

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, 相互送受信法, ドップラー法を用いた風による音速変化の補償方法の概要—

○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 –Outline of Corresponding Method of Variation of Sound Velocity by Wind using Basement Method, Mutual Receive & Trans Method and Doppler 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, mutual receive & trans method and Doppler method. This paper describes outline of three compensate methods.

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. 急斜面 (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位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 系列符号を用いて作成す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, スピーカーやマイクなど安価なデバイスで構築できると報告されている. 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. 現在, 上記誤差を改善するために, 基地局法, 相互送受信法, ドップラー法の 3 つの音速変化補償方法の開発を行っている. 本講演では, この 3 つの補償方法の概要について説明する.

2 位置測位システムの概要

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. チップレートは 12 [kcps] とした. 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.

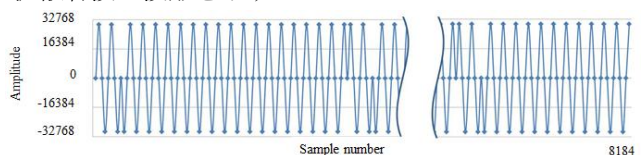


Fig. 1 Spread Spectrum Sound Wave

2.2 位置測位システム

Fig. 2 に位置測位システムの概要を示す。ロボットの作業範囲の4隅にマイクロホンと送信機で構成されるポールを設置する。ロボットには、スピーカ、受信機、プロセッサを搭載する。ロボットのスピーカより送信されたスペクトル拡散音波は、ポールのマイクロホンに受信され、ポールの送信機からロボットの受信機に送信される。ロボットの受信機で受信した信号は、プロセッサ内で相関処理を行い、相関ピーク検出することで各ポールのスペクトル拡散音波の受信時刻を推定する。送信時刻から受信時刻を引くことで各ポールまでの伝搬時間を算出し、伝搬時間に音速を掛けることで距離を求める。各ポールの位置を既知としたとき、下記の式からスピーカの位置を推定できる。

$$l_{Mi} = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2 + (z_M - z_i)^2} \quad (1)$$

ここで、 i はポール番号、 l_{Mi} [m]はスピーカと各ポールまでの距離、 (x_i, y_i, z_i) は各ポールの座標、 (x_M, y_M, z_M) はスピーカの座標を示す。

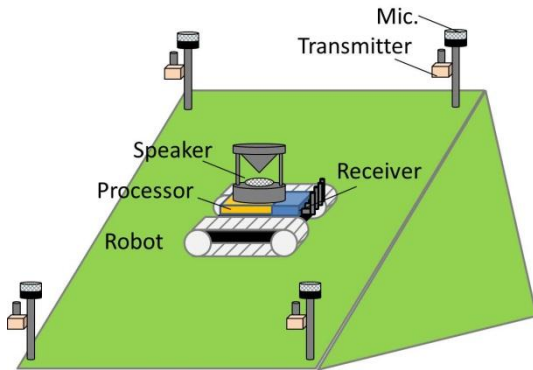


Fig. 2 Outline of positioning system

3 音速変化の補償方法

3.1 基地局法(Fig.3)

基地局とポール間の距離 D_b [m]が既知であるとき、基地局とポール間の音速 V_c [m/s]は、基地局とポール間の音波の伝搬時間 Δt_b [s]を測定することで下記の式から求めることができる。

