

可聴音を用いた透過法計測による屋内での人体検知

宮本 隆典[†] 堀江 和正[†] 北川 博之[†]

[†]筑波大学計算科学研究センター 〒305-8573 茨城県つくば天王台 1-1-1

E-mail: [†]miyamotor@kde.cs.tsukuba.ac.jp, {horie, kitagawa}@cs.tsukuba.ac.jp

あらまし 屋外における位置情報の取得は GPS(Global Positioning System)により一般的なものとなっているが、GPS 信号が届かない屋内における位置情報の取得手法はいまだ確立されていない。超音波を用いた屋内測位手法が提案されており、高精度での測位を実現しているが、超音波の送受を行う専用の機器を必要とする。そこで本研究では、汎用スピーカとマイクロフォンを用いた屋内測位の基礎的検討として、可聴音を用いた人体検知が可能かを WE-FDTD 法を用いた 2 次元波動伝搬シミュレーションにより検討した。その結果、スピーカから発された音がマイクロフォンで受信された際の振幅と到達時間が、スピーカ・マイク間の人の存在により変動することが確認された。このことにより、可聴音を用いた透過法計測による屋内での人体検知の可能性が示された。

キーワード 人体検知, 可聴音, 透過法, 相互相関, WE-FDTD 法, 音響信号処理

1. 序論

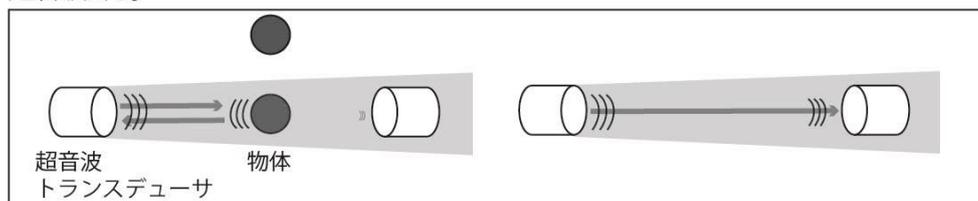
屋外における位置情報の取得は GPS(Global Positioning System)により一般的なものとなっており、GPS 受信機が搭載されたカーナビやスマートフォンなどのデバイスも普及している。しかし、屋内においては GPS 信号が届かないことから、GPS による位置情報取得は困難である。屋内での位置情報は人の動線情報が得られることから、ナビゲーションをはじめ、商業施設における購買行動の促進や工場における業務の効率化等への利用が期待されている。

屋内での位置取得手法は近年盛んに研究されており、ユーザがスマートフォンなどのデバイスを携帯する測位方法と、ユーザがデバイスを携帯しないデバイスフリー測位に大きく分けられる。デバイスを携帯する測位手法として、Wi-Fi[1]や BLE (Bluetooth Low Energy)[2]等の電波強度に基づく手法や、UWB (Ultra

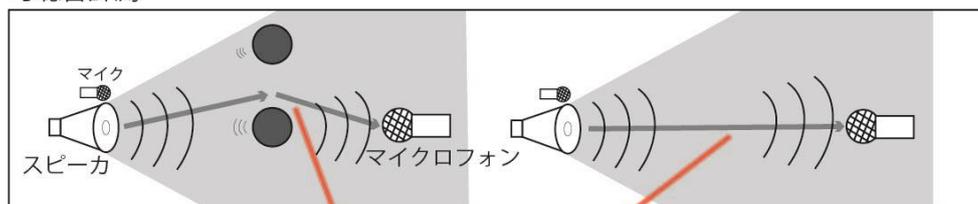
Wide Band)[3]による電波到達時間に基づく手法、音響信号を用いた手法[4]等、多様な手法が提案されている。これらの手法により、ユーザが所持するデバイスを用いたナビゲーションが実現可能であるが、商業施設における顧客の動線情報等の取得には、ユーザのデバイスの所持によらず位置情報が取得可能なデバイスフリーな手法が求められる。

デバイスフリーな屋内測位手法として、画像や赤外線、超音波を利用した手法が提案されている[5]。画像による手法の課題として、プライバシーの保護がある。画像処理によりプライバシーを保護した屋内測位も可能であるが、カメラのレンズを向けられることにより嫌悪感を抱かれる可能性がある。赤外線を用いた計測では、照射した赤外線の反射や透過量により人や物体の検知が可能であるが、検出したいものの色によりセンサの反応が異なるといった問題がある。超音波によ

