超音波によるロボットの3次元位置・姿勢計測

(第3報)*

—3次元位置計測精度の検討—

青柳誠司** 神谷好承** 岡部佐規一** 佐々木 健*** 高野政晴***

Measurement of 3-D Position and Orientation of a Robot Using Ultrasonic Waves (3rd Report)
—Estimation of the Accuracy of 3-D Position Measurement of the Developed System—

Seiji AOYAGI, Yoshitsugu KAMIYA, Sakiichi OKABE, Ken SASAKI and Masaharu TAKANO

An ultrasonic measuring system of 3-D position and orientation of a robot has been proposed in the previous report. The system is based on distance measurement between ultrasonic transmitters attached to a robot arm and receivers placed around the work space of the robot. This paper describes a new method of 3-D position measurement which employs one redundant receiver and estimates the sound velocity in the measured space in real time and with high accuracy. The error distribution was simulated by using Monte Carlo method and it was proved theoretically that the accuracy achieved by this method is better than that achieved by the conventional method which uses three receivers. A 3-D measuring system of which receivers are able to rotate and face up to the transmitter precisely was developed and the accuracy of it was estimated experimentally by using an NC machine tool. The average of errors of X,Y,Z-coordinates was about $\pm 0.2\text{mm}$ respectively in the $X \times Y \times Z$ space of $300 \times 400 \times 400\text{mm}$. The causes of the measuring error were also discussed.

Key words: 3-D measurement, redundant receiver, simulation of error distribution, estimation of accuracy

1. はじめに

現在産業用ロボットの運動性能を正確に評価することを目的とした様々な3次元位置計測法が提案され、それらの調査、分類が国際標準化機構(ISO)で行われている¹⁾。このうち動的な計測もできる代表的なものにカメラ方式²⁾、レーザ方式³⁾がある。前者は測定空間を広くとるほど精度が劣化し、1m立方の測定空間では1mm程度の測定誤差が生じてしまう。後者は数mm立方の測定空間で10 μm 程度の精度が得られるが、姿勢の計測を行うことが困難である。また前者は画像処理装置、後者はレーザ干渉計が必要なためシステムが高価になり、これらを所持する専門の中立機関が必要となる¹⁾。このような背景のもとに筆者らは先に図1に示すような超音波パルスの伝播時間計測を応用してロボットの位置・姿勢を計測する手法を提唱した⁴⁾。本方式に基づいたシステムの位置計測精度は本論文で後で示すように0.3mm程度であり、現在0.1~0.3mm程度である産業用ロボットの位置繰返し精度の評価の用途には精度不足である。しかしながら6自由度多関節型ロボットの絶対位置決め精度が機構の寸法誤差等の校正を行わない状態で数mm~数十mmであることが3次元測定機、セオドライト等により確認されていることを考慮すると^{5) 6)}、本システムはロボットの絶対位置決め精度、絶対経路精度等の評価の用途には対応できると思われる。また超音波発信器、受波器ともに安価、小型、軽量であるため他方式に比べて安価に構成でき、携帯性に優れていること、測定座標系をシステム内部で校正できるので、セットアップが容易で計測が簡便に行えること、動的な計測が行えること、姿勢の計測が可能であること等の利点を本システムは持つ。このため本システムはメーカ、ユーザの双方が独自に所有できる簡易なロボットの運動性能評価システムの候補として有望である。

本報では位置計測原理として冗長な受波器を用いた音速推定

法を新たに提唱し、システムの位置計測精度について理論的、実験的に検討する。

2. 3次元位置計測原理

2.1 三点法の計測原理

発信器 $T(X, Y, Z)$ と受波器 $R_i(x_i, y_i, z_i)$ の間の測定された距離を L_i とする ($i=1\sim3$)。このとき

$$(X-x_i)^2 + (Y-y_i)^2 + (Z-z_i)^2 = L_i^2 \quad (i=1\sim3) \quad (1)$$

を解くことにより T の位置が求められる^{4) 7)}。本論文では従来行われているこの手法を三点法と呼ぶ。三点法には図2に示すように3個の受波器により構成される平面から発信器までの距離が比較的小さい場合に、距離測定誤差が大きな感度でZ座標の測定誤差に影響するという問題点がある。さらに三点法では既知の一定距離を超音波パルスが伝播する時間をリアルタイムでモニタする音速補正センサを用いて音速 C を求め、これ

