 以上の系統誤差が乗ることは予備実験で検証済みである。実機実験は、実験 A：提案手法導入以前での測位実験、実験 B：アンカー 7 個での提案手法評価実験の 2 種類で行った。

実験 A のアンカー選択法導入前実機実験で使用するアンカーは A0~A3 の計 4 個で、位置推定には逐次計算法を用いた。位置推定に最小二乗法ではなく逐次計算法を用いる理由は、使用しているアンカー数が 4 個の状態では位置推定に必要な未知変数が $(x, y, z, \Delta t)$ の 4 つであるため過剰決定の状態にならないからである。実験は系統誤差を乗せていない場合と A3 にのみ系統誤差を乗せた場合との位置推定結果を比較した。

実験 B のアンカー 7 個でのアンカー選択法の実機実験では、使用するアンカーは A0~A6 であり、位置推定には最小二乗法、Hampel フィルタ、アンカー選択法を用いた。A6 は金属製パーテーションを挟んだ裏側に配置したため NLOS 状態である。実験はアンカー 7 個をすべて用いた全選択法の場合と Hampel フィルタとアンカー選択法を用いた場合、それぞれの位置推定結果を比較した。

実験 A : アンカー選択法導入前実機実験の xy 平面における位置推定結果を図 10 (a)、図 10 (b) に示す。系統誤差なしの場合で、タグ推定位置の平均値が $(2.39, -0.56)$ で真値とは 0.356m の測位誤差が生じていた。一方、A3 に系統誤差を付与した場合での位置推定結果の平均値は $(3.01, -1.08)$ であり、その測位誤差が 0.613m であった。特に y 座標に関しては最大で 0.75m もの推定誤差となる結果が得られた。この結果から、屋内測位システムにおける最小限のアンカー個数である 4 個の場合では、アンカー総数が少ないことやアンカーの冗長自由度がないことが原因で、1 つのアンカーに生じた系統誤差の影響を強く受けてしまう問題があることが示された。

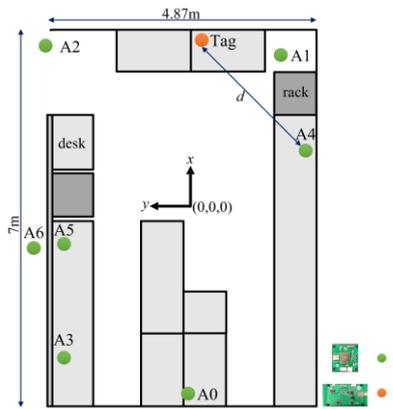


図 9 実機実験の環境

表 1 実機実験における電波タグの座標値の真値

Radio tags	Ground truth [m]			
	x	y	z	d
A0	-3.71	-0.3	2.25	6.53
A1	2.49	-1.64	1.71	1.35
A2	2.42	3.17	2.18	3.88
A3	-3.15	2.51	1.635	6.69
A4	0.655	-2.205	2.05	2.86
A5	-0.96	2.54	1.725	4.88
A6	-1.02	2.697	1.78	5.01
Tag	2.74	-0.53	1.035	

実験 B : アンカー 7 個での全選択法とアンカー選択法のそれぞれの実験結果を図 11、12 に示す。まず、 xy 平面で比較評価を行った。全選択法については図 11(a)より、タグ推定位置の平均値が $(3.02, -0.57)$ で真値との測位誤差が 0.278m と、アンカー選択手法については図 12(a)より、タグ推定位置の平均値が $(2.87, -0.73)$ で真値との測位誤差が 0.237m と求められた。この結果から、 xy 平面においてはアンカー選択手法の方がより真値に 0.041m 近づいていることが分かるが、推定精度の保証についての評価としては効果が絶大とはいえない。次に、 z 軸も含めた 3 次元空間での比較評価を行った。全選択法については図 11(b)より、 z 座標が 1.5m 以下と 2.4m 以上に分かれて位置推定されており、A3 と A6 のセンサ距離の影響を強く受け、位置推定が安定して行われていないことが読み取れる。アンカー選択手法については図 12(b)より、タグ推定位置の平均値が $(2.87, -0.73, 0.84)$ で真値との測位誤差が 0.305m と求められた。これは、アンカー総数 $n=7$ でアンカーの冗長自由度が 2 個となり、NLOS 状態にあるアンカー A3, A6 を除いたアンカーグループにおける位置推定結果が採用されていたため、安定した測位が可能となったからである。特に、 z 座標に注目すると全選択法では $\sigma=0.69$ であったのに対し、アンカー選択法では $\sigma=0.03$ であったことから位置推定を安定して行っていたことを示している。

