

スマートデバイスを用いた
スペクトル拡散超音波による屋内測位のための信号検出
Signal Detection for Indoor Positioning by Spread Spectrum Ultrasonic Waves
Using a Smart Device

○久野光義*, 鈴木彰真**, 伊与田健敏*

○M. Kuno*, A. Suzuki** and T. Iyota*

*創価大学大学院工学研究科

**岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究科

*Graduate School of Engineering, Soka Univ.

**Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural Univ.

キーワード：屋内測位システム(Indoor positioning system), スペクトル拡散(Spread spectrum),
超音波(Ultrasonic waves), スマートデバイス(Smart Devices),
サンプリング周波数(Sampling frequency), エイリアシング(Aliasing)

連絡先：〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236 創価大学大学院工学研究科
情報システム工学専攻 伊与田研究室 久野光義
Tel.: 090-3932-5313 E-mail: e12m5205@soka-u.jp

1 はじめに

近年, GPS を用いたカーナビゲーションや携帯電話, スマートフォンなどで用いる屋外位置情報サービスが広く普及している. また, 屋内でも人を対象にした位置情報サービスの必要性が高まっており, IMES¹⁾などの屋内測位システムが提案され, Place Engine²⁾や SONIC NAUT³⁾などのスマートデバイスのための製品が登場している. さらに, スマートデバイスにより簡易に制御できるロボットも登場しており, スマートデバイスを用いた屋内測位が実現できれば, これらのロボットの応用範囲が飛躍的に広がると考えられる. ロボットの自己位置認識においては, 既に提案されている製品よりもさらに高精度の測位が必要である.

本研究室では, これまで超音波をスペクトル拡散(Spread Spectrum : SS) 変調することで耐雑音性を持ち, さらに符号分割多重通信能力を持つ屋内測位システムの研究を進めてきた⁴⁾. 本測位システムでは, 誤差 5cm 以内の高精度かつ

リアルタイムでの測位を専用のハードウェアボードにより実現している⁵⁾.

本研究では, SS 超音波を用いた屋内測位によって, スマートデバイスで動作するロボットの自己位置認識の実現を目指す. スマートデバイスは, A/D 変換時のサンプリング周波数が超音波帯域をカバーしておらず, 搬送波 40kHz の SS 超音波信号の検出が困難である. そこで, 信号受信時の A/D 変換におけるエイリアシングを利用した手法を提案した.

本稿では, エイリアシングを利用した手法の有用性を検証した. また, デバイスとしてスマートフォンを用いた時の SS 超音波信号の検出可能性を検証すると共に, 検出可能距離を検討した.

2 スペクトル拡散信号を用いた測位

2.1 測位システムの概要と測位の流れ

本測位システムでは, 正方形の測位空間の 4 頂点の天井に送信機を設置し, そこから SS 超音波を同時に送信する. これらの SS 超音波を

受信機では符号分割多重通信により検出する。送信開始から検出までの超音波の伝搬時間から送・受信機間の距離を求め、少なくとも3組の距離情報から測位範囲内の受信機の3次元位置情報を得る。

2.2 スペクトル拡散信号

本システムは直接拡散方式によってSS信号を生成する。拡散符号にはM系列による符号を用いる。送信信号のスペクトル分布を図1に示す。横軸は周波数、縦軸はスペクトル密度である。送信機では、搬送波5周期に対しM系列1チップを乗じて送信信号を生成するため、スペクトル分布は40kHzを中心に±8kHzのメインローブと8kHzのサイドローブを持つものとなる。

2.3 相関演算による信号検出

信号検出のために、受信信号から相関演算によって相関値を算出する。受信側では、送信側と同じ搬送波とM系列1周期を用いてレプリカ信号を生成し、レプリカ信号と同じ信号長の受信信号との相関演算を行うことで相関値を算出

