

スペクトル拡散音波を用いた屋外位置測位における精度向上方法

—基地局法を用いた2次元位置測位システム—

○椎木友朗（京都大学） 山本一哉（シブヤ精機） Slamet Widodo, Naing Min Than（京都大学）
菊池日出男，柳田径吾（システムワット） 中土宜明（新産業創造研究機構）
近藤直，小川雄一（京都大学）

Method of Improving Measurement Accuracy for Outdoor Positioning System using Spread Spectrum Sound –2D Position Measurement System by using Basement Method-

* T. Shiigi (Kyoto Univ.), K. Yamamoto (Shibuya Co., Ltd.), S. Widodo, N. M. Than (Kyoto Univ.),
H. Kikuchi, K. Yanagida (SystemWatt Co., Ltd.), Y. Nakatsuchi (NIRO)
N. Kondo, Y. Ogawa (Kyoto Univ.)

Abstract— GPS is widely used as a positioning system for an automatic vehicle. But the GPS devices are typically so expensive. Therefore we used the positional measurement method combined with sound wave technique for developing a low cost positioning system. The problem of this method is measurement error with change of velocity due to wind in outdoor. In this study we are trying to compensate velocity change by using base station method; which works like a differential-GPS. This paper describes 2D measurement result by using base station method in outdoor.

Key Words: Positioning System, Spread Spectrum Sound, Wind

1 はじめに

中山間地域の棚田や段畑の法面は急傾斜であり、刈払機による人力での草刈作業は重労働かつ危険な作業である。この作業を軽労化すべく小型除草ロボットの開発（農林水産省委託プロジェクト研究「農作業の軽労化に向けた農業自動化・アシストシステムの開発」）が進められている。本プロジェクトでは、急斜法面（斜度45度以下）に対応可能で、人の判断を介さずに無人作業が行えるロボットを開発し、断続的に運用できるシステムを構築することが目標である。

本論文では、小型除草ロボットの要素技術となる現在位置測定システムについて述べる。開発中の小型除草ロボットの刈幅は800 (mm)を目標としている。刈残しがないように走行するためには、往復刈りをするときに刈幅800 (mm)をオーバーラップしなければならない。このオーバーラップの幅は、位置測位精度および走行精度に依存する。またこの幅が広いと作業効率が低減する。そのため、位置測位精度の目標を±100 (mm)以内と定めた。屋外における航法システムとして良く用いられているものにGPSがある。農業分野でも、トラクタ、田植機、コンバインの航法システムとして用いられている^{1),2),3)}。しかし、上記位置測位精度を満たすためにはRTK-GPSのような高価なシステムが必要である。さらに、中山間地域では、山影になり観測できる衛星の数が足りずに測位できない場合もある。その他にもレーザーや画像を用いたものがあり研究開発が進められているが、高価であること、太陽光による光環境の変化の影響があることなどが課題となる。本研究では、安価で高精度な測位システムを実現するために、M系列符号によるスペクトル拡散音波を用い

た測位システムを開発している。音波を用いた手法は屋内で用いられることが多く、数(cm)単位の測位が可能で、スピーカやマイクなど安価なデバイスで構築ができる特徴がある。また、M系列符号により変調された音波を用いることで雑音耐性を向上できる^{4),5)}。しかし、この手法を屋外で用いる場合、風による音速変化が生じることによる測位誤差が無視できない。この誤差を補償する方法として基地局法を開発した。本論文では基地局法による誤差補償方法、装置、補償精度と問題点について述べる。

2 基地局法による誤差補償機能を有するスペクトル拡散音波を用いた測位システム

2.1 スペクトル拡散音波

本システムでは、周期1023のM系列符号を疑似乱数系列として用い、周波数24 (kHz)の正弦波を搬送波としてM系列符号で位相変調(BPSK)したものをスペクトル拡散音波として使用した。基地局用スペクトル拡散音波と位置計測用スペクトル拡散音波は符号を変えることで識別する。チップレートは12 (kcps)、サンプリング周波数は96 (kHz)、サンプリングビットは16 (bit)を用いた。Fig.1にスペクトル拡散音波の波形を示す。

