

スペクトル拡散音波を用いた屋内三次元測位システムに関する研究

A Study on Local Positioning System using Spread Spectrum Sound Waves

02D5103 山根 章生 指導教授 渡辺 一弘 教授

SYNOPSIS

In this thesis, a novel local positioning system (LPS) using spread spectrum sound waves has been proposed and investigated as an analogy for global positioning system (GPS) by satellites based on real-time positioning using electromagnetic waves. In order to evaluate propagation characteristics of spread spectrum sound waves, a series of experimental studies has been performed with analogous discussion of the GPS principle. Range measurements as an analogy for pseudorange measurements in GPS yielded 0.019% (corresponding to about 4mm in range distance) of range accuracy for a full-scale distance of 19.2m. High abilities in the capabilities of noise tolerance and signal discrimination in code division multiple transmission have been also ensured on longitudinal elastic sound waves. Severely band-limited experiments using all-purposed ultrasonic transducer from the practical standpoint improved accuracy using a longer M-sequence length by extending shift registers from 10-bit to 15bit. 3-D positioning experiments based on results mentioned above were successfully made demonstrating a positioning RMS error of 4.39cm (a horizontal RMS error of 1.88cm and a vertical RMS error of 3.96cm) in a rectangular room of dimension 4.0m(W) x 4.0m(L) x 1.5m(H).

Keywords: Global Positioning System, Local Positioning System, Spread Spectrum, M-sequence, Sound Wave.

1. 序論

近年、全天候、実時間、三次元測位を可能とする世界的な航法衛星システムとして GNSS (Global Navigation Satellite System) の計画が進められている。その一部となる既存の GPS では、衛星ごとに異なる擬似乱数系列を電波信号に割り当て、諸雑音に強いスペクトル拡散信号を用いることで、汎用コードによる単独測位精度で約 15m の屋外測位に実用的な高分解能を有している。その利用用途は、屋外における陸海空および、宇宙のあらゆる移動体や乗り物の位置や速度の計測にとどまらず地球科学全般に対し応用されつつある。

屋外と同様に、GPS の電波信号が極端に低下する屋内においても、物の位置認識が正確に出来れば、移動体の経路案内、行動認識、局所的な電動工具などの作業経路追跡など、種々の応用が期待できるであろう。そこで、屋内測位システムとして GPS 補強システム¹⁾や赤外線を用いたシステム²⁾、超音波パルスを用いたシステム^{3,4)}など多くの研究がなされている。これら測位システムのうち、信号伝播媒体として超音波を用いたシステムは、他のシステムに比べ、簡便なシステム構成で測位のための擬似距離を高精度に計測できること、また電波の利用が禁止される場所でも、安全・安心に利用できることから注目されている。しかしながら、音波固有の問題としてセンサ間や雑音による干渉に極端に弱いこと、いずれも時分割送信を用いており、測位対象が増えるにつれ、計測時間の増大を防ぐことが出来ない。そこで本論文では、スペクトル拡散信号を音波に適応することで音波干渉に耐性を持たせ、電波帯 GPS のアナロジーとして屋内超音波測位システム LPS (Local Positioning System) を提案した。これまでも音波干渉に対して、パルスコードや変調を用いた測距研究^{5,6)}がなされ、受信利得の向上による信号検出の改善が報告されているが、本論文のように GPS のアナロジーの構成を目的に、縦波弾性波である正弦波音波に擬似乱数系列で直接的な位相変調をかけ、理論的に精度評価をした例はない。本論文では、その研究過程において音波帯スペクトル拡散信号の評価として、測距精度、耐雑音性、符号分割多重通信能力について実験的検討を行い、屋内測位の実現性を明らかにしている。

