

音速情報を必要としない位相差法にもとづく 2次元超音波風速計測

Two-dimensional ultrasonic airspeed measurement based on phase-shift method without requiring knowledge of the speed of sound

○高田 知英*, 熊谷 皓史**, 佐藤 淳***,

○ Tomohide Tanaka*, Hirofumi Kumagai**, Atsushi Satoh***,

*岩手大学大学院, ** (株) 東北フジクラ, ***岩手大学,

*Graduate school of Iwate University, **TOHOKU FUJIKURA LTD., ***Iwate University

キーワード： 風速測定 (wind velocity measurement), 超音波風速計 (ultrasonic anemometer), 位相差法 (phase shift method), 位相検波 (phase detection),

連絡先： 〒 020-8551 岩手県盛岡市上田 4 丁目 3-5 岩手大学 理工学部 システム創成工学科
佐藤 淳, Tel.: 019-621-6404, Fax.: 019-621-6404, E-mail: satsushi@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

近年, ドローンが野外で利用される機会が増えている^{?)}. ドローンの活用法として, 空撮, 災害救助, 輸送物流, インフラ点検, 農薬散布, 測量などがあげられる.

しかしドローンは元々ほぼ無風の屋内で飛行させるホビー用途から発展したもので, 対気速度や迎え角などの風速情報を得るための計測装置を備えていない. そのため風のある屋外で飛行させた場合 Vortex Ring State などの危険な飛行状態に陥る可能性を避けることができない. そこで本研究ではドローンの対気速度計測装置への応用を目指して新たな超音波風速計測方法を提案し, 原理確認のための実験を行った結果を報告する.

2. 原理

2.1 風速計の種類

風速計にはピトー管, 熱線式風速計, 風杯型風速計, 超音波風速計などが存在し, 下表のような特徴がある.

Table 2.1 風速計の特徴

	特徴
ピトー管	高速域で計測が可能 低速域で計測できない
熱線式風速計	温度の影響を受けやすく, 使用前に校正が必要 ちりやほこりで壊れやすい
風杯型風速計	風に対する応答性が悪い 風向は別途風向計が必要
超音波風速計	低速域で風速も風向が計測が可能

ドローンに搭載することを考えたとき、搭載する条件として以下が上げられる。

- 風速ゼロからの計測が可能（ピトー管では不可）
- 屋外で利用したい（熱線風速計では不可）
- 風向計測（将来的には3次元）が必要（風杯型では不可）

以上より、超音波風速計を選択する。

2.2 超音波風速計の測定原理

2.2.1 パルス時間差法

超音波で風速を計測する方法として、パルス時間差法、位相差法、シンギングアラウンド法など様々な方法がある。現在、風速の計測方法として、パルス時間差法が多く使用されている^{?)}。

パルス時間差法は Fig.?? のように、ある一定の距離 L に対向させた2つのトランスデューサを使い、パルス波を送受信の方向を交互に変化させてパルス波の伝播時間 T_1, T_2 を計測することで、気温によって変化する音速 C を計測することなく、風速を (??) 式より計測することができるという優れた特徴がある。

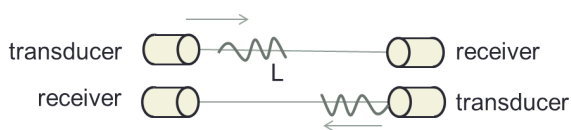


Fig. 2.1 パルス時間差法

$$T_1 = \frac{L}{C - V} \quad (2.1)$$

$$T_2 = \frac{L}{C + V} \quad (2.2)$$

$$V = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (2.3)$$

しかし、送信側から超音波パルスを送信した後、それが受信側で受け取られるまでは待ち時

間となり次のパルスを送信することができない。また高い速度域までの計測を行おうとするとさらに待ち時間が長くなり、一般的には計測周期は 100[ms] 程度を必要とする。一方、ドローンの制御周期は 20[ms] 程度で、従来の超音波風速計をドローンの飛行制御に使うには計測周期が長く不向きである。