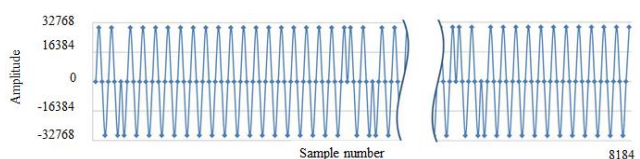


Fig. 1 Spread Spectrum Sound Wave

2.2 位置測位システムと補償方法

Fig. 2, 3 に位置測位システムと補償方法の概要を示す。ロボットの作業範囲の4隅に超音波シリコンマイクロホン (Knowles Electronics 型式: SPM0404UD5) と送信機から構成されるポール(P1, P2, P3, P4)を設置する。また, 作業範囲外の位置に基地局用のスピーカ(B) (Fostex 型式: FT28D) を設置する。測位対象にはスピーカ(M), 受信機, サウンドインターフェイス (ローランド(株) 型式: OCTA-CAPTURE), PC(CPU: Windows XP, CPU: Core 2 Duo)を設置する。

次に信号と処理の流れについて述べる。測位対象のPCで測位用と基地局用のスペクトル拡散音波とトリガ信号を作成し同時に出力する。測位用スペクトル拡散音波は, サウンドインターフェイス, アンプ, 測位用スピーカから送信され4隅のマイクロホンで受信する。受信された音波信号は送信機を通して測位対象の受信機に送られる。受信機に送られた音波信号はサウンドインターフェイスを通してPCに入力される。トリガ信号は, インパルス波を使用し, 音波の送信時刻を通知するために用いる。そのため, サウンドインターフェイスの出力端子から入力端子にケーブルで直接繋ぐ。PC内では, 音波信号の相関処理, 伝搬時間推定, 位置計算を行う。まず, 10 (ms)毎に録音バッファからデータを取り出しトリガ信号の検出を行う。トリガ信号を検出後, 240 (ms)分のデータを蓄積する。データが溜まった時点で相関処理を行う。相関ピーク値を検出しその時刻を音波の受信時刻とする。音波の受信時刻からトリガの受信時刻を引くことで音波の伝搬時間 Δt_{Mi} (s)を求め, 式(1)のように各ポールまでの距離 l_{Mi} (m)を算出する。

$$l_{Mi} = V \times \Delta t_{Mi} \quad (1)$$

ただし, i はポール番号, V (m/s)は音速($331.5 + 0.61 \times T$), T (°C)は温度を示す。各ポールの位置 $P1(x_1, y_1, z_1)$, $P2(x_2, y_2, z_2)$, $P3(x_3, y_3, z_3)$, $P4(x_4, y_4, z_4)$ を既知としたとき, 式(2)からスピーカの位置 $M(x_M, y_M, z_M)$ を推定できる。

$$l_{Mi} = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2 + (z_M - z_i)^2} \quad (2)$$

ただし, 式(1)で用いた音速 V は風速の影響を考慮していない。次に基地局法を用いた風による音速変化の補償方法について述べる。前述のように測位用スピーカと同じタイミングで基地局スピーカからスペクトル拡散音波を送信する。送信された音波は, 4隅のマイクロホンで受信され, 上記同様にPCで音波の伝搬時間を求める。基地局と各ポールの位置は既知とし基地局とポールとの距離を l_{Bi} (m)とおくと, 求めた伝搬時間 Δt_{Bi} (s)から式(3)により各ポール方向の音速を推定できる。

$$V_{Bi} = l_{Bi} / \Delta t_{Bi} \quad (3)$$

さらに, 音速 V_{B1} (m/s)と V_{B2} (m/s)の逆方向の音速 V'_{B1} (m/s), V'_{B2} (m/s)を式(4), (5)のように推定する。