本論文の内容は 7 章から構成されている。第 1 章は序論であり、第 2 章から第 6 章までが本論であり、第 7 章は結論である。第 2 章ではスペクトル拡散音波の信号と識別、第 3 章では音波帯スペクトル拡散信号を用いた擬似距離計測^{7,8)}、第 4 章では音波帯スペクトル拡散信号の特性評価、第 5 章では汎用超音波トランスデューサによる帯域制限の影響⁹⁾、第 6 章ではスペクトル拡散音波を用いた三次元測位について述べる。以下に、第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 6 章についてまとめる。第 3 章における広帯域送受信音源を用いた擬似距離計測では、音源間距離 19.2m の範囲において、誤差として平均で 0.019% (距離にして約 4mm) を得た。また、第 5 章における価格、サイズの観点で実用化に優れた汎用超音波トランスデューサを受信音源に用いた音源特有の帯域制限下における測距では、拡散符号系列を長く取り受信処理利得を高めることで、汎用音源が十分利用可能であることを明らかとした。さらに第 6 章における三次元測位の評価では、幅 4.0m、奥行き 4.0m、高さ 1.5m の直方体空間における信号受信範囲内で、RMS 測位誤差 4.39cm (水平方向 RMS 誤差 1.88cm、鉛直方向 RMS 誤差 3.96cm) での測位を実現した。

2. スペクトル拡散音波の信号と識別

2.1 実験システムの構成

スペクトル拡散音波のシステム構成図を Fig.1 に示す。本実験システムは、スペクトル拡散信号を生成し送り出す送信部、音波を受け取り信号の識別を行う受信部の二つに役割が分担されている。

送信部では、スペクトル拡散音波送受信用 PCI ボードの動作開始と同時に擬似乱数 M 系列を生成し、周期 T[us] の搬送波に変調周期 (チップ長) Tc[us] 毎に M 系列 1 ビットを掛け合わせ、スペクトル拡散信号の波形データを作成する。M 系列は、N ビット・シフトレジスタと適切なレジスタ位置に接続された複数の Tap で生成され、系列長 P[N] は $2^N - 1$ となる。位相変調により作成されたスペクトル拡散信号の波形データは、D/A 変換部でアナログ波形となり、広帯域スピーカ (Sony Super Tweeter) より音波として送信される。

受信部では、音波の送信と同時にマイクにより入力さ

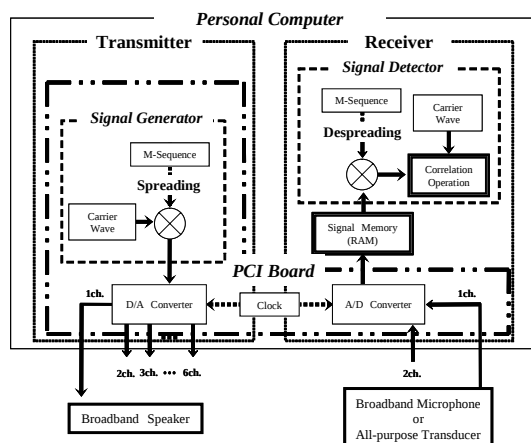


Fig.1 Block diagram of experimental setup.

れたアナログ波形が、A/D変換部でデジタル波形データに変換され、メモリに蓄えられる。ボードの動作終了後、メモリより波形データを読み出し、送信部で拡散に用いた同じM系列で生成したレプリカ信号との相関計算により、信号検出を行う。スペクトル拡散信号の処理はデジタルデータで行っており、また信号は8ビットの2進数で扱っているため-128から+127の間の値を取る。そのため相関値Cの最大値は $2^{14}/2$ となる。

D/A・A/D変換には同クロックを用いているため、送受信のタイミングは同期し、受信開始時刻から信号検出時刻の時刻差が音波伝播時間となる。音波伝播時間に音速を乗算することで、送受信間距離が得られる。信号のサンプリング周期には、搬送波周期の1/8、または1/4を用いているため、サンプリング周期 $T_s=T/8$ 、または $T_s=T/4$ が基本的な時間の単位となる。Fig.4,6のNs目盛りの横軸は時刻tに相当し、各時刻に対応するサンプリングの番号Nsを用いると $t=N_s \cdot T_s$ と表される。

