

空中超音波を用いた位置計測システムに関する研究

評価技術課 佐々木 克浩

生活工学研究所 塚本 吉俊

機械電子研究所 浅田 峯夫

1. はじめに

空中超音波を用いた距離/位置の測定は、物体検知や厚み計測など広く利用されており、性能の向上次第では位置決めなどの制御系への適用¹⁾も期待される。このような測定の方法は、超音波の伝搬時間を用いる方法(時間差法)が一般的であり、測定精度は超音波の波長程度に制限される場合が多い¹⁾。一方、超音波の位相情報を用いる(位相差法)²⁻⁵⁾と波長以下の精度が得られるが、測定可能な範囲が一波長程度までに制限される。さらに空気中の超音波は周波数制限があり、数十 kHz(波長では 10 mm 前後)が最もよく実用されているため、上記の波長による制限が計測上の課題の一つとなる。

本研究では、位相差法における測定範囲を一波長以上に拡大する方法を検討することで、高精度広範囲計測システムの開発を目指す。測定範囲拡大の一方法として、複数の周波数を用いる方法が数例報告されており²⁻⁴⁾、中でも連続波を用いた方法は高い S/N 比が得られるが、時間に対して分割して多周波を送受波する^{2,3)}ため測定時間が長くなる。本報では、2 周波数の連続波超音波を同時に送受波した際の受信信号を位相検波するシステムを構築し、一波長以上の一次元位置変化を波長以下の精度で計測したので報告する。

2. 原理

Fig.1 に示すように周波数 f_i ($i=1, 2 \dots$) の超音波が位相差 $2\pi m_i + \phi(f_i)$ 遅れて観測された場合、超音波伝搬距離 L は次式により求められる。

$$L = \frac{2\pi m_i + \phi(f_i)}{2\pi} \cdot \lambda_i \quad (1)$$

ここで、 $\lambda_i = c/f_i$ (c は超音波の音速) は波長、 m_i は整数であり単一の周波数のみの送受波では通常決定することができない。そこで異なる周波数 f_1 および f_2 (ここでは $f_1 > f_2$ の場合で説明するが $f_1 < f_2$ でも同様) の超音波を送受波する場合を考える。各々の周波数に対応する位相 $\phi(f_1)$ および $\phi(f_2)$ は Fig.2 上段に示すように変化する。これらの位相の差 $\phi(f_1) - \phi(f_2)$ は、Fig.2 中段に示すようであり、式(1)より $\Delta\lambda = c/(f_1 - f_2)$ を用いて次式で表される。

$$\phi(f_1) - \phi(f_2) = \frac{2\pi L}{\Delta\lambda} - 2\pi(m_1 - m_2) \quad (2)$$

ここで、 $\phi(f_1) > \phi(f_2)$ のとき $m_1 = m_2$ のため $\Delta\phi = \phi(f_1) - \phi(f_2)$ 、 $\phi(f_1) < \phi(f_2)$ のとき $m_1 = m_2 + 1$ のため $\Delta\phi = 2\pi + \phi(f_1) - \phi(f_2)$ とすることで(Fig.2 中段および下段)、式(2)は次式のように表され、 λ_1 以上($\Delta\lambda$ まで)の距離が求められる³⁾。

$$L = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \cdot \Delta\lambda \quad (3)$$

さらに本研究では、式(3)より求めた距離 L と式(1)から求める距離 L が等しいとして、次式のように m_1 について解き、これを四捨五入することで m_1 を決定する。

$$m_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} \cdot \Delta\phi - \phi(f_1) \right) \quad (4)$$

m_1 を式(1)に代入すれば L が高精度に決定され、基準距離 L_0 から距離 L までが $\Delta\lambda$ 以内であれば、一次元の相対的な位置(変位) d は次式により求められる。

$$d = L - L_0 \quad (5)$$

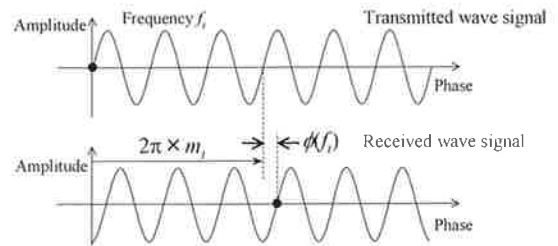


Fig.1 Phase differences between the transmitted and received wave signals.

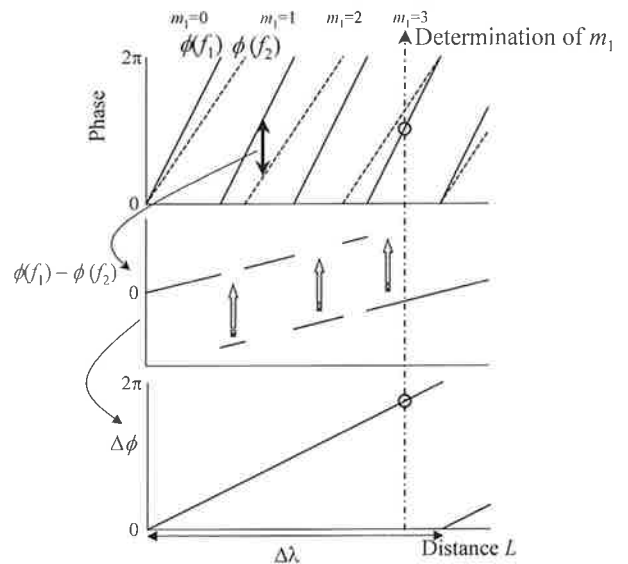


Fig.2 Principle of distance measurement using double-frequency ultrasonic wave and determination of m_1 .