T : Transmitter
 R : Receiver
 L : Distance between T and R
 C : Sound velocity
 t : Transit time of ultrasonic pulse

Fig.1 Principle of 3-D position and orientation measuring system using ultrasonic pulse

* 原稿受付 平成6年9月9日

** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

*** 正 会 員 東京大学工学部 (東京都文京区本郷7-3-1)

Fig.2 Error in Z-direction when using three receivers method

に発信器・受波器間のパルス伝播時間の測定値 t を乗じて距離 L を求めるが⁴⁾、測定空間と音速補正センサの設置場所の両者において温度、湿度、空気の流れ等が異なることにより正確な音速の補正が行えない可能性がある。

2.2 音速推定法の計測原理

図 1 に示すように冗長な受波器を 1 個用いて合計 4 個の受波器を用い、測定 XYZ 座標の他に測定空間内の音速 C を変数として扱う。発信器 $T(X, Y, Z)$ と受波器 $R_i(x_i, y_i, z_i)$ の間の超音波パルス伝播時間の測定値を t_i とする ($i=1\sim 4$)。このとき以下の 4 式が成立する。

$$(X-x_i)^2 + (Y-y_i)^2 + (Z-z_i)^2 = (C t_i)^2 \quad (i=1 \sim 4) \quad (2)$$

式(2)を変形することにより $T(X, Y, Z)$ は次式で表される⁸⁾.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} (Ct_1)^2 - (Ct_2)^2 - r_1^2 + r_2^2 \\ (Ct_1)^2 - (Ct_3)^2 - r_1^2 + r_3^2 \\ (Ct_1)^2 - (Ct_4)^2 - r_1^2 + r_4^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \quad (i=1 \sim 4)$ (4)

式(3)の逆行列は計測に先だち求められるので、本手法を用いることで三点法に比べてリアルタイム性が損なわれることはない。式(3)を式(2)に代入し直すと C^2 についての2次式ができ、 C は解析的に容易に求められる(計算式は紙面の都合上省略)。この C を式(3)に代入することにより X, Y, Z が求められる。

本手法は測定空間外の音速補正センサを用いることなしに測定空間内の音速をリアルタイムで正確に補正でき、また4個目の受波器を測定空間の上方に設置するのでZ座標の計測精度が三点法に比べて高いという特長を持つ。

3. モンテカルロ法による精度分布シミュレーション

3.1 測定距離の誤差分布

先に報告したように本研究で用いる超音波距離計は1mの測定範囲で $\pm 0.1\text{mm}$ の計測精度を有する⁴⁾。約1mの距離を1000回測定した結果の一例を図3に示す。ヒストグラム1本の幅は0.07mmの測定誤差に相当しており、測定距離の平均値が横軸の中心と一致するように図を作製した。これらの誤差は音速補正セン

※ Distance of about 1m was measured for 1000 times and histogram was made around the average.