超音波計測



可聴音計測



回折による音波伝搬時間の変化+受信信号振幅の変化に着目して物体を検知

図 1 超音波計測と可聴音計測の比較

る手法では、物体の色によらず検出が可能であるが、距離による減衰の影響が大きいので広い空間での計測は困難である。また、超音波の送受信には専用の機器を必要とする。

そこで、汎用機器を用いた広い空間での位置測定を実現するため、汎用スピーカとマイクロフォンを用いた可聴音による屋内測位手法に着目する。可聴音は超音波と比べ波長が長いことから、距離減衰の影響が小さくなり、広い空間における計測も可能になると考えられる。超音波と可聴音による計測を比較した図を図1に示す。トランスデューサから超音波を送信した際の、物体からの反射波をもとに物体を検知する反射法と、送信に用いたトランスデューサと対向する位置に配置したトランスデューサで受信される信号振幅の減衰をもとに物体を検知する透過法がある。超音波は波長が短いため指向性が鋭く、反射波の存在により、図1上図の灰色の範囲で示すようなトランスデューサ前方の限られた範囲に物体が存在することがわかる。また、物体の大きさに比べて信号波長が短いほど反射波の振幅が大きくなり、透過波の振幅減衰も大きくなる。一方、可聴音を用いる場合には信号波長が長くなることにより、図1下図に示すように広い角度で音波が伝搬し、反射波からどの角度方向に物体が存在するかの判断が困難となる。また、超音波に比べて波長が長い可聴音では、物体からの反射波振幅が小さくなり、ノイズが存在する環境での計測が困難となる。透過波においても同様に振幅変動が小さくなるが、透過波の到達時間に着目することにより物体の有無が判別できるとの報告が非破壊検査分野においてなされている[6,7]。この報告では、鉄鋼内部の空洞欠陥を透過波の回折現象により生じる到達時間の変動から検出しており、送信信号の波長以下の大きさの欠陥の検出も可能としている。空気中においても同様の方法によって可聴音を用いた物体・人体検知が可能であると考えられる。可聴音の透過波に着目することで、スピーカとマイクロフォンの間の人の有無が判定可能となる。また、可聴音が広い角度で放射されることを利用して、音波が伝搬する範囲に複数マイクロフォンを配置することにより、人の位置情報を得ることが可能となる。

本研究では、可聴音の透過法計測による人体検知の有効性を、計算機による波動伝搬シミュレーションを用いて検討した。

2. 提案手法

図1下図に示すように、スピーカから発せられた可聴音信号の透過波をマイクロフォンにより受信する。スピーカとマイクロフォンの間に人体が存在する場合、人体近傍で音波が回折し、人体が存在しない場合と比

べて受信信号振幅が減少し、音波到達時間が遅くなることを利用して人体の検出を行う。人体が存在しない場合の受信信号 $r(t)$ を人体の計測を行う場合の受信信号 $m(t)$ と比較し、最大振幅の比と到達時間変動量を求める。最大振幅の比は $r(t)$ と $m(t)$ の最大値の比を取ることにより求め、到達時間変動量 $\Delta\tau$ は $r(t)$ と $m(t)$ の相互相関関数 $R(\tau)$ の値が最大となる τ を計算することにより求める[6]。 $R(\tau)$ および $\Delta\tau$ は以下の式、

$$R(\tau) = \int_{-T}^T m(t)r(t-\tau)dt,$$

$$\Delta\tau = \arg_{\tau} \max[R(\tau)],$$

として表される。ここで、 T は信号の計測時間を表す。相互相関関数 $R(\tau)$ の値が大きいほど $m(t)$ と $r(t-\tau)$ の一致度が高い。よって、 $R(\tau)$ がピークを示す時の τ が2つの信号の到達時間差 $\Delta\tau$ となる。入力信号にはチャープ信号を用いる。チャープ信号は単一周波数のバースト信号に比べて帯域幅が広いことから、自己相関関数におけるピークが鋭くなり、分解能に優れるため、相互相関法を用いる際に一般的に用いられる。人体が存在しない場合の受信信号 $r(t)$ は予め取得しておき、人体の計測を行う場合の受信信号 $m(t)$ と $r(t)$ の最大値の比と到達時間変動量の値から人体の検出を行う。

3. 数値シミュレーション

3.1 シミュレーション条件

提案手法による人体検出のシミュレーションにおける波動伝搬は、波動方程式における時間領域有限差分(Wave-Equation Finite-Difference Time-Domain: WE-FDTD)法を用いる[8]。図2にシミュレーション条件を示す。屋内空間は三次元であるが、シミュレーションにおいては計算量の軽減のために二次元場として波動伝搬のシミュレーションを行う。計測空間は、300 cm × 300 cm の断面を持つ音速 346.5 m/s の室温 25°C の部屋を想定する。解析空間を 1 cm 幅で離散化する。部屋の壁面は自由境界とし、音圧を 0 とした。計算時間