$$V_c = D_b / \Delta t_b \quad (2)$$

距離測定点のスピーカとポストの距離 D_m [m]を、式(2)より求めた音速を用いて式(3)のように計算することで、時々刻々と変化する音速を補償する。

$$D_m = V_c \times \Delta t_m \quad (3)$$

ただし、 Δt_m [s]は測定用スピーカとポスト間の音波の伝搬時間とする。

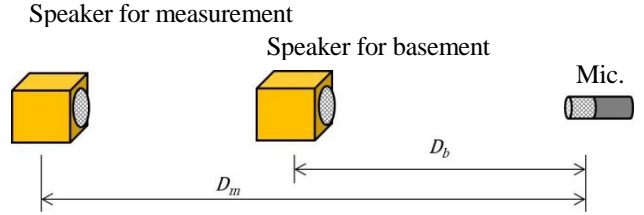
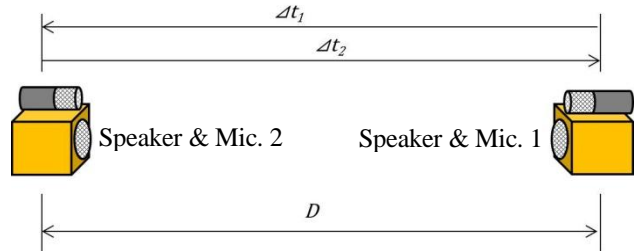


Fig. 3 Basement method

3.2 相互送受信法(Fig.4)

スピーカとマイクを一体化し、両方のスピーカから音を送信し、各マイクで音を入力する。スピーカ1とマイク2間の音伝搬時間 Δt_1 [s]、スピーカ2とマイク1間の音伝搬時間 Δt_2 [s]から補償音波伝搬時間 Δt_c [s]を求める(式(4))。温度 t [°C]を測定して音速を求めて、式より距離 D [m]を求める。



$$\begin{aligned} \Delta t_c &= (\Delta t_1 + \Delta t_2) / 2 \\ V &= 331.5 + 0.61 \times t \quad (4) \\ D &= V \times \Delta t_c \end{aligned}$$

Fig. 4 Mutual receive & trans method

3.3 ドップラー法

風の速度を V_w [m/s]とし、Fig.5 のようにマイクとスピーカを配置し、スピーカから周波数 f の音波を放射する。この時、音波は速度 V_w で移動する微粒子に散乱反射し、式(5)、(6)のようなドップラー現象によりマイクの受音する周波数 f'' は、式(7)となる。ここで f' は微粒子に衝突した時の音の周波数である。

$$f' = \frac{(V - V_w \cos \theta_1)}{V} f \quad (5)$$

$$f'' = \frac{V}{(V - V_w \cos \theta_2)} f' \quad (6)$$

$$f'' = \frac{(V - V_w \cos \theta_1)}{(V - V_w \cos \theta_2)} f \quad (7)$$

この式から f 、 f'' 、 V 、 θ_1 、 θ_2 が既知もしくは測定可能であれば、風速 V_w を求めることができることが分かる。この原理により風速を推定する手法がドップラーソーダ法⁶⁾である。この手法を本位置測位システムに応用する場合、スピーカとマイクの位置関係は定まら

ないため、 θ_1 、 θ_2 は一定値にならない。また、ドップラーソダ法では、指向性の鋭いスピーカおよびマイクを用いて、狭い空間のドップラーシフトを観測する。しかし、本システムでは、ポールに設置するマイクおよびスピーカは測位範囲内のあらゆる位置や向きで音波を送受信する必要があるため無指向性であることが望ましい。そこでマイクは、 $0[^\circ] < \theta_1 < 90[^\circ]$ 、 $0[^\circ] < \theta_2 < 90[^\circ]$ の範囲内の音を受信していると考えてみる。式(7)を用いて、 θ_1 と θ_2 の違いにより受信する音波の周波数を計算した結果を Fig.6 に示す。音速 V を $340[\text{m/s}]$ 、送信音波の周波数 f を $24[\text{kHz}]$ とし、風速の条件を $1, 5, 10 [\text{m/s}]$ とした。Fig.6の各グラフはx軸が θ_1 ,y軸が θ_2 ,z軸が受信周波数を表している。風速が大きくなると受信音波の周波数帯域の幅が広がることが分かる。このことから、受信音波の周波数帯域幅を計測することで風速を推定できることが期待できる。