2.2.2 位相差法

位相差法は Schotland^{?)} が音速と位相差による風速計測の提案を行った。Fig.?? のように、連続的に送信側から受信側に超音波を発信する。

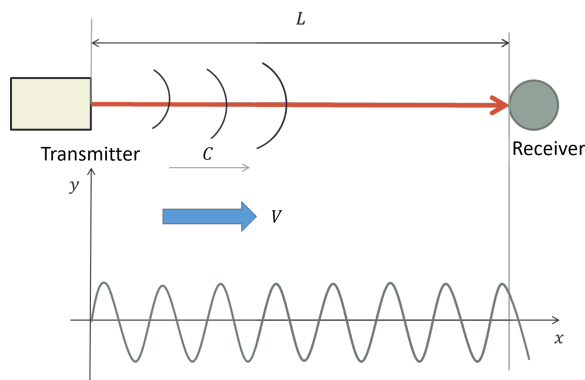


Fig. 2.2 位相差法

送信側から発信する超音波 y_T を次式で表す。

$$y_T = A_T \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

超音波は送受信間距離 L を音速 C と風速 V の合成速度で伝播するため、受信された信号 y_R には位相遅れが生じる。

$$y_R = A_R \sin(\omega t - \Delta\theta) \quad (2.5)$$

また、送信側と受信側の位相差 $\Delta\theta$ は次式で表される。

$$\Delta\theta = \frac{\omega L}{C + V} \quad (2.6)$$

観測した y_R の情報から、実際に計測できる位相差は $-\pi$ から π までの範囲になり、これを $\Delta\psi$ とおくと

$$\Delta\theta = \Delta\psi + 2\pi k \quad (2.7)$$

と表される． k は送受信機間距離 L を超音波の波長で割り，小数点以下を切り下げて得られる整数値である．

3. 提案する超音波風速計

3.1 座標軸の設定

トランスデューサの送信側と受信側を Fig.?? のように設置し，3つの計測軸を構成する．

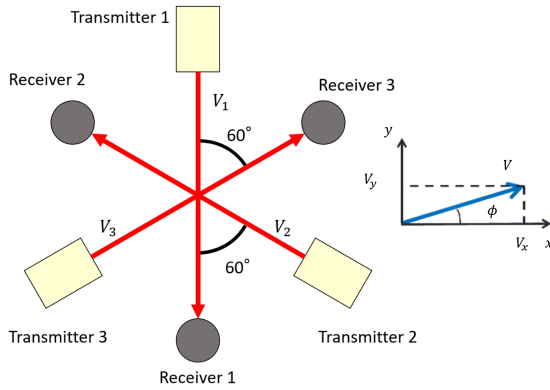


Fig. 3.3 超音波センサの座標軸

風は x, y 平面内を吹いているものとする． V_1, V_2, V_3 は，軸方向における風速 (送信側から受信側に向かって正) を表す．直交座標の x 軸と風速がなす角を ϕ とする．

3.2 計測手法

各軸方向の風速成分は (??) 式を変形して用いる．

$$V_1 = \frac{\omega L}{\Delta\psi_1 + 2\pi k} - C \quad (3.8)$$

$$V_2 = \frac{\omega L}{\Delta\psi_2 + 2\pi k} - C \quad (3.9)$$

$$V_3 = \frac{\omega L}{\Delta\psi_3 + 2\pi k} - C \quad (3.10)$$

また，計測軸の幾何学的関係より

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0 \quad (3.11)$$

が成り立ち，音速 C について解くと

$$C = \frac{\omega L}{3} \left(\frac{1}{\Delta\psi_1 + 2\pi k} + \frac{1}{\Delta\psi_2 + 2\pi k} + \frac{1}{\Delta\psi_3 + 2\pi k} \right) \quad (3.12)$$

