



# 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—

青柳誠司\*\* 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 (1st Report)  
-Principle of Measurement and Trial Manufacture of System-

Seiji Aoyagi, Sakiichi Okabe, Ken Sasaki and Masaharu Takano

Nowadays numerous industrial robots are increasingly applied to complicated and precise operations such as assembly. So precise estimation of performance characteristics of a robot, such as positioning accuracy, orientating accuracy, path accuracy and so on, is being necessary for both users and manufacturers of robots. However it is difficult to measure the position and orientation of a robot moving in wide 3-D (three dimensional) space without contact, in real time and with high accuracy. In this paper a system using ultrasonic waves is proposed. The principle is a triangulation using distances between transmitters attached to a robot arm and receivers placed around the work space of the robot. An electric spark which works as a non-directional point source of ultrasound is used as a transmitter. This system is simple and economical compared with that using laser beams or LED. Moreover the accuracy is good because it measures distances directly from the time-of-flight of an ultrasonic pulse. In this first report the principle and a trial manufacture are dealt with.

**Key words:** robot, ultrasonic waves, 3-D measurement, triangulation, electric spark

## 1. はじめに

ロボットがピックアンドプレイス等の単純な作業のみでなく、組立等の高い精度が要求される作業にも用いられつつある現在、メーカ、ユーザの双方にとってロボットの運動性能を正確に評価することは重要な課題である。特にロボットの絶対位置決め精度の評価はマニュアル教示の代替として期待されているオフラインプログラミングの前提となるので重要である。しかし、広い3次元空間内を任意の軌道をとりながら移動するロボットの位置・姿勢を非接触、リアルタイムに、しかも高精度で計測する測定機器は現状では実用段階に至っていない。そのため現在ロボットの性能評価として、空間上の数点への繰返し位置決め精度を近接セ

ンサで評価することが一般に行われている<sup>1)</sup>。この方式は測定精度は比較的高いが静的な測定であり、しかも局所的なデータしか得られず、ロボットの運動性能の評価には十分とはいえない。

3次元座標の非接触測定装置として、従来よりLED光<sup>2)</sup>、レーザービーム<sup>3)</sup>、超音波<sup>4)</sup>を用いたシステムが研究されており、一部商品化されている。このうち前二者は、2章で述べるように角度を用いた三角測量を行うため広い測定範囲においては位置精度が出にくい。しかも画像処理装置やレーザー干渉計が必要なのでシステムが大がかりで高価になり、各メーカ、ユーザが独自でシステムを所有するのは困難である。レーザーを用い距離による三角測量を行った報告もあるが<sup>5)</sup>システムが高価になりロボットの計測には適さない。

本研究では図1に示すような超音波パルスの伝播時間測定による距離計測を応用した3個の発信器、3個の受波器を用いてロボットの位置・姿勢を計測する手法を提唱し、これに基づいた計測システムを構築することを目的とする。本システムは、安価な超音波素子

\*原稿受付 平成3年4月23日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和62年3月27日)および昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和63年3月16日)にて発表

\*\*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)

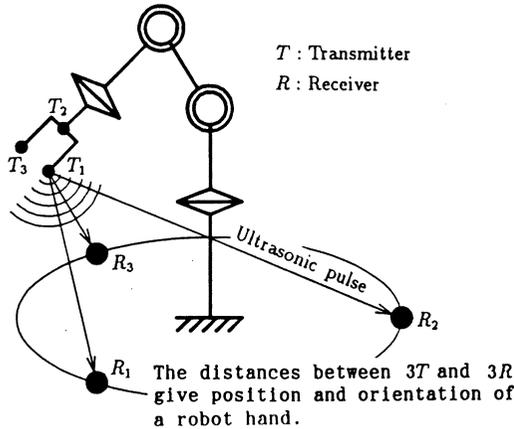


Fig.1 Principle of 3-D measurement system using ultrasonic pulse

を用いるため簡便，安価に構成でき，距離を用いた三角測量を行うため測定精度もロボットの計測に必要な水準が得られる．本論文では超音波パルスを用いることの意義と計測原理について述べる．また超音波距離計および計測システムを試作し，3次元空間内で回転するアームの位置・姿勢を測定することによりシステムの計測精度を検証したので，それについて述べる．なお超音波発信器・受波器の詳細，高い計測精度を得るための3個の受波器の最適配置法，システムの広い3次元空間内での動的な位置・姿勢測定などの高度な評価等については続報において述べる予定である．