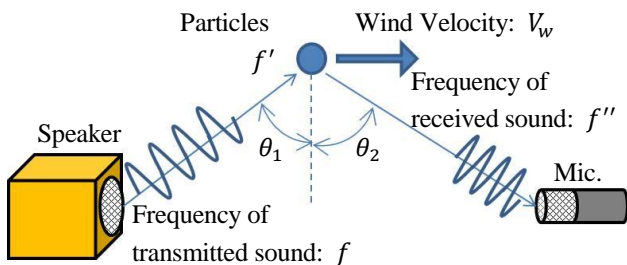


Fig.5 Doppler Sodar

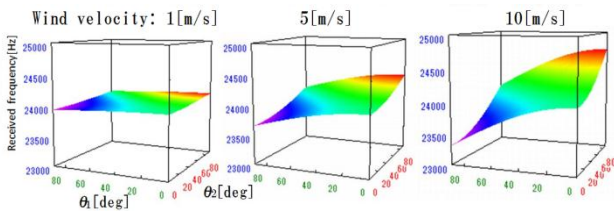


Fig.6 Frequency change by wind

4 実験方法

4.1 基地局法

実験装置の概要を Fig.7 に示す。本装置はPCから作成した音波をサウンドインターフェイス（ローランド（株）型式：OCTA-CAPTURE）を通して、アンプ（（株）サイズ 型式：KAMA BAY AMP 2000 Rev.B）で増幅させて、スピーカ（Fostex 電気（株） 型式：FT28D）を利用して測定点（MS Speaker）および基地局（BS Speaker）から音波を出力する。一方で、出力した時間を知るために、Trigger signalとしてPCにも信号を送る。出力した音波は、超音波シリコンマイクロホン（Knowles Electronics 型式：SPM0404UD5）により入力し、 2.4GHz の帯域で通信を行う無線デバイスを使用して、マイクからPCへ送信し、距離を計算する。

マイク、基地局、測定点には実際の風速と温度を測定するためには超音波風向風速計（SECOM（株） 型

式：SE-8371-UA01）と温度計（日置電気（株） 型式：3670）を配置する。この風向風速計の精度は風速が $\pm 0.3 [\text{m/s}]$ 、風向は $< 3 [^\circ]$ 、温度計の精度は $0.0 \sim 35.0 [^\circ\text{C}]$ の範囲で $\pm 1.0 [^\circ\text{C}]$ 、 $35.1 \sim 70.0 [^\circ\text{C}]$ の範囲で $\pm 1.0 [^\circ\text{C}]$ である。

実験場所は香川県善通寺市の近畿中国四国農業研究センター内の試験場である。今回は風速 $0.5 \sim 2.5 [\text{m/s}]$ の環境下で実験を行った。基地局はマイクから $D_b = 25 [\text{m}]$ の地点に配置、測定用スピーカをマイクから $D_m = 1, 10, 20, 30, 40, 50 [\text{m}]$ で測定を行った。

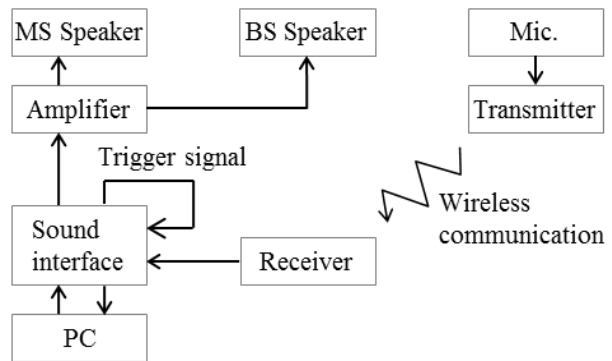


Fig.7 Experimental device for base station method

4.2 相互送受信法

実験装置の概要を Fig.8 に示す。本装置も基地局法の装置と同様にPCから作成した音波をサウンドインターフェイス、アンプ、スピーカを通して送信する。マイクで受信された音波は無線デバイス、サウンドインターフェイスを通してPCに入力される。

