超音波多重位相差方式による3次元座標の測定*

馬 樹 元** 下 河 辺 明***

Three Dimensional Coordinate Measurement Based
on Phase Shifts of Multi-ultrasonic-waves

Shuyuan MA and Akira SHIMOKOHBE

Development of three dimensional (3 D) measuring machines which are not equipped with axes; x , y , z axes and/or joint axes, is important because such machines do not suffer from the Abbe's errors, play and clearance of joint axes, and/or elastic deformation of mechanisms. This paper first introduces the principle of a new coordinate measurement system using ultrasonic waves in which: (1) some fixed receivers receive several kinds of ultrasonic signals from a movable transmitter, (2) from the phase shifts between the transmitted and received signals, distances of the transmitter from the receivers are calculated, and (3) from the distances, 3 D coordinates of the transmitter are determined by triangulation. Secondly, the paper explains a measuring setup. Some experimental results in a space of $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ shows that the errors of 1 D measurements are less than 0.2 mm and those of 2 D and 3 D are less than 1 mm and 2 mm respectively. The causes of the errors are also discussed.

Key words: three dimensional measuring machine, coordinate measurement, Abbe's error, ultrasonic, phase shift, triangulation

1. 結 言

現在のXYZ形3次元測定機は構造的にAbbeの原理に反し、案内機構の運動精度は測定精度に大きな影響を及ぼす¹⁾²⁾。また関節形の3次元測定機においても、関節のガタ、腕の弾性変形などが測定精度に影響する。

本研究は軸や関節などを使わない3次元座標測定法の基礎研究である。軸、関節を使わないため、機構の精度を問題にする必要がなく、さらに大型重量物の測定、空間運動物の座標測定、ロボットのセンサなどへの応用の可能性も生じて来る。

軸を使わないで距離を測定する方法には、光、電波、超音波などを用いる方式が考えられている。光波測距儀、電波測距儀³⁾⁴⁾では、1種類あるいは数種類の変調波の位相差から距離を決定しているが、電磁波が高速なため、信号処理は困難であり、装置が大型化するとされている。また、光波測距儀では被測定物上に反射鏡を設置し、光を常時反射鏡に向ける必要があると

いう3次元測定には適さない点もある。

超音波式は小型で安価などの特徴があり、これを用いた方式の研究は多い^{5)~7)}。従来は超音波の送波素子から受波素子までの伝達時間を測定する方式のものが一般的である。しかし、超音波が受波素子に到達した瞬間をとらえることは困難で、精度の向上は難しい。また最近では、2種類の近接した周波数の連続超音波を交互に送波して対象で反射させ、送波と受波された反射波の位相差を用いて距離を求める方式もあるが、現状では分解能は低いようである。

本研究では直接に超音波の伝達時間を測定せずに、数種類の超音波信号を順次送波素子から送り、送波信号と受波信号の位相差から距離、座標を決定する。本論文では測定原理について述べるとともに、各種の測定実験を通じて本研究の手法の有効性を示す。

2. 測 定 原 理

2.1 距離の測定原理

図1(a)の左側に超音波送波素子T、右側に受波素子Rがあり、二つの素子が対向して配置されている。(b)、(c)、(d)は送受波される3種類の超音波信号の波形である。(b)は周波数 f_a 、波長 λ_a の正弦波で、これをa波と呼ぶ。(c)、(d)は周波数 f_b 、 f_c 、波長 λ_b 、 λ_c の

* 原稿受付 昭和60年4月27日、昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和59年10月2日)にて発表

** 学生会員 東京工業大学大学院(横浜市緑区長津田町4259)

*** 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所

Fig. 1 Measuring principle

正弦波を信号波として a 波を振幅変調した超音波信号の波形であり、これらの信号波を b, c 波と呼ぶ。

図 1 (a) の送受波素子間の波は各超音波を送る場合に素子間に存在する波である。 n_a, n_b, n_c はそれぞれ a, b, c 波の波数の整数部分であり、 $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ はそれぞれの送受波信号の位相差 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ に相当する波数の小数部分である。本研究では実際に測定するのは送受波信号の位相差 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ であり、これから送波素子と受波素子との距離はそれぞれ式 (1), (2), (3) により表される。

$$L_a = (n_a + \Delta a) \lambda_a \quad (1)$$

$$L_b = (n_b + \Delta b) \lambda_b \quad (2)$$

$$L_c = (n_c + \Delta c) \lambda_c \quad (3)$$

ただし、

$$\Delta a = \frac{\theta_a}{2\pi}, \quad \Delta b = \frac{\theta_b}{2\pi}, \quad \Delta c = \frac{\theta_c}{2\pi}$$

