

[研究助成 (C)]

ポストコロナ時代における商業・公共施設のための
空間管理システムの基盤構築

2227006



研究代表者 北海道大学 大学院情報科学院 博士後期課程 須崎 太久弥

[研究の目的]

本研究の目的は、ポストコロナ時代において施設内の安全を確保しつつ、日常生活や経済活動を円滑に維持・促進するための位置情報を取得する基盤技術を確立することである。新型コロナウイルスの感染拡大は、ショッピングモールなどの人が密集する施設に対し入場制限などの措置を強いることとなり、施設のサービスモデルは大きな転換を迫られた。

感染リスク軽減のため、政府や企業が推進するデジタルトランスフォーメーション(DX)の取り組みにより、施設内サービスの高速化・効率化を目的としてデジタル技術の積極的な活用が求められている。中でも施設内における人の位置情報は、混雑状況の把握、人流解析、購買行動促進などの行動分析に不可欠なデータであり、感染リスクを考慮した空間利用の最適化を図る上でも重要である。

このような位置情報に基づく管理システムを実現するためには、誤差10 cm以下の精度でありながら、低コストかつ簡便に運用可能な測位技術が必要となる。そこで本研究では、高精度が期待できる音響を利用した測位技術の開発に取り組む。音響測位は、Wi-FiやBluetoothなどの電波による方法と比較して高精度な測位が期待できることで知られている。また、施設に既存のスピーカを送信機として活用し、利用者が所有するモバイル端末を受信機として活用することで、追加設備費用が抑えられる点でも

優れている。

一方で、音響測位にはいくつかの技術的課題がある。本研究では特に重要とされる3つの課題に着目し、それぞれの解決手法を提案することで、より頑健な音響測位システムの実現を目指す。

[研究の内容、成果]

研究1：設置スピーカ数の削減

■背景

本研究では、測位に必要なスピーカの数削減する手法の開発を目的とした。通常、2次元測位には最低3台以上のスピーカからの信号を受信する必要がある。これはスピーカとモバイル端末間で高精度な時刻同期が困難であることに起因するため、時刻同期が不要な到来時刻差(TDoA: Time Difference of Arrival)を利用した測位アルゴリズムが一般的に用いられる。しかし実環境では、障害物などにより常に3台以上のスピーカからの信号を安定して受信できるとは限らないため、より少ないスピーカでの測位が求められている。

■手法

提案手法では、床面からの反射波に着目し、高精度な時刻同期を実現する方法を提案した。床からの反射波を鏡像法により仮想スピーカからの直接波としてモデル化することで、幾何学的に送信時刻を推定することが基本概念となる(図1)。受信機側では、推定された送信時刻が

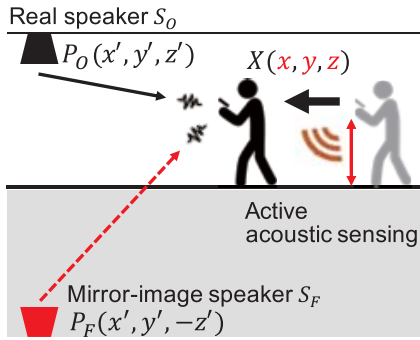


図1 時刻同期手法の概要

ら伝搬時間を求め、音速を乗じることでスピーカまでの距離を推定する。

受信信号はパルス圧縮技術を用いて受信時刻を検出しやすい波形に変換する。この際、床面以外の反射波も含まれるが、階層クラスタリングを用いて分類が可能であることを確認した。また、本手法に必要な床からの高さ情報についても、モバイル端末に搭載されたスピーカとマイクロフォンを利用したアクティブ音響センシングにより、高精度で測距可能であることを示した。

■成果

評価実験の結果、提案手法による時刻同期誤差は平均 0.1072 ms となった。この同期誤差を音速に換算すると距離誤差は約 3.690 cm であり、目標精度の 10 cm 以内を達成できることを確認した。

さらに、本手法をロボットのトラッキング実験に適用した結果（図2）、測位誤差の90パーセンタイル値は 28.8 cm となった。この誤差は系統的な要因による影響が大きく、キャリブレーションなどの最適化により大幅な精度向上が可能であると考ええる。