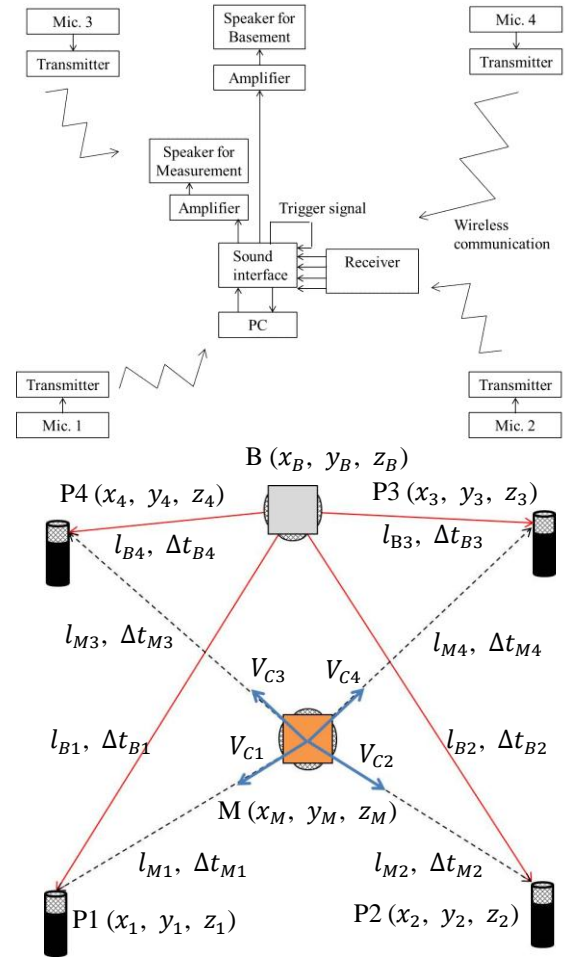


Fig. 2 Outline of positioning system

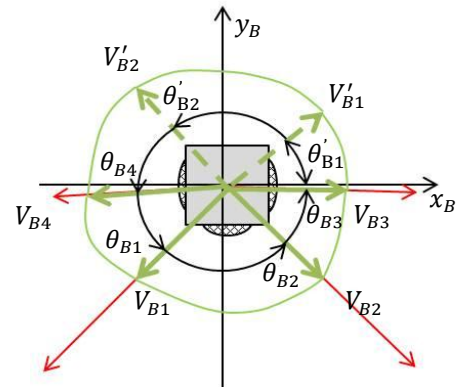


Fig. 3 Obtained sound velocity by basement

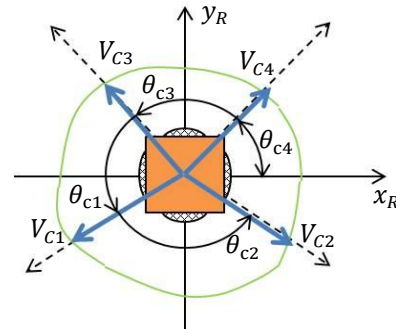


Fig. 4 Sound velocity for calculating distance

$$V'_{B1} = V - (V_{B1} - V) \quad (4)$$

$$V'_{B2} = V - (V_{B2} - V) \quad (5)$$

基地局を中心とし、 x_B 軸 ($\overline{P1P2}$ の方向を正とする)を 0 (rad.), 反時計回りを正としたとき式(3), (4), (5)から求めた各音速の方向は,

$$\theta_{Bi} = \begin{cases} \pi/2 & (y_i > y_B) \text{ and } (x_i = x_B) \\ 3\pi/2 & (y_i < y_B) \text{ and } (x_i = x_B) \\ \tan^{-1} \frac{y_i - y_B}{x_i - x_B} & (x_i > x_B) \text{ and } (y_i \geq y_B) \\ \tan^{-1} \frac{y_i - y_B}{x_i - x_B} + \pi/2 & (x_i < x_B) \text{ and } (y_i \geq y_B) \\ \tan^{-1} \frac{y_i - y_B}{x_i - x_B} + 2\pi & (x_i > x_B) \text{ and } (y_i \leq y_B) \\ \tan^{-1} \frac{y_i - y_B}{x_i - x_B} + \pi & (x_i < x_B) \text{ and } (y_i \leq y_B) \end{cases} \quad (6)$$

となる. 求めた 6 方向の音速以外は, 角度に線形に変化すると仮定し, 式(7)のように全方向(2次元平面)の音速を推定する. ここでは例として, 音速 V_{B3} が第 4 象限にある場合を考える.

$$V_{ci} = \begin{cases} V_{B3} + (V'_{B1} - V_{B3}) \frac{(\theta_{ci} + 2\pi - \theta_{B3})}{(\theta_{B1} + 2\pi - \theta_{B3})} & (0 \leq \theta_{ci} < \theta'_{B1}) \\ V'_{B1} + (V'_{B2} - V'_{B1}) \frac{(\theta_{ci} - \theta_{B1})}{(\theta'_{B2} - \theta_{B1})} & (\theta_{B1} \leq \theta_{ci} < \theta'_{B2}) \\ V'_{B2} + (V_{B4} - V'_{B2}) \frac{(\theta_{ci} - \theta_{B2})}{(\theta_{B4} - \theta_{B2})} & (\theta_{B2} \leq \theta_{ci} < \theta_{B4}) \\ V_{B4} + (V_{B1} - V_{B4}) \frac{(\theta_{ci} - \theta_{B4})}{(\theta_{B1} - \theta_{B4})} & (\theta_{B4} \leq \theta_{ci} < \theta_{B1}) \\ V_{B1} + (V_{B2} - V_{B1}) \frac{(\theta_{ci} - \theta_{B1})}{(\theta_{B2} - \theta_{B1})} & (\theta_{B1} \leq \theta_{ci} < \theta_{B2}) \\ V_{B3} + (V'_{B1} - V_{B3}) \frac{(2\pi - \theta_{ci})}{(2\pi - \theta_{B3})} & (\theta_{B3} \leq \theta_{ci} < 2\pi) \end{cases} \quad (7)$$