もし測定誤差がなければ、 $L_a = L_b = L_c$ であるが、一般には測定誤差のため、この関係は成立しない。距

離を定めるためには $(n_a, \Delta a)$, $(n_b, \Delta b)$, $(n_c, \Delta c)$ を正確に知る必要があるが、測定できるのは $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ だけであり、一般には n_a, n_b, n_c を知ることはできない。そこで次のような方法を考える。

まず、測定範囲に対して n_c は 0 であるように λ_c を選ぶ。すると、式 (3) により L_c は次のように計算される。

$$L_c = \Delta c \cdot \lambda_c$$

この L_c の精度は高くはないが、b 波の整数波数 n_b を推定するために使用することは十分可能である。つまり

$$n_b = \left\lfloor \frac{L_c}{\lambda_b} \right\rfloor \quad [] \text{ はガウス記号}$$

この n_b を式 (2) に代入して L_b を計算し、同様に n_a を

$$\begin{aligned} n_a &= \left\lfloor \frac{L_b}{\lambda_a} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{\lambda_b}{\lambda_a} (n_b + \Delta b) \right\rfloor \\ &= \left\lfloor \frac{\lambda_b}{\lambda_a} \left(\left\lfloor \frac{L_c}{\lambda_b} \right\rfloor + \Delta b \right) \right\rfloor \end{aligned} \quad (4)$$

として求める。この n_a を使って、 L_a を式 (1) により計算する。電気的な位相差の測定精度は同一と考えられ、周波数が低いほど距離の測定誤差が大きいと考えられるが、低精度の L_c を計算し、順次に L_b, L_a を計算して精度を高めていく。具体的に距離 L は次式により計算される。

$$L = L_a = \left\{ \left\lfloor \frac{\lambda_b}{\lambda_a} \left(\left\lfloor \frac{\lambda_c}{\lambda_b} \Delta c \right\rfloor + \Delta b \right) + \Delta a \right\rfloor \lambda_a \right\} \quad (5)$$

2.2 座標の測定原理

3次元測定の場合では、固定した受波素子を3個以上使い、移動する送波素子から球面波を送り（受波素子を図1のように特に対向させない）、送波素子とそれぞれの受波素子の距離から3次元の座標を計算する。

3. 実験装置

図2は実験装置の構成である。超音波素子として TDK 製の SE 08-40 を送波及び受波素子に使用している⁶⁾。なお、実験装置は恒温室に設置され、以下の実験を行う際には恒温装置を停止し、実験中の温度変動 0.1°C 以下の条件を保っている。

図3は超音波素子の送波波面の球面からのずれを、図3(a)のように、送波素子 T のまわりに受波素子 R を相対的に回転させて調べた結果である。図3(b), (c), (d) は位相特性で、点線円弧の右側の数字はその測定点の半径である。▲印はその半径上で測定した位相の理想位相値に対する誤差である。図3(e) は a 波の受波信号の電圧振幅のゲインで、半径 400 mm の中

Fig. 2 Measuring system

心位置に対する振幅比のデシベル値である。

a 波の場合、位相誤差が 45° で距離の測定誤差が 1 mm 生じる。b 波の場合、 8.5° 以上の誤差があると、a 波の波数に 1 の誤差が生じ、測定結果に λ_a の誤差が生じる。c 波の場合では、 17.8° 以上の誤差があると、b 波の 1 波長相当の誤差が生じる。

図 3 から、半頂角 30° の円すい空間内では誤差 0.3

mm 以下の精度で距離測定が可能であり、この円すいを超えると、位相差誤差が大きくなり、また a 波の受波信号の振幅がかなり小さくなることからわかる。

なお、このように波面が球面からずれる理由は、素子そのものが点音源ではないこと、また素子の音圧の指向性(図 3(e))からもわかるように角度が大きくなると反射波の影響を受けやすくなることなどが考えられる。送波素子、受波素子の近くに反射物がある場合の影響についても実験を行っているが、ここでは省略する。

4. 実 験

各測定の送波素子と受波素子の配置は図 4 に示し、超音波の周波数、波長、受波素子の位置は表 1 に示す。送波素子はその移動量が 0.02 mm の分解能で測定できる大型工作機械(デブリグ社、ジグミル)に取り付け、受波素子は固定している。また送、受波素子とも反射の影響がないように $\phi 8 \times 200$ mm の鋼棒の先端に取り付けてある。

Fig. 3 Spherical characteristics of ultrasonic transmitter

Fig. 4 Arrangement of ultrasonic transducers

Table 1 Frequencies, wavelengths and position of receivers

Factor	1 D measurement	2 D measurement	3 D measurement
f_a kHz	39.3	42.8	42.8
λ_a mm	8.75	8.03	8.03
f_b kHz	0.48	2.02	2.02
λ_b mm	716	170	170
f_c Hz	—	200	200
λ_c mm	—	1 720	1 720
x_1 mm	-378.20	-400.76	-398.40
y_1 mm	0	125.00	147.00
z_1 mm	0	0	151.50
x_2 mm	—	-401.00	-402.00
y_2 mm	—	-125.00	-155.00
z_2 mm	—	0	152.00
x_3 mm	—	—	-400.06
y_3 mm	—	—	-153.20
z_3 mm	—	—	-151.00

