様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ６ 月 ２５ 日現在

機関番号：８２６２６
研究種目：若手研究
研究期間：2022～2024
課題番号：２２Ｋ１７９２２

研究課題名（和文）環境音を活用して人行動計測を実現する屋内測位法

研究課題名（英文）Indoor localization method with environmental sound for human behavior measurement

研究代表者

小木曽　里樹（Ogiso, Satoki）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：１０８２１７３８

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は「固有の場所から固有の音を発する環境音を使えば，携帯端末の位置座標を求められるのではないか?」という問いに対し，環境音の音色と音地図を用いることで，単一マイクでも2次元位置を推定できる測位法の確立を目的とした．提案法は音のスペクトログラムに対し非負値行列因子分解で各音源の振幅を推定し，各位置での音源振幅を示す音地図と照合して位置尤度を算出する．提案法は研究所内及び営業中のサービスエリア内で実験し測位精度を評価した．この際，音が鳴っていないという情報が測位に寄与することが示唆された．本研究を通じて装置設置なしで絶対位置を取得できる情報源としての環境音の有用性を示した．

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究は環境音のみを用いて位置推定を行う方法を示すものであり，従来は部屋の識別などまでしかできなかった環境音で位置座標を推定する方法を示した．また，実験を通じて提案法の特性を明らかにしており，事前に音の知識を用いることで少なくとも10 dB程度雑音に対し頑健にできること，営業中のサービスエリア内で冷蔵庫等の音を用いて位置推定が可能であることを示した．また，小さい音や音が聞こえないことが位置推定に重要なことを示唆した．これらはマイクさえあれば概ね位置がわかることを示しており，簡便な人行動計測や小型IoT機器などの位置情報計測に貢献する．

研究成果の概要（英文）：This study aims to establish a positioning method that can estimate two-dimensional coordinates using a single microphone by utilizing the knowledge of environmental sounds and sound maps. The proposed method estimates the amplitude of each sound source using non-negative matrix factorization on the spectrogram of the sound, and then calculates the position likelihood by comparing it with the sound map showing the amplitude of each sound source at each location. The proposed method was tested within the research institute and in operational service areas to evaluate positioning accuracy. During this process, it was suggested that information about the absence of sound contributes to positioning. Through this study, the proposed method showed the usefulness of environmental sounds as a source of information for obtaining absolute positions without the need for device installation.

研究分野：屋内位置情報，音響計測

キーワード：環境音　屋内測位

１．研究開始当初の背景

人の位置を測る測位は，製造業の生産性評価やサービス業の人行動計測を行う基盤技術である．屋外では GPS に代表される測位衛星などの公設インフラで誰でも測位を利用できるが，屋内測位は受益者負担で測位用機材設置が必要である．現在主流の方法は，対象施設内に電波を発するビーコンを設置し，その電波強度を用いる測位法である．これは原理上，数十〜数百のビーコンが必要で，設置・電池管理・撤去などが大きな課題となる．既設の WiFi アクセスポイントを用いる方法もあるが，多数の WiFi アクセスポイントが必要で駅構内など特殊な環境以外は適用が困難である．建物内の磁気を用いることで設置機材を減らす試みもあるが，初期位置が必要などの課題がある．

一方，多くの施設内では製造機械や空調，展示品などの既存設備から固有の音が固有の場所で発生しており，これらは測位用ビーコンの代わりとなる可能性がある．従来，環境音の音源方向から人の 2 次元位置を推定する方法が提案されているが，空間的に音を分離する必要があるため，音源数を超える多数のマイクが必須である．人行動計測にはスマートフォンなど携帯端末を用いる場合が多く，単一マイクのみ使用できる場合がほとんどである．このような制約のもとで音色を用いて部屋を識別する方法も発展しているが，この方法では 2 次元位置の測位は原理的に不可能である．携帯端末のマイクのみでも環境音を用いて 2 次元位置を推定できるようになれば，ごく少数の機材設置のみで測位を実現でき，多様な労働現場や小売店などにも適用できる（図 1）．

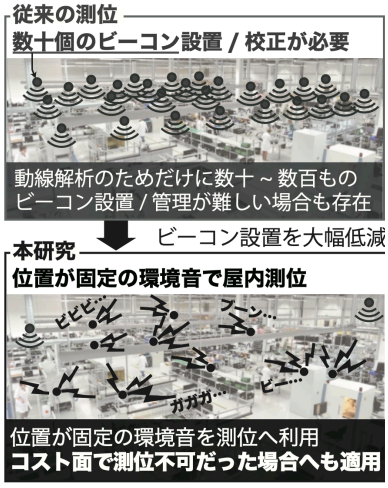

図 1 本研究の目的

２．研究の目的

本研究は環境音の音色と音地図を用いることで，スマートフォン搭載の単一マイクでも 2 次元位置を推定できる測位法を確立する．ビーコン設置にかかる時間/費用のコストを大幅に低減し，気軽に利用できる人行動計測向け屋内測位システムの基盤技術となる．