本システムは、測位実験時には送信4チャンネル、受信1チャンネルを使用し、送信チャンネルをそれぞれ4種の擬似乱数系列に割り当てることで、オフライン処理ではあるが、測位環境における受信信号を得ることが可能である。

本研究では、スペクトル拡散信号にデータを乗せるための変調を行っていないため、スペクトル拡散通信分野で一般的に言われている拡散率を定義することはできない。そこで、チップ長に対する擬似乱数系列1周期の時間 T_p との比、 T_p/T_c で拡散率を定義する。ここで、 $T_p=T_c \cdot P[N]$ である。

2.2 送受信音源、およびスペクトル拡散信号の

拡散周波数帯域

スペクトル拡散信号のメインローブ帯域幅は、搬送波周波数 $f_{cr}(=1/T)$ [Hz]を中心に $2/T_c$ で表される。本研究では、搬送波に40.2kHzを用いるため、帯域幅は $T_c=3T$ に設定した場合26.8kHz ($=2f_{cr}/3$)、 $T_c=4T$ に設定した場合20.1kHz ($=2f_{cr}/4$)となる。

本実験で用いる広帯域スピーカの周波数特性は、20 - 100[kHz]において約-7dB程度の変動となっている。また受信音源（マイク）には、広帯域マイク（Bruel&Kjaer Condenser Electrostatic Microphone 4138）、または汎用超音波トランスデューサ（日本セラミック社製超音波センサ R40-16）を用いている。広帯域マイクの周波数

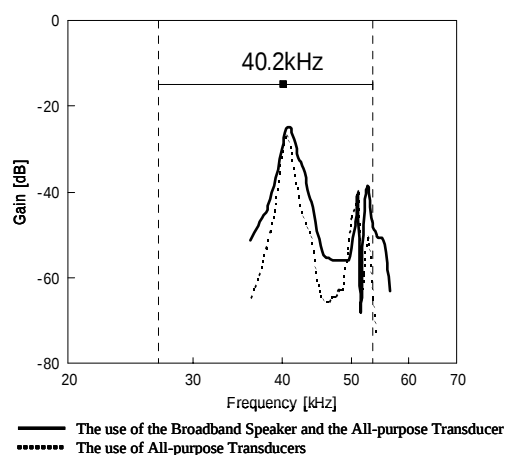


Fig.2 Frequency response experimentally obtained for two configurations of transmitter and receiver sources with a 30cm propagation path in air.

特性は、20 - 100[kHz]において約-1.5dB程度の変動を持っている。そのため、広帯域スピーカ、広帯域マイクの組み合わせは、本研究で用いるスペクトル拡散音波に対し、十分フラットな特性を持っていると言える。

Fig.2は実測した送信音源 - 空中伝搬路（30cm） - 汎用超音波受信器系の周波数特性である。搬送波周波数40.2kHz、 $T_c=3T$ に設定した場合のスペクトル拡散信号の帯域幅 ($=2f_{cr}/3$) を図中に示す。図中の実線は、送信音源に広帯域スピーカを用いた周波数特性、破線は送信音源にも日本セラミック社製超音波センサ T40-16（汎用送信器）を用いた周波数特性である。いずれも周波数35kHzまでは、信号受信利得が極端に低くなるため計測できなかった。帯域内における利得の変動は、約-40dBとなっている。送受信器共に汎用超音波センサを用いた周波数特性は、帯域制限のある送信器によってさらに周波数特性が重畳され、受信器のみに汎用マイクを用いた周波数特性より信号利得の高低差が大きいがわかる。

