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

鈴木 彰 真*・伊与田 健 敏*

Performance Improvement of Real-time Indoor Positioning System
by Spread Spectrum Ultrasonic Waves

Akimasa SUZUKI* and Taketoshi IYOTA*

The fields of application for indoor positioning have expanded in tandem with advancements in our information-driven society. Compared to other positioning methods such as using radio waves, pseudolites or infrared rays, the systems based on ultrasonic waves have the advantages of low cost and comparatively high accuracy. However, these systems have weak noise resistance. Furthermore, the system takes a longer time to acquire data because they use a time-division multiplexed method with on-off keying (OOK), which becomes more cumbersome as the number of objects to be measured increases. To overcome these drawbacks, we have investigated a real-time positioning system with spread spectrum (SS) ultrasonic modulation using general-purpose transducers, which is band-limited and utilized in the conventional systems with the OOK. In this paper, the measurement time, measurable range and measurement errors are compared with two modulation types (i.e., conventional OOK and proposed SS modulation) in a situation and an environment using a positioning system. In real-time measurements, improvement of angular dependence and ability for accuracy using SS modulation in conjunction with general-purpose transducers has been not discussed thus far. In the case of measurement for over 3 targets, the system with OOK takes more longer time to obtain a position than with SS, because of CDMA. The result with SS modulation presents the measurement accuracy and measurable range were improved. Therefore, in terms of accuracy, the SS modulation is more effective for indoor positioning than OOK.

Key Words: spread spectrum modulation, ultrasonic waves, 3D-indoor positioning system, ability on measurement, on-off keying

1. はじめに

屋内環境の位置情報は、自律移動ロボットの自己位置認識や複雑な建物内でのロボットによる経路案内をするために重要とされている。屋内環境では、移動可能範囲が限定された空間に多数の障害物や移動体が存在し、人と複数のロボットとの協調タスクも想定されるため、測位誤差 10 cm 以内での測位が応答時間 100 ms 程度で必要となる。そのため、現在位置情報取得に関する研究が活発に行なわれている。位置情報に関する研究のうち、環境設置型センサを用いたものは絶対座標の取得が可能で遮蔽が少なく、複数のロボットが作業を行なう場合はほかのロボットや人との情報共有が容易であり、衝突回避の予想もしやすい。そこで、屋内 GPS¹⁾、Pseudolite (屋内擬似衛星)²⁾、赤外線エミッタ入射角に基づく測位³⁾、

超音波を用いた測位^{4),5)}など、さまざまな環境設置型センサを用いた屋内測位システムの研究がされている。

中でも、超音波を用いた屋内測位システムは、電波や赤外線などに比べ伝播速度が遅く、距離分解能を向上させることが比較的容易なことから、低コストで測位誤差 10 cm 以内のシステムを構築できる。また、橋爪ら⁵⁾は測位精度 0.3 mm 以内での超音波計測システムを構築している。さらに、超音波の伝播速度の遅さから、マルチパスの影響が誤差に反映されにくい。しかし、一般的な手法であるパルス検出手法を用いたオンオフ変調による超音波屋内測位は、一般に雑音に弱いといわれている。また、多くのオンオフ変調の超音波を用いたシステムは時分割で測位を行なう必要があるため、測位対象物が増えると計測時間が増大する。そこで、耐雑音性に優れた符号分割多重通信能力をもつスペクトル拡散 (SS: Spread Spectrum) 超音波を用いた屋内測位について研究がされており、事後処理ではあるが、自作の帯域の広い超音波送・受信器を用いた Mike Hazas らによる研究⁶⁾、周波数ホッピング方式を用いた研究⁷⁾など多くの報告がある。また、送受信器の位置関係を逆にすることで、送信器位置のモニタリングを

* 創価大学工学部 八王子市丹木町 1-236

* Faculty of Engineering, Soka University, 1-236 Tangi-machi, Hachioji

(Received September 5, 2012)

(Revised November 9, 2012)

行なった例もある (逆 GPS 方式)⁸⁾。さらに、測位に必要な計測時間については述べていないが、帯域の広い超音波素子による測位誤差と分散について、SS 変調を含むさまざまな符号分割多重接続方式で比較をした報告もある⁹⁾。

一方、筆者らは帯域と指向性が狭い汎用トランスデューサをそのまま用いて、一般のオンオフ変調による超音波測位と同様の安価で現実的なシステム構成によって、GPS のアナログ的見地から SS 超音波測位を行なうことを目的とした研究を行ってきた。現在まで、事後処理による受信処理や測位計算での符号分割多重通信能力、汎用トランスデューサによる距離計測能力、狭指向性状況下での DOP (Delusion Of Precision) を考慮した測位精度について検討を行ない、SS 超音波測位手法の有用性を示してきた^{10)~12)}。

一般に、オンオフ変調による超音波屋内測位システムは、単独の対象物を測位する場合において処理の遅延がないリアルタイム測位が可能である。同様に、SS 超音波測位においてもリアルタイムでの測位が望ましい。そのため、これまで測位演算のうち最も時間が必要な相関演算処理をリアルタイムで行なう手法を提案し、その計算時間について検討してきた¹³⁾。これにより、通常のオンオフ変調による超音波屋内測位システムと同様、事後処理を必要としないオンラインでの SS 超音波測位システムの構築が可能となった。

