

氏名	岩谷 洋和		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲第9409号		
学位授与年月日	令和2年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	トランスポンダ方式を用いる屋内音響測位法に関する研究		
主査	筑波大学	教授	工学博士 水谷 孝一
副査	筑波大学	准教授	博士（工学） 海老原 格
副査	筑波大学	准教授	博士（工学） 若槻 尚斗
副査	筑波大学	助教	博士（工学） 善甫 啓一
副査	筑波大学	助教	博士（工学） 前田 祐佳
副査	筑波大学	准教授	博士（工学） 庄野 和宏
副査	防衛大学校	教授	工学博士 森下 久

論文の要旨

本論文は、可聴音周波数帯の音波とトランスポンダ方式による伝搬時間計測法を用いて空間内の音響信号の伝搬時間等を計測する事によって、比較的 low コストで広範囲を実用的な精度で測位可能な屋内音響測位法が実用的である事を実験により示したものである。

【第1章】では、研究背景について既存技術である電波、音波、可視光、地磁気、加速度等を用いるセンサを利用した屋内測位方法が概説されている。特に、音波を用いる方法では、正確な伝搬時間計測のための時刻同期機構が複雑になるという点や、周波数が数 10 kHz 以上の超音波領域では、空気中での減衰により、体育館クラスの大規模屋内空間の測位において、多数のセンサが必要となる点についての問題点を指摘しており、可聴音を用いる本研究の必要性が示されている。

【第2章】では、トランスポンダ方式の伝搬時間計測を用いる測位方法を設計し、3 m 四方の無響室において、トランスポンダ方式の伝搬時間計測法及び可聴音を用いる測位法の基本的な測位性能について評価している。スピーカとマイクロフォンを用いて、使用する音響デバイスの周波数特性等を考慮に入れたに音響信号の周波数について検討を行っている。実験の結果、1~7 (kHz) 程度の周波数特性が概ね平坦であることから 5 kHz \pm 5 kHz の周波数の利用を決定している。更に、音響信号には、優れた相互相関特性を有する M 系列符号を用いてパルス圧縮を行っており、距離分解能の向上を計っている。干渉のない場合とある場合の測位実験を行い、前者の場合の測位精度は十分であるとしているが、後者の場合においては、十分な測位精度が得られなかったことが示されている。そこで、干渉のある場合においても、トランスポンダ側における信号レベル調整機能について導入し、端末に

において複数の信号の受信レベルを均一にする方法を採用した結果、干渉のある場合においても 0.1 m 程度の精度での測位が可能となった。

【第 3 章】では、反射の影響が存在する実際の屋内環境において提案しているトランスポンダ方式の音響測位法を実験により性能評価を行っている。これにより例えば壁面からの反射が存在する環境において提案方法による測位精度と測位範囲の確認を行っている。従来法をそのまま適用した測距実験と測位実験を 25 m×15 m の大きな部屋において実験を行った結果、端末の位置によっては測位精度は不十分であったため、無響室と部屋における受信信号について解析している。その結果、床面反射の影響により複数のピークが生じることで、正しいピークを検出できないことが誤差の原因であることを確認して音響信号の直達波は、通常は反射波よりも先に端末に到達する事を利用して信号を分離した結果、20 m 程度の範囲まで 10 mm 程度の高精度で測距できることを確認している。更に、測位実験の結果、3 個のトランスポンダを 7 m 四方の空間に展開することで、0.10 m 程度の精度で測位できることを明らかにしている。

【第 4 章】では、端末が移動する場合の測位に関する検討を行っている。移動体測位におけるドップラシフトの影響を調べるため、ピーク対雑音比(PAPR)を指標（この値は高いほど良い）とし、端末の移動速度に応じた PAPR の関係をシミュレーションにより評価した。シミュレーションの結果、移動速度の増加とともに、PAPR が低下することを確認している。PAPR の低下は、伝搬時間計測における誤差に影響があると結論付けている。次に、1 次元の移動体測位の実験系を無響室に構築し、端末がトランスポンダに接近する場面を想定して測距実験を行っている。測距実験の結果、シミュレーションと同様に、端末の移動速度の増加とともに、PAPR の低下を確認している。また、測距結果において、移動速度の増大に伴い、ランダムな測距誤差とオフセットが生じることも明らかにしている。更に、移動体測位におけるドップラシフトを低減し、精度よく測位するための対策として、端末の移動速度に応じたドップラシフトした参照信号を事前に作成し、相互相関関数の計算の際に取り入れる処理する方法を考案し、同じ条件のもと測距実験を行った結果、改良した方式は、従来方式と比較して、端末の移動速度が 1.20 m/s 程度の場合は、PAPR と測距精度の低減が改善できている。測距精度は、0.12 ~1.20 (m/s)の端末の移動速度に対して、平均誤差が 0.05~0.20 (m) 程度であるとしている。

以上の結果より、トランスポンダ方式による可聴音を用いる屋内音響測位法の提案により、3 個のトランスポンダを屋内の天井等に展開することで、7 m 四方の空間を測位でき、1.20 m/s 程度の移動速度であれば、0.2 m 程度の誤差で測距できるような測位法が実現された。本研究成果は、屋内における人のナビゲーションや作業ロボットの測位への応用が期待できると考えられる。

【第 5 章】では、本研究の総括がなされている。

審査の要旨

【批評】

本論文は、可聴音周波数帯の音波とトランスポンダ方式による伝搬時間計測法を用いて、音波伝搬時間を計測する事によって、比較的 low コストで、数 10 m 程度の範囲を実用的な精度で測位可能な屋内音響測位法を実験により実現したものである。システムの構成が簡単であり、簡便な装置で実現できたのは、時刻同期不要なトランスポンダ方式を採用したからであり、大規模ではないシステムには実用的なシステム構成となっている。また、トランスポンダにおける信号レベル調整においては、複数の信号が端末において干渉する場合においても有効に機能しており、0.1 m 程度の十分な精度で屋内測位を実現している。加えて、反射の影響が避けられない実際の屋内環境における測位においても、適切な対策が講じられており、無響室内で行った実験結果と同等の測位精度が得られている。更に、端末が移動する際に生じるドプラ効果により、測位精度の劣化の原因を理論と共に実験でも確認している。その対策として、ドップラシフトした参照信号を用いることを提案し、移動体の速度が増大する場合でも、測距精度を改善していることは、評価できる。

本論文は、時刻同期を不要とするトランスポンダ方式の伝搬時間計測をコア技術として、音波のみを用いて 0.1 m 程度の十分な精度で測位が可能であることを示しており、屋内における既存の放送設備や人々のスマートフォン等の機器を利用することができれば、低コストかつ十分な精度で測位を実現する有用な手法である。また、屋内環境において避けることのできない反射の影響についても対策を行い、かつ、人が歩行して移動する程度の速度においても利用が可能であることが示されている。本研究の成果及び音波以外の屋内測位手法を複合的に併用することにより、商業施設や地下鉄構内等の大規模屋内空間における人や物体の詳細なナビゲーションや、工場や施設等における移動する作業ロボットの測位、インフラ点検用ロボットの測位等、多様な場面における応用が期待でき、評価できる研究である。

【最終試験の結果】

令和 2 年 1 月 27 日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。