



超音波屋内高精度測位技術とその実用化に関する研究

石井, 徹

(Degree)

博士 (科学技術イノベーション)

(Date of Degree)

2022-09-25

(Date of Publication)

2023-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8477号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100477903>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名	石井 徹		
論文 題目	超音波屋内高精度測位技術とその実用化に関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	川口 博
	副 査	教 授	永田 真
	副 査	准教授	和泉 慎太郎
	副 査	教 授	山本 一彦
要 旨			
<p>概要</p> <p>本研究は、屋内測位方式の中では比較的高精度ながら移動体測位が出来ないという、超音波測位の従来課題を克服し、cm 精度の高精度測位を可能とする基盤技術と、本技術の実用化について述べている。本論文は全 6 章で構成される。</p> <p>第 1 章は序論である。本論文の研究背景及び、研究目的について述べられている。研究背景として、屋外測位ではスマートフォンの地図アプリケーションに代表される測位衛星 (GNSS) による測位システムが我々の一般生活に広く普及している一方で、屋内測位では電波、磁気、カメラ画像、音波/超音波、あるいはこれらのうちの複数を組み合わせた様々な方式が実用化されており、屋外測位における GNSS のようなデファクトスタンダードは確立されていないという状況がある。</p> <p>第 2 章では、第 1 章の序論を踏まえ、屋内で移動する人や物に対し、cm 精度の位置検知が可能な屋内測位基盤技術の確立を目指した技術研究テーマを 2 つ提案している。</p> <p>第 3 章では、直接スペクトラム拡散 (DSSS) による高精度超音波測距におけるドップラシフトの補正技術について述べられている。超音波 DSSS 測距におけるドップラシフトによる相関信号波形の劣化は、DSSS 符号の種類よりもむしろコード長に依存し、コードが長いほどドップラシフトの影響が顕著に現れ、相対速度の増加につれ、相関信号波形は急激に悪化する。送信する DSSS 符号全体では相関信号上に明確なピークが得られないが DSSS 符号を複数に分割した各々のサブブロックではピークが得られる条件があり、異なるサブブロックのピーク間隔からドップラ速度を求め、相互相関演算に供する参照信号を伸縮補正する新方式が提案されている。コード長 384 の DSSS 符号を用いて評価を行い、ドップラ補正を行わない従来手法では加速度 2.9m/s^2、速度 1.0m/s で測距不能となるのに対し、本提案に基づいてブロック長 96 の 4 サブブロックに分割してドップラ補正を行い、加速度 9.8m/s^2、速度 2.0m/s にて標準偏差 5mm 未満で測距できることが実機実験で確認されている。さらに本提案方式による動体測定の適応範囲をシミュレーション評価し、前期実験と同じ DSSS 符号にて、加速度 30m/s^2、速度 5.5m/s の移動体まで追従可能であることが確認されている。この研究は、ISHII T., Y. Yoshikawa, S. Izumi, and H. Kawaguchi, "Subcentimeter Precision Ranging System for Moving Targets with a Doppler-Effect-Compensated Ultrasonic Direct Sequence Spread Spectrum," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (TIM), vol. 70, no. 9505008, pp. 1-8, Jan. 2021, DOI: 10.1109/TIM.2020.3047932 として出版された。</p> <p>第 4 章では、1 つの超音波トランスデューサと複数のマイクが空間内に三角形を形成する三角形制約を適用し、離散的な位置に誤観測として現れる「外れ値」を抑制する 3 次元測位精度向上技術が提案されている。DSSS にて符号分割多元接続 (CDMA) を行う 3 次元超音波測位手法による高精度屋内測位システムに適用できる技術として、DSSS の送受信信号の相互相関関数からピーク抽出する際に、1 つの超音波トランスデューサ (送信点) と、超音波波長のオーダーで隣接して配置した 3 マイクのうちの任意の 2 つが空間内に三角形の頂点を構成するという制約条件を考慮したピーク抽出により、偽ピーク判定を行う原理が述べられている。床上 2m 強の 1 辺 1m の正方形の頂点に配置した 4 つの超音波トランスデューサからそれぞれ異なる 256 ビット DSSS 符号を送信し、床面近傍にロボットアームで固定した 7mm の正方間隔で小型 MEMS マイクを実装したマイクアレイ基板で受信する測位実験を実施した。測位結果に外れ値を発生させる要因としては、波長単位での誤差 (λリープ) とマルチパス干渉の 2 つがあるが、従来の改善手法である、4 送信信号中の相互相関ピークが最も低いものを除去して残り 3 つの送信信号を用いる方式 (UDD) では真値から離れた離散的な位置に外れ値が観測される条件にて、今回提案手法 (UDD+Triangle) では、λリープ、マルチパス干渉のいずれに起因する場合でも、外れ値の発生のない、真値近傍に密集した測位結果が得られることが確認されている。また別の実験</p>			