図4より明かなように、以下の実験においては、受波素子は送波素子に対し、相対的に平行移動するのみで、図3(a)のように相対的回転運動は行っていない。したがって図3の球面波特性を用いて、以下の測定結果をそのまま論じることではできないが、今回の多次元測定実験では、波面の平均的位相が測定されるものと考えて実験を行う。

4.1 1次元の測定結果

1次元の測定はa, b波を用いて送受波素子間の距離測定として行った。結果は図5(a), (b), (c)に示す。(a)はa波, b波の測定位相差 θ_a, θ_b である。(b)は距離の測定誤差 E_x 及びa, b波の位相差誤差 $E_{\theta a}, E_{\theta b}$ である。この結果より、距離の測定誤差の最大値は0.2 mmである。また、a波の測定位相差誤差と距離の測定誤差はほぼ対応していることがわかる。

図5(c)は以上の測定を10回繰り返して再現性を調べた結果である。●印は測定誤差の平均値 E_{xm} であり、最大値、最小値と共に示してある。○印は測定誤差の標準偏差である。この図から距離が大きいくほど測定誤差が大きくなることわかる。測定値のばらつき

Fig. 5 Results of 1 D measurement

きは空気のゆらぎなどによるa波の位相差の測定値のばらつきが原因と思われる。

なお以上の実験では、音速は図5(b)のx座標の測定誤差 E_x の傾きが零となるように定めた。

4.2 2次元の測定結果

2次元測定の音速は工作機械ジグミルの座標系による各送受波素子間の距離と本研究の超音波を用いた測定距離の差が最小になるように決定した。測定はx方向には1 000 mmの範囲、y方向には $y=0, -125, -250$ mmの3か所で10回繰り返して行った。図6に測定結果を示す。(a)は $y=0$, (b)は -125 mm, (c)は受波素子 R_1, R_2 の外側 $y=-250$ mmの位置で測定した結果である。

(a), (b)の場合、 E_x の最大値は0.4 mm, 平均値 E_{xm} は0.2 mm, 標準偏差 σ_x は0.2 mm以下であり、良い結果が得られたと言える。 E_y の最大値はごく少ない点を除いて1 mm, 平均値 E_{ym} は0.7 mm, 標準偏差 σ_y は0.6 mm以下であった。(c)の場合には、 E_x の最大値は0.9 mm, 平均値 E_{xm} は0.3 mm, 標準偏差 σ_x は0.3 mm以下であった。 E_y の最大値は2.0 mm, 平均値 E_{ym} は1.2 mm, 標準偏差 σ_y は0.7 mm以下であった。また $y=-250$ mm, $x=0$ では R_1 のTに対する角度が 30° を超えたので、a波の整数波数 n_a に誤差

Fig. 6 Results of 2D measurement

Fig. 7 Results of 3D measurement

が生じ、測定不可能であった。

4.3 3次元の測定結果

3次元の測定は受波素子3個を用い、音速は2次元

の場合と同様に決定した。

図7(a)は $y=z=0$ 、(b)は $y=-150\text{ mm}$ 、 $z=150\text{ mm}$ で測定した結果である。(b)の場合では $x=100\text{ mm}$ 以内で R_1, R_3 のTに対する角度が 30° を超え、位相差誤差が大きすぎて、測定不可能であった。測定可能領域の測定精度は x が $\pm 1.5\text{ mm}$ 、 y, z が $\pm 2\text{ mm}$ 以内である。

図7の結果はほとんどすべての測定位置が半頂角 30° の円すい内に入る測定可能領域内の場合であるが、($y=0, z=150$)、($y=-150, z=0$)の他の測定可能領域内の位置でも同様の結果を得た。しかし、測定可能領域外の($y=150, z=150$)、($y=-150, z=-150$)などでは、ここでは省略するが、a波の波数誤差が生じて精度が低下し、測定不可能となった。

4.4 検討

4.4.1 素子の位置座標誤差の影響

図6(a), (c), 図7(a), (b)の E_y に傾きがあり、図6(b)では $E_y < 0$ 、図7(a)では $E_x < 0$ 、 $E_z > 0$ という傾向を持つが、これは受波素子の位置座標誤差によるものだと考えられる。これについてここで検討する。

1次元の場合、図4の受波素子 R_1 の位置 x, y に誤差 $\Delta x, \Delta y$ があるとすると、 Δx は x のすべての測定誤差に均等に影響を及ぼす。したがって、この誤差を補正することは簡単であり、実際に図5の結果も E_x の補正後のものである。また、 Δy の影響は極めて小さく無視できる。