これまでの事後処理における測位誤差と、測位可能範囲に関する検討¹²⁾では、超音波信号の減衰や環境内の温度変化、雑音といった外乱が含まれた実環境における SS 超音波測位の実現可能性について検討を行ってきた。一方、リアルタイム計測において SS 変調を施すかどうかによって変化する、測位に必要な計測時間、距離計測可能範囲、距離計測における誤差の変化や、これらに起因する測位結果の変化については、議論されていなかった。そこで、本論文では標準的なオンオフ変調と SS 変調を自由に切り替えることを可能とした、汎用超音波素子によるリアルタイム屋内測位システムを構築して、同一のハードウェア構成、測位環境における、計測時間、距離計測・測位誤差、計測可能範囲の差異について実験的検討を行ない、超音波における SS 変調の有用性を、SS 変調とオンオフ変調で変化する特性から明らかにした。

2. 超音波屋内測位システム

2.1 オンオフ変調とスペクトル拡散変調

SS 変調以外を用いた超音波測位においては、最も単純であるパルス状の搬送波を直接信号に用いたオンオフ変調のほか、二点の受信地点の位相差から距離を求める位相一致法⁵⁾などの変調方式が挙げられる。これらの超音波測位では、帯域を制限したトランスデューサを用いて受信した超音波信号の振幅に基づいて信号の到達を判断する。一方、これまで筆者らは超音波屋内測位のための SS 信号に疑似乱数符号系列である M 系列を用いて、直接拡散 (DS: Direct Sequence) 方式による二位相遷移変調 (BPSK: Binary Phase Shift Keying) を行ってきた。M 系列は、シフトレジスタによって 0 また

Fig. 1 Ultrasonic signals generated in the transmitter units (a) carrier waves (on-off keying) and (c) SS signals multiplied to (b) M-sequence; In case of on-off keying, we only utilize the carrier waves

は 1 の系列が生成されるが、製作した測位システムでは容易に信号処理を行なうために、生成された M 系列の 0 を -1 に変換し、搬送波との論理積をとることで送信信号を生成する。Fig. 1 に、送信ボードで生成された SS 信号を示す。Fig. 1 では、縦軸に振幅、横軸に計測時間を示しており、M 系列 1 に対応する信号を点線、 -1 に対応する信号を実線で示している。また、送信信号は搬送波 1 周期あたり 16 sample でサンプリングをしており、Fig. 1 の送信信号上の各点でそれを示している。

本システムでは、送信信号の搬送波周波数は 40.2 kHz とする。また、送信信号は搬送波 4 周期を M 系列 1 チップ分のシンボルとし、M 系列が -1 のときは搬送波を反転させる。ここで、Fig. 1 内に示すチップ長 t_c を M 系列の 1 チップを表現するために必要な時間と定義する。このとき、搬送波周波数 f を用いて $t_c = 4/f$ と表現することができる。筆者らは、演算量、演算時間、S/N 比を考慮して¹¹⁾ 9 bit シフトレジスタを用いて M 系列を作成した。そのため、本実験での SS 超音波の符号長は $2^9 - 1 = 511$ チップとなる。

一方、受信側では受信した超音波に対して搬送波 1 周期あたり 4 sample でサンプリングをする。そのため、サンプリング周期は $6.25\text{ }\mu\text{s}$ となる。また、M 系列 1 周期の総サンプリング回数は $511 \times 4 \times 4 = 8176\text{ sample}$ となる。オンオフ変調では、Fig. 1 の搬送波成分における、振幅をもとに信号の到達を判断する。一方、SS 超音波の受信ユニットでは、内部で生成された M 系列のレプリカ信号と受信したデータとの間で相関演算を行なう。M 系列はその自己相関特性により、送信信号が拡散符号一周期以上到達し、レプリカ信号との位相が一致した瞬間に高い相関値を出力する。また、信号が送信されていない場合や位相がずれた場合は相関値が低下する。そのため、デジタルマッチドフィルタを用いて送信開始より相関演算を繰り返し行ない、相関値の極大値が得られるまでの経過時間を計測することで、TOF を測定することができる。

2.2 SPAN を用いた屋内測位システムの構成

筆者らは、これまで環境に設置された複数の送信器と測位

Fig. 2 Ultrasonic positioning system with on-off keying utilizing SPAN with inverse-GPS method

対象に設置された受信器を用い、測位対象の測位を行ってきた¹²⁾。本論文では、オンオフ変調を用いた測位との比較を同一環境下で行なうために、すでにあるオンオフ変調による測位システムをもとに、SS変調でも計測できるように拡張する。本論文では測位システムとして、マイコンが実装された複合センサーノードである SPAN (Smart Passive/Active Node) を 4 台連携させたオンオフ変調による超音波測位システムを利用する^{14), 15)}。そのため、環境に設置された複数の受信器と測位対象に設置された送信器を用いた逆 GPS 方式をとる。Fig. 2 に SPAN を用いた実際の測位環境と使用機材を示す。Fig. 2 の測位環境では、4 台の SPAN と Fig. 2 の拡大図内に示した送信ユニット、測位開始時刻を伝達するタイミング生成機で構成されており、Fig. 2 における SPAN1～SPAN4 の中にそれぞれ受信器が内蔵されている。SPAN1～SPAN4 と送信ユニットは、タイミング生成機を通して無線通信により送信開始時刻を同期している。また、Fig. 2 では SPAN1 から SPAN4 に内蔵している受信器を時計回りにそれぞれ Rx₁ から Rx₄ と名付ける。SPAN による屋内測位環境に設置する受信器は、400 cm 四方の空間の四隅に設置しており、その中の 1 つの受信器位置 Rx₁ を原点の座標にする。ここでは、SPAN1 の受信素子の座標を原点としている。