## 2. 超音波パルスを用いる方式の利点

### 2.1 ロボットの位置決め精度との関連性

現在の産業用ロボットの位置繰返し精度は6自由度垂直多関節型のもので $\pm 0.3\text{mm}$ 程度であるが，絶対位置決め精度については通常カタログに表示されておらず<sup>6)</sup>，比較的高精度なDDロボットやスカラ型ロボット以外のロボットではかなり悪いと言われている．この原因として，リンク長，各軸の芯ずれ等の機構の寸法誤差や減速器のバックラッシュ等が挙げられる．従って $2\text{m}$ 四方程度の3次元空間内の座標を $\pm 0.3\text{mm}$ 程度の測定精度で簡便・安価に計測するシステムがあれば，絶対位置決め精度，姿勢精度，経路繰返し精度，絶対経路精度，速度精度等のロボットの運動性能の評価に有効である<sup>1)</sup>．

超音波距離計は温度や空気の局所的な揺らぎ等の影響を受けやすい音速を利用するため，密閉しない通常の室内で測定を行う場合やや距離測定精度が悪くなるという問題点はあるが，精度的には許容範囲内であり，

超音波を用いた計測システムはロボットの性能評価に十分有効であると考えられる．

### 2.2 距離を用いた三角測量と角度を用いた三角測量との比較

角度を用いた三角測量の例として，レーザヘッドからのビームを基準点に設置した2軸回りに回転可能なミラーで反射させ，コーナキューブ等のターゲットに照射するシステムについて考える．この場合，ターゲットの移動に伴うビームの位置ずれを光位置検出器で検出し，それをなくするようにミラーの回転角度を常に制御し，この回転角度からターゲットの存在する方位角を知り位置を計算する方式がとられる．このシステムでは，例えば基準点から $1\text{m}$ 離れたターゲットを $\pm 0.2\text{mm}$ の精度で計測するために $\tan^{-1}(\pm 0.2/1000) = \pm 0.01^\circ$ の高い角度測定精度が要求される．さらに検出器がこの角度精度を持っているとしても<sup>7)</sup>，ターゲットを正確にこの角度精度でリアルタイムに追尾するには極めて高度な制御技術が必要であり，システムの開発費等も膨大なものになる<sup>8)</sup>．

これに対して本システムの3次元座標の計測精度は距離計測精度により決定されるので，測定空間の大小にかかわらず高い精度が得やすいという特長を持つ．

### 2.3 伝播時間を測定する方法と位相差を測定する方法との比較

超音波を用いて距離を測定する方法に，数十波長の超音波を断続的に送信し受信波形との位相差より距離を求める方法がある<sup>9)</sup>．この方法は振幅変調した数種類の音波を送る必要があり，また不要な反射波を除去する必要があるので1回の座標の測定に時間がかかるという問題点がある．これに対して本システムの超音波パルスの伝播時間を測定して距離を求める方法は，3章で述べるように信号処理が容易なため測定時間が短く，反射波の影響も受けにくいという特長を持つ．

## 3. 超音波距離計

### 3.1 発信器および受波器

ロボットは様々な位置・姿勢をとるので，超音波発信器は測定精度および指向性の観点から無指向性点音源であることが望ましい．そこで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る<sup>4) 10)</sup>．本システムにおける発信器の構造を図2に，放電電気回路のブロック線図を図3に示す．電極間に衝撃的な高電圧を印加することにより電気火花を生じさせると，それに伴い超音波パルスが発生する．受波器は図4に示す共振周波数 $85\text{kHz}$ のコンデンサ型