氏名	石井 徹
----	------

としてロボットアームを水平および鉛直方向に 10mm ピッチで移動した空間内の異なる 33 点での測位精度評価を行い、いずれの測定でも外れ値がなく標準偏差 1.21mm 以下で測位結果が得られている。さらにより現実的な厳しい環境を模して3枚のアクリル板で構成したコーナー内部の異なる 18か所にマイクアレイ基板を配置して検知確率評価を行い、測位結果が得られなかった 2 か所を除いた全測定結果に対する累積誤差分布の 90%レベルが誤差 4mm であることが確認されている。この研究は ISHII T, Y. Yasuda, S. Sato, S. Izumi and H. Kawaguchi, "Millimeter-Precision Ultrasonic DSSS Positioning Technique with Geometric Triangle Constraint," IEEE Sensors Journal (JSEN), vol. 22, no. 16, pp. 16202-16211, Aug. 2022, DOI: 10.1109/JSEN.2022.3188007 として出版予定である。

第 5 章では、本研究における測位技術を実用化する上での技術戦略と事業戦略が述べられている。技術戦略では、超音波 DSSS を選択した理由として「超音波」は消費電力面、「DSSS」は測定精度面で原理的に有利であることを示され、実用化の際の差別化要素を意識した開発目標を定められている。また今後から事業開始後にかけてこの先 5 年間の技術ロードマップが示されている。事業戦略では最初に事業コンセプトが述べられた後、提供製品、事業化事例の説明に続き、環境分析として PEST 分析、ファイブフォース分析、バリューチェーン分析、VRIO 分析の結果が示され、実用化検討が加えられている。

第 6 章では、本学位論文の結論について述べられている。

本研究は超音波屋内高精度測位技術について、ドップラシフトにより困難となる移動体検知と、3 次元測位結果における外れ値の、2 つの課題を研究したものであり今後の実用化とイノベーションの創出について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は科学技術イノベーション研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の石井 徹は、博士（科学技術イノベーション）の学位を得る資格があると認める。

(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 石井 徹 _____

専 攻 _____ 先端 IT _____

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

超音波屋内高精度測位技術とその実用化に関する研究

指導教員 _____ 川口 博 教授 _____

本論文は、超音波屋内高精度測位技術の開発と実用化を目指す研究に関するものである。第1章は序論である。2022年現在、測位衛星（GNSS）により屋外測位は我々の一般生活に広く普及している。一方屋内測位においては、屋外測位におけるGNSSのようなデファクトスタンダードは確立されておらず、用途ごとに様々な方式が混在している。本研究は測位精度に優れるものの移動体測位が出来ないという従来の超音波測位の課題に着目し、この課題を克服して移動体に対しても高精度測位を可能とする技術を実用化し、新たなイノベーションの創出を目指したものである。