超音波の送信器、受信器はそれぞれ汎用のトランスデューサとして、これまでにオンオフ変調によって行なわれた大原らの検討⁴⁾と同様、送信器には広範囲に超音波を送出可能な密閉型の汎用トランスデューサ (PC40-18S, Nippon Ceramic co., Ltd.), 受信器には指向性は狭いが指向方向の利得が大きい開口型の汎用トランスデューサ (R40-16, Nippon Ceramic co., Ltd.) をそれぞれ用いている。そのため、送信器の指向性による音圧はトランスデューサの中心より 60 deg. で 2/3、受信器の場合トランスデューサの中心より 60 deg. で 1/4 に減衰する。また、トランスデューサの帯域は 40 kHz を中心に ± 5 kHz で -20 dB の特性をもつ¹²⁾。SS 変調を用いる場合、送信する超音波の帯域が広がるため、帯域の狭い送信器や受信器を用いることで信号が劣化する。

2.3 SPAN を用いた距離計測方法

SPAN に搭載する SS 超音波測位のためのハードウェアの構成を Fig. 3 に示す。まず、Fig. 3 に示すように、送信信号

を生成するハードウェアを送信ユニット、信号の受信より伝播距離を算出するハードウェアを受信ユニットと定義する。通常、SS 超音波を用いた測位システムでは、SS 超音波の生成や復号、送受信のために FPGA と AD/DA 変換器を含むハードウェアを用いる。SPAN には、あらかじめ FPGA と外部メモリが搭載されている。そのため、Fig. 3 における相関演算とピーク検出¹³⁾を SPAN に実装し、その後の測位計算は、最適化された計算式により SPAN 内のマイコンを用いたソフトウェア演算により求める。また、SPAN による超音波測位システムでは、Fig. 2 の送信器 Tx に示すようなパルス幅変調による超音波送信ユニットを用いており、送信ユニット内には FPGA が実装されている。そのため、SS 変調の測位システムにおいてはこの超音波送信ユニットに Fig. 3 の SS 超音波の生成部、パルス幅変調部を構築する。送信、受信ユニットはそれぞれ分離されている。

また各送受信に用いるトランスデューサをそれぞれ送信器・受信器とし、送信・受信ユニットと合わせてそれぞれ送信部・受信部とする。Fig. 3 に示されるように、送信部のハードウェアではまず、搬送波に疑似乱数符号である M 系列を掛け合わせ、送信信号を生成する。この信号は、内部のハードウェアにより動的に生成され、パルス幅変調によるアナログ変換の後に送信器から 9Vp-p で出力される。一方、受信ユニットでは送信開始をきっかけに受信器より得られた超音波信号を 8-bit で AD 変換する。つぎに、Fig. 3 の相関演算部で相関演算を行なう。その後、Fig. 3 のピーク検出部において相関演算の結果を用いた極大値の検出を自動的に行なう。また、ピーク検出部では送信開始から相関値が極大値となるまでの受信データ数 (以下サンプリング回数) をカウントし、送受信器間の信号伝播時間 (TOF: Time Of Flight) を求める。さらに、SPAN 内のソフトウェア演算により TOF と音速を乗算して送受信器間の距離 d を計測する。ある計測時の環境内の温度を $T^{\circ}\text{C}$ とする。伝搬時間に音速を乗算し距離を求めるとき、超音波の音速 v [m/s] には以下の近似式を用いる。

$$v = 331.5 + 0.60714 \times T \quad (1)$$

その後、各 SPAN で得られた TOF は内蔵のネットワーク機構によって SPAN1 に集約され、SPAN1 内では測位演算を行なう。測位対象から環境に設置された受信器までの 3 つ以上の送受信器間距離と各受信器の 3 次元位置座標から、測位対象の 3 次元での位置座標を連立方程式によって求めることができる¹²⁾。Fig. 3 に示す SPAN の環境では一度の測位演算で 4 つの解が求められ、その平均地点を求めることで誤差の補償を行なっている。

このシステム構成により、リアルタイムかつ自動的に測位結果が出力される¹³⁾。また、SPAN を用いた超音波測位システムでは、Fig. 2 と Fig. 3 にそれぞれ示されている timing generator を用いて無線による測位開始タイミングの伝達と、送受信器の動作周波数を同期させている。これま

Fig. 3 System architecture for distance measurement using ultrasonic waves with OOK and SS modulation

で、符号分割多重通信能力に関する検討として、 $\{4,9\}$, $\{3,4,6,9\}$, $\{4,5,8,9\}$, $\{2,3,5,9\}$ の 4 つの Tap を用いた同時送信による距離計測を行なったところ、6 m 以下で十分な S/N 比が得られている。