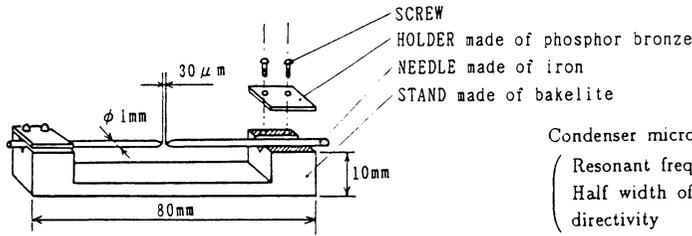


Fig.2 Structure of transmitter

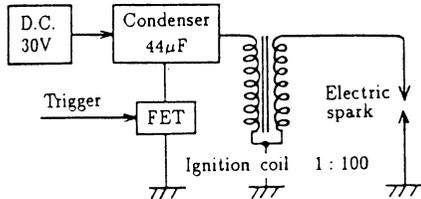


Fig.3 Electric circuit of transmitter

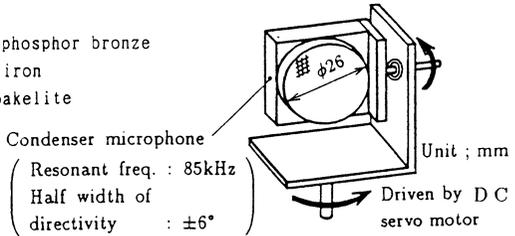


Fig.4 Structure of receiver

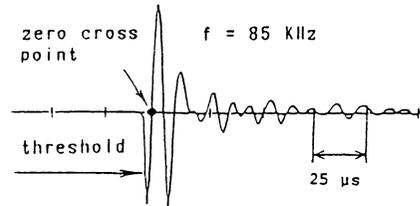


Fig.5 Received pulse waveform by electric spark discharge

のものを用いた<sup>11)</sup>。図5に電気火花により生じた超音波パルスの受信波形を示す。波形は超音波パルスが到達した瞬間をとらえるのに十分な鋭い立ち上がりを持ち、その音圧はロボットへの応用に必要な2m程度の距離測定に十分である。10万回放電した後の電極表面を顕微鏡で観察したところ微小なクレータ状の損耗が見られたものの、電極の消耗に伴う受信波形の変化は微小であり測定精度に影響を及ぼさない程度であった。

### 3.2 距離測定方法

本距離計は超音波パルスの到達した時点として図5に示すように閾値から先のゼロクロス点を用いることにより、測定距離の変化等に伴う振幅の変化の影響を受けにくくしている<sup>11)</sup>。本距離計は超音波パルスの到達時間に音速を乗じて距離を求めるため、既知の一定距離(約1350mm)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して正確な音速を求めている。

### 3.3 距離計測精度の検証

本距離計の計測精度を1μmの位置決め精度を持つNC工作機械を校正基準として検証した。発信器をNC工作機械のベッドに固定し、ベッドを1軸方向上の50mmごと800mmまでの各点で1μmの精度で位置決めし、各点における発信器と受波器の間の距離を本距離計により1000回ずつ計測した。図6(a)に示すように受波器を最初の発信器の位置から約200mm離して設置した場合と約1200mm離して設置した場合について測定を行った。最初の測定点を原点とし、各点での測定距離から原点での測定距離を差し引いたものを相対座標として求めた結果を図6(b), (c)に示す。本距離計の測定誤差の平均値は1mの測定範囲で±0.1mm以内、2mの測定範囲で±0.3mm以内であり、標準偏差は1mの測定

範囲で0.1mm以下、2mの測定範囲で0.2mm以下であった。

測定誤差の要因は、測定を行う場所と音速補正用の距離計の設置場所が実験の都合上1mほど離れており、恒温化や空気の安定化がなんら考慮されていない工場内で測定したため気温・湿度、空気の流れ等が双方の場所において異なってしまう、正確な音速の補正が行われなかったためと考える。測定誤差のばらつきは測定空間における空気の揺らぎに起因する。比較のため音速補正用の距離計を含めた本距離計を密閉された風洞装置内に設置し、近似的な無風状態で約2mの距離を約4時間にわたって1000回計測した。その結果気温の変化による音速のドリフトにもかかわらず測定誤差の標準偏差は0.07mm、測定誤差の最大値と最小値の差は0.34mmと密閉しない場合に比べて高い精度が得られた。これより測定誤差のばらつきは、発信器である電気火花の放電位置のばらつき等ではなく測定空間の空気の揺らぎに起因することがわかる。従って音速補正を測定位置の近傍で行い、測定空間の空気の安定化を配慮すれば本距離計の精度はさらに向上すると思われる。