Fig.3 Example of deviation of measured distance

Fig.4 Condition of simulation of 3-D error distribution

サで補正しきれない空気の揺らぎに起因するもので、偶然誤差であると思われる。また測定距離が長いほど空気の揺らぎの影響は大きくなるとと思われる。従って距離測定誤差が平均0.0mm、標準偏差0.1mm/mの正規分布に従うものと仮定する。参考のため図3に正規分布の確率密度関数を、平均値における縦座標が測定結果の頻度と一致するように縮尺を調整して示す。

3.2 精度分布シミュレーションの手順

本節ではモンテカルロ法⁹⁾を用いたシミュレーションの手順を述べる。簡単のためロボットの作業領域として半径1000mmの半球面内を考え、図4に示すように受波器を配置すると仮定する。 $T_0(\overline{X}, \overline{Y}, \overline{Z})$ を真の発信器の座標、 L_{0i} を T_0 と受波器 R_i との間の真の距離とし、測定空間内の真の音速を一定値 $C_0 = 340\text{m/s}$ と仮定する。3.1節の仮定から ξ_i を平均0、標準偏差 10^{-4} の正規分布 $N(0, 10^{-4})$ に従う乱数として、超音波パルスの測定伝播時間 t_i を

$$t_i = L_{0i} / C_0 \cdot (1 + \xi_i) \quad (i = 1 \sim 4) \quad (5)$$

のように計算機内に発生させる。この $t_1 \sim t_4$ の組を1000組用いて音速推定法により $T(X, Y, Z)$ を求める操作を1000回行い、 $T_0(\overline{X}, \overline{Y}, \overline{Z})$ との誤差 $|\overrightarrow{T T_0}|$ の平均値を求める。以上の操作をロボットの作業領域内およびその周辺の多数の $(\overline{X}, \overline{Y}, \overline{Z})$ において適当な間隔を置いて行い精度分布図を求める。

三点法では図4に示す音速補正センサ $|\overrightarrow{T_H R_H}| = 1350 \text{ mm}$ のパルス到達時間 t_H より音速 C を求め、これに式(5)で示され

Fig.5 Results of simulation of 3-D error distribution

る測定伝播時間 t_i を乗じて L_i を求める ($i=1\sim3$)。 $L_1\sim L_3$ の組を1000組用いて三点法により $T(X, Y, Z)$ を求め、後は音速推定法と同様の操作で精度分布図を求める。なお t_H も式(5)と同様に 10^{-4} の割合でばらつくことを考慮している。

3.3 シミュレーション結果とその考察

図4に示す YZ 平面内において三点法、音速推定法を用いて精度分布をシミュレーションした結果を図5(a), (b)にそれぞれ示す。これらの結果より音速推定法を用いた場合、三点法に比べて XY 平面に近い領域での計測精度が改善され、高精度で測定可能な空間が広くとれることがわかる。

4. 計測システムの構成

4.1 発信器および受波器

本研究では超音波発信器として無指向性点音源近似できる電気火花を用い、受波器は 85kHz のコンデンサ型のものを用いている⁴⁾。受波器の指向性が半減角 6° と鋭いため受波器をDCサーボモータで水平、鉛直方向に回転可能にし、発信器に対し正面を向くようにした⁴⁾。図6(a)に示すように受波器が発信器に対して正面を向いている場合 ($\theta=0^\circ$) から水平面内で $\theta=3^\circ, 6^\circ, 9^\circ$ 傾いた場合において約500mmの距離を測定したと

Fig.6 Measurement of directivity of ultrasonic receiver

Table 1 Ranging error according to rotational angle of receiver

θ	Average	Std.dev.	Difference
0°	496.0	0.1	—
3°	496.0	0.1	0.0
6°	496.1	0.1	0.1
9°	496.3	0.1	0.3

※ Constant distance of about 500mm was measured for 1000 times for each case

unit ; mm
Std.dev. : Standard deviation
Difference : Difference between average of $\theta=0^\circ$ and average of each case

Fig.7 Mutual calibration of receiver positions

きの測定誤差を表1に示す。図6(b)に $\theta=3^\circ$ の場合の受信波形を示す。これらより $\theta=3^\circ$ 以内の誤差で受波器が位置決めされていれば、超音波パルスの波形の乱れや振幅の低下はなく、受波器の傾きは計測精度に影響を与えないことがわかる。