3. SS 超音波とオンオフ変調による超音波の計測時間

一般に、GPS と同様のシステム構成でオンオフ変調を用いる場合、送信器が搭載された擬似衛星数が増加するにつれ計測時間が増大する。また、逆 GPS 方式でオンオフ変調を用いる場合、測位対象が増加するにつれ計測時間が増大する。ここで、SS 変調方法による計測時間の変化を具体的に Fig. 4 を用いて説明する。Fig. 4 は、 n 個の送信器を用いた測位において必要な時間について、(1) オンオフ変調と (2) SS 変調の 2 つの変調手法で示している。測位結果を出力するまでの時間は、大きく分けて Fig. 4 (a) に示される超音波伝搬時間、Fig. 4 (b) の測位計算時間、Fig. 4 (c) の信号検出に必要な超音波信号の受信開始から終了までの時間、Fig. 4 (d) のつぎの測位計算に移行するために必要な受信側の制御時間で示される。

Fig. 4 (a) の TOF は、測位空間の大きさに依存し、400 cm 四方の測位空間の場合一度の測位において最大で 12 ms 程度となる。また、オンオフ変調は時分割処理で送受信器間距離を計測する必要があり、 n 個の送信器を用いる場合は Fig. 4 (1) の TOF_1 から TOF_n に示すように TOF の合計が必要となる。SS 変調は符号分割多重通信が可能で、測位環境内にあるすべての送信器から同時に超音波を送信し計測する。そのため、(a) の計測時間は Fig. 4 (2) の TOF_{max} に示す最も送・受信器間距離の長い TOF のみとなる。SPAN においては、測位計算を行なうソフトウェア側は一定時間待機し、ハードウェア上のレジスタに現れる TOF の値を読み込む。

Fig. 4 (b) に示される測位計算時間は、オンオフ変調の場合 1 つの送信器による計測ごとに TOF を算出し、測位計算を行なう。一方、SS 変調はすべての送信器からの TOF を集計したあと、まとめて測位計算が行なわれる。しかしながら、得られた TOF から測位結果を導出するまでの計算手法はオンオフ変調と SS 変調で差がないので、Fig. 4 (1) における測位計算時間の総和は Fig. 4 (2) のそれと同値となる。計算時間

はマイコンの処理能力に依存し、SPAN の処理時間では平均 65 ms 程度必要である。

つぎに、Fig. 4 (c) に示される信号長に関する時間について説明する。オンオフ変調による直接波超音波の場合は信号の到達を振幅でのみ判断するため、短いパルス状の信号を送信する。受信側では、パルス信号の先頭の到達をもって信号検出とするため、Fig. 4 (1) における (c) はほぼ 0 である。一方、SS 超音波は 511 chip 分の M 系列信号を送受信する。超音波信号の長さは 51 ms となり、SS 信号すべてを取得してはじめて相関値のピークが検出されるため、Fig. 4 (2) には 51 ms の時間が追加される。よって、送信器 1 器あたりの信号検出時間はオンオフ変調よりも劣る。

Fig. 4 (d) に示される時間について、オンオフ変調では 2 つ以上の超音波送信器がある場合、電波のチャンネルや信号によって超音波を送信する対象を指定し、1 器ずつ順番に超音波信号の送信を行なう。そのため、測位環境内に超音波を伝播させない一定時間を設け、超音波を送信する対象を切り替える必要がある。また、センサノードではネットワークを通した測位情報の処理が想定され、Fig. 4 (d) の測位番号の切り替え時間と命令再送の時間がさらに増大する。SPAN による屋内測位システムでは、TCP/IP を用いた HTTP 通信による POST によって測位開始命令を行なう。4 台の SPAN からネットワークにより TOF を集計する時間は、1 回の測位に平均 31 ms 必要であった。オンオフ変調による測位では、時分割で各送信器より送受信器間 TOF を求めるため、送信器個数の増加に比例してこの TOF 集計のための時間は増加する。しかしながら、SS 超音波測位では符号分割で各送信器より同時に超音波を送信することが可能なため、SS 信号のチャンネル数に満たない限り送信器の個数は計測時間に影響せず、平均 31 ms となる。

Fig. 4 から、 n 個の送信器を用いた 400 cm 四方の測位環境において SPAN を用いた場合、オンオフ変調、SS 変調で必要とされる処理時間 $T_{ook} [ms]$, $T_{ss} [ms]$ はそれぞれ以下のようになれる。

$$\begin{aligned} T_{ook} &= 12n + 65 + 31n \\ &= 43n + 65 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_{ss} &= 12 + 65 + 51 + 31 \\ &= 159 \end{aligned} \quad (3)$$

よって、400 cm 四方の測位環境において SPAN を用いた場合、(2) 式、(3) 式より、送信器数 n が 3 を超える場合は SS 変調を用いたほうが短時間で計測結果が得られる。これらの検討から、特に SPAN などの複合センサノードやマイコンを用いた低処理速度の環境下において、リアルタイム性を重視した複数の人・ロボットの測位を行なう場合は、SS 超音波を用いたほうが有利といえる。一方、より単純かつ狭い範囲で少数の測位対象を計測する測位システムにおいては、オンオフ変調のほうが有利であり、測位時間の観点からいえば

Fig. 4 Total measurement time of a positioning procedure

用いる環境やアプリケーションに応じてオンオフ変調のように振幅による信号検出と SS 変調を用いた信号検出を使い分けることが望ましい。一方で、ロボットがスムーズに移動しながら経路案内を行なうために、本研究では応答周期 100 ms 以内での自己位置認識を目標¹³⁾にしている。SS 変調による超音波測位の場合、GPS などの電波を対象としたシステムと同様に信号検出後に同期維持手法¹⁶⁾を用いることが可能であり、一度測位をしてしまえば以後 100 ms ごとの応答周期での連続的な計測が期待できる。