## 4. 3次元位置・姿勢計測原理

ここでは本研究で提唱する3個の発信器と3個の受波器を用いた位置・姿勢の計測原理について述べる。

### 4.1 3次元位置計算

図7に示すように3個の受波器を配置し1番目の発信器  $T_1(X_1, Y_1, Z_1)$  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 ( $i = 1 \sim 3$ )。このとき

$$(X_1 - x_i)^2 + (Y_1 - y_i)^2 + (Z_1 - z_i)^2 = L_i^2 \quad (i = 1 \sim 3)$$

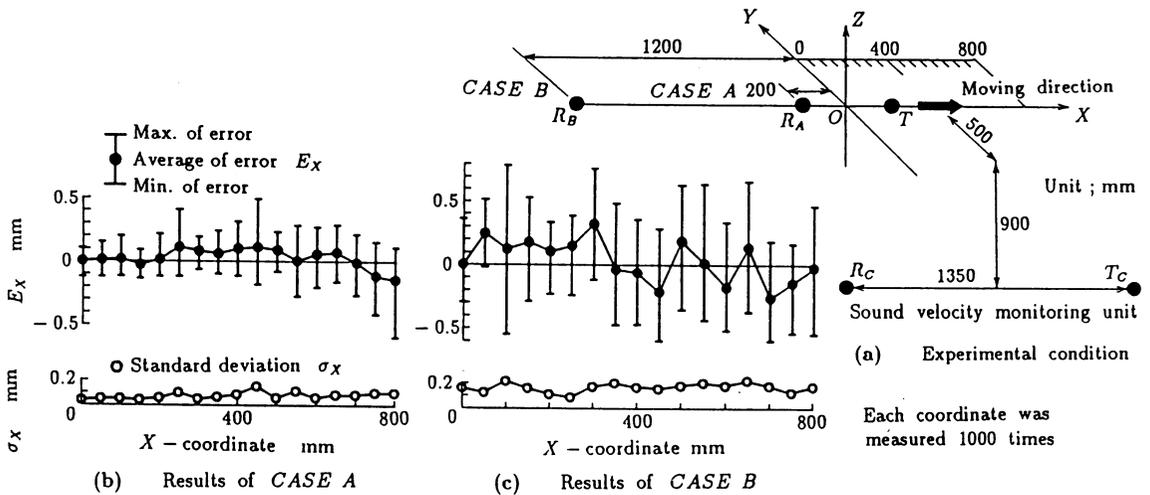


Fig.6 Experimental results of accuracy of ranging system

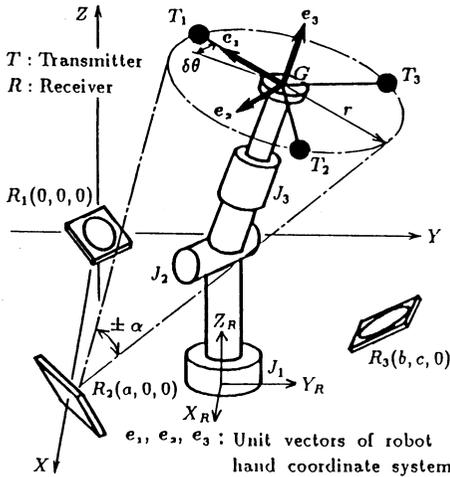


Fig.7 Principle of 3-D measurement

を解くことにより  $T_1$  の 3次元位置が求まる。残りの  $T_2(X_2, Y_2, Z_2)$ ,  $T_3(X_3, Y_3, Z_3)$  も同様にして求めることができる。ここで計測に先立ち 3 個の発信器の構成する三角形の重心とハンドの先端  $G$  が一致するように位置決めされているとすると  $G$  の座標は  $T_1, T_2, T_3$  の測定された座標より計算し求めることができる。

4.2 3次元姿勢計算

図7に示すように、基準ベクトル  $e_1, e_2, e_3$  をとり、これでロボットの姿勢を表すとする。まず

$$p_i = \overrightarrow{GT_i} \quad (i = 1 \sim 3) \quad q = p_1 - \frac{|p_1|^2}{p_1 \cdot p_2} p_2$$

を計算する。 $q$  は  $T_1, T_2, T_3$  及び  $G$  で構成される平面上で  $p_1$  と直交するベクトルである。これらを用いて基準ベクトルは、

$$e_1 = \frac{p_1}{|p_1|} \quad e_2 = \frac{q}{|q|} \quad e_3 = e_1 \times e_2$$

のように求めることができる。以上のようにロボットの位置・姿勢は 3 個の発信器と 3 個の受波器を用いることにより一意に求めることができる。

計測した位置・姿勢をロボット座標系 (図7の  $X_R, Y_R, Z_R$ ) での値に変換する場合、ロボット座標系と測定座標系との相対位置関係を校正する必要が生ずるが、この手法としてロボットに数点への位置決めを行わせ、その各点での計測座標値と各関節のエンコーダの読みを利用する方法が種々提案されている<sup>12)13)</sup>。