歴史上、六分儀、クロノメーター、電波航法、GNSS測位と、時代の要請を背景として、デファクトスタンダードが普及してきた屋外測位とは事情が異なり、屋内測位の歴史は浅い。屋内測位の實用研究が始まったのは医療スタッフの所在場所を知らせるシステムであるActive Badgeが1989年に発表されて以降であり、さらに屋内測位技術の実用化が進むのは21世紀になってからである。スペクトラム拡散技術を超音波に応用した高精度測位技術のHazasとWardによる2002年の発表に続き、翌2003年にはUWB電波測位システムを手掛けるUbisense社が創業し、これ以降屋内測位システムは、運輸、自動車、流通等の事業者向けを中心に普及が進んでいるが、現在の屋内測位には様々な方式が混在している。屋内測位技術は、位置算出の「原理」、信号の何を測るのかという「評価特性」、また電波、（超）音波、画像等、何の信号を用いるのかという「使用技術」、の3つの観点から分類できる。これら3要素間の可能な組合せは決まっており、近接検知の原理により電波を用いて信号強度（RSSI）を評価する方式は安価だが精度は低い一方で、多数の点を三角測量の原理により複数のカメラ画像を用いて計測するものは精緻だが高価になる、というように精度とシステムコストの間にはトレードオフが存在している。近年の屋内測位の動向として、UWB電波測位を用いるPozyx社、超音波を用いるMarvelmind Robotics社等、スタートアップ企業による低価格と高精度の両立を謳う屋内測位システムが発売されており、工場や倉庫内でのB2B分野での採用が進んでいるが、人やロボット等の屋内移動体を正確に測位できる技術で、民生市場にまで普及しているものは2022年現在で未だ存在していない。本研究の最終目的は、人などの屋内移動体に対してcm精度位置検知を行う屋内測位基盤技術の確立と、この技術応用によるイノベーションの創出である。

第2章は、本研究の研究テーマ設定についての説明である。通信電波帯と比較して周波数が低いがゆえに低消費電力で高精度測位を行うのに適しているという超音波の選択理由、直接スペクトラム拡散信号が持つ本来の疑似ランダム雑音性により高精度測定の原因について述べた後、研究課題として具体的に取り組んだ、ドップラシフトによる信号劣化、および、3次元測位結果に生じる外れ値、の2つの従来技術課題について説明する。

第 3 章は本論文の 1 つ目の課題であるドップラ補正技術に関する研究報告である。直接スペクトラム拡散(DSSS)を用いた高精度超音波測距に対して適用が可能なドップラ補正技術について述べる。超音波 DSSS 測位では、DSSS 符号の送信信号とこれを受信した受信信号との相互相関関数のピーク位置を測定することにより静止物に対しては高精度な測定ができる一方で、移動体に対しては受信波がドップラ効果の影響で伸縮するために、相互相関関数に静止時には現れる鋭いピークが生じず、移動体に対しては正しい測定が行えないという課題が従来あった。この課題に対して、これまでいくつかの先行研究が報告されているが、観測時間やノイズ耐性上の課題に加え、人が成しうる程度の動きを想定した実験結果を示したものが無い。

この従来課題に対処する新たなドップラシフト補正手法を提案する。超音波 DSSS 測距における相関信号波形は、測定ターゲットの相対速度が増加するにつれ急激に悪化するが、この悪化程度は DSSS 符号の符号長が短いほど影響が軽減される。この特徴を利用して、送信 DSSS 符号を複数のサブブロックに分割し、各々のサブブロック毎の相関関数で得られたピークの間隔からドップラ速度を求め、これに応じて相互相関演算を行う際に信号を伸縮補正するという原理によりドップラシフト補正を行う。

評価として、実機実験とシミュレーションを実施した。実機実験では前後に往復するスライダーの上にマイクを配置し、スライダーの一端に固定した超音波トランスデューサから DSSS 符号を送信しマイクと超音波トランスデューサ間の距離を測定した。測定はスライダーを固定した状態の静止評価と、スライダーを往復運動させた状態での動体評価の 2 条件で行った。静止評価では、127bit 長の M 系列符号にダミービットを付加した 128bit 符号であり 1 符号あたり搬送波 3 波長を割り当てた、信号長 $128 \times 3 = 384$ の送信信号を用いた。静止評価実験では特定の距離で、相関関数の最大ピーク位置が入れ替わるため誤差ばらつきが増大する現象を発見したが、この場合にも包絡線ピークをとることで、誤差ばらつきを本現象が生じない場合と同等の標準偏差 0.5mm 未満に抑えられることを確認した。また動体評価ではさらに 8 波長/符号である信号長 $128 \times 8 = 1024$ の送信信号も条件に加え評価を行った。0.1–1.6m の範囲にて 9.8 m/s² で加速し最大速度 2.0 m/s に達する移動体に対し、信号長 384 の場合には標準偏差 4.5mm、同 1024 の場合には標準偏差 6.4mm での誤差ばらつきの測距結果を得た。またシミュレーションにより、信号長 384 の送信信号を用いて範囲 4–6m にて 30m/s² で加速して最大速度 5.5 m/s に達する移動体に対し、追従検知可能であることを確認した。これらの特性は、ドローン、ペット、屋内スポーツ等、急速に動く移動体に対する将来の屋内測位システムに好適である。