4. SS 変調による距離計測性能の変化

4.1 距離計測誤差の検討

まず、同一のハードウェア構成を用いて変調方法の差による距離計測可能範囲と誤差を比較するために、距離計測実験を行なった。実験では、Fig. 3 で示した 1 対の SPAN と超音波送信ユニットを用いて、設置距離 $d = 1.2\text{ m}$ から 15.6 m まで 1.2 m ごとにそれぞれ 5 回ずつオンオフ変調と SS 変調を用いた距離計測を行ない、その平均値をもとに各変調によって得られた結果を比較した。信号の電圧出力はともに 1.66 V p-p とした。また、信号の送信時間はオンオフ変調、SS 変調ともに 51.1 ms とした。

Fig. 5 は、(1) オンオフ変調による直接超音波と (2) SS 超音波それぞれの変調方式における 15.6 m までの距離計測結果を設置距離に対する誤差 d_{err} で示している。誤差 d_{err} は、システムの遅延によって発生する定常誤差を実際に得られた距離計測結果から引いている。Fig. 5 は、横軸に設置距離 d を縦軸に誤差 d_{err} をとっている。Fig. 5 の点線は、(1) オンオフ変調による超音波を用いて直接的に計測した場合の距離計測誤差を、実線は (2) SS 超音波を用いた場合の計測誤差をそれぞれ示している。また、Fig. 6 に 3.6 m の設置距離におけるオンオフ変調による受信データのうち、信号の到達部分を示す。Fig. 6 では、横軸にサンプル数、縦軸に 8-bit 幅のデジタル受信データをとっている。

Fig. 5 (1) の場合、超音波測位開始時に超音波信号が off から on に切り替わり、高い周波数成分が付与される。そのため、Fig. 6 に示すように受信した超音波にはアタック時間ができる。遠距離では信号が減衰するため、検波のためのしきい値に到達するまでの時間が遅延し、計測誤差は増加する。また Fig. 5 (1) に示すように、オンオフ変調による超音波を用いた距離計測は、信号減衰の影響により 13.2 m 以降の計測

Fig. 5 Average measurement errors d_{err} in distances modulated for (a) on-off keying and (b) spread spectrum from 1.2 m to 15.6 m

Fig. 6 Received sound data at the reception unit in case of OOK

結果を得ることができなかった。一方、Fig. 5 (2) SS 変調を用いた計測においても、Fig. 6 のデータとほぼ同様のアタック時間となった。しかし、帯域の狭い送信器と受信器による信号劣化があるにもかかわらず、オンオフ変調よりも良好な計測誤差と計測可能距離が得られた。Fig. 5 (2) では、M 系列 1 周期分の符号を送受信して相関演算した結果を距離計測に用いる。そのため、超音波のアタック時間において M 系列の自己相関値は減少するが、その後の信号は劣化しない。そのため、(1) の直接超音波と比較して遠距離における距離計測誤差に優位性が得られたと考えられる。また、Fig. 5 (2) は 10.8 m の計測を行なうことができなかったが、その他の地点においては SS 超音波の S/N 比の向上により 15.2 m までの距離計測が可能であった。 10.8 m の計測を行なうことができなかった原因としては、壁面・床面を反射した複数のマルチパス波の位相が一致し、信号の誤検出を招いたことが考えられる。しかし、今後受信ユニット内での信号処理によって誤検出の防止が期待できる。

4.2 距離計測における分散の検討

SS 超音波測位においては、相関演算の結果得られた相関値のピークをもとに送受信器間距離を求める。オンオフ変調より SN 比が向上して計測の頑健性が増加する一方、演算に用いるデータ数が増加することによって処理が複雑になり、雑音や反射波によって相関値ピークの分布が変化するため、距離計測結果が計測ごとに変化することが予想される。そこで、距離計測結果の分散について検討した。

Fig. 7 は、Fig. 2 の中心付近に送信器を設置して、SPAN1 における (1) オンオフ変調による超音波と (2) SS 超音波を用いた距離計測をそれぞれ 300 回ずつ行なったときのヒスト

Fig. 7 Histogram on the measurement distance obtained by (1) on-off keying and (2) SS modulation

グラムを示している。Fig. 7の横軸には、TOFを得るために用いている送信開始からカウントしたサンプル数を、平均値との残差で示している。また、Fig. 7の縦軸はそのサンプルを記録した回数を記している。実験の結果、Fig. 7(1)では3つの山ができ、山の頂上間の時間差はそれぞれおよそ $25 \mu\text{s}$ となった。この山の頂上間の周期は、搬送波周期に一致している。オンオフ変調による距離計測では、搬送波の振幅で信号を検出するため、振幅のピーク付近に確率分布が集中する。一方、SS超音波による実験結果 Fig. 7(2)は、超音波の振幅を直接信号検出には用いないため Fig. 7(1)ほどのまとまった山が見られない。

