HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	音響を用いた屋内測位およびエコー埋め込みに関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	須崎, 太久弥
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第16500号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94917
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Takumi_Suzaki_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (情報科学)　氏名　須崎　太久弥

審査担当者　主　査　教　授　杉本 雅則
副　査　教　授　田中 章
副　査　教　授　松原 崇
副　査　教　授　今井 英幸
副　査　准教授　中村 将成

学位論文題名

音響を用いた屋内測位およびエコー埋め込みに関する研究
（Research on Acousitc Indoor Positioning and Echo Embedding）

われわれの日常生活の様々な場面において, 屋内測位技術へのニーズが高まっている. 具体的には,(1) 大型商業施設, 駅構内, 空港, 博物館などでのナビゲーション,(2) 災害時の避難誘導システム,(3) 人流の把握および行動分析,(4) 自律ドローンやロボットの自己位置推定,(5) 医療施設での位置把握など, その応用例も多様である. このように, 産業, 防災, 医療, エンターテイメントなど, 広範な分野で屋内測位技術の利用が想定されており, その経済効果は 2030 年までに世界で 1,325 億米ドルに達するという予測もある. 世界標準の測位システムとして Global Navigation Satellite System (GNSS) が挙げられるが, 屋内では GNSS 信号が遮蔽されるため常時利用は困難である. われわれは 1 日の 88.9 パーセントを屋内で過ごすという調査報告もあり, 屋内測位における標準技術の開発は非常に重要な課題である.

現在までに,Wi-Fi や BLE を活用した電波強度による屋内測位システム等が実用化されている. しかしながらこれらの測位システムでは, 数 m の誤差が発生する場合があり, 屋内ナビゲーション等への応用に十分な性能とは言えない. そこで, 本論文では屋内のインフラストラクチャとして普及しているスピーカを活用した音響測位に着目する. 音響信号は電波と比較し伝搬速度が遅いため, 信号伝搬時間計測により得られる測距性能が高く, よって高精度な測位を実現できる. しかしながら, さらなる測位性能向上のために解決されるべき課題が残されている. そこで本論文では, 以下の 3 つの課題に対し, 新しい技術の提案, 構築, 評価を行った.

1 つ目の課題として, 送受信機間の時刻同期が困難であることが挙げられる. 音響測位は, 信号が空気中を伝搬する時間を基に位置を推定するため, 送信機 (スピーカ) と受信機 (マイクロフォン) のマイクロ秒単位の精密な時刻同期が求められる. 本論文では, 床からの反射波に着目し, 送受信機間の擬似的な時刻同期を可能にする手法を提案する. この手法では, 鏡像法によって床からの反射波を仮想スピーカからの直接波と捉える. これにより, 擬似的にスピーカ数を増加させ, 受信側で幾何学的に送信時刻を推定することが可能となる. 複数スピーカからの音響信号の同時捕捉が難しい環境において, 提案手法は高精度測位実現のための実装可能な手法となる.

2 つ目の課題として, 高精度測位が可能な範囲が限定的であることが挙げられる. スマートフォン等のモバイルデバイスに搭載されているマイクロフォンは指向性を持つため, その周波数特性によって測位精度が変化する. このため, スピーカとモバイルデバイスの配置関係や環境の影響により,

測位精度が低下する場合がある. 本論文では, 多重化方式である TDM (Time Division Multiplexing; 時間分割多重) と FDM (Frequency Division Multiplexing, 周波数分割多重) を組み合わせた方式を提案し, 測位領域の拡張を試みる. この手法では, 各タイムスロットで周波数が異なる信号を送信することで, 周波数特性による測位精度への影響を抑制する. 複数のタイムスロットを用いて送信信号帯域を拡張することで, 測位精度の向上を実現する.

3 つ目の課題として, 送信信号の帯域が可聴域と干渉する点が挙げられる. 多くのモバイルデバイスでサポートされているサンプリング周波数は最大 48 kHz であり, 受信可能な周波数は 24 kHz 以下に限定される. 一方で, 人の可聴域は 18 kHz 程度であるため, 送信信号として利用可能な帯域は 18 kHz から 24 kHz に限られる. 高精度測位実現のためには, より広い帯域利用が可能となることが望ましい. 本論文では, 音響電子透かしの分野に着目し, エコーを測位用信号として BGM に埋め込む手法を提案する. この手法では, 人の知覚が反響音に対して低感度であることを利用して, 広帯域の信号を BGM に埋め込む. 帯域と時間分解能にはトレードオフの関係があり, 広帯域であるほど時間分解能が向上するため, 高精度な測位が期待できる.

本論文は全 6 章で構成され, 各章の概要は以下の通りである.

第 1 章では, 本論文の背景, 提案手法の概要およびその学術的な貢献について述べられている.

第 2 章では, 提案手法に関連の深い既存研究について言及し, 提案手法との相違点および位置付けが明らかにされている.

第 3 章では, 床からの反射波に着目した疑似的な時刻同期手法を提案し, 実験による時刻同期の誤差および測位精度の評価を通して提案手法の有効性を示している.

第 4 章では, 送信方式の工夫による測位領域の拡張手法を提案し, 実験による従来の送信方式との比較を通して提案手法の有効性を示している.

第 5 章では, エコーを BGM に埋め込むことによる測位手法を提案し, 音源のジャンルや埋め込みパラメータによる測位精度の比較実験を通して提案手法の有効性を示している.

第 6 章では, 前章までの議論を踏まえて本論文の結論, 今後の課題および展望について述べられている.

これを要するに著者は, 実世界で展開可能な高精度屋内音響測位技術を実現するため, 反射波を用いた時刻同期手法, 測位領域拡張のための信号送信方式, およびエコー埋め込みによる送信信号帯域拡張手法を提案し, 実装および評価実験を通してその有用性を明らかにした. 本論文により得られた成果は, 屋内測位研究, 特に音響測位研究の分野に貢献するところ大なるものがある. よって著者は, 北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める.