となり， $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2, \Delta\psi_3, k$ の情報から音速が算出可能である．さらに (??) 式から軸方向の風速 V_1, V_2, V_3 が求まる．

軸方向の風速 V_1, V_2, V_3 と V_x, V_y との関係は以下のようなになる．

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (3.13)$$

$$V_x = V \cos \phi \quad (3.14)$$

$$V_y = -V_1 \quad (3.15)$$

$$V_2 = V \cos \left(\phi - \frac{5}{6}\pi \right) \quad (3.16)$$

$$V_3 = V \cos \left(\phi - \frac{\pi}{6} \right) \quad (3.17)$$

(??)~(??) 式より，風向 ϕ と風速 V は次式で求まる．

$$\phi = \arctan \left(\sqrt{3} \frac{V_3 + V_2}{V_3 - V_2} \right) \quad (3.18)$$

$$V = \sqrt{V_1^2 + \left(\frac{V_2 \cos \phi}{\cos \left(\phi - \frac{5}{6}\pi \right)} \right)^2} \quad (3.19)$$

4. 実験器具および校正

4.1 超音波センサ間距離 L と波数 k

位相差の計測範囲は $-\pi < \Delta\psi < \pi$ であるため，無風状態で位相差 $\Delta\psi$ が 0 に近づくような L を選択することにする． $t = 15[^\circ\text{C}]$ のとき， $25[\text{kHz}]$ の超音波の波長の整数倍になるような距離 L を Table?? にまとめる．

L が小さすぎるとトランスデューサやその支柱が風速計測に与える影響が大きくなる．また

Table 4.2 波長の整数倍となるような L ($t = 15[^\circ\text{C}]$)

k	$L[\text{m}]$
5	0.06811
6	0.08173
7	0.09535
8	0.1090
9	0.1226

大きすぎると超音波が減衰し計測精度に悪影響がある。そのため今回は $k = 7$ の時の距離を参考に、トランスデューサ間の距離を $L = 0.1[\text{m}]$ とする。

4.2 トランスデューサ

風速の計測レンジを広げるには利用する超音波の周波数が低い方が有利である。市販の超音波トランスデューサは $40[\text{kHz}]$ のものが一般的だが^{?)}、今回は $25[\text{kHz}]$ の製品 (ProWave Electric Corporation 250ST/R160) を利用した。これにより $40[\text{kHz}]$ の場合と比べて計測レンジは約 1.6 倍になる。

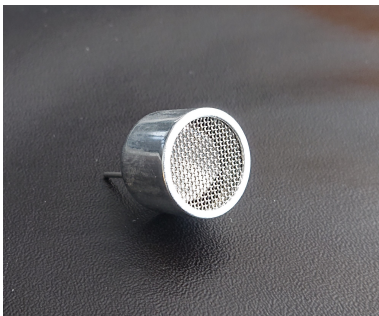


Fig. 4.4 Air Ultrasonic Ceramic Transducers 250ST/R160

4.3 ADA2200

実験に使用した評価用ボード ADA2200SDP-EVALZ は位相差計測を行うための ADA2200 同期式復調器を搭載している。ADA2200 のブロック図を Fig.(?) に示す。本チップを利用して同

Table 4.3 トランスデューサ 250ST/R160 の仕様

送信	250ST160
受信	250SR160
周波数	$25 \pm 1.0[\text{kHz}]$
直径	$16.2 [\text{mm}]$
動作温度	$-30 \sim 70[^\circ\text{C}]$

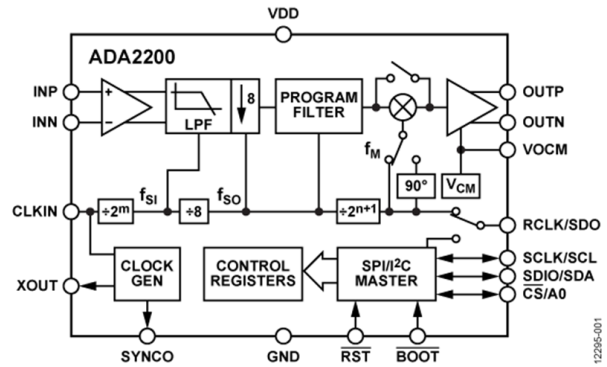


Fig. 4.5 ADA2200 の機能ブロック Fig.