３．研究の方法

本研究ではまず，マイク信号の中に「どの音が」「どのくらいの音量で」鳴っているかを認識し，事前に記録した音環境の知識と比較することで測位する枠組みを確立する．事前の音環境サーベイにより環境中の音の周波数スペクトルを音色テンプレートとして記録，その場所を音地図として記録する．測位時にはマイク信号をスペクトログラムとして表現し，音色テンプレートに応じた音の振幅を非負値行列因子分解により推定する．この推定された振幅がどの程度ありうるか，事前計測した音地図から位置尤度を計算し，環境音による測位を実現する．

４．研究成果

提案法の概要を図 2 に示す．提案法は事前に環境中の音を個別に録音したうえで，各々の音源の信号に対し非負値行列因子分解を行い基底を求める．また，位置推定を行いたい対象の範囲に対し，位置座標と音を対応させて計測，各位置座標における前述の基底に対応する音の大きさ（root-mean square：RMS）を求める．これを用いてガウス過程回帰により，位置座標から各音源の基底に対応する音の大きさを求めるモデルを作成する．マイクの位置推定を行う際は，図 2 に示す通り，まず音から特徴量抽出をした後，ガウス過程回帰モデルを利用して位置尤度を計算する．音の特徴量抽出では，まずマイクで受信した信号を短時間フーリエ変換し，事前に計測した各音源の基底に基づき非負値行列因子分解を行う．これにより得た結果を用いて元のマイク信号をウィーナフィルタで音源ごとに分離，音源ごとの音の大きさ（RMS）を計算し，特徴量と

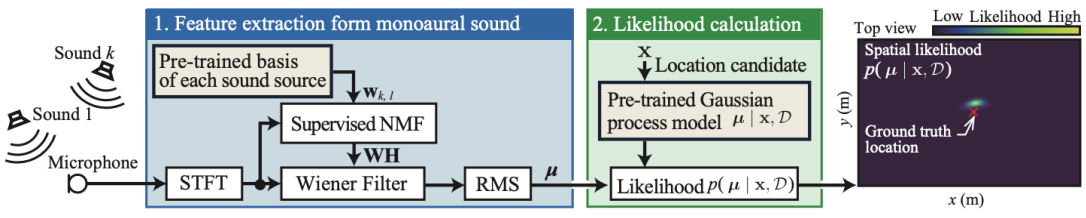

図 2 環境音を用いる位置尤度計算手法

して用いる．次に，当該特徴量を事前に学習したガウス過程回帰モデルを用いて位置ごとの尤度を計算する．これにより，マイク信号から位置の尤度を計算できる．

提案法の評価を行うため，図 3 に示す実験を行った．環境中には図 3(a)のとおり 5 種類の音源が存在し，これらを事前に個別に録音を行った．図 3(b)に示す位置座標でマイク信号を録音し，各位置座標における位置推定結果を評価した．環境は図 3(c)に示す通り，柱や壁などによる遮蔽物が存在する．事前の計測により各音源に対して学習した音の大きさのガウス過程回帰モデルと対応する音源の位置を図 4 に示す．各図について，概ね音源の位置の周辺で学習済みモデルの出力も大きくなることがわかる．他方，たとえば図 4(b)や図 4(e)のように，図中左右端ではモデルで予測される音の大きさが小さくなっており，自由空間の音の伝搬とは異なる分布になっていることがわかる．これは図 3 に示す壁の内側の領域に対応しており，音源のモデルが実際の建物による遮蔽をモデル化できていることを示している．また，図 4(d)に示すように，本来想定した音源位置以外にも似た音が存在しているものもあり，音源の位置に点音源を仮定するよりもより実態に即したモデルとなっている．