4.2 測定座標系の校正

計測に先立ち4個の受波器の相対位置関係を知り、測定座標系を定めてやる必要がある。本システムでは受波器自体が振動膜として能動的に超音波パルスを発信できるので、受波器同士でパルスをやりとりし相互に距離を測定することにより相対位置が求められる⁴⁾。図7に示すように4個の受波器を適当な位置に配置し $R_1(0, 0, 0)$, $R_2(a, 0, 0)$, $R_3(b, c, 0)$, $R_4(d, e, f)$ として図中の式に従って a, b, c, d, e, f を求めて測定座標系を校正する。

5. NC工作機械を用いた3次元位置計測精度の検証

5.1 実験装置および実験方法

発信器をNC工作機械のチャックに固定し、ベッドに3個の受波器を固定し、4個目の受波器をベッドの上方に固定する。発信器を図8に示す36個の格子点に精度 $1\mu\text{m}$ で位置決めして、各点の座標を1000回測定した。計測に際しては計算された発信器の座標情報をもとに、各受波器が正確に発信器の正面を向くように受波器回転角度をリアルタイムで制御した。実験中は座標計算手法として音速推定法を用いたが、座標の他に超音波パルスの伝播時間および音速のデータも収集した。このため実験終了後これらのデータをもとに比較のため三点法を用いて同じ

Table 2 Error of NC coordinates measurement

Whole space	ΔX	ΔY	ΔZ	Δ	Unit; mm
Three receivers method	0.50	0.28	0.60	0.83	
Sound velocity estimating method	0.33	0.24	0.26	0.48	
In the case of limited space	0.15	0.20	0.22	0.33	

Whole space: 1-36th point (900×400×400mm)

Limited space: 10-27th point (300×400×400mm)
(Shaded space in Fig.8)

$$\Delta X = \frac{1}{N} \sum |x_i - X_i| \quad \Delta Y = \frac{1}{N} \sum |y_i - Y_i| \quad \Delta Z = \frac{1}{N} \sum |z_i - Z_i|$$

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum \sqrt{(x_i - X_i)^2 + (y_i - Y_i)^2 + (z_i - Z_i)^2}$$

$$\text{where } \frac{1}{N} \sum : \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \text{ (Whole space)} \quad \frac{1}{18} \sum_{i=10}^{27} \text{ (Limited space)}$$

 x_i, y_i, z_i : Measured coordinates of i-th point
(Average of 1000 times measurement)

 X_i, Y_i, Z_i : NC coordinates of i-th point

Fig.9 Standard deviation of NC coordinates measurement

条件で座標計算を行うことが可能となった。

5.2 測定座標系からNC座標系への座標変換

実験結果の解析において、本システムで計測された座標（以下測定座標と呼ぶ）と校正基準であるNC工作機械のコントローラが表示する座標（以下NC座標と呼ぶ）とを比較する必要がある。このため 1, 9, 14, 16, 20, 25, 32, 34番の8個の格子点（図8参照）における測定座標とNC座標が最も一致するような座標変換式を最小二乗法を用いて求め、それに従ってすべての測定座標をNC座標系での値に変換した。

5.3 計測結果とその考察

表2に三点法、音速推定法を用いた場合の測定誤差を示す。各格子点において座標変換後の測定座標の平均値とNC座標の誤差を求め、全格子点におけるこの誤差の平均値を表中の式に従って計算した。また図9に各計測法を用いた場合のY=-200mmの平面内の格子点における測定座標の標準偏差を示す。三点法を用いた場合Z座標の計測精度がX, Y座標の計測精度に比べて悪く、測定値の標準偏差も大きい。これに対して音速推定法を用いた場合、冗長な受波器を測定空間の上方に設置するため三点法に比べてZ座標の測定誤差が減少し、測定値の標準偏差も小さくなることからわかる。さらに音速推定法を用いた場