それぞれの実験結果について標準偏差を求めると、オンオフ変調による測定では $13.20 \mu\text{s}$ 、SS変調を用いた場合は $16.38 \mu\text{s}$ となった。SS変調の標準偏差は帯域の狭い汎用素子を用いたことで増加した。TOFは、 $1 \mu\text{s}$ あたりおよそ距離 0.3 mm に相当する。そのため、このばらつきを距離計測結果として表現するとオンオフ変調の標準偏差はおよそ 3.96 mm 、SS変調を用いた場合の標準偏差はおよそ 4.91 mm になる。SPANのオンオフ変調による測位では4つの距離計測誤差の平均値を求め、前後の測位データから測位のブレを補償し、すでにロボットの測位を実現している¹⁵⁾。SS変調においても同様の処理が可能であり、オンオフ変調とSS変調ともに人やロボットの測位のための距離計測のばらつきとしては十分許容範囲内と考えられる。

4.3 変調方法による汎用送信器と受信器の角度に依存した距離計測特性

通常のオンオフ変調を用いた測位の場合、送信器と受信器の幾何学的な位置関係が変化することでそれぞれの指向性によって信号強度が減少し、距離計測誤差が増加する^{4), 17)}。また、これまでのSS超音波を用いた測位に関する研究¹²⁾においても、帯域の広い送信器と受信器を用いたSS超音波の指向性による信号劣化が示唆されてきた。そこで、汎用素子を用いたSS超音波距離計測における送信器と受信器の相対的な角度が与える距離計測誤差の変化について、オンオフ変調との比較の観点から実験を行なった。実験では、送信器と受信器の角度変化によるSS変調とオンオフ変調の場合の距離誤差と計測可能範囲の差異について検討した。実験概要をFig. 8に示す。実験では、送信器と受信器を 2.0 m の距離で設置し、送信器、

Fig. 8 Experimental setting for distance measurement using a (Exp. A) transmitter and a (Exp. B) receiver tilted at a certain angle

受信器を片方ずつ角度変化させて距離計測を行なう。Fig. 8のExp. Aでは受信器を固定し、送信器の角度を変化させた実験を、Fig. 8のExp. Bでは送信器を固定し、受信器の角度を変化させた実験をそれぞれ示している。Fig. 8のExp. A, Exp. Bともに、正面方向に相対している状態を 0 deg. とし、 90 deg. まで 5 deg. ずつ変化させたときの相関値分布から得られる距離計測誤差を求めた。

Fig. 8に示した実験結果についてFig. 9に示す。Fig. 9に示す実験結果では、設置距離 2.0 m において正面方向に相対している状態での距離計測結果の誤差を 0 cm とし、角度変化に対する誤差の増加量をグラフ化している。また、Fig. 9 Exp. Aでは、密閉型素子である送信器を回転させた場合の実験結果、Fig. 9 Exp. Bでは、開口型素子である受信器を回転させた場合の実験結果をそれぞれ示している。さらに、それぞれのグラフ Exp. AとExp. Bは、横軸に送信器と受信器の角度、縦軸に距離計測誤差 d_A , d_B をそれぞれ示している。また、Fig. 9(1)には提案手法であるSS変調による距離計測結果、Fig. 9(2)には通常のオンオフ変調による距離計測結果を示している。

Exp. Aにおいては、指向性の広い密閉型素子を用いているため、(a) SS変調では 90 deg. と (b) オンオフ変調では 80 deg. での距離計測が可能であった。計測誤差について検討すると、Fig. 9(1) (2)ともに、送信器の角度が増加するにつれて距離計測誤差が増大している。しかしながら、特に 20 deg. 以上の角度においてSS変調の誤差増加量はオンオフ変調に比べて抑えられており、計測可能範囲も 10 deg. 向上した。一方、Fig. 9 Exp. Bにおける実験では、指向性の狭い開口型素子により、計測可能範囲は(1) オンオフ変調と(2) SS変調ともにExp. Aよりも 30 deg. 以上狭まった。また、Exp. Aよりは顕著ではないが、距離計測誤差はSS変調のほうが低い。

また、SS変調の距離計測精度は、距離計測における比較実験結果Fig. 5と似ており、同様の原因による測位誤差の変化が類推できる。すなわち、オンオフ変調では超音波信号の減衰により振幅の検出が遅れるため、遠距離での計測や幾何学的な位置関係によって指向性の影響を受けた場合、信号が減衰することで距離計測誤差が増加する。

SS変調においても開口型素子を用いた場合は、超音波の指向性による信号劣化によりSS超音波を用いても設置する

Fig. 9 Distance measurement error for angled transmitter and receiver obtained using (a) OOK and (b) SS modulation

方向への配慮がオンオフ変調と同様に必要である。しかし、SS変調は長い周期の信号を用いているため高い利得が得られやすく、信号減衰に比較的頑健である。そのため、これらのFig. 9に示す実験結果より、角度に依存する距離計測特性において、オンオフ変調よりSS変調が優れていることが示された。

5. オンオフ変調とSS変調手法を用いた測位性能の比較

5.1 測位実験の概要

つぎに、測位における計測範囲、計測時間、計測誤差を検討するためにFig. 2の環境を用いた測位実験を行なった。ただし、実験ではFig. 2の空間内から送受信器、送信ユニット、SPAN、WTM以外を撤去して送信器はスピーカスタンドで保持する。実験環境をFig. 10(a)(b)に示す。Fig. 10(a)は測位空間の全体の概略図である。またFig. 10(b)は測位空間を上部から見た平面図である。受信器は400 cm四方の空間の四隅に設置する。その受信器より時計回りにRx₁からRx₄まで名前を付ける。受信器は220 cmの高さに設置し、それぞれFig. 10(a)(b)の点線矢印に示す方向を音軸として、空間の中心である(200, 200, 100) cmの座標に向けている。