研究2：測位領域の拡張

■背景

本研究では、モバイル端末の測位可能領域を拡張するための研究を行った。施設内でのスピーカとモバイル端末は必ずしも正対しているとは限らず、相対的な角度やスピーカおよび受

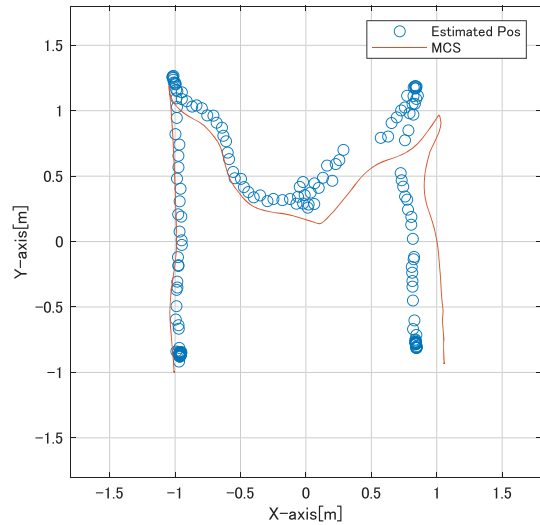


図2 ロボット移動時の軌跡

信機の指向性により受信信号が劣化し、測位精度が著しく低下することがある。そのため、実環境での運用を考慮し、指向性による影響を軽減して、安定して高精度測位が可能な領域を広げる必要がある。

■手法

提案手法では送信方式に工夫を施し、図3に示すように各スピーカの送信帯域を動的に割り当てることで測位範囲を拡張した。本方式は、周波数分割多重（FDM：Frequency Division Multiplexing）と時間分割多重（TDM：Time Division Multiplexing）を組み合わせしており、一巡するまでの送信時間をフレームとし、そのフレーム内の各送信タイミングをタイムスロットとしている。各タイムスロットでは帯域干渉

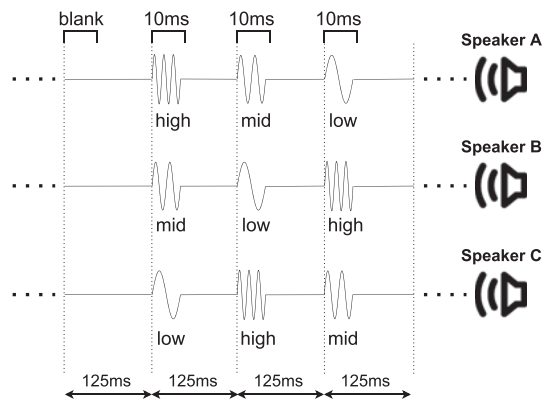


図3 提案する送信方式

を避けるよう設計されているため、効率的な信号伝送が可能である。

この送信方式の利点として、複数のタイムスロットを使用することで実質的な帯域が広がり、指向性に起因する信号の劣化を抑制できることが挙げられる。また、もともと十分な測位精度が確保されている領域では、単一のタイムスロットのみを使用することも可能であり、運用の柔軟性も高い。

■成果

提案手法の評価実験を行った結果、誤差 1.0 m 以下の測位が実現する割合は従来手法の 78.77% から 100% へと大幅に改善されることを確認した。この結果により、本手法は音響測位システムの実環境への展開を促進する重要な基盤技術となることが期待される。

研究 3：BGM を用いた測位

■背景

本研究では、ショッピングモールなど公共施設の BGM を用いた測位手法の開発を目的とした。一般的に広帯域信号を利用することで高精度な測位が可能となるが、モバイル端末のサンプリング周波数制限により非可聴帯域のみの使用は困難である。可聴域を用いる際には、利用者の不快感を抑える必要があり、BGM のような自然な音楽に信号を埋め込む手法が望まれている。

■手法

提案手法では、人間が知覚しにくい微弱なエコーを BGM に埋め込む音響情報ハイディング技術を採用した (図 4)。具体的には、PN (擬似乱数) 系列をエコー拡散法で埋め込み、スピーカの ID 識別に用いる。また、ケプストラム解析を用いて埋め込まれた信号を分離し、これにより複数スピーカの到来時刻差を検出し、TDoA アルゴリズムにより位置推定を行う。