合X, Y座標の計測精度も三点法に比べて改善されている。これは音速推定法が測定空間内の音速を推定計算するのに対して、三点法では実験の都合上図8に示すように測定空間から約1m離れた音速補正センサからのデータをもとに距離計算を行っており、測定空間と音速補正センサの設置場所との間で温度、湿度、空気の流れ等の条件が異なったためであると思われる。

以上より本システムは音速推定法を用いた場合、X×Y×Zが900×400×400mmの測定空間内のXYZの各座標を測定誤差の平均値±0.3mm程度で計測することが可能である。

5.4 測定空間を制限した場合の本システムの計測精度

本論文では以下音速推定法を採用することにする。第3章のシミュレーション結果より計測精度は測定空間の中央付近で最も良く、それから離れるに従って悪くなる。このことを考慮して測定空間の中央付近の18個の格子点（図8で陰影を施した部分）のみを解析対象とした結果を表2にあわせて示す。これより本システムはX×Y×Zが300×400×400mmの測定空間内のXYZの各座標を誤差の平均値±0.2mm程度で計測することが可能であり、測定空間を制限することで計測精度が向上することがわかる。またこの測定空間内での測定座標と真の座標の距離Δ（以下これを位置計測精度と呼ぶ）は0.3mm程度である。

6. 位置計測の誤差要因の検討

本章では位置計測の誤差要因を1)発信器・受波器間の距離測定誤差、2)測定座標系の校正誤差（すなわち受波器同志の距離測定誤差）に大別し、それらについて検討する。

6.1 空気の状態に起因する距離測定誤差の影響

音速推定法では測定空間内の音速を一定と仮定しているが、温度・湿度や空気の流れ等の空気の状態は空間分布しており、

Table 3 Example of measured distances between receivers

T No.	R No.	Measured distance (A)	Difference (B)	(B)/(A) $\times 10^{-4}$
1	2	2848.3	0.0	0.0
2	1	2848.3		
2	3	2697.6	0.3	1.1
3	2	2697.3		
3	1	1904.1	0.1	0.5
1	3	1904.2		
1	4	3212.0	0.3	0.9
4	1	3212.3		
2	4	2067.6	0.2	1.0
4	2	2067.8		
3	4	1849.8	0.1	0.5
4	3	1849.9		

※ For example, T No.=1 and R No.=2 means that R_1 transmits the pulse and R_2 receives it.
 ※ Measured 1000 times for each data ※ Unit:mm

それに伴い厳密には測定空間内の音速も空間分布している。従って音速推定法で求められる測定空間内の平均的な音速は、発信器から各受波器への超音波パルスの伝播経路における真の音速とは異なるため、音速の補正誤差が生じてしまう。NC工作機械を用いた精度検証実験において音速補正センサの設置場所を数箇所変えて音速をモニタした結果、それぞれ音速推定法により得られる音速とは0.05m/s程度の偏差があることが確認された。この例より音速の補正誤差を0.05m/sであると仮定すると1mの測定距離で0.1mm程度の距離測定誤差が生じる。第3章では距離測定誤差が時間的にばらつくとして仮定してシミュレーションを行ったが、空間的にばらつくとして仮定しても同様のシミュレーションが有効である。すなわち測定空間内の音速を一定と仮定することにより生じる距離測定誤差が空間的に平均0.0mm、標準偏差0.1mm/mの正規分布に従うと仮定した場合、図5(b)より0.2mm程度の位置計測精度が得られることが予測される。

6.2 測定座標系の校正誤差の影響

表3に測定座標系を校正する際に受波器間の距離を測定した例を示す。受波器間の真の距離は未知であるが、各受波器の発信機能、受波機能を入れ換えて同一距離を測定した場合の偏差から、音速の補正誤差等に伴う受波器間の距離測定誤差が測定距離の 10^{-4} 程度であることが推察できる。第3章のシミュレーションと同様の条件（図4参照）において受波器 R_i と R_j との間の真の距離を $d_{i,j,0}$ とする。 $\xi_{i,j}$ を正規分布 $N(0, 10^{-4})$ に従う乱数として、