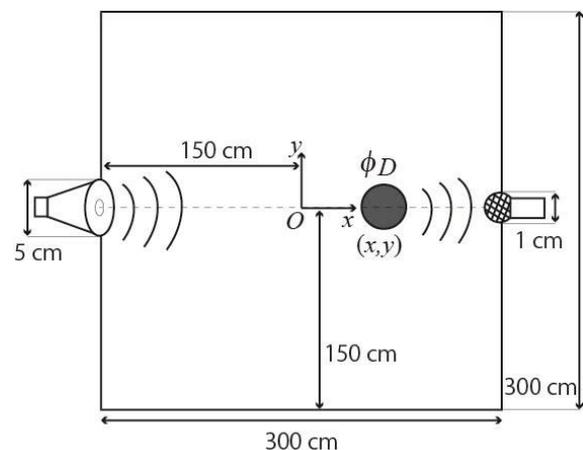


図2 シミュレーション条件

離散幅は $20.4 \mu\text{s}$ とした。人体は二次元波動伝搬シミュレーションにおいて円形のを想定し、図 2 に示すように直径を $D \text{ cm}$ としたものを位置 (x, y) に配置した。開口径が 5 cm であるスピーカを $(-50, 0)$ に配置し、音響信号を送信する。空間を伝搬した音波を $(50, 0)$ に配置した開口径が 1 cm であるマイクロフォンにて受信する。送信信号として周波数帯域を $1\text{--}3 \text{ kHz}$ としたリニアアップチャープ信号に Hann 窓を適用したものを 3 ns 分用いた。第 2 節で述べた原理に基づいて、人体の存在による受信信号振幅と到達時間の変動量を計算する。

3.2 シミュレーション結果

図 3 に人体を部屋の中心に配置し、直径 D を $10, 20, 30 \text{ cm}$ と変化させたときの結果を示す。赤線は人体が

存在しないときの参照信号 $r(t)$ 、青線は人体が存在するときの計測信号 $m(t)$ を示す。上の図は受信信号を示しており、図中の数値は $m(t)$ の最大値と $r(t)$ の最大値の比である。人体の存在により $m(t)$ の最大振幅が低下しており、人体の径が大きくなるにつれ、振幅低下量も大きくなっている。2 段目の図は青線が $r(t)$ と $m(t)$ の相互相関関数であり、赤線が $r(t)$ の自己相関関数である。下の図はその最大値近辺の拡大図を示す。相互相関関数値は最大値で正規化を行った。人体の存在により音波の到達時間が変動しており、径の増大に伴い変動量が大きくなっていることが確認できる。今回用いた送信信号の中心周波数である 2 kHz の波長は 17.3 cm であり、波長と同程度またはわずかに波長より小さい物体においても変動がみられることが確認された。