埋め込み信号のカーネル k を以下の式で表す。

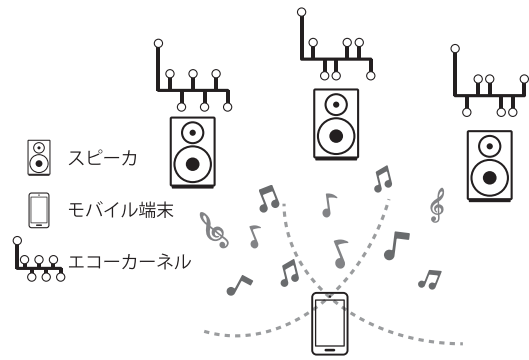


図 4 BGM を用いた測位手法の概要

$$k(t) = \delta(t) + \alpha p(t)$$

ここで δ はディラックのデルタ、 α は PN の振幅、 p は PN 系列である。音質と測位精度はトレードオフ関係にあり、PN 系列が長いほどエコー持続時間が延び、振幅が大きいほどエコーが顕著になる。一方で到来時刻差の検出には PN 系列の検出性能が高いことが重要であり、そのため系列が長く、かつ振幅が大きいほど有利になる。しかし、音質劣化を防ぐためには、適切なバランスでパラメータを調整することが必要である。

■成果

客観的音質評価指標 ViSQOL を用いた評価では、系列長と振幅の調整により音質が許容範囲内であることを確認した (図 5)。

測位実験の結果、エコー拡散法を適用した BGM による高精度な測位が可能であることを示し、本手法が音響測位技術の新たな可能性を拓くものであることを確認した (図 6)。

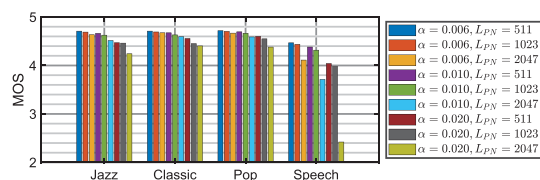


図 5 音質の評価実験

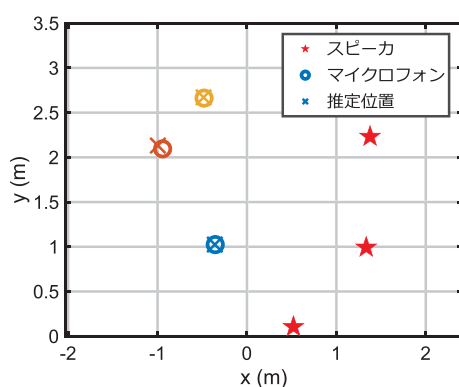


図6 測位実験の結果

[まとめ、今後の展望]

研究1では、床面の反射波を利用した高精度な時刻同期手法を開発し、必要なスピーカ数の削減を実現した。研究2では、送信帯域の動的割り当てを通じて測位領域を拡張し、指向性による精度低下を克服した。研究3では、人間が知覚しにくいエコーをBGMに埋め込むことで、可聴帯域を利用した測位手法を提案し、高精度化を達成した。

これらの研究成果は、実際の施設運営において重要な基盤技術になることが期待される。今後の展望としては、提案した音響測位手法をWi-Fi, Bluetooth, UWBなど他の測位技術と統合したハイブリッド測位システムを構築し、各技術の長所を相互補完的に活用することで、より頑健で実用的な測位システムの実現を目指す。

[成果の発表、論文など]

- Suzuki, T., Murakami, H., Nakamura, M., Watanabe, H., Hashizume, H., Sugimoto, M.: PT-Sync: COTS Speaker-based Pseudo Time Synchronization for Acoustic Indoor Positioning, In Proc. of IEEE IPIN 2022, pp. 1-8, 2022.
- 須崎, 中村, 村上, 渡邊, 橋爪, 杉本: 音響屋内測位におけるモバイルデバイスのための高精度測位領域の拡張手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 64, No. 11, pp. 1525-1536 (2023).
- 須崎, 中村, 村上, 橋爪, 杉本: エコー埋め込みを用いたBGMによる屋内測位, 情報処理学会 UBI 研究会, 2024.