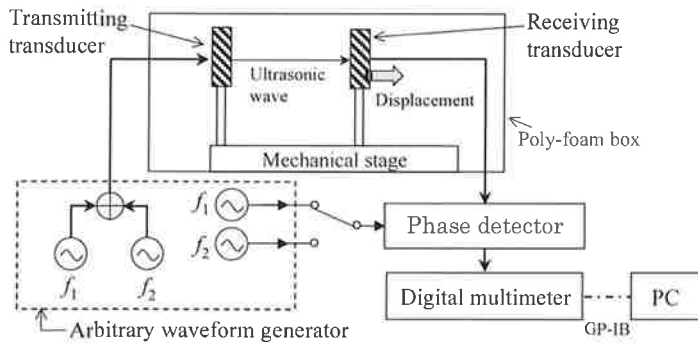


Fig.3 Schematic / block diagram of our system.

3. システムおよび実験方法

前述の原理に基づいて構築した計測システムを Fig.3 に示す. 任意波形発生装置により 2 周波数連続波を合成した波形を作成し, 汎用超音波トランスデューサに印加する. トランスデューサの帯域と測定精度を考慮し, 印加信号の周波数は一例として $f_1=40$ kHz と $f_2=42$ kHz に設定した. 同時送波された 2 周波超音波は受波用トランスデューサにより受波する. 受波信号から位相情報を抽出するため, 位相検波器において送波信号に同期した参照信号 (40 kHz と 42 kHz) と受波信号を乗算した後積分することで, 各周波数に対応した直流電圧出力を得る. 連続波を用いた場合, 位相検波における積分時間を長くする狭帯域化により, 比較的高い S/N で目的信号を抽出できるという特長がある. 本実験では積分時間 100 ms としてデジタルマルチメータにより測定し, そのデータは GP-IB を介してパソコンに取り込んだ. メカニカルステージにより受波用トランスデューサを変位させた際の位相変化量を算出した後, 式(1), 式(4)および式(5)に基づいて変位を算出した.

4. 実験結果および考察

変位計測結果例を Fig.4 に示す. Fig.4 の●は 10 回の測定の平均値であり, 波長 $\lambda_1 \cong 9$ mm 以上の 160 mm (式(3)による原理的な測定範囲 $\Delta\lambda=170$ mm 程度) まで測定できている. 周波数 f_1 と f_2 の差を小さくすることで

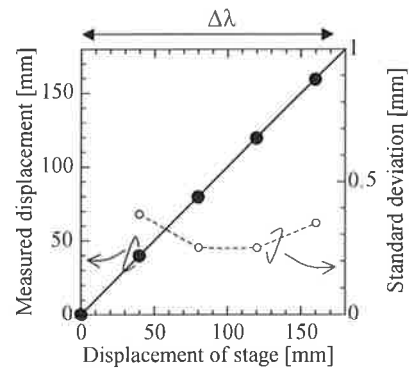


Fig.4 Experimental results for evaluating our system.

らに測定範囲を拡大できる可能性がある. また Fig.4 より標準偏差は 0.4 mm 以下であることから, 測定精度は波長 λ_1 以下を有している. 本実験で利用したステージの副尺が 0.1 mm であり, 繰り返し位置決めにおけるばらつきが測定の標準偏差の一要因と考えられる. この他の要因として, 空気の揺らぎや温度変化 (温度係数は 0.5 mm/°C 程度) の影響が挙げられる. またマルチパスが誤差要因となり得るため, 上記要因と併せて今後対策が必要と考えられる.

5. おわりに

一個の汎用超音波トランスデューサで近接した 2 周波数 (40 kHz と 42 kHz) を同時に送受波させ, 受波信号を位相検波するシステムを構築した. このシステムを用いて, 波長 $\lambda_1 \cong 9$ mm 以上の 160 mm ($\cong \Delta\lambda$) 程度までの変位を波長 λ_1 以下の標準偏差で測定できた. 今後の課題として, 複数周波数の同時検出による測定時間短縮の実証とその特長を生かした移動体計測が挙げられる.

参考文献

- 1) 堀内, オートメーション, **45**, 4 (2000) 30.
- 2) A. K. T. Lee et al., *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **22** (1989) 52.
- 3) C. F. Huang et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **70** (1999) 1452.
- 4) 橋爪他, 電子情報通信学会論文誌, **A J91-A**, 4 (2008) 435.
- 5) K. Sasaki et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46** (2007) 4545.

キーワード: 空中超音波, 2 周波超音波, 位相検波, 位相差, 位置計測

Positioning system using air-coupled ultrasonic waves

Katsuhiko SASAKI, Yoshitoshi TSUKAMOTO and Mineo ASADA

A system that simultaneously transmits and receives air-coupled continuous ultrasonic waves of double frequencies ($f_1=40$ kHz, $f_2=42$ kHz) is constructed for efficient detections of displacements longer than an ultrasonic wavelength $\lambda_1 \cong 9$ mm. In this system, a phase detection technique can accurately extract phase variations of received wave signals for each frequency. Displacements up to 160 mm longer than the wavelength λ_1 , have been successfully measured with standard deviations smaller than λ_1 .