$$d_{i,j} = d_{i,j,0}(1 + \xi_{i,j}) \quad (i=1\sim 4, j=i+1\sim 4) \quad (6)$$

のように測定距離 $d_{i,j}$ を計算機内に発生させ、これらを用いて $R_1\sim R_4$ の座標を4.2節で述べたように計算し、校正誤差を有する測定座標系を構成する。この座標系を1000個用い、発信器・受波器間の距離も正規分布 $N(0, 10^{-4})$ に従ってばらつくとして仮定して第3章と同様の手法で精度分布をシミュレーションした結果を図10に示す。これより測定座標系の校正誤差と距離測定誤差の両方が存在する場合、図5(b)に示した距離測定誤差のみが存在する場合に比べて精度は劣化し、測定空間の中央付近でも0.2~0.3mmの位置計測精度しか得られないことがわかる。これは第5章でNC工作機械を用いて検証した本システムの位置計測精度と同程度の値であり、シミュレーションが妥当であることがわかる。測定座標系の校正誤差と距離測定

Fig.10 Influence of receivers positions calibration error on measuring accuracy

誤差はともに音速の補正誤差に主に起因しており、恒温化、安定化を考慮しない通常の空気中では、本論文で示した0.3mm程度の位置計測精度は実現でき得る限界の値であると思われる。

7. 結 言

超音波を用いたロボットの計測システムにおいて、位置計測精度を理論的、実験的に検証した。以下に結果をまとめる。

- (1) 座標計測原理として冗長な受波器を用いた音速推定法を提唱した。本手法は測定空間内の音速をリアルタイムで正確に補正できる。また4個目の受波器を測定空間の上方に設置するのでZ座標の計測精度が高い。
- (2) モンテカルロ法を用いて測定空間内の精度分布をシミュレーションし、音速推定法の有効性を確認した。
- (3) 精度1μmのNC工作機械を校正基準として本システムの位置計測精度を検証した結果、本システムは $X \times Y \times Z$ が $300 \times 400 \times 400$ mmの測定空間内のXYZの各座標を測定誤差の平均値 ± 0.2 mm程度で計測可能であることが判明した。
- (4) 位置計測の誤差が音速の補正誤差に伴う発信器・受波器間の距離測定誤差と測定座標系の校正誤差に起因することをシミュレーションにより確認した。

参 考 文 献

- 1) An Overview of Test Equipment and Metrology Methods for Robot Performance Evaluation in Accordance with ISO 9283, ISO DTR 13309, (1994) 1.
- 2) 斉藤正樹：ロボットの実際の挙動を確認するチェック・システム，自動化技術，18，11（1986）117.
- 3) 中村 収，後藤充夫，豊田幸司，高井 望，黒澤俊郎，中俣 透：三次元トラッキングレーザ干渉計による座標測定機の精度評価，精密工学会誌，58，11（1992）1899.
- 4) 青柳誠司，岡部佐規一，佐々木 健，高野政晴：超音波によるロボットの3次元位置・姿勢計測（第1報）—計測原理と計測システムの構築—，精密工学会誌，58，5（1992）859.
- 5) J.H.Borm and C.H.Wenq: Determination of Optimal Measurement Configurations for Robot Calibration Based on Observability Measure, Int.J. Robotics Res., 10, 1, (1991) 51.
- 6) P.Judd and A.B.Knasinski: A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification, Trans. Robotics and Automation, 6, 1, (1990) 20.
- 7) K.Takamasu, R.Furutani and S.Ozono: Development of the Three Dimensional Coordinate Measuring System with Ultra-Sonic Sensors, Proc. Int. Symp. Metrol. for Quality Control in Production, (1984) 300.
- 8) 馬 樹元，下河辺 明：超音波による3次元座標測定，精密工学会誌，54，12（1988）2359.
- 9) 津田孝夫：モンテカルロ法とシミュレーション，培風館，（1969）1.