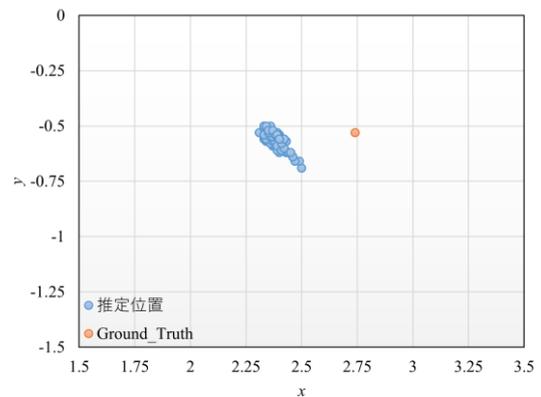


図 10(a) 実験 A : 系統誤差付与なし

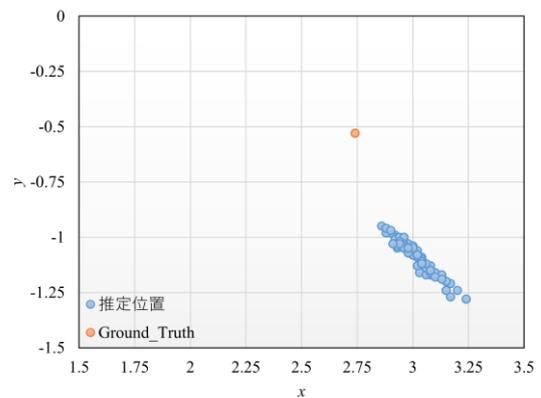


図 10(b) 実験 A : A3 に系統誤差付与

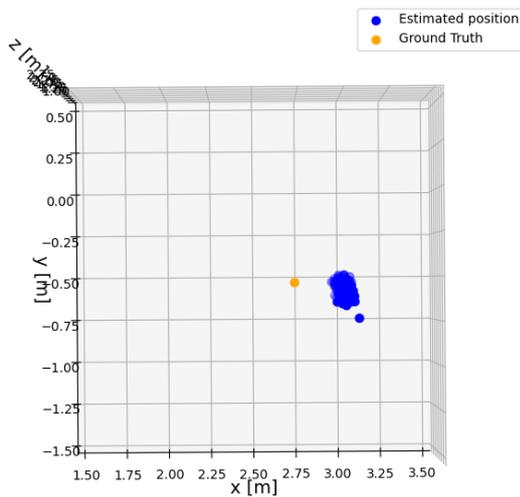


図 11(a) 実験 B の全選択法 : xy 平面

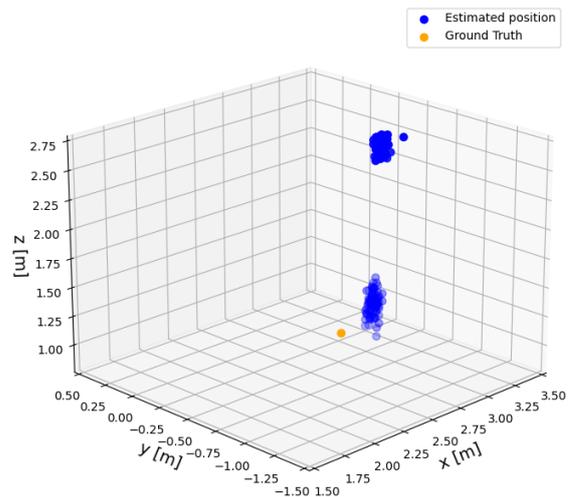


図 11(b) 実験 B の全選択法 : 3 次元

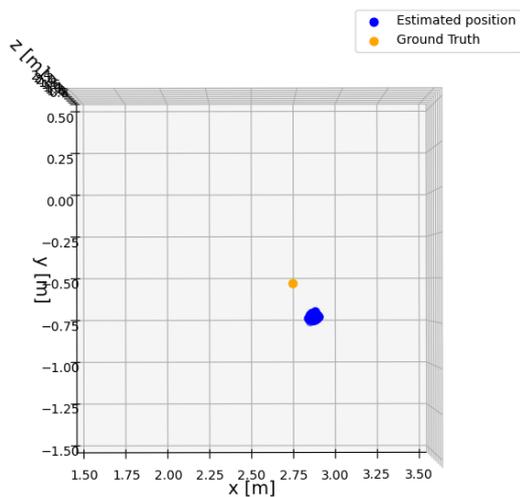


図 12(a) 実験 B のアンカー選択法 : xy 平面

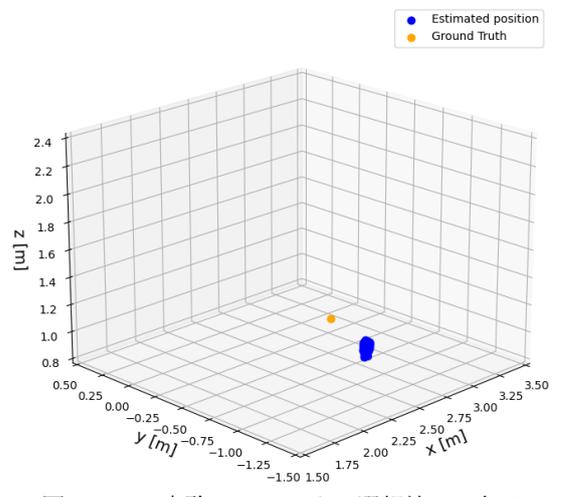


図 12(b) 実験 B のアンカー選択法 : 3 次元

以上の実験結果からアンカー選択法は、 xy 平面はもとより z 軸を含めた 3 次元空間における位置推定の補償に優れており、その推定精度は 3 次元空間において約 0.3m であることが示された。