3. 音波帯スペクトル拡散信号を用いた擬似距離計測

一般的に測位には、少なくとも3つの送信源からの送受信間距離の計測が必要となる。ここでは、音波特有の伝播特性に加え、電波帯スペクトル拡散を用いた擬似距

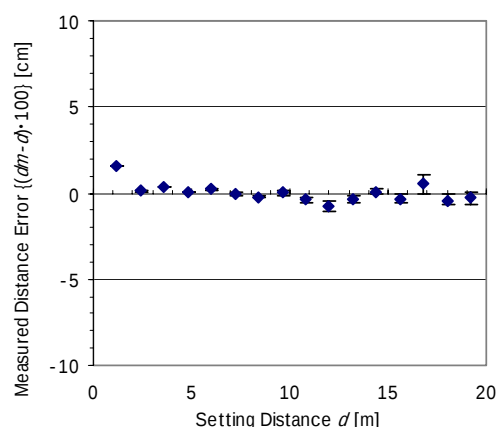


Fig.3 Measured distance errors with the 10-bit M-sequence by using the combination of the broadband speaker and microphone.

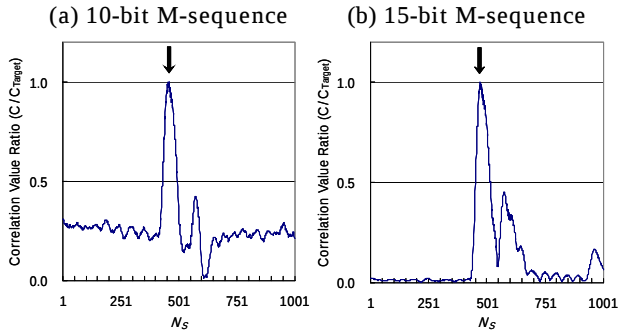


Fig.4 Resultant correlation values with the (a) 10-bit M-sequence and the (b) 15-bit M-sequence by using the broadband speaker and all-purpose transducer with a 4.8m propagation path in air.

離計測のアナロジーとして、音波帯スペクトル拡散信号を用いた測距精度について評価した。

送受信音源に一對の広帯域スピーカ・マイクを用い、スペクトル拡散音波を用いた測距実験を行った。送受信音源間の距離は、1.2 - 19.2m の範囲の任意 16 地点に設置し、各地点 5 回計測した。実験では、チップ長 $T_c=4T$ 、サンプリング周期 $T_s=T/8$ に設定し、スペクトル拡散音波の擬似乱数符号には 10 ビット・シフトレジスタを用いて得られる系列を用いている。

各送受信音源間の設定距離 $d[m]$ における計測値の平均値 $\bar{d}[m]$ の誤差 $\{(\bar{d}-d) \cdot 100\} [cm]$ を Fig.3 に示す。広範囲で高い測距精度を示し、計測距離 19.2m 以内において計測誤差の平均は 0.37cm となった。本研究で用いるスペクトル拡散音波では、チップ長 $T_c=4T$ より 1 チップ距離は 3.4cm ($=340 \cdot 4 \cdot 1/(40 \cdot 2 \cdot 10^3)$) となる。本実験結果は 1 チップ距離の 1/9 程度の誤差となり、電波帯スペクトル拡散信号を用いた測距精度の指標であるチップ長の $1/10^{10}$ に近い値が得られたが、音波を用いたことで伝播距離に対する減衰が大きくなったことや送受信音源系の応答特性の低下など、音波特有の影響を受けていると考えられる。

4. 汎用超音波トランスデューサによる

帯域制限の影響

一般的に電波帯スペクトル拡散では、処理利得 G_p は受信機側での逆拡散前後の SN 比で定義される。したがって、擬似乱数系列の系列長 $P[N]$ で表され $G_p=P[N]$ となる¹¹⁾。そこで、拡散系列である M 系列の系列長 $P[N]$ を長くすることで処理利得を上げ、帯域制限のある汎用超音波マイクを用いた測距精度について影響を確かめた。

実験では、チップ長 $T_c=3T$ 、サンプリング周期 $T_s=T/8$ に設定し、10 ビット・シフトレジスタ、15 ビット・シフトレジスタから得られた 2 種類の系列信号を用いる。10 ビット・シフトレジスタ (系列長 $P[10]$) と比較すると、15 ビット・シフトレジスタ (系列長 $P[15]$) を用いることで $30.1dB (=20 \cdot \log_{10} (P[15]/P[10]))$ の利得改善が期待できる。