第4章は、本研究の2つ目の課題として取り組んだ、3次元測位で生じる外れ値に対する方策の研究である。高精度屋内測位システムに適用できる技術として、3次元測位における外れ値の検知と補正が可能となる手法について報告する。DSSSは複数の送信信号を同時送信するコード多重分割(CDMA)ができるためシステムの測定レートを高められる利点があるが、この場合に生じる他信号との干渉や、マルチパス反射による干渉により超音波DSSS測位では真値からは離散的な大きな誤差を持つ外れ値が発生するという問題がある。超音波の直接スペクトラム拡散(DSSS)を用いた測位方式に関し、過去20年の間に10以上の研究が報告され、測位精度向上や干渉の影響に対処する手法もいくつか提案されているが、外れ値の問題に関する詳細な評価報告はなされていない。筆者の先行研究(第2章)で発見した1次元測距における送受信信号の相関関数の最大ピーク位置の入れ替わり(λリブ)が発生すると、3次元測位では外れ値となる結果が観測される。この問題に対し、高精度屋内測位システムに適用できる技術として、1つのトランスデューサと2つのマイクが空間内の三角形の頂点を構成するという制約条件(三角形制約)を考慮することにより、3次元測位における外れ値の検知、補正が可能となる手法を考案した。4つのMEMSマイクを1辺7mmの正方形の頂点となる位置に実装した評価基板を用いて、4つの超音波トランスデューサから、それぞれ異なる符号長255、3波数/符号のM系列符号を同時送信して測位実験を行った。実験にて、三角形制約未適用の場合では発生していた外れ値が、三角形制約を適用した場合には発生せず、この際の測位誤差ばらつきが標準偏差1.00mmであったことを確認した。またマルチパス干渉が生じている状況での実験も行い、三角形制約を適用しない場合には平均誤差が820mmと明らかに大きな誤差を生じる状況で、三角形制約を適用すると平均誤差を1.32mmに抑えられることを確認した。またロボットアームで水平かつ鉛直方向に10mmずつ移動した11地点における3マイクの測位実験も行い、いずれのマイクも外れ値がなく真値付近に集中し、標準偏差1.21mm未満である結果を得た。さらに、より厳しい現実的環境として部屋の隅を模した3枚の亚克力板を組み合わせたコーナーの中の異なる18か所に評価基板を配置して各々124回の測定を行い、検知確率を評価した。検知確率は18か所中13か所で100%、残りは高い順に、58.9%、57.3%、7.3%、0%(2か所)という結果であった。標準偏差は、検知確率が0%以外の16か所中13か所では2mm未満であり、残り3か所は、6.53mm、8.59mm、9.40mmであった。本提案手法は、精度、ロバスト性、構成の簡易さの面に優れており、1cm以下の高精度検知が要求される将来の屋内測位システムへの応用に好適である。

(氏名： 石井 徹 NO.4)

第5章では、今後の実用化の際に必要な技術戦略と事業戦略に関する検討結果を記す。技術戦略では、先行研究の課題を踏まえた実用化の際の差別化ポイントになる開発目標を定める。また事業上の概念検証（Proof of Concept、以下 PoC）を行うプロトタイプ開発についても述べ、さらにこの先5年間の技術ロードマップを示す。

事業戦略では最初に、事業コンセプトについて述べ、続いてこれを具現化する提供製品を示す。またターゲット市場例を想定し、ここでのユースケースを考察する。さらに事業戦略の最後に、本事業を取り巻く市場状況に関する、外部環境分析と内部環境分析の結果を記す。

最後に第6章において、本論文の結論について記述する。