5. 結論

本論文では WPT-Robot における屋内測位システムの高精度化を目標に、NLOS 状態のアンカー以外を選択して推定位置を得るアルゴリズムの基礎検討を行った。シミュレーションで全選択法に対するアンカー選択法の優位性を示したのち、オフィス環境下を想定した環境で提案手法を取り入れたシステムでの実機実験を行った。その結果、3 次元空間において安定した測位を実現し、その位置推定精度が約 0.3m 以下であることを実証した。

本論文の屋内測位システムが抱える課題として、アンカーの設置コストの高さが挙げられる。第 2 章で述べたように、電波タグを用いた屋内測位システムは環境内にアンカーを設置する必要がある。アンカーを設置する際には NLOS 状態を回避するため、壁や三脚を用いてなるべく高所へ設置している。そして、現行システムでは高

精度な測位のためにレーザー距離計を用いてアンカー座標を正確に測位し、プログラムに組み込む必要がある。このように、初期設定における導入コストが高い現行システムでは、実用化を考慮した時の障壁になりえる。この改善策として、アンカー座標の自動推定機能の導入を検討している。現在使用しているタグには IMU を搭載しており、タグとアンカー間のセンサ距離とタグを搭載した WPT-Robot が移動した際の IMU 測定値によって逐次的にアンカーの位置推定を行うことができる。こうすることで、現行システムでの設置時間のコストを軽減することができると考えている。

謝辞：本研究に取り組むに当たり、お忙しい中、ご指導してくださった法政大学工学部電気電子工学科の指導教員、中村壮亮准教授に感謝申し上げます。研究面以外でも、発表資料のご指摘や助言に始まり、研究室での役割など多くのことをご教授いただきました。重ねて御礼申し上げます。特任研究員の清水拓様と京セラ先進技術研究所の鯉坂志門様には御多忙の中、技術面で大変お世話になりました。清水拓様には、提案手法についての

助言や研究背景の精査など多方面でお世話になりました。鯨坂志門様には、電波タグの無線通信ならびにハードウェア作成についてのご指導をいただきました。ここに、感謝申し上げます。柴山純教授には、電波タグの測距性能評価実験の際に、柴山教授が所有する電波暗室をお借りしました。その結果、電波タグに系統誤差の乗り方が環境依存であることを実証することに役立たせていただきました。また、一社会人としての作法について叱咤激励を賜り、人生の糧になったと感じております。最後に、本論文の実験を行うにあたり、協力してくださった中村壮亮研究室の諸先輩方や同期の学生、後輩の皆さまに感謝の念が堪えません。誠にありがとうございました。

参考文献

- 1) S. Nakamura, T. Suzuki, Y. Kakinuma, S. Saruwatari, K. Yamamoto, K. Arai, K. Akiho, H. Hashimoto, "Prototype System for Energy Management of Mobile Device via Wireless Charging Robot," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2016)*, pp. 727-732, 2016.
- 2) 酒井義史, "屋内自動飛行ドローンの可能性", *電気設備学会誌*, pp.246--248, 2020.
- 3) Brena, Ramon F., et al. "Evolution of indoor positioning technologies: A survey," *Journal of Sensors*, 2017.
- 4) 三橋俊哉, 鯨坂志門, 吉澤美玲, 清水拓, 中村壮亮, "屋内測位システムの高精度化に向けた電波タグ測距性能の評価," 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3E4-07, 2021.
- 5) Yang, Xiaofei, et al. "A novel NLOS error compensation method based IMU for UWB indoor positioning system," *IEEE Sensors Journal*, pp.11203-11212, 2021.
- 6) L. Schmid, D. Salido-Monzú and A. Wieser, "Accuracy Assessment and Learned Error Mitigation of UWB ToF Ranging," *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1-8, 2019.
- 7) Albaidhani, Abbas, Antoni Morell, and Jose Lopez Vicario, "Anchor selection for UWB indoor positioning," *Transactions on emerging telecommunications technologies*, vol.30, issue.6: e3598, 2019.
- 8) Albaidhani, Abbas, and Ahlam Alsudani, "Anchor selection by geometric dilution of precision for an indoor positioning system using ultra - wide band technology," *IET Wireless Sensor Systems*, vol.11, issue1, pp22-31, 2021.
- 9) Toshiya Mitsuhashi, Shimon Ajisaka, Sousuke NAKAMURA, "WPT-Robot: Improving Practicality of An Automatic Power Management System —Downsized Positioning Module and Transmission Coil —," *The 7th International Conference on Advanced Mechatronics, OS-2A*, 2021.
- 10) Lian Sang, Cung, et al. "Numerical and experimental evaluation of error estimation for two-way ranging methods," *Journal of Sensors*, 19.3: 616, 2019.
- 11) Neiryneck, Dries, Eric Luk, and Michael McLaughlin. "An alternative double-sided two-way ranging method," *13th workshop on positioning, navigation and communications (WPNC). IEEE*, pp.1-4, 2016.