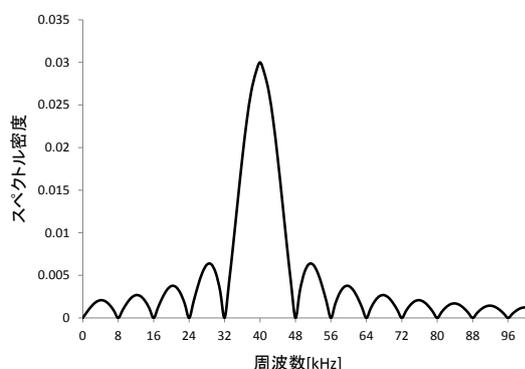


図1 送信信号のスペクトル分布
搬送波周波数:40kHz 拡散周期:5周期

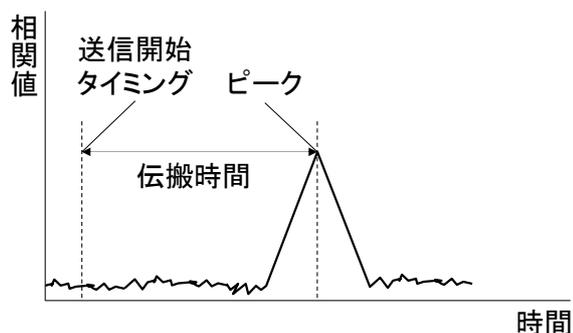


図2 相関値の推移と出現するピーク

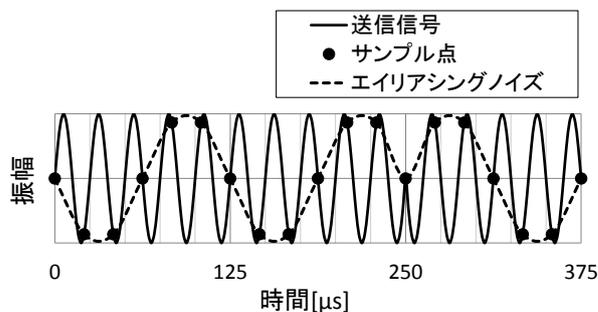


図3 送信信号とA/D変換時のサンプル点
サンプリング周波数:48kHz

する。相関値はM系列の自己相関特性により、受信信号とレプリカ信号の位相が一致する時のみ最大値のピークとなる。超音波を送信開始してから相関値のピークが現れる様子を図2に示す。横軸は時間、縦軸は相関値である。この相関値のピークを閾値により判定することで信号を検出する。

3 エイリアシングを利用した相関演算手法

スマートデバイスは、通話や音楽での利用を対象としており、ヒトの可聴域の最大周波数とされている24kHz以上をデータ化する要求が少ないため、A/D変換時のサンプリング周波数は最大48kHzである。本システムでは40kHzの搬送波を用いているため、標本化定理によれば、A/D変換時のサンプリング周波数が80kHzより大きければ原信号を再現でき。それ以下では、エイリアシングが起こり低周波数の波（エイリアシングノイズ、折り返し雑音）が現れる。本システムでの送信信号と受信機でA/D変換したときのサンプル点の対応を図3に示す。横軸は時間、縦軸は振幅である。図3におけるサンプル点を滑らかに結んだ破線がエイリアシングノイズである。

図3に示される通り、受信信号が送信信号と異なりエイリアシングノイズになるため、本手法ではエイリアシングノイズ1周期に対し1チップを掛け合わせたSS信号をレプリカ信号とし、受信信号との相関演算を行うことで信号検出する。受信機におけるレプリカ信号の先頭からu番目のサンプル値 $V_{rep}(p)$ は、次の式(1)で表される。

$$V_{\text{rep}}(u) = M \left(\left\lfloor \frac{p}{6} \right\rfloor \right) \sin \left(2 \pi p \times \frac{40\text{kHz}}{48\text{kHz}} \right) \quad (1)$$

$(p = 0, 1, 2, \dots, 6L + 2)$

ここで、 $M(n)$ は n チップ目の M 系列の値、 L は M 系列の系列長である。

次に、受信開始からのサンプリング回数を N_s とし、 N_s 番目の受信サンプル値を $V_{\text{rcv}}(N_s)$ と置く。 $V_{\text{rcv}}(N_s)$ と $V_{\text{rep}}(p)$ との相関値を c_1 と置くと相関値は式(2)で求められる。