5. 計測システムの構成

ここでは本研究で構築した計測システムの概要とその特長について述べる。

5.1 計測システムの概要

図8に本研究で用いた計測システムの概要を示す。

5.2 受波器の回転可能化

受波器の指向性が半減角  $6^\circ$  と鋭いため3章図4に示すように受波器を水平、鉛直方向に回転可能にして発信器に対し正面を向くようにした。これにより従来の固定された超音波受波器を用いるシステム<sup>4)9)</sup>に共通な受波器に指向性があるため測定可能な空間が制限されるという問題が解消され、それらに比べて高い精度で計測できる空間が拡大された。さらに指向のかなり鋭い受波器を発信器に対して正面を向かせることにより、発信器以外から飛来する超音波領域周波数のノイズの防止が可能となった。

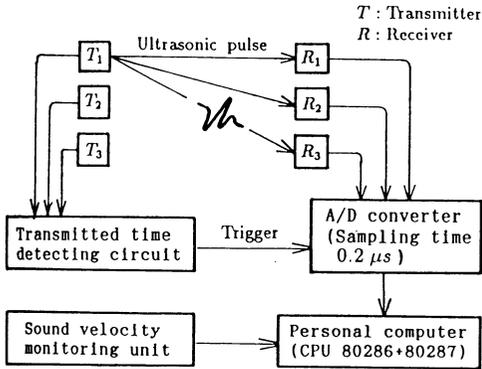


Fig.8 Outline of 3-D measuring system

5.3 3個の発信器の配置半径

図7に示す発信器を配置する半径  $r$  について考察する。本システムでは計測のリアルタイム性を考え受波器を3個の発信器の正面に逐一向かせず、 $G$ の正面を向かせたままで3個の発信器の位置を計測する。このため受波器が正確に発信器までの距離を計測できる許容振れ角を  $\alpha$ 、受波器から  $G$  までの距離を  $L$  とすると  $r$  は  $r < L \tan \alpha$  を満たす必要がある。一方  $r$  が大きいほど姿勢測定誤差は小さくなる。例として図中  $T_1$  の位置測定誤差が  $\delta d$  である場合  $\delta \theta = \tan^{-1}(\delta d/r)$  の角度誤差を伴って  $e_1$  は測定される。

本システムの超音波距離計は受波器の半減角  $6^\circ$  の誤差内で受波器が発信器に対し正面を向いていれば、受波器の大きさの測定精度への影響は 500mm の測定範囲で 0.2mm 程度であった。そこで本システムでは受信波形および音圧をもとに  $\pm 3^\circ$  程度の誤差で受波器が  $G$  に対し正面を向くようにしてこの影響を取り除いている。従って本システムでは  $\alpha = 3^\circ$ 、 $L = 500 \text{ mm}$  と仮定した場合の条件  $r < 26.0 \text{ mm}$  より  $r = 25.0 \text{ mm}$  とした。このとき  $\delta d = 0.1 \text{ mm}$  と仮定すると姿勢計測誤差は  $\delta \theta = 0.23^\circ$  で見積られる。

5.4 初期座標系の校正

計測に先立ち、3個の受波器の相対位置関係を知ることが必要である。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送信できるので、受波器同志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まる。従って、3個の受波器を適当な位置に配置し、 $R_1(0,0,0)$ 、 $R_2(a,0,0)$ 、 $R_3(b,c,0)$  として  $a, b, c$  を求め標準座標系を校正する(図9参照)。受波器同志の間の距離の測定に際しては受波面同志を平行に保ったので、受波器の大きさおよび指向性は測定精度に影響を与えなかった。このように、本システムは内部でキャリブレーションを行うため外部から初期座標系を校正する必要がなく、ま