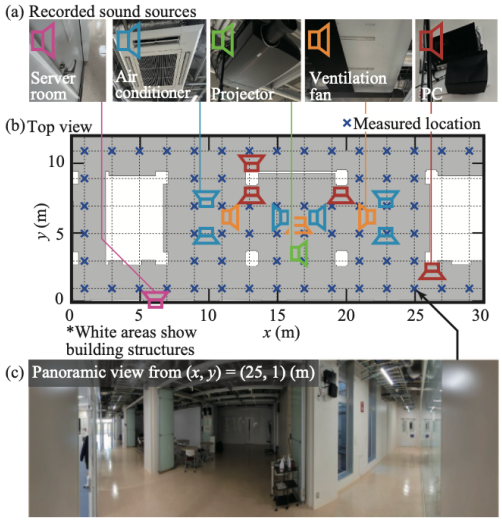

図 3 実験環境の概要

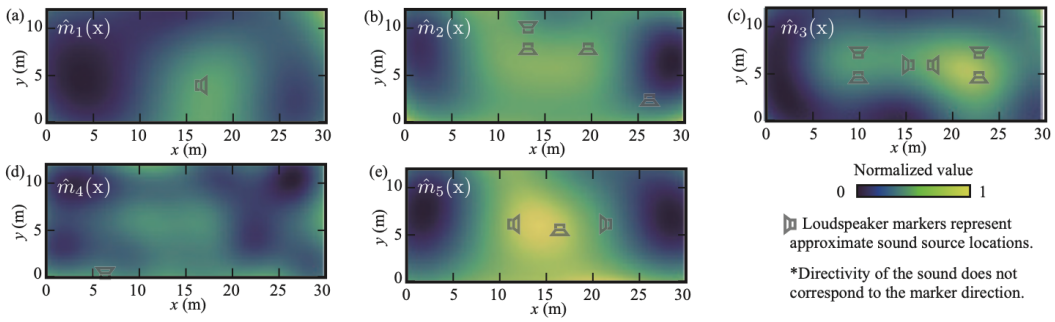

図 4 各音源に対する音の大きさ(RMS)マップの可視化

以上の結果を用いて提案法による位置推定を行った結果を図 5 に示す．提案法（SNMF+WF）の比較対象として，音の特徴料抽出にメル周波数ケプストラム係数を用いた場合（MFCC）と，図 2 のうちウィーナフィルタを用いず Supervised NMF により得たアクティベーションの時系列に対して RMS を計算した場合（SNMF）を比較した．その結果，図 5(a)に示す通り，SNMF+WF が最も精度が高く測位できるが，理想的な計測条件では概ねいずれの手法も同等には測位が可能であることを示した．他方，図 5(b)に音の信号対雑音比を変化させた場合の各手法による測位誤差の変化を示す．この結果から，MFCC は概ね-10 dB 程度で大きく測位誤差が増加するのに対し，Supervised NMF を用いる提案法では誤差の増加が緩やかであり，概ね MFCC に対して 10 dB 程度雑音に対して頑健になっていることが確認できる．これは MFCC は雑音等を区別せず特徴量として出力するのに対し，提案法では事前に音の特徴量を対象とする音ごとに基底を用いて分離していることに起因する．このことから，教師あり NMF を用いて事前に音の情報を学習されることがノイズに対してロバストな位置推定を行うために重要であることを示した．

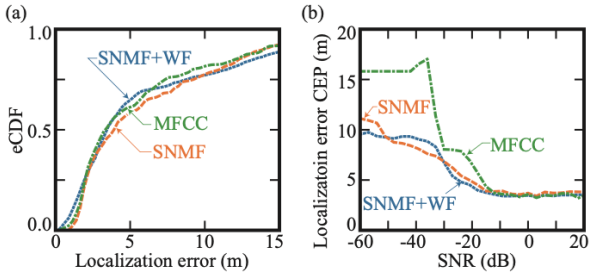

図 5 測位精度の評価. (a)異なる音の特徴量を用いた場合の提案法による測位結果，(b)信号対雑音比を変化させた場合の各特徴量の測位結果の変化

提案法を実環境で利用可能であるか評価するため，営業中の阪神高速吹田サービスエリアの売店及びフードコートエリアにて計測及び評価を行った．図 6 に計測に用いた装置を示す．計測時には位置座標の正解値としてハンドヘルド LiDAR（GeoSLAM ZEB Horizon）を用い，襟部分にマイクロフォンを装着した．また，腰にスマートフォンを装着し，この IMU の信号をもとに歩行者

相対測位を行い，これを位置の事前分布，前述の環境音による尤度計算と統合した位置推定も検証した．実験は 4 名の被験者を対象とし，のべ 160 分間歩行を行った．対象のエリアには冷蔵庫や券売機など 14 種類の音源があり，各々事前に収録して基底学習を行った．

図 7 に環境音のみを用いた測位誤差の評価結果を示す．営業中のサービスエリアで実験を実施したため測位に用いた音源以外にも多様な音がなっているが，測位誤差の中央値は 4.1 m であり，図 5 に示す測位結果と比較して概ね同等程度の測位ができていると確認できる．これは音源分離を事前学習したことにより信号対雑音比が 20 dB 程度までであれば概ね影響がないことによると考えられる．

図 6 計測に用いた装置

ここで，測位に用いる特徴量が非常に小さな値の場合，信号対雑音比が悪化しやすく位置推定に悪影響を与えると考えた．このため，閾値を設けて一定の値以下の特徴量を測位計算から除外した結果を図 8 に示す．閾値が大きいほど，大きな特徴量のみを測位に用いていることを示す．この結果から，当初の想定とは逆に，小さい音が除外されると測位精度が悪化することがわかった．これは強い音が存在することよりも，各位置に応じた音が存在しないことにより消去法的に位置推定が行われている，もしくは音は小さいが特徴的な基底を頼りに測位が行われている可能性を示している．