測位対象となる送信器は、 $h = 100$ cmの高さに設定し、(50, 50, 100) cm地点から(350, 350, 100) cmまで50 cm間隔、49地点に対して10回ずつ測位を行なう。送信器は上面に向け床面と垂直に設置している。

5.2 測位精度に関する考察

Fig. 11(1)(2)にオンオフ変調波、SS超音波を用いた測

Fig. 10 Experimental environment

位結果における誤差を示す。ここで測位誤差 e_{RMS} は実測で得た x, y, z 方向の各測位結果を用いて、

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2} \quad (4)$$

としている。ここでは、 x_m, y_m, z_m は実測の座標、 x, y, z は真値の座標を示している。Fig. 11(1), Fig. 11(2) 上部のスケールは計測地点での測位誤差の範囲を示している。たとえばFig. 11(1)の送信器座標(50, 50, 100) cmでは⑥と表示されていることから、測位誤差は5.00 cmから6.00 cmあることを示している。

実験の結果、各点の距離計測はオンオフ変調、SS変調それぞれにおいて距離計測不可能な点は存在しなかった。全地点の3次元測位誤差 e_{RMS} の平均は、Fig. 11(1) オンオフ変調の場合3.68 cm、Fig. 11(2) SS変調の場合1.65 cmとなった。また、オンオフ変調を用いた場合、遠距離での距離計測誤差が増大されるため、Fig. 11(1)の中心付近より3つの受信器からの距離が最も遠い測位環境の縁に向かって測位誤差が増大する。一方、遠距離において距離計測誤差が少ないFig. 11(2) SS変調による測位結果においては、Fig. 11(1)にみられる傾向がなく、比較的精度劣化の傾向が少ないため全地点で平均測位誤差5 cm以内で測位できた。

各地点10回の試行より正規分布の累積分布関数を求めたところ、平均誤差 e_{RMS} より2 cmの範囲内に入る確率は、Fig. 11(1) オンオフ変調における空間の四隅の誤差が大きい部分、すなわち(50, 350, 100) cmや(350, 50, 100) cm地点ではおよそ85%となった。また、それ以外の比較的精度の良いFig. 11(1) 中心部では e_{RMS} より2 cm以内に入る確率

Fig. 11 Positioning error with ultrasonic waves by (1) on-off keying and (2) SS modulation

は 99~100%となった。一方、SS ではすべての地点ではほぼ 100%の確率で 2cm 以内に収まり、ほとんどの地点で RMS 誤差 1cm 以内に収まる確率が 99%以上という結果を得た。また、Fig. 11 (1) (2) 双方の各点で、全体的に測位誤差が大きくなるほどばらつきは増加する傾向にあった。

これらの測位実験の結果から、SS 変調に不利な汎用素子を用いた場合においてもオンオフ変調に対する SS 変調の測位精度における優位性が示された。

6. おわりに

本論文では、筆者らがこれまで提案してきた汎用素子による SS 超音波を用いたリアルタイム屋内測位手法を実際にシステムとして構築し、同一のハードウェア、環境下での計測時間、測距・測位精度、計測可能距離について、搬送波をそのままパルス信号として用いたオンオフ変調と提案手法である SS 変調を用いた距離計測・測位実験の結果から検討した。これらの実験では、超音波屋内測位システムとして SPAN に筆者らが提案した SS 変調・復調手法を実装し、同条件にお

けるオンオフ変調と SS 変調での検討を可能とした。

SS 超音波測位では用いる信号が長く、オンオフ変調などのパルス変調による距離計測に比べて時間がかかる。一方、SS 変調は符号分割多重通信能力があるため、計測時間の観点からみれば、変調方式の優位性に一長一短がある。よって、測位空間のシステム構成、同時計測対象数によって使用する変調方式を選択すべきである。本論文では、一例として SPAN における測位に必要な計測時間の検討を行ない、送信器数が 3 を超える場合に SS 変調のほうがオンオフ変調に比べて計測時間が短いという結果が得られた。

まず、距離計測における検討では、SS 変調では超音波の帯域が拡大するため、帯域の狭い汎用素子を用いた場合に信号が劣化するにもかかわらず、SS 変調によって距離計測可能範囲が増加した。また、計測距離 12.0 m でおおよそ 10 cm の精度向上が認められ、遠距離での距離計測精度が大幅に改善された。さらに、送信器と受信器の幾何学的位置関係に依存した角度変化によって生じる距離計測誤差と計測可能範囲についての検討した結果、両方の変調方式で素子の指向性による信号の減衰があったものの、SS 変調方式を用いることで計測可能範囲が 5~10 deg. 拡大した。また、距離計測精度は SS 変調によって向上した。これらから、帯域の狭い汎用素子を用いても、SS 変調によって距離計測性能が向上することが示された。最後に、測位可能範囲と測位誤差について検討を行なうために測位実験を行なった。測位実験の結果、それぞれの変調方式を用いてすべての測位点で計測可能であった。全地点の測位誤差 e_{RMS} の平均は、オンオフ変調の場合 3.68 cm, SS 変調の場合 1.65 cm となった。オンオフ変調の場合は、遠距離での距離計測誤差と近距離での角度依存特性が悪化することから、特に、測位空間の 4 隅での測位誤差が増加した。一方、SS 変調を用いた場合比較的精度劣化の傾向が少なく、全地点での平均測位誤差は 5 cm 以内となった。