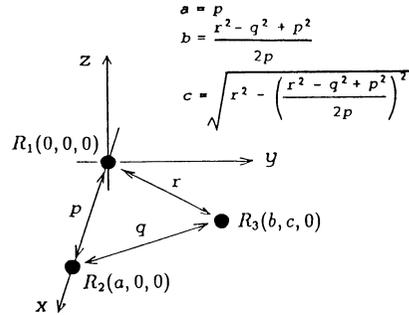


Fig.9 Mutual calibration of receiver positions

た受波器を任意の位置に配置できるため測定対象の変化に対して大きな柔軟性があるという特長を持つ。

6. 位置・姿勢計測精度の検証実験

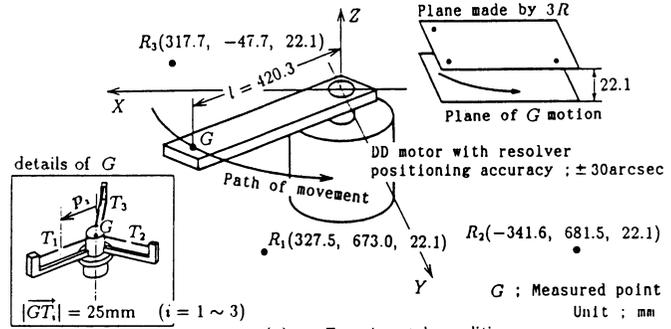
図10(a)に示すような空間回転アームの円軌道上の数点におけるアーム先端位置(精度  $\pm 0.06 \text{ mm}$ )とアーム姿勢(精度  $\pm 30 \text{ arcsec}$ )を校正基準とし、それを測定することで本システムの3次元位置・姿勢計測精度を検証した。アームの運動は平面内で行われたが、測定座標系の  $XY$  平面とは一致しておらず計測は立体的である。計測に際しては定盤、ジグ等を用いて両平面が平行になるよう留意した。平行精度が比較的良好であったことは表2に示す  $Z$  座標の測定結果からも確認できる。

3個の発信器の位置を順次計測して重心  $G$  の座標を求めた。最初の2つの  $G$  の測定  $XY$  座標とアーム座標を合致させることにより、測定システムの座標系からアーム座標系への2次元での座標変換式を求めた。以下3番目の点からはこの式に従って測定座標をアーム座標に変換した。姿勢角は図(a)中の  $p_1$  を求め、この  $XY$  成分を同様にアーム座標系に変換することにより得た。図10(b)および表1、表2に結果を示す。表2中  $Z_M$  および  $E_Z$  の欄には測定  $Z$  座標の平均値  $-22.1 \text{ mm}$  からの偏差を示した。図(b)において実線はリゾルバの読みより求めた正確なアームの位置・姿勢を表したもので、破線は本システムの測定誤差を図中に示す倍率で拡大して測定結果を表示したものである。位置測定誤差は  $0.4 \text{ mm}$  以下であった。標準偏差が小さいことを考慮すると、第1点、第2点だけでなくさらに多くの点を合致させることにより座標変換の精度を向上させれば、位置測定精度は改善されると考える。姿勢角測定誤差は  $0.4^\circ$  以下であり、標準偏差は  $0.2^\circ$  以下であった。以上の結果より、本システムが実際のロボットの計測に対応できる可能性を持つことが確認された。

Table 1 Results of orientation measurement

No.	$\theta_A$ (True)	$\theta_M$	$E_\theta$	$\sigma_\theta$
1	20.0°	20.1°	0.1°	0.0°
2	30.0°	29.8°	-0.2°	0.1°
3	40.0°	40.0°	0.0°	0.1°
4	50.0°	50.1°	0.1°	0.1°
5	60.0°	60.4°	0.4°	0.2°
6	70.0°	70.0°	0.0°	0.1°

$\theta_A$ : Arm orientation (Standard of calibration)  
 $\theta_M$ : Measured orientation  
 $E_\theta, \sigma_\theta$ : Error and standard deviation of orientation measurement