$$c_1 = \sum_{q=0}^{6L} V_{\text{rcv}}(N_s + q) V_{\text{rep}}(q) \quad (2)$$

相関値の算出においては、受信信号とレプリカ信号の位相の相違による値の変動が小さくなるようレプリカ信号を複数用意し、それらとの相関値を二乗平均する。今回の場合、図 3 に示す通り受信信号半周期に 3 サンプルあるため、位相を $\pi/3$, $2\pi/3$ ずらした 3 種の各レプリカ信号との相関値を求め、その平均を最終的な相関値とする。 $V_{\text{rep}}(p+1)$ との相関値を c_2 , $V_{\text{rep}}(p+2)$ との相関値を c_3 と置くと、相関値 c は以下の式 (3) で求められる。

$$c = \sqrt{\frac{2}{3}(c_1^2 + c_2^2 + c_3^2)} \quad (3)$$

今回の設定の場合、 M 系列は 8 段のシフトレジスタから生成し、その系列長は 255 であるため、 M 系列 1 チップ 6 サンプルである受信信号の相関値には 1530 サンプルごとにピークが現れる。

4 スマートフォンを用いた超音波受信可能性検証実験

4.1 実験の目的と方法

スマートフォンの音波の受信周波数帯域は 20Hz から 20kHz である⁶⁾。しかし、スマートフォンには、より高周波も受信できるシリコンマイクロフォンが内蔵されており、エイリアシングにより超音波をある程度受信可能ではないかと推測できる。そこで、40kHz の超音波の受信可能性を検証するための送受信実験を行った。

ファンクションジェネレータを用いて 40kHz

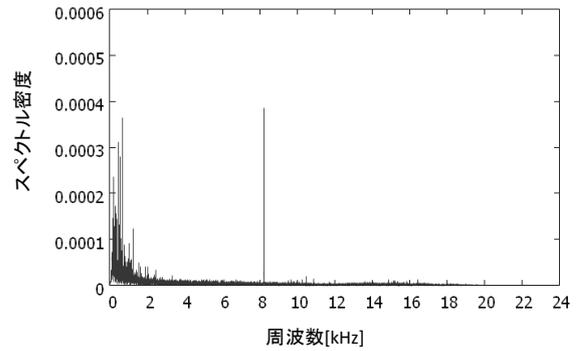


図 4 40kHz の超音波送信時の受信データの周波数スペクトル

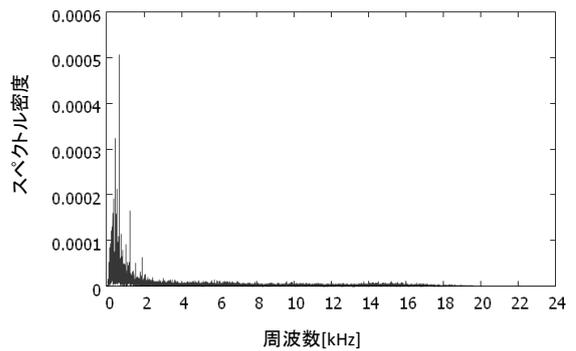


図 5 超音波無送信時の受信データの周波数スペクトル

の信号を生成し、ツイーターを用いて送信した超音波をスマートフォンの iPhone4S で録音した。その後、ソフトウェア上で受信データの周波数スペクトルを解析した。

4.2 実験結果と考察

解析の結果を周波数スペクトルのグラフとして図 4 に示す。横軸は周波数、縦軸はスペクトル密度であり、大きく受信されている周波数ほどスペクトル密度が高くなる。図 4 から周波数 8kHz のエイリアシングノイズが受信されていることがわかる。

同程度に高いスペクトル密度が 0Hz から 2kHz 近傍に見られる。同環境で超音波を送信せずに録音した時の受信データの周波数スペクトルを解析した結果を図 5 に示す。図 5 から、同様な高いスペクトル密度が見られるため、周囲の雑音を受信したと思われる。したがって、図 4 から、雑音並みではあるが、スマートフォンを用いて超音波 40kHz をサンプリング周波数 48kHz で受信したとき、8kHz のエイリアシングノイズが受信できた。