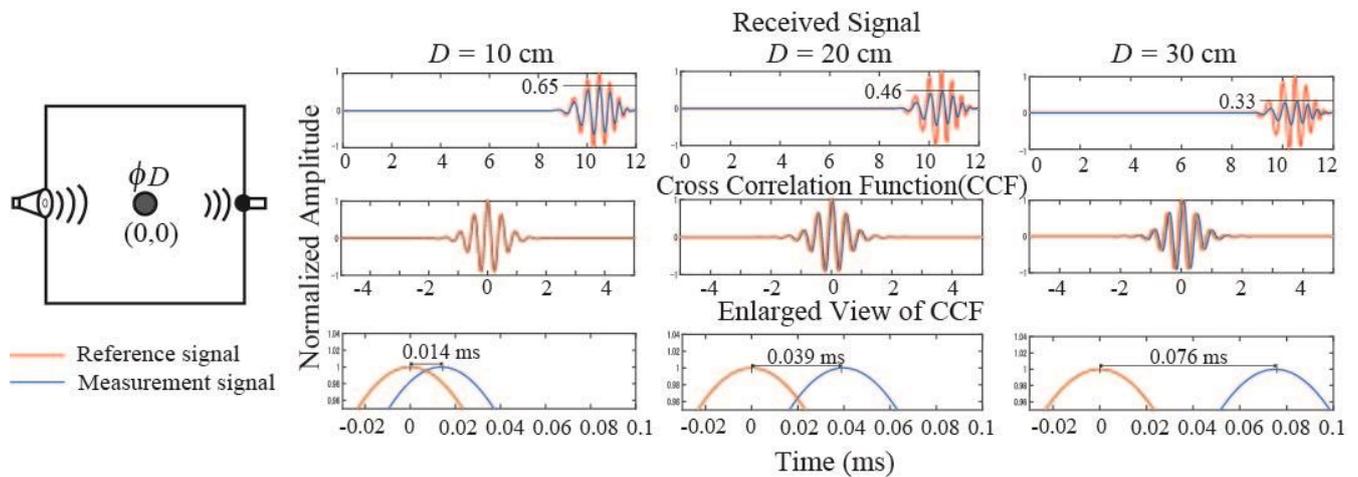


図 3 人体の径 D を変化させたときの受信信号と相互相関関数

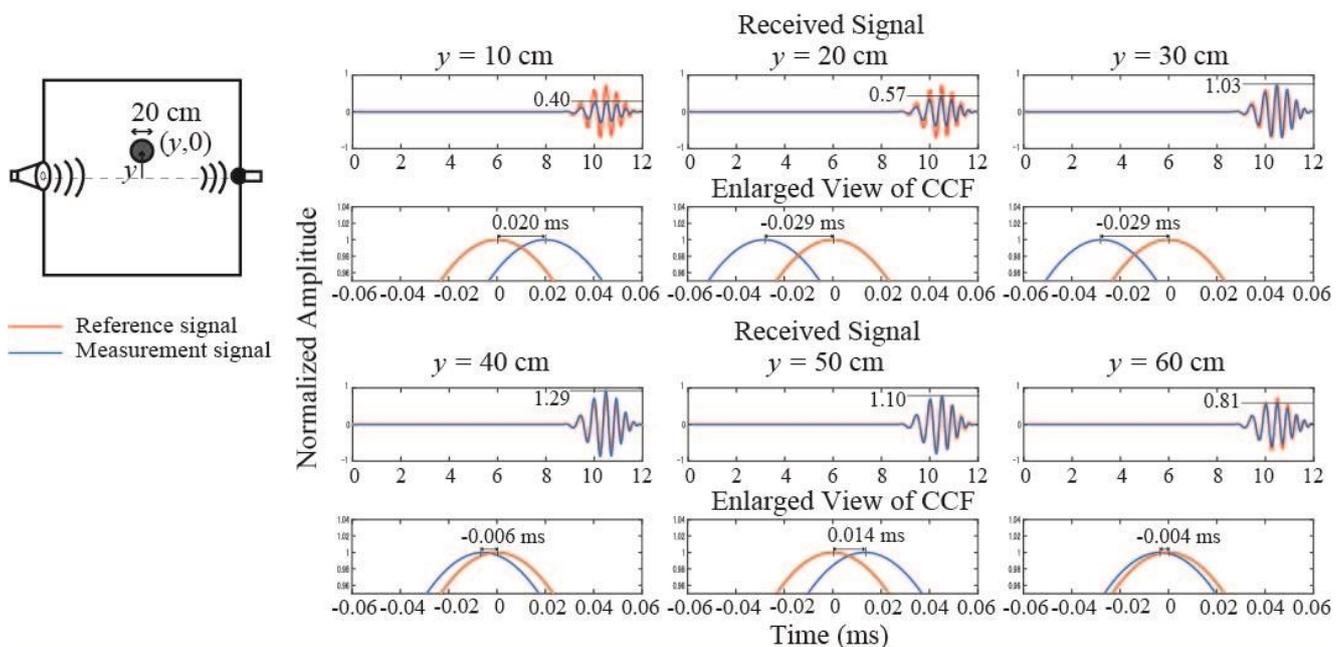


図 4 人体の位置 y を変化させたときの受信信号と相互相関関数

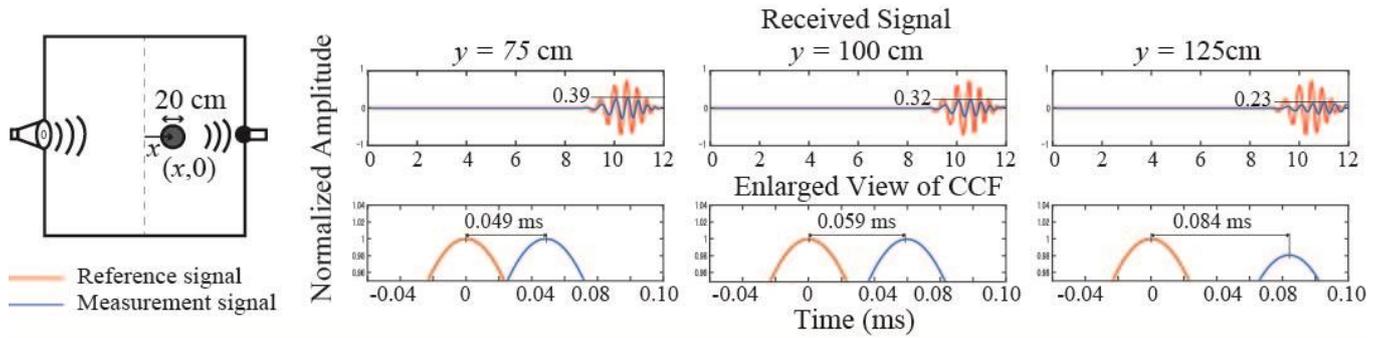


図5 人体の位置 x を変化させたときの受信信号と相互相関関数

図4に $D=20\text{ cm}$ の人体を部屋の中心から y 方向に移動したときの結果を示す. y 方向への移動量が0から30まで変化した時, $r(t)$ と $m(t)$ の振幅の差が小さくなっていることが確認できる. これは, 人体によって音波伝搬経路が遮られる面積が小さくなることにより生じたものだと考えられる. しかし, 受信信号が, $y=30$ を超えたところで $m(t)$ が $r(t)$ より大きくなり, $y=60$ では再び小さくなっている. 人体の径 D は 20 cm であるため, y が 20 以上するとき, スピーカとマイクロフォンを結んだ線上には人体が存在しない状態である. そのような状態にもかかわらず振幅に変動が生じた理由としては, スピーカから発した音波が人体にて反射し, その反射波がマイクロフォンにより受信されることによることが考えられる. 人体からの反射波とスピーカからの直達音が干渉し, 受信信号の振幅が変動したものと考えられる. 相互相関関数のピークについてもプラス方向からマイナス方向へ変動していることが確認できる. この相互相関関数ピークのマイナス値は, 音波の到達時間がマイナスとなったことをあらわすのではなく, 直達波と反射波の干渉により相互相関の計算結果に変動が生じたことに由来するものと考えられる.

図5に $D=20\text{ cm}$ の人体を部屋の中心から x 方向に移動したときの結果を示す. x 方向に移動するにつれ, 振幅減少量が大きくなり, 到達時間変動量も大きくなっていることが確認できる.

以上の結果から, 可聴音の透過法計測において振幅及び到達時間に着目することにより, 人体の検出が可能であることが示された.

4. 結論

本研究では, 数値シミュレーションにより, 可聴音の透過法計測による人体検知の有効性を検討した. その結果, 人体の有無により透過波の振幅及び到達時間に変動が生じることが確認され, これら変動量に着目することにより人体検知が可能であることが示された. 今回行ったシミュレーションでは距離減衰を考慮していないことから, 長距離計測の有効性に関しては今後検証する必要がある.

今後の展望として, マイクロフォンを複数とすることによる人体位置の推定, 実験による検証があげられる.

参考文献