期検波を行うことにより位相差を計測する。

同期検波をする際、2つの ADA2200 を使用し、1つは I データ、もう1つは Q データの計測に用いる。このとき、オフセット電圧 V_{off} と位相遅れ $\Delta\theta_{DEL}$ が存在するため、予めこれらを校正し、次式から $\Delta\theta_{REL}$ を求める必要がある。

$$I' = I - V_{off,I} \quad (4.20)$$

$$Q' = Q - V_{off,Q} \quad (4.21)$$

$$\Delta\theta_{REL} = \arctan(I'/Q') + \Delta\theta_{DEL} \quad (4.22)$$

4.4 増幅回路

トランスデューサの受信側信号は減衰しているため ADA2200 へ入力する前に増幅を行った。増幅回路を Fig.(?) に示す。

この回路の増幅率 A_v とバイアス電圧 B_v は、

$$A_v = 2$$

$$B_v = 2.5$$

であり、入力電圧を V_{in} とすると出力電圧 V_{out}

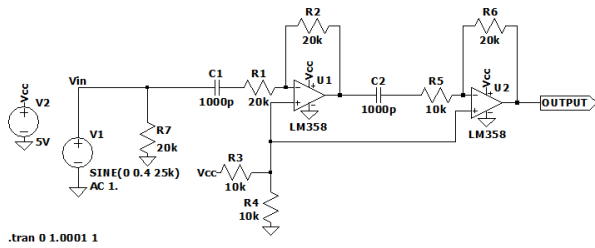


Fig. 4.6 受信側増幅回路

は

$$V_{out} = A_v V_{in} + B_v \quad (4.23)$$

となる。また、この増幅回路の 25[kHz] における位相遅れは 50.1384° である。

5. 風速計測実験

5.1 実験方法

実験装置の構成を Fig.?? に示す。ファンクションジェネレータから 2 つの ADA2200 に駆動クロック (800[kHz]) の矩形波を入力する。この時 ADA2200 の RCLK から出力される 25[kHz] の矩形波で送信側のトランスデューサを駆動させる。受信側からの正弦波を増幅回路で増幅し、ADA2200 の INP へ入力し、同期検波を行うことで位相差を計算するための I 、 Q が OUTP から得られる。