スピーカの位置に風速計と温度計を設置した。温度の値は、温度計から読み取った値を用いた。実験場所は香川県善通寺市の近畿中国四国農業研究センター内の試験場である。風速 $0.5 \sim 2.5 [\text{m/s}]$ の環境下で実験を行った。測定距離は、 $2, 10, 20, 30, 40, 50 [\text{m}]$ とした。

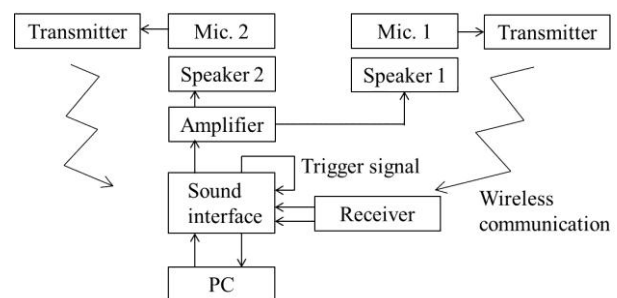


Fig.8 Experimental device for mutual receive & trans method

4.3 ドップラー法

ドップラー法の原理を確かめるために以下の実験を行った。Fig.9に装置の概要を示す。スピーカとマイクとの距離を $1 [\text{m}]$ となるように設置する。扇風機はスピーカ後方に設置し、風をスピーカからマイク方向に

吹かせる。風速は、0, 2.23, 2.99, 4.46 [m/s]の4条件で行った。各風速条件下で、周波数24 [kHz]の正弦波を送信し、FFT(Fast Fourier Transform)を用いて受信音波の周波数解析を行った。

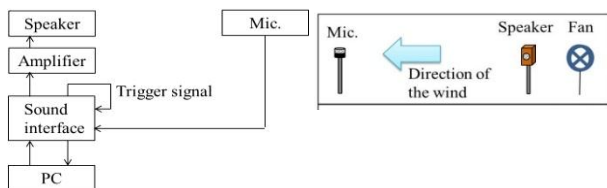


Fig.9 Experimental device for Doppler method

5 実験結果

5.1 基地局法

実験結果を Fig.10 に示す。図中の条件である Method 1 は音速として計測した温度 T だけで求めた結果 ($V=331.5+0.61t$)、Method 2 は計測した温度 t [°C]と、風速計で測定した風速 V_w を用いて計算した音速 ($V=331.5+0.61t+V_w$) を利用した結果、Method 3 は基地局から求めた音速 V_c (式(2))を使用した結果を示す。各条件における詳細の測定誤差の値は Table 1 から Table 3 に示す。

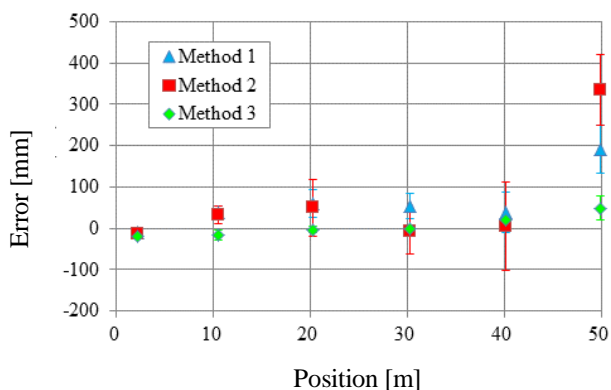


Fig.10 Experimental result

Table 1 Result of method 1

Position [m]	Error [mm]			
	Average	Min	Max	SD
1	-9.1	-21.0	4.8	6.6
10	39.7	18.8	77.6	13.4
20	59.8	8.6	111.3	33.8
30	59.8	8.6	111.3	33.8
40	39.5	-40.7	120.2	48.4
50	191.8	76.4	306.6	57.7