ここで θ_{ci} は求めたい音速の方向を示す. 前段で推定された測位点 $M(x_M(t-1), y_M(t-1), z_M(t-1))$ を用いて測位点に対する各ポールへの方向を式(8)を用いて求める.

$$\theta_{ci} = \begin{cases} \pi/2 & (y_i > y_M) \text{ and } (x_i = x_M) \\ 3\pi/2 & (y_i < y_M) \text{ and } (x_i = x_M) \\ \tan^{-1} \frac{y_i - y_M}{x_i - x_M} & (x_i > x_M) \text{ and } (y_i \geq y_M) \\ \tan^{-1} \frac{y_i - y_M}{x_i - x_M} + \pi/2 & (x_i < x_M) \text{ and } (y_i \geq y_M) \\ \tan^{-1} \frac{y_i - y_M}{x_i - x_M} + 2\pi & (x_i > x_M) \text{ and } (y_i \leq y_M) \\ \tan^{-1} \frac{y_i - y_M}{x_i - x_M} + \pi & (x_i < x_M) \text{ and } (y_i \leq y_M) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)により求めた角度 θ_{ci} を式(7)に代入することで, 補償された音速 V_{ci} を求める. 補償された音速を用いて, 各ポールまでの距離および測位位置を計算することで, 風による誤差を補償した位置を推定する. Fig.3に基地局法により得られる2次元平面の音速の概念を示す. 赤い矢印は基地局から各ポールへの方向, 実線の緑の矢印は式(3)により求まる各ポール方向の音速, 破線の緑の矢印は式(4), (5)より求まるポール 1, 2の逆方向の音速, 緑の曲線は2次元平面の音速を示す. Fig.4に

各ポールと測位用スピーカとの間の距離計算に用いる音速を示す. 破線の矢印は測位用スピーカから各ポールへの方向, 青い矢印は式(7), (8)より求まる風による音速変化を補償した音速を示す.

3 実験

実験圃場は Fig. 5 に示すように稲の刈取り後の田で行った. 風速は平均 1.3 (m/s), 最大 2.9 (m/s)であった. 測定範囲は Fig. 6 に示すように 40 (m) × 40 (m) の範囲内を 10 (m) 間隔で合計 9 ケ所の測定を行った. 真値として, トータルステーション (SOKKIA 型式: SRX5X) による計測結果 $T(x_T, y_T)$ を用い, 式(9)により評価した.

$$2D \text{ Error} = \sqrt{(x_M - x_T)^2 + (y_M - y_T)^2} \quad (9)$$

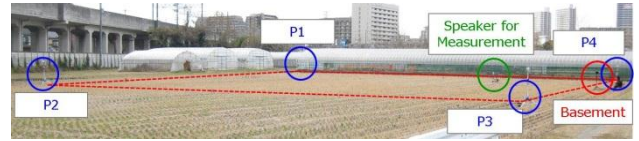


Fig. 5 Experiment field

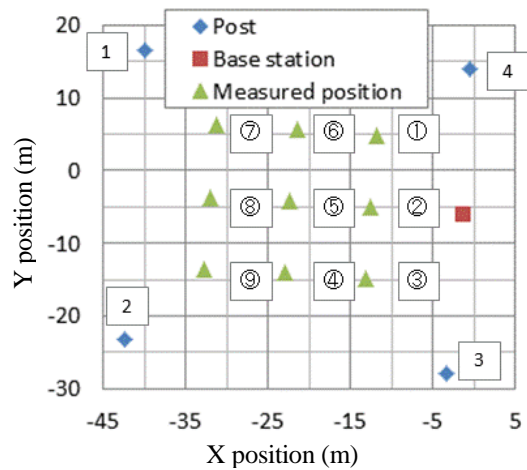


Fig. 6 Measurement area and points

4 結果と考察

実験結果を Fig.7 に示す. 青い点(NonComp)は補償無しの平均誤差, 赤い点(Comp)は補償有の平均誤差を示す. 位置番号 1 以外は補償有の方が誤差は小さくなるのが分かる. また, エラーバーは誤差の標準偏差を示している. 標準偏差は補償することで全ての位置で小さくなるのが分かる. 全体では, 補償無の測定誤差は平均 103 (mm), 標準偏差 28 (mm), 最小 5 (mm), 最大 205 (mm)であったが, 基地局による補償により測定誤差は平均 57 (mm), 標準偏差 17 (mm), 最小 9 (mm), 最大 150 (mm)と精度の向上を確認した. 位置番号 1 だけ, 補償無しの平均誤差が補償有より下回った. Fig.8 に位置番号 1 のときにポール 2 で受信された基地局音波の相関波形を示す. 正ピークの直後