送受信音源には一對の広帯域スピーカ、汎用マイクを用い、1.2 - 19.2m の範囲の任意 16 地点において、各地点 5 回の距離計測を行った。Fig.4(a)(b) は、それぞれ送受信音源間の設定距離 4.8m における受信波形に対して送信側と同じ M 系列・系列長 (a) $P[10]$ (b) $P[15]$ を用いて得られた相関関数の波形を示す。縦軸は相関値

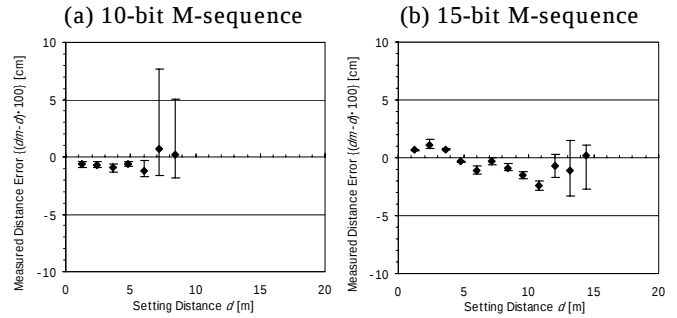


Fig.5 Measured distance errors with the (a) 10-bit M-sequence and (b) 15-bit M-sequence by using the broadband speaker and the all-purpose transducer.

C と信号の到達を示す捕捉点での相関値 C_{Target} の比 ($=C/C_{Target}$)、横軸 N_s は前述したサンプル位置の番号で、任意の位置で示している。図中の矢印は、捕捉点での相関値 C_{Target} を示す。Fig.4(b) $P[15]$ の相関波形は、(a) $P[10]$ のそれと比べ処理利得の向上によりノイズを低く抑えることができ、信号の捕捉を示す相関値ピークが明瞭であり、より顕著に表れているのがわかる。送受信音源間の設定距離 $d[m]$ に対する計測距離平均値 $\bar{d}[m]$ の誤差 $\{(\bar{d}-d) \cdot 100\} [cm]$ について、M 系列・系列長 $P[10]$ のスペクトル拡散音波による測距精度、 $P[15]$ のスペクトル拡散音波による測距精度を、それぞれ Fig.5 (a), (b) に示す。M 系列・ $P[10]$ のスペクトル拡散超音波は 9.0m 以降、 $P[15]$ のスペクトル拡散超音波は 15.0m 以降、信号の到達を示す相関ピークとノイズとの判別が困難となり実測できなかった。

計測可能な距離を含めた誤差の評価値として、フルスケール誤差 $\%FS[\%] (=|(\bar{d}-d)/L| \cdot 100)$ を定義する。ここで、 $L[m]$ は計測最大距離を示す。系列長 $P[10]$ での計測では $L=8.4m$ として $\%FS=0.084[\%]$ 、 $P[15]$ での計測では $L=14.4m$ として $\%FS=0.063[\%]$ となる。受信音源には広帯域マイクを、M 系列には系列長 $P[10]$ を用いた Fig.3 の距離計測では、 $L=19.2m$ として $\%FS$ は 0.019% となる。これらの誤差評価から帯域制限により計測範囲や測距精度は低下するが、市販の安価な汎用圧電素子型超音波マイクでも系列長を長くすることで処理利得を高め、広範囲に距離精度を上げることができると明らかになった。