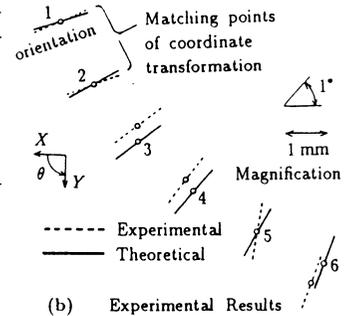
(a) Experimental condition

Table 2 Results of position measurement

No.	$(X, Y, Z)_A$ (True)	$(X, Y, Z)_M$	$E_X$	$\sigma_X$	$E_Y$	$\sigma_Y$	$E_Z$	$\sigma_Z$
1	(389.5, 157.7, 0.0)	(389.5, 157.7, -0.2)	Matching points of		coordinate transformation		-0.2	0.2
2	(356.2, 223.0, 0.0)	(356.2, 223.0, 0.2)					0.2	0.1
3	(312.1, 281.4, 0.0)	(312.1, 281.1, 0.3)	0.0	0.1	-0.3	0.1	0.3	0.4
4	(258.4, 331.4, 0.0)	(258.5, 331.2, -0.1)	0.1	0.1	-0.2	0.1	-0.1	0.4
5	(197.0, 371.2, 0.0)	(197.0, 371.2, 0.0)	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.5
6	(129.8, 399.7, 0.0)	(130.1, 400.1, -0.2)	0.3	0.1	0.4	0.1	-0.2	0.4

$(X, Y, Z)_A$ : Arm coordinate (Standard of calibration)  
 $(X, Y, Z)_M$ : Measured coordinate  
 $E_X, E_Y, E_Z$ : Error of coordinate measurement  
 $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ : Standard deviation of coordinate measurement

Position G and arm orientation were measured 100 times for each data.



(b) Experimental Results

Fig.10 Measurement of position and orientation of rotational arm

7. 結 言

ロボットの運動性能を評価するシステムとして、超音波パルスの伝播時間計測を応用した簡便な3次元位置・姿勢計測システムを提唱した。本研究の主要な結果は以下の通りである。

- (1) 超音波素子が安価なこと、距離を用いた三角測量を行うので精度が出やすいことなどから本システムがロボットの運動性能の評価に有効なことを示した。
- (2) 電気火花を発信器とし、ゼロクロス点検出およびリアルタイム音速補正を行う超音波距離計を開発した。測定誤差の平均値は 1m の測定範囲で ±0.1mm 以内、2m の測定範囲で ±0.3mm 以内、測定誤差の標準偏差は1mの測定範囲で 0.1mm 以下、2m の測定範囲で 0.2mm 以下であった。
- (3) 3個の発信器と3個の受波器を用いたロボットの3次元位置・姿勢計測原理を提案し、それに基づき計測システムを構築した。本システムは初期座標系の決定が容易で、受波器を自由な位置に配置できるため測定対象の変化に対して大きな柔軟性を持つ。
- (4) 空間回転アームの位置・姿勢を計測し、本システムの3次元位置・姿勢計測精度を検証した。その結果本システムが実際のロボットの計測に対応できる可能性を持つことが確認された。

参 考 文 献

- 1) 「産業用ロボットの標準化に関する調査研究」成果報告書, (社)日本産業用ロボット工業会, (1988) 6.
- 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) K. Lau, R. J. Hocken and W. C. Haight: Automatic Laser Tracking Interferometer System for Robot Metrology, Prec. Eng., 8, 1, (1986) 3.
- 4) GP-8-3D Sonic Digitizer Operator's Manual, Science Accessories Corp., (1985) 1.
- 5) 後藤充夫, 谷村吉久, 黒澤俊郎: 追尾式レーザー干渉計による座標計測システム, 昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1988) 315.
- 6) 産業用ロボットカタログ総覧, (社)日本産業用ロボット工業会, (1990) 1.
- 7) 奥谷憲男, 上田富康, 増田 豊: 高分解能レーザエンコーダ, M&E, 4, (1987) 88.
- 8) 工業技術院大型プロジェクト 極限作業ロボット研究開発技術報告書, 極限作業ロボット技術研究組合, (1990) 168.
- 9) 下河辺 明, 馬 樹元: 断続超音波の多重位相差による3次元座標の測定, 精密工学会誌, 53, 9, (1987) 1408.
- 10) 松川真美, 大谷隆彦: 放電インパルス音源における放電回路条件の影響, 超音波研究会資料, (1988) 37.
- 11) 佐々木 健, 小野勝久, 高野政晴: ロボットのための高精度超音波センサの開発研究, 精密機械, 51, 6, (1985) 1238.
- 12) D. E. Whitney, C. A. Lozinski and J. M. Rourke: Industrial Robot Forward Calibration Method and Results, Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement and Control, 108, 1, (1986) 1.
- 13) 古屋信幸, 牧野 洋: S C A R A ロボット諸元のティーチングによる校正, 精密機械, 49, 9, (1983) 1223.