同様の測位環境下における同一ハードウェアを用いたこれらの実験結果から、SS 変調を用いることで超音波測位における測位精度が向上することが示された。また、広い空間における屋内測位においては、SS 変調によって計測可能距離が増加するため、環境に設置するセンサ数の削減が期待できる。一方、Gold 符号や Kasami 系列の適用や超音波へチャンネル情報を付加することで、センサが増加しても時分割計測をせずに測位が可能になることも期待できる。そのため、広い測位空間で多くの送信器を同時に使う場面ほど SS 変調による優位性が発揮されることが示された。

参考文献

- 1) G. Dedes and A.G. Dempster: Indoor GPS positioning: Challenges and opportunities, 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC-2005-Fall), 412/415 (2005)
- 2) I. Petrovsky, M. Ishii, M. Asako, K. Okano, H. Torimoto and K. Suzuki: Pseudolite Application for ITS, 電子情報通信学会技術研究報告, **104-230**, 13/18 (2004)
- 3) C. Lee, Y. Chang, G. Park, J. Ryu, S.G. Jeong, S. Park, J.W. Park, H.C. Lee and K. Hong: Indoor Positioning Sys-

tem Based on Incident Angles of Infrared Emitters, 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON2004, **3**, 2218/2222 (2004)

- 4) 大原, 山根, 伊与田, 崔, 久保田, 渡辺: 直接波超音波を用いたリアルタイム位置計測システムの評価, 第 37 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会講演論文集, **A-6**, 23/24 (2005)
- 5) 橋爪, 金子, 杉本: 位相一致法による正確な超音波位置認識手法とその特性, 電子情報通信学会論文誌, **J91-A-4**, 435/447 (2008)
- 6) M. Hazas and A. Hopper: Broadband Ultrasonic Location Systems for Improved Indoor Positioning, IEEE Trans. Mob. Compt., **5-5**, 536/547 (2006)
- 7) J.R. Gonzalez and C.J. Bleakley: Accuracy of Spread Spectrum Techniques for Ultrasonic Indoor Location, 15th International Conference on Digital Signal Processing, 284/287 (2007)
- 8) Y. Fukayama: Acoustical Positioning applying the Gold-sequence PRK, Proceeding of 38th International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 160/165 (2006)
- 9) M.C. Pérez, J. Ureña, A. Hernández, A. Jiménez, D. Ruiz, F.J. Alvarez and C. De Marziani: Performance Comparison of Different Codes in an Ultrasonic Positioning System using DS-CDMA, 6th IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, Budapest, Hungary, 125/130 (2009)
- 10) 山根, 伊与田, 崔, 久保田, 渡辺: 擬似乱数 M 系列によるスペクトル拡散超音波の距離計測への応用, 計測自動制御学会論文集, **39-10**, 879/886 (2003)
- 11) A. Yamane, T. Iyoda, Y. Chio, Y. Kubota and K. Watanabe: A Study on Propagation Characteristics of Spread Spectrum Sound Waves using a Band-limited Ultrasonic Transducer, Journal of Robotics and Mechatronics, **16-3**, 333/341 (2004)
- 12) 鈴木, 山根, 伊与田, 久保田, 渡辺: スペクトル拡散超音波を用いた屋内測位の計測精度, 計測自動制御学会論文集, **44-5**, 465/473 (2007)
- 13) 鈴木, 宇佐美, 伊与田, 渡辺: スペクトル拡散超音波による距離計測のためのリアルタイム相関演算, 計測自動制御学会論文集, **46-7**, 357/364 (2010)
- 14) 野中, 近, 松藤, 崔, 渡辺: 知的複合センサノード (SPAN) を用いた測位センサネットワークにおけるロボットの走行支援, 第 52 回自動制御連合講演会論文集 (CD-ROM), F5-3 (2009)
- 15) 鮫島, 斎藤, 萩原, 崔: SPAN による位置・固体識別機能を用いた案内ロボットに関する研究, 第 54 回自動制御連合講演会論文集, 830/831 (2011)
- 16) P. Misra and P. Enge: *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press (2001)
- 17) 萩谷, 伊与田, 崔, 久保田, 渡辺: 直接波超音波を用いた屋内測位システムにおける測位精度の向上, 第 40 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会講演論文集, **A-25**, 59/60 (2008)

伊与田 健 敏

1986 年東北大学工学部応用物理学専攻卒業。92 年同大学院工学研究科応用物理学専攻修了。現在、創価大学工学部准教授。画像による環境認識、超小型人工衛星、ならびに超音波による距離計測と測位システムなどの研究に従事。日本物理学会、電子情報通信学会の会員（工学博士）。

[著 者 紹 介]

鈴木 彰 真（正会員）

2006 年創価大学工学部情報システム学科卒業。2011 年同大学院工学研究科情報システム学専攻博士後期課程修了。現在、創価大学工学部助教、スペクトル拡散超音波による測位システム・反射波距離計測センサの研究に従事、IEEE の会員（工学博士）。