5 エイリアシングを利用した手法による SS 超音波信号検出可能性の検証実験

5.1 実験目的と方法

エイリアシングを利用した手法による SS 超音波信号の検出可能性を検証するため、本手法に基づいて実験を行った。送信素子に汎用トランスデューサーを用い SS 超音波を連続的に送信した。汎用トランスデューサーの周波数特性は 40kHz を中心に $\pm 1\text{kHz}$ で大きく減衰する。ゆえに、図 1 に示した SS 超音波信号の周波数成分の内、スマートフォンで受信可能な可聴域の超音波は殆ど送信されない。受信時のサンプリング周波数は 48kHz であり、受信素子に周波数特性が 6.5kHz から 140kHz の広帯域でフラットなマイクロフォンを用いて受信した。その後、受信データをソフトウェア上で相関演算し相関値を算出した。

5.2 実験結果と考察

得られた相関値の推移を図 6 に示す。横軸は受信開始からのサンプリング回数、縦軸は相関値の最大値に対する割合である。図 6 から、M 系列 1 周期分の SS 超音波信号のサンプル数と同様の 1530 サンプルに近い周期でピークが現れていることがわかる。したがって、エイリアシングを利用した手法による SS 超音波信号の検出が可能であり、本手法の有用性が示された。

また、図 6 において、ピークに少し遅れて局所的に高い値が現れる。直接波と床に反射して届く波との経路差を計測したところ、サンプリング回数に音速を掛けて求まる距離と一致したため、送・受信機間で超音波が床や壁に反射し

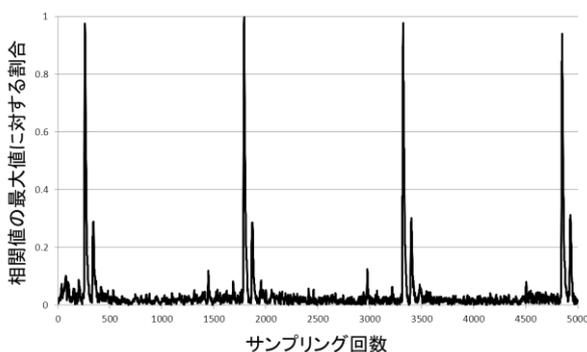


図 6 相関値の推移 受信: 広帯域 Mic.

て届く波であるマルチパスによる影響と考えられる。

6 スマートフォンを用いた本手法による

SS 超音波検出実験と検出可能距離の検討

6.1 実験目的と方法

スマートフォンを用いた時の、エイリアシングを利用した手法による SS 超音波信号の検出可能性を検証するとともに、検出可能な距離を検討するため実験を行った。

送信信号の搬送波は 40kHz、信号電圧は $10V_{pp}$ とし、送信素子に汎用トランスデューサーを用いて SS 超音波を連続的に送信した。受信時のサンプリング周波数は 48kHz であり、送信素子から 0.5m 間隔で 4.0m まで距離を置いてスマートフォンで録音した後、前実験と同じ方法で相関値を算出した。

6.2 実験結果と考察

実験結果のうち、0.5m と 1.5m の距離を置いて受信した相関値をそれぞれ図 7, 8 に示す。横軸は受信開始からのサンプリング回数、縦軸は相関値の最大値に対する割合である。図 7 から、M 系列 1 周期分の SS 超音波信号のサンプル数と同様の 1530 サンプルに近い周期でピークが現れていることがわかる。したがって、スマートフォンを用いてエイリアシングを利用した手法による SS 超音波信号の検出が可能であることがわかった。

ここで、周期的に現れる最大の相関値をメインピークと定義する。また、メインピーク以外の比較的大きな複数の相関値をサブピークス、中でも 2 番目に高い値をセカンドピークと定義し、メインピークとセカンドピークの比を S/N 比とする。各距離のメインピークとセカンドピークの値、および S/N 比を表 1 に示す。ピークの検出は閾値を用いた判定で行い、図 8 のようにメインピークに比べセカンドピークが大きい場合、つまり、S/N 比が小さいほど閾値を設定できる範囲が狭くなり、値が少し変動するだけで信号を誤検出する可能性が高くなる。S/N 比が最小になる距離は 1.5m で 1.11 であり、ピー