2, 3次元の場合、例えば、2次元測定の図4の R_1 の位置 (x_1, y_1) に $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ の誤差があるとすると、簡単な幾何学的関係より図8に示すような計算結果を得る。図8(a)は $\Delta x_1 = 0.2\text{ mm}$ 、 $\Delta y_1 = \Delta x_2 = \Delta y_2 = 0$ の場合で、測定位置の y 座標によらず、 E_y に傾きが生じる。(b)は $\Delta y_1 = 1\text{ mm}$ 、 $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta y_2 = 0$ の場合で、誤差 E_y が正になる傾向が生じる。なおこれらの位置座標誤差については、予備実験の段階で数回の測定を繰り返し、結果を参考にしながら補正を行い、表1に示す値を決定している。

4.4.2 2, 3次元測定での送受波素子間の距離測定誤差の影響

Fig. 8 Errors by position errors of receivers

Fig. 9 Errors by distance errors between transducers

図6で同じ x 座標の測定点において、 $\sigma_x < \sigma_y$ となる傾向が見られるが、この理由は次のように考えられる。

図9に本実験における二次元測定の場合の受波素子 R_1, R_2 及び送波素子の位置関係を示す。送波素子が位置 T_1 にある時、受波素子 R_1, R_2 との距離を L_{11}, L_{12} とし、位置 T_2 にある時のそれらを L_{21}, L_{22} とする。ただし、本実験では受波素子間の距離 $\overline{R_1 R_2}$ は送受波素子間の距離 $L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}$ よりも小さい。この図より距離測定値 L_{11}, L_{21} に ΔL の測定誤差があると、幾何的な関係から常に誤差は $|E_{x1}| < |E_{y1}|$ ($i=1, 2$)の関係になることがわかる。すなわち、それぞれの距離測定値にばらつきがある場合、幾何的に x 座標の測定値のばらつきより y 座標の測定値のばらつきの方が大きくなってしまふことがわかる。

また図から、 x 座標が大きくなると、幾何的な関係で y 座標の測定誤差が大きくなってしまふことがわか

る。つまり、これは図6(b), (c)で x 座標が大きくなると、 y 座標の測定誤差及びばらつきが大きくなっている原因の一つであると言える。

5. 結 言

本論文では超音波を用いる距離、座標の測定の原理を述べ、基礎的問題を実験的に検討した。その結果を要約すると、次のようになる。

1次元の測定は1000 mmの範囲で行った。測定誤差の最大値は0.2 mmであった。

2次元の測定は受波素子を2個用いて、250 mm × 1000 mmの範囲で行った。−125 mm ≤ y ≤ 0の範囲でごく少ない点を除いて、測定誤差の最大値は1 mm以下であった。 $y = -250$ mmのところで、測定誤差の最大値は2 mmであった。

3次元の測定では受波素子3個を用いて、測定できる範囲は150 mm × 150 mm × 1000 mmであった。この範囲では送、受波素子の距離が近いところで、低周波超音波信号の測定不能な点が2か所ある以外、 x は1.5 mm、 y, z は2 mmの最大誤差であった。

これらの誤差の原因は空気の流れによる位相差の測定値のばらつき、超音波素子の位置座標の誤差、及び超音波の反射の影響などである。

今後の課題はより多くの超音波素子を用いて精度を向上させ、測定範囲を拡大すること、超音波を断続的に送り、定在波や反射波の影響を避けること、などである。

終わりに有益なご助言をいただいた東京工業大学精密工学研究所梅澤清彦教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) A. Weckenmann: Proc. IMEKO 9th World Congr., Berlin, May (1982) 110.
- 2) 薛 軍, 大園成夫, 高増 潔: 3次元座標測定機の案内精度の測定試験と検討, 精密機械, 50, 3 (1984) 556.
- 3) 横河ヒューレットパッカード社カタログ: YHP レーザアプリケーション・ガイド.
- 4) 須田教明: 電磁波測距儀, 森北出版 (1984) 108.
- 5) T. Arai & E. Nakano: Development of Measuring Equipment for Location and Direction (MELODI) Using Ultrasonic Waves, J. Dynamic System, Measurement, and Control, Sept., 105, (1983) 152.
- 6) K. Takamasu, R. Furutani and S. Ozono: Development of the Dimensional Coordinate Measuring System with Ultrasonic Sensors, Proc. IMEKO TC 14 ISMQC, Tokyo, (1984) 300.
- 7) 高梨伸彰, 堀口敏男: 超音波2周波測距方式, 第27回自動制御連合講演会予稿集 (1984) 455.
- 8) TDK 社カタログ: 電歪振動子編, DATA BOOK NO DFJ 834-001 B (1983.4) 30.