に疑似ピークが現れ、疑似ピークの方が相関値は高かったため、疑似ピークを正ピークとして検出し伝搬時間の測定に誤差が生じた。そのため、補償された音速に誤差が生じ、距離計算で誤差が増大したと言える。また、Table 1 に測定位置と各ポールまでの距離測定誤差を示す。表から基地局法による補償(Comp.)を行うことで、全てのポール間の距離測定精度が向上していることが分かる。しかし、ポール 1, 2 に比べ 3, 4 の測定精度は悪かった。今回は、作業範囲に基地局を設置させなかった。そのため、音速 V_1 , V_2 は基地局から出力する音とは逆方向になり、式(3)のように直接音波の伝搬時間を用いて計算することはできない。そのため、逆向きの音速は、風の影響も逆になると仮定して式(4), (5)のように求めた。そのため、ポール 3, 4 の間の距離測定精度はポール 1, 2 と比較して向上しなかった。測位精度を向上させるためには配置したポールの中央に基地局を設置する方が温度勾配も同時に補償できるためよいと考えられる。また、測定用スピーカがポストに近づくと、測定用スピーカから出力される音波が基地局の音波を掻き消してしまい計測ができないときがあった(遠近問題)。音波の周波数を分ける、送信タイミングを変える、干渉キャンセラ処理を導入するなど改善が必要である。

Table 1 Measurement error of distance between measurement speaker and each Mic. (mm)

		P1	P2	P3	P4
Comp.	Average	13.4	28.8	69.5	41.3
	SD	21.6	25.2	23.5	28.8
Non Comp.	Average	67.6	44.0	103.1	66.4
	SD	39.2	30.2	43.0	36.3

5 おわりに

本研究では、基地局法による音速変化の補償を行うことで、屋外での測位精度を平均 57 (mm) の誤差まで向上させた。今後の課題として、遠近問題を緩和し測位範囲を拡大することが重要となる。また、今回試作したシステムでは、基地局のスピーカは有線で繋いでいる。実際に運用するためには、有線でないことが望ましい。そのため、基地局のスピーカから音を出力するタイミングを作る同期方法の確立が必要となる。

参考文献

- 1) 近藤 直, 門田充司, 野口 伸: 農業ロボット(I)-基礎と理論-, 149 - 154, コロナ社(2004)
- 2) 飯田訓久, 山田裕介: GPS とジャイロを用いた無人コンバインによる稲収穫, 農業機械学会誌, 68(6), 138 - 143(2006)
- 3) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾出男: DGPS を利用した農用移動ロボットのナビゲーション, 農業機械学会誌, 62(6), 144 - 153(2000)
- 4) Lewis, G. : Development and Characterization of an Acoustic Rangefinder, Information Science Institute (ISI), the University of Southern California (USC), 2000
- 5) 山根章生, 伊与田健敏, 崔龍雲, 久保田譲, 渡辺一弘: 疑似乱数 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

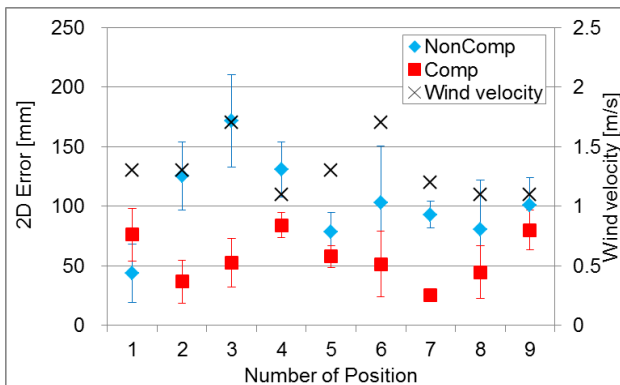


Fig. 7 Result

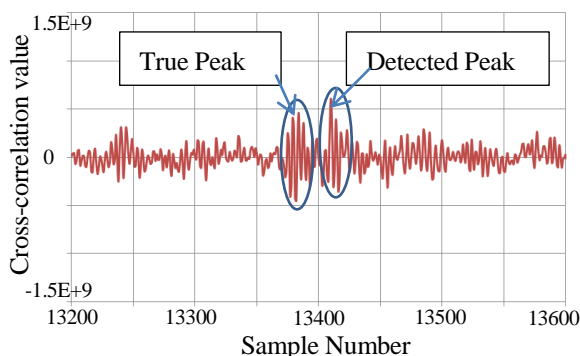


Fig. 8 Cross-correlation value of miss detection