5. 符号分割多重送信による三次元測位の評価

これまでに得られた知見を基に、障害物のない幅 4.0m、奥行き 4.0m、高さ 1.5m の直方体空間でスペクトル拡散音波を用いた屋内三次元測位を評価した。測位実験には、本システムにおける送信 4 チャンネル、受信 1 チャンネルを使用し、4 種の擬似乱数系列を各送信チャンネルに割り当てている。4 つの送信器は、それぞれ高さ 1.5m における直方体の天井面の四つ角に配置し、音軸を天井面の中心に向けた。受信器は、床面に対し平行な平面を、幅、奥行きをそれぞれ 0.50m 間隔に区分けして出来る交差点 49 地点に設置した。平面の高さは 0.50, 0.75, 1.00m とした。送信音源の音軸方向を基準に -14dB 以内の受信強度で得られる角度範囲 (± 30 度) を信号受信範囲と定義する。実験では、チップ長 $T_c=4T$ 、サンプリング周期 $T_s=T/4$ に設定し、10 ビット・シフトレジスタより得られる M 系列を用いた。また、送受信音源に

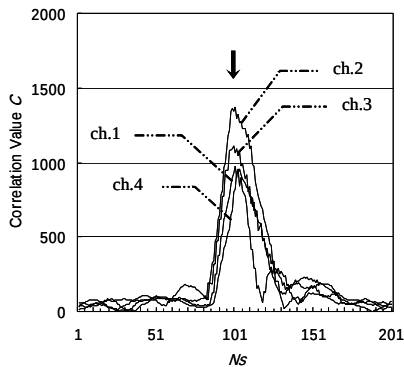


Fig.6 Resultant correlation values for four different M-sequence codes simultaneously launched from four speakers (ch.1, 2, 3 and 4), measured at the center of a 1.0m high plane.

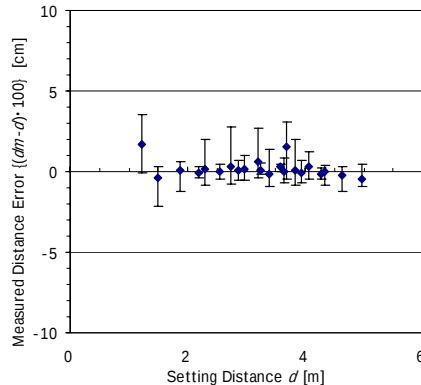


Fig.7 Measured distance errors taken within areas of a 1.0m high plane with strong signal strengths.

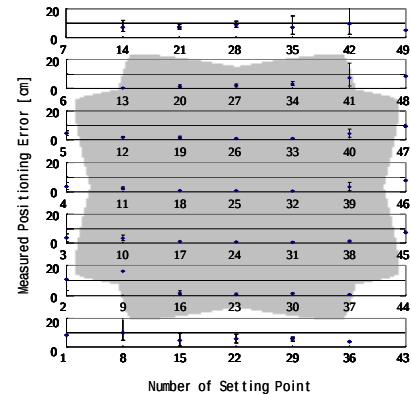


Fig.8 Measured positioning errors at 1.0m height. The gray area represents the place with strong signal strengths.

は広帯域スピーカ・マイクを用いた。

高さ 1.00m における計測結果を Fig.6, 7, 8 に示す。Fig.6 は各チャンネルの送信器から等距離に位置する平面の中心地点において受信した信号に対し各信号の識別を行った相関関数の波形である。縦軸は相関値 C 、横軸 N_s は前述したサンプル位置の番号で、任意の位置で示している。図中の矢印は捕捉点での相関値 C_{Target} を示し、いずれの信号も干渉なく同じ位置で検出できていることがわかる。Fig.7 は信号受信範囲内における測位に必要な擬似距離計測の測距誤差である。横軸は送受信音源間距離 d [m]、縦軸は距離計測値の平均値 dm [m] の誤差 $\{(dm-d) \cdot 100\}$ [cm] を示している。測距誤差の平均値は 0.57cm となり、 $L=4.97$ m とすると %FS は 11.47% となる。この測距精度は、Fig.3 の測距実験に比べ 2 倍のサンプリング周期を用いたことや、送受信音源の指向特性など音波固有の影響を受けているものと考えられる。Fig.8 は高さ 1.0m における各計測地点での測位誤差である。各段の横軸は計測地点の番号、縦軸は真値との誤差距離を示している。図中の灰色の領域は、信号受信範囲内で、かつ測位に最低限必要な 3 つの信号を受信できる範囲である。RMS 測位誤差は、範囲内で 3.48cm、全体で 5.79cm となり、Fig.8 に示すように範囲内では比較的安定した測位が可能であることがわかる。直方体空間の全計測地点で RMS 測位誤差は、範囲内で 4.39cm、全体で 5.56cm となり、いずれにおいても cm 単位での測位を可能とした。全計測地点における測位誤差を水平方向、鉛直方向の二つの成分に分けると、水平方向の RMS 誤差は、範囲内で 1.88cm、全体で 1.98cm、鉛直方向の RMS 誤差は、範囲内で 3.96cm、全体で 5.20cm となり、鉛直方向の誤差が比較的大きいことがわかる。これは全送信器を同じ高さに設置したため、鉛直方向の分解能が低下したものである。今後、送信音源の音軸方向や、GPS における送信機位置による測位誤差評価の指標である DOP (Dilution Of Precision) を考慮することで、さらに高い測位精度が期待できる。