以上の結果をもとに，環境音を用いる尤度計算と歩行者相対測位及び地図の通行可否の情報をパーティクルフィルタで統合し，位置推定を行った．その結果誤差中央値は 10 m 程度となり，環境音単体で測位を行う場合よりも精度が悪化した．これは尤度計算を単純に利用できず，図 8 の結果と併せて，BLE 等のビーコンに基づく測位とは異なる性質があることを示唆している．本手法を他の測位法と統合する際には，尤度計算の統合方法に工夫が必要になる可能性がある．

以上により，本研究では環境音により単一のマイクでも位置座標を推定する方法を確立し，その特性を明らかにした．

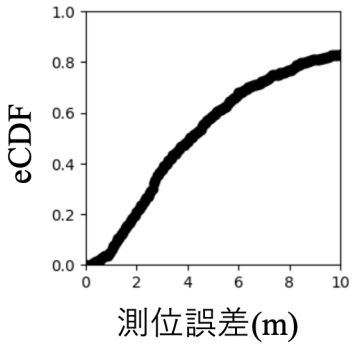

図 7 実環境での測位精度評価結果

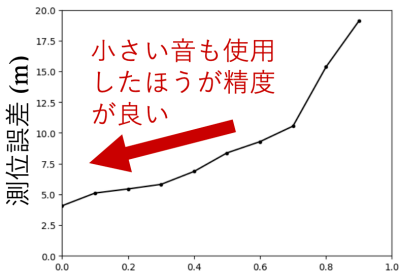

図 8 使用する音の閾値を変化させた場合の測位誤差（中央値）の変化

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計2件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　2件）

１．著者名 小木曽 里樹	４．巻 80
２．論文標題 超音波屋内測位の最前線	５．発行年 2024年
３．雑誌名 日本音響学会誌	６．最初と最後の頁 511～514
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20697/jasj.80.9_511	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Yoshida Takuto、Kaji Katsuhiko、Ogiso Satoki、Ichikari Ryosuke、Uchiyama Hideaki、Kurata Takeshi、Kawaguchi Nobuo	４．巻 31
２．論文標題 A Survey of Ground Truth Measurement Systems for Indoor Positioning	５．発行年 2023年
３．雑誌名 Journal of Information Processing	６．最初と最後の頁 15～20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2197/ipsjjip.31.15	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

〔学会発表〕　計6件（うち招待講演　0件／うち国際学会　5件）

１．発表者名 Satoki Ogiso, Ikue Mori, Takahiro Miura, Satoshi Nakae, Takashi Okuma, Yasunori Haga, Shintaro Hatakeyama, Kengo Kimura, Atsushi Kimura, Takeshi Kurata
２．発表標題 Integration of BLE-based proximity detection with particle filter for day-long stability in workplaces
３．学会等名 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium 2023（国際学会）
４．発表年 2023年

１．発表者名 Satoki Ogiso and Takashi Okuma
２．発表標題 Objective evaluation of voice quality by intermittent recording of sound on english voice
３．学会等名 The 52nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering（国際学会）
４．発表年 2023年

１．発表者名
Satoki Ogiso, Yoshiaki Bando, Takeshi Kurata, Takashi Okuma

２．発表標題
Infrastructure-Less Localization from Indoor Environmental Sounds Based on Spectral Decomposition and Spatial Likelihood Model

３．学会等名
Proceeding of the 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII2023)（国際学会）

４．発表年
2023年

１．発表者名
Masakatsu Kourogi, Ryoshuke Ichikari, Takahiro Miura, Satoki Ogiso, Takashi Okuma

２．発表標題
Vibration-Based Dead-Reckoning for Vehicle Localization

３．学会等名
IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium 2023（国際学会）

４．発表年
2023年

１．発表者名
Satoki Ogiso, Satoshi Nakae, Karimu Kato, Ikue Mori, Takahiro Miura, Ryosuke Ichikari, Takashi Okuma, Takeshi Kurata, Takanori Sugi, Yasunori Haga, Eri Nakano, Atsushi Kimura

２．発表標題
Metrics for Comparing Different Types of Positioning Techniques: Proximity Detection and Location Coordinate Estimation

３．学会等名
2024 IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)（国際学会）

４．発表年
2024年

１．発表者名
小木曽 里樹，佐藤 大介，一刈 良介，三浦 貴大，興梠 正克，大隈 隆史，蔵田 武志，田辺 健

２．発表標題
ナビゲーションロボットとスマートフォンの相対位置計測に基づく座標系変換とユーザ位置推定手法

３．学会等名
HCGシンポジウム2024

４．発表年
2024年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

―

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関