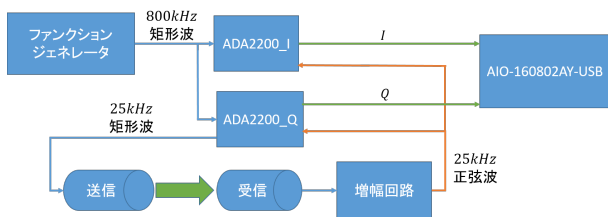


Fig. 5.7 実験装置の構成

今回実験に使用した風速計測装部を Fig.?? に示す。

風の流入方向を固定し、計測部を $120[\text{deg.}]$ ずつ回転させて、3 回計測することで V_1, V_2, V_3 を計測したとする。

風はドライヤーで発生させた。ドライヤーは計

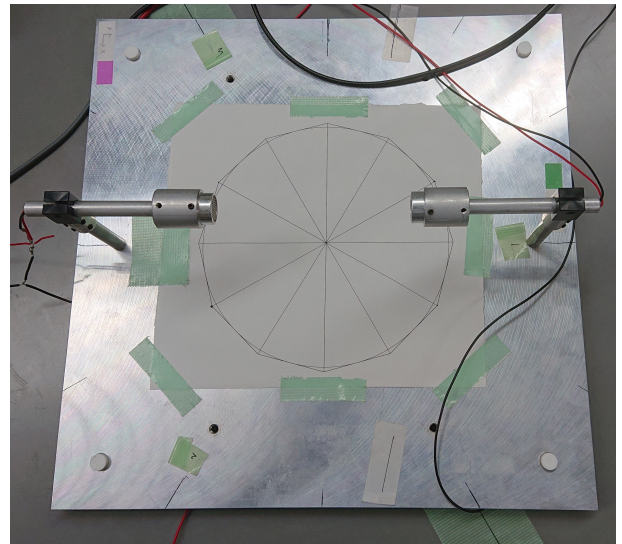


Fig. 5.8 風速計測装置

測中心から一定距離になるようにし、向きはレーザー墨出し機を用いて合わせる。ADA2200 からの I 、 Q 電圧出力は AIO-160802AY-USB (contec) で計測し、比較用に風車式風速計である Kestrel2500 (Nielsen Kellerman) で計測を行った。また、各軸の位相差 $\Delta\psi_i$ は ADA2200 の位相遅れ $\Delta\theta_{Del}$ のほかに、増幅回路、超音波センサの位相遅れ $\Delta\theta_{Amp}, \Delta\theta_{Sensor}$ を含んで計測されるので、

$$\Delta\psi_i = \arctan(I'/Q') + \Delta\theta_{Del} + \Delta\theta_{Amp} + \Delta\theta_{Sensor} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5.24)$$

$$\Delta\theta_{Del} = -53.3172$$

$$\Delta\theta_{Amp} = 50.1384$$

$$\Delta\theta_{Sensor} = 52.44925$$

となる。

5.2 結果

実験によって得られた結果を Table?? に示す。風向の計測誤差は最大で $3.1531[\text{deg}]$ であった。風速は Kestrel 2500 の計測値と比べ最大 $0.3[\text{m/s}]$ の差を生じた。今回は提案する計測手法の確認のために簡易的な実験を行ったが、風向、風速ともに妥当な計測結果が得られた。

Table 5.4 計測結果

[deg.]	流入方向	風向 ϕ	誤差
	0	0.8629	-0.8629
	30	30.5747	-0.5747
	90	91.8020	-1.8020
	150	150.0161	-0.0161
	180	176.8469	3.1531
	210	211.1062	-1.1062
	270	269.8194	0.1806
	330	330.5599	-0.5599
最大			3.1531
最小			-1.8020
平均			1.0324

[m/s]	風速 V	Kestrel 2500	誤差
	3.6987	3.6000	0.0987
	3.4479	3.4667	-0.0188
	3.0553	3.4000	-0.3447
	3.4047	3.3667	0.0381
	3.6459	3.5667	0.0792
	3.0587	3.3333	-0.2746
	3.2529	3.5000	-0.2471
	3.1904	3.4667	-0.2762
最大			0.0987
最小			-0.3447
平均	3.3431	3.4370	0.1641
標準偏差	0.2313	0.1160	

- 3) R.M.Schotland, The measurement of wind velocity by sonic means.; Journal of the Atmospheric Science, Vol. 12, Issue 4, pp. 386-390 (1955)
- 4) 佐々木克浩, 西平守正, 今野和彦, 40 kHz の空中用音波を用いたサブ μm の変位検出法; 計測自動制御学会東北支部第 217 回研究集会資料番号 217-15(2004)

6. 結言

本研究ではドローンの対気速度計測装置への応用を目指し、音速情報を必要としない新たな位相差法による風速計測方法を提案した。また提案方法を用いた計測実験を行い、有効性を確認した。

参考文献

- 1) ドローン活用事例 <https://www.javoa.or.jp/case/>
2021年5月24日閲覧
- 2) 谷腰欣司 谷村康行, トコトンやさしい超音波の本; 日刊工業新聞社, pp.41,46 (2015)