- [1] S. Gao and S. Prasad, "Employing spatial analysis in indoor positioning and tracking using wi-fi access points", Proc. of ACM SIGSPATIAL, pp. 27-34, 2016.
- [2] Y. Pu and P. You, "Indoor positioning system based on BLE location fingerprinting with classification approach", Appl. Math. Model., pp. 654-663, 2018.
- [3] C. Briso, C. Calvo and Y. Xu, "UWB propagation measurement and modeling in large indoor environment", IEEE Access, pp. 41913-41920, 2019.
- [4] S. Ogiso, K. Mizutani, N. Waktsuki and T. Ebihara, "Robust indoor localization in a reverberant environment using microphone pairs and asynchronous acoustic beacons", IEEE Access, pp. 123116-123127, 2019.
- [5] T. Kivimäki, T. Vuorela, P. Peltola and J. Vanhala, "A review on device-free passive indoor positioning methods", Int. Journal of Smart Home, pp. 71-94, 2014.
- [6] H. Mitsui, K. Mizutani, N. Wakatsuki and Y. Norose, "Artifact reduction in tomographic images for nondestructive testing of square billets using ultrasonic computerized tomography", Jpn. J. Appl. Phys., 116601, 2011.
- [7] R. Miyamoto, K. Mizutani, T. Ebihara and N. Wakatsuki, "Defect detection and size estimation in billet from profile of time-of-flight using ultrasonic transmission method with linear scanning", Jpn. J. Appl. Phys., 07HC11, 2015.
- [8] 土屋隆生, "音場シミュレーションと音空間レンダリング", IEICE Fundamentals Review, pp. 206-218, 2017.