Table 2 Result of method 2

Position [m]	Error [mm]			
	Average	Min	Max	SD
1	-13.9	-34.2	2.3	8.9
10	31.5	-0.4	90.9	21.8
20	50.3	-54.1	154.4	68.2
30	-6.8	-99.2	119.5	55.2
40	5.0	-214.7	155.6	106.2
50	335.1	71.2	519.6	85.9

Table 3 Result of method 3

Position [m]	Error [mm]			
	Average	Min	Max	SD
1	-18.3	-28.9	-4.5	6.5
10	-16.7	-49.6	21.6	13.1
20	-3.2	-29.2	20.5	8.3
30	-1.4	-46.1	34.2	10.6
40	19.2	-20.7	56.3	14.0
50	49.1	3.9	134.9	28.5

この結果より、補償無時の Method 1 において最も平均測定誤差が大きい 50 [m]地点において、基地局を使用することで平均測定誤差 191.8 [mm] から 49.1 [mm]、標準偏差が 57.7 [mm]から 28.5 [mm]と測定精度が向上した。Method2 の結果では、Method 1 と比較して逆に平均測定誤差が 335.1 [mm]、標準偏差が 85.9 [mm]と測定誤差が大きくなった。この原因として一つ目に、風速計と PC の同期が正確にできていないことにより、厳密な測定時の風速が測定できていないことが挙げられる。二つ目に基地局方式ではマイクと基地局間の全体の風、温度の影響を受けた音速を得られるのに対して、風速計では各点での風速を測定している。そのために、風速計の値で補償を行っても、精度が低くなったと考えられる。

5.2 相互送受信法

実験結果を Fig.11 に示す。点は平均誤差、エラーバーは測定誤差の標準偏差を示している。実験中の風速は、0.5~2.5 [m/s]であった。本手法を用いることで、全体の平均誤差 23.8 [mm]を -6 [mm]に、誤差の標準偏差 21.4 [mm]を 6.9 [mm]に改善した。Table 4 と 5 に補償した時としないときの詳細な結果を示す。特に計測距離が長いほど改善される割合が高い。計測距離 40 [m]では、平均誤差 65.3 [mm]を 7.2 [mm]に、誤差の標準偏差 39.7 [mm]を 14 [mm]に改善している。しかし、計測距離 50 [m]では、近くのスピーカの音により、遠くのスピーカから送信される音が掻き消され計測ができなかった。

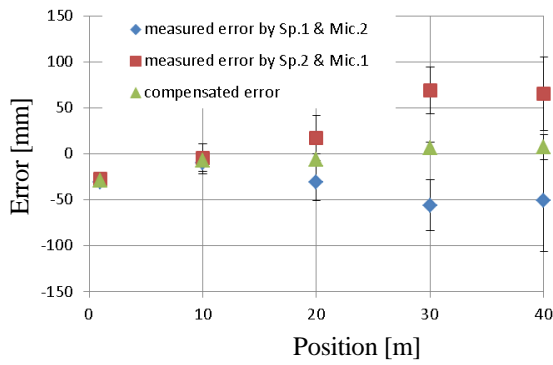


Fig.11 Experimental result

Table 4 Result of compensation

Position [m]	Error [mm]			
	Average	Min	Max	SD
1	-29.4	-35.9	-26.8	2.7
10	-7.3	-18.1	5.7	5.1
20	-6.8	-23.0	6.3	7.0
30	6.5	-4.1	25.2	6.1
40	7.2	-13.7	26.6	14.0

Table 5 Result of no compensation

Position [m]	Error [mm]			
	Average	Min	Max	SD
1	-27.7	-30.4	-23.1	1.7
10	-4.5	-29.0	44.1	15.0
20	17.1	-30.3	83.1	24.6
30	68.9	-11.4	113.0	25.8
40	65.3	-0.9	141.8	39.7