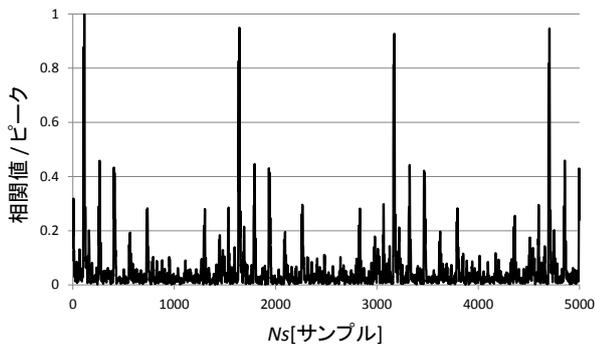


図7 相関値の推移
受信: iPhone4S 距離: 0.5m

ク検出は困難になると予想される。

現行の SS 超音波を用いた屋内測位システムは、4.0m×4.0m の範囲で測位可能であり、最大で対角線距離の約 5.4m の距離計測が必要とされる。実験結果では距離が不十分であり、システムの実現に多くの送信機を設置しなければならないため、検出可能距離を長くする必要がある。検出可能距離が短い要因はサブピークスにあり、図6のマルチパスによる影響とは違う原因があると考えられるため、今後サブピークスが現れる原因を究明し、高い S/N 比を維持できる方法を提案する必要がある。

7 おわりに

本研究では、スマートデバイスを用いた SS 超音波検出手法の検討として、エイリアシングを利用した信号検出手法の有用性を検証した。また、スマートデバイスとしてスマートフォンを用いた SS 超音波信号の検出実験を行い、信号検出の可否の検証、また、受信データから得られる相関値の推移から信号検出可能な距離を検討した。

実験の結果、スマートフォンを用いた場合、サブピークスと定義した原因不明の高い相関値が周期的に現れることがわかったものの、エイリアシングを利用した手法そのものは信号検出において有用であることが示唆された。

今後は、スマートフォンを用いて受信した時

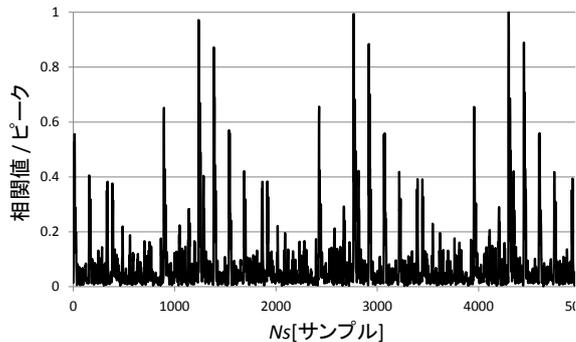


図8 相関値の推移
受信: iPhone4S 距離: 1.5m

表1 送・受信間距離ごとの
各ピークの値と S/N 比

距離[m]	メインピーク	セカンドピーク	S/N比
0.5	3,662,571	1,678,666	2.18
1.0	3,248,772	1,624,640	2.00
1.5	1,223,046	1,097,739	1.11
2.0	133,351	93,825	1.42
2.5	86,488	56,272	1.54
3.0	45,277	29,538	1.53
3.5	28,120	17,463	1.61
4.0	21,473	13,798	1.56

に相関値に現れるサブピークスの原因を究明し、高い S/N 比での信号検出を実現することで、計測可能距離の向上を目指す。また、送受信機間のタイミング同期を行い、スマートフォン上で測距可能なアプリケーションを開発する。

参考文献

- 1) 村田正秋, 瀬川爾朗, 鳥本秀幸: IMES の技術動向 ～シームレス三次元測位・航法の新技術, 電子情報通信学会誌 Vol.95 No.2 , (2012)
- 2) MTI LTD. <http://www.sonicnaut.jp/index.html>
- 3) Koozyt, Inc. <http://www.placeengine.com/>
- 4) 山根章生, 伊与田健敏, 崔龍雲, 久保田讓, 渡辺一弘: 擬似乱数 M 系列によるスペクトル拡散音波の距離計測への応用, 計測自動制御学会論文集 Vol.39 No.10, 879/886 (2003)
- 5) 鈴木彰真, 伊与田健敏: リアルタイム超音波屋内測位システムにおけるスペクトル拡散変調による計測性能の向上, 計測自動制御学会論文集 Vol.42 No.1, 1/9 (2012)
- 6) Apple LTD. <http://www.apple.com/jp>