6. 結論

本研究では、近年急速に発展してきた世界規模の実時間測位システムである電波による GPS の原理をそのまま音波に置き換え、音波間干渉を排除し符号分割多重通信を行い、室内においても精度の高い測位システムを提

案し実験的検討を行った。一連の実験では、実時間測位の GPS における擬似距離計測のアナロジーとして捉えて検討を加え、スペクトル拡散音波を用いた測距精度を定量的に評価し、音源間距離 19.2m のフルスケール誤差として 0.019% (距離にして約 4mm) を得た。汎用送受信音源による帯域制限下では、拡散符号である擬似乱数系列の系列長を伸ばすことで受信処理利得を高め、十分利用可能であることを明らかとした。さらに三次元測位実験では、安定して信号受信できる範囲において RMS 測位誤差 4.39cm (水平方向 RMS 誤差 1.88cm、鉛直方向の RMS 誤差は 3.96cm) を得た。本研究で得られた多くの知見は、音波計測を利用した多くの研究において雑音耐性や信号識別性に優れたスペクトル拡散音波の利用が可能であることを示唆し、スペクトル拡散音波を用いた屋内三次元測位の設計、開発に必要な指針を与えるものである。

参考文献

- 1) D.H.Yun, et al: Concept and Experimental Results of Pseudolite-based Indoor Navigation, GPS Symposium 2001, 73/81 (2001)
- 2) R. Want, et al: The Active Badge Location System, Trans. On Information Systems, Vol.10 No.5, 42/47 (1992)
- 3) A. Ward, et al: A New Location Technique for the Active Office, IEEE Personal Communications, Vol.4 No.5, 42/47 (1997)
- 4) M. Minami, et al: DOLPHIN: A Practical Approach for Implementing a Fully Distributed Indoor Ultrasonic Positioning System, Proc. of the 6th International Conference on UbiComp2004, 347/365 (2004)
- 5) 丹沢 他: 屋外移動ロボットのための雑音に強い超音波センサ, 日本ロボット学会誌, Vol.15 No.4, 542/549 (1997)
- 6) 棚田 他: 実数直交擬似乱数系列を用いた超音波測距方式, 電子情報通信学会スペクトル拡散通信研究会, SS87-27, 63/71 (1987)
- 7) A.Yamane, et al: Development of Range Sensing System using Spread Spectrum Sound Waves, Proc. of ICAR2001, 671/675 (2001)
- 8) 山根 他: 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)
- 9) A.Yamane, et al: A Study on Propagation Characteristics of Spread Spectrum Sound Waves using a Band-limited Ultrasonic Transducer, JRM Vol.16 No.3, 333/341 (2004)
- 10) 日本測地学会編著: GPS - 人工衛星による精密システム -, 26, 日本測量協会 (1989)
- 11) トランジスタ技術編集部編: 電波による無線データ伝送技術, 35 (1999)