5.3 ドップラー法

実験結果を Fig.12 に示す。Fig.12 より、風速が大きくなるほど受信音波の周波数の幅が広がるのが分かる。パワースペクトラムが -50 dB となる位置での周波数の幅と風速の関係を Fig.13 に示す。線形近似すると決定係数が 0.996 となり非常に高い相関を示すことが分かった。つまり、受信周波数の幅を計測することで、スピーカとマイク間の正確な風速を計測できる可能性がある。求めた風速 V_w [m/s] を用いて、式(8)から風速による音速変化を補償できる。

$$V_c = 331.5 + 0.61t + V_w$$

ただし、 t [°C] は温度とする。

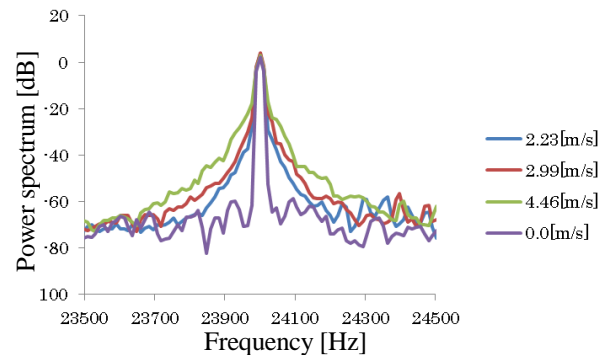


Fig.12 Frequency property of received sound

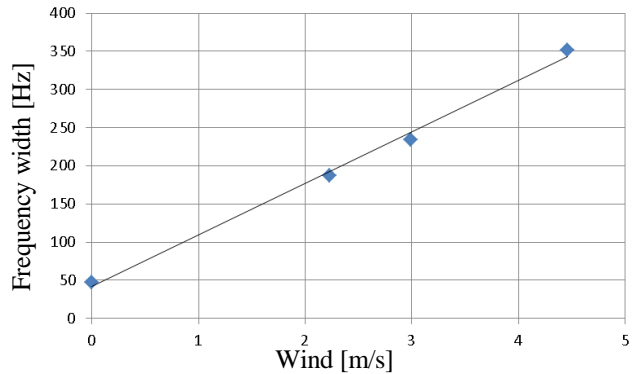


Fig.13 Relationship between wind and frequency width

6 まとめ

本論文では、風速による音速変化を補償するための 3 つの方法について概要を述べ、どの方法も補償性能を示唆する基礎的な実験結果を示した。まとめとして、各方式の利点と今後の課題を述べたい。

基地局法は、音波の伝搬時間から音速を推定する方法であるため風の影響だけでなく温度の影響も補償できる。課題となることは、まず、測位用スピーカがポールに近づいた時に、基地局からの音波を掻き消してしまう遠近問題を緩和することにある。周波数帯域を変える、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の検討が必要である。また、音速は、風が吹いている場合や温度勾配がある場合、向きによって音速が異なる。本実験では距離測定であったため問題ないが、2次元以上の位置を測定する場合にどのように音速を推定するかが課題となる。

相互送受信法は、基地局法と異なり、測位点とポールの間を音波が相互に送受信するため、その間の音速変化を直接補償でき、2次元平面及び3次元空間を測位する場合でも問題とならない。また、基地局法はポール及び基地局の位置を正確に知る必要があるが、相互送受信は、測位点とポールの間だけでなく、ポール同士の間隔も求めることができるため、自動で設置位置を測定できる可能性がある。課題は、基地局と同様に遠近問題が上げられる。

ドップラー法は、上記2つの方法と異なり、追加するハードウェアが少ないことが利点である。また、相関処理を高速化するためにFFTを応用すれば、相関処

理とドップラーによる風速推定を同じ処理内で行える可能性がある。課題としては、まず、より多くのデータを取得し、風速推定のアルゴリズムを作成することである。また、風向が分からないため順風か逆風かが分かるような簡易な風向計の開発が必要となる。

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, 久保田謙, 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
- 6) 福田 剛志, 他: 「風力発電立地調査のための簡易型ドップラーソーダの基礎的検討」, 日本音響学会講演論文集, 3-5-5, 1067/1068 (2007)