超音波によるロボットの3次元位置・姿勢計測 (第4報)*

—動的・静的位置計測システムの開発と実際のロボットの静的・動的位置計測—

青柳誠司** 藤岡 潤*** 土居 誠† 神谷好承** 佐々木 健*** 高野政晴**

Measurement of 3-D Position and Orientation of a Robot Using Ultrasonic Waves (4th Report)
-Development of Dynamic Position Measuring System and Static/Dynamic Position Measurement of a Practical Robot-

Seiji AOYAGI, Jun FUJIOKA, Makoto DOI, Yoshitsugu KAMIYA, Ken SASAKI and Masaharu TAKANO

A simple and economical ultrasonic measuring system of 3-D position and orientation of a robot has been proposed, and its accuracy is proved to be better than $\pm 0.3\text{mm}$ in each X, Y, Z coordinate in the previous report. This system is based on distance measurement between transmitters attached to a robot arm and receivers placed around the robot working space. In this report the effectiveness of this system for the static and dynamic position measurement of a practical robot is experimentally investigated. An automatic tracking system, which predicts the next transmitting position and controls rotational angle of each receiver so as that its receiving plane faces up to the transmitter without delay, is proposed. The static positions of a 6-DOF articulated robot (PUMA robot) are measured and the obtained error distribution is similar to that obtained by a high precision laser tracking system. Kinematic parameters of a SCARA robot are calibrated and the positioning accuracy is improved. The dynamic positions of a PUMA robot on linear and cornering paths are measured and the obtained trajectories coincide fairly with these obtained by a laser tracking system and these by a pen drawing. From these results, it is experimentally proved that this system has good potential to estimate the static and dynamic performance characteristics of a robot such as positioning accuracy, path accuracy, etc.

Key words: ultrasonic waves, 3-D measurement, robot, automatic tracking system, positioning accuracy, path accuracy, calibration

1. はじめに

現在産業用ロボットは位置繰返し精度に基づいたティーチングブレイバック方式で動作しており、ティーチングペンダント等を用いたマニュアルでの教示に多くの時間と労力が必要である。この代替としてオフライン教示の普及が期待されているが、この教示方式が有効であるためにはロボットが高い絶対位置・姿勢精度を有していることが前提となる。このためメーカ、ユーザの双方にとってこれらの精度を正確に評価することが現在重要な課題となっており、様々な3次元位置・姿勢計測システムが提案・利用されている¹⁾²⁾。これらのうち3次元測定機³⁾⁴⁾、セオドライト⁵⁾⁶⁾は基本的にリアルタイムな計測が行えず、一点あたりの計測に時間と労力が必要とされる。このため動的な絶対軌跡精度等をISO 9283「ロボットの特性・機能とその測定方法」⁷⁾に準拠して確認することができない。動的な計測も行えるレーザトラッキングシステム⁸⁾⁹⁾は、静的 $10\mu\text{m}$ 、動的 $20\sim 50\mu\text{m}$ の高精度で計測が行えるが、高価であり、しかも姿勢の計測を行うことが困難である。このような背景をもとに筆者らは既に超音波パルスの伝播時間計測を応用して¹⁰⁾¹²⁾、ロボットの位置および姿勢を安価、簡便に計測する方式を提唱し、 0.3mm の静的位置計測精度を実現した¹³⁾¹⁵⁾。本方式は現在 $0.1\sim 0.3\text{mm}$ 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が不足しているが、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キャリブレーションを行わない状態で数 $\text{mm}\sim$ 数 10mm であること⁴⁾⁶⁾⁹⁾を考慮すると、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考える。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、3個の発信器を用いれば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公立機関やロボットメーカーのみならず、ロボットユーザも所持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。さらに本システムを用いることにより、エンコーダのオフセット誤差等のロボットの機構誤差パラメータのキャリブレーションを簡易に行える可能性がある（これについては4章で後述する）。

前報¹⁵⁾では精度 $1\mu\text{m}$ のNC工作機械を校正基準として本システムの3次元静的位置計測精度を検討したので、本報では実際のロボットの静的・動的・位置計測に対する本システムの実用性を検討する。具体的に行うことは以下の通りである。1)発信器の位置を自動追尾しながら計測する動的・位置計測システムの構成法を示し、実際にシステムを開発する。2)本システムのロボットの静的な絶対位置決め精度検証に対する有効性を確認する。3)本システムのロボットキャリブレーションへの適用可能性を検討する。4)本システムのロボットの動的な絶対経路精度検証に対する有効性を確認する。

2. 3次元位置自動追尾計測システムの開発

2.1 発信器、受波器および位置計測原理¹³⁾¹⁵⁾

図1に本システムの計測原理を示す。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¹⁴⁾、受波器は共振周波数 85kHz のコンデンサ型のものを用いている。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、発信器に対し常に正面を向くようにしている¹⁵⁾。3次元座標の計算方法は、受波器を4個用いて測定空間内の音速を正確に推定計算する「音速推定法」を用いている¹⁵⁾。

*原稿受付 平成13年4月2日

**正会員 関西大学工学部 (吹田市山手町 3-3-35)

***正会員 石川工業高専 (河北郡津幡町北中条)

†松下通信金沢研究所 (金沢市彦三町 2-1-45)

**正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

***正会員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)

Fig.1 Principle of 3-D position measuring system using ultrasonic pluses

Fig.2 Block diagram of control system for DC servo motor

Fig.3 Feed-forward control of receivers

2.2 受波器回転角度サーボ系の設計

速度指令電圧を入力とし回転速度を出力とした場合のDCサーボモータの伝達関数を近似的に1次遅れ要素として取扱ひ、図2のブロック線図で示すような位置決め制御系を構成した。サンプリングタイム(0.7ms)を制御対象の時定数(7.1ms)の10%以下に設定したため近似的に連続時間系として取扱ひ¹⁶⁾、フィードバックゲイン K_P 、 K_V 、 K_A を、制御系の3極が以下になるように定めた。

$$-\omega_n \zeta_n \pm \omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2} j, \quad -T_n + 0j \quad (1)$$

ここで $\omega_n = 2\pi \cdot 10$, $\zeta_n = 0.707$, $T_n = 500$

ω_n は制御系の固有角振動数、 ζ_n は制御系の減衰比、 T_n は制御系の定常偏差を $e^{-T_n t}$ のように減少させる係数を表す。

本制御系に ω , rad/s の一定速度のランプ応答を与えた場合 (t を時間として ωt , rad の目標位置をサンプリングタイムごとに与えた場合)、定常速度偏差は理論的に $e_{sv} = (K_V / K_P) \omega = 0.024 \omega$, rad である(データは省略するが実験的にも確認した)。簡単のため2次元平面内において a m/s の速度で受波器の正面 b mm 先を横切る発信器(すなわちロボットの手先)を追尾する場合を想定する。現在の6自由度多関節型ロボットのアーム先端最大速度は各社カタログによれば $0.5 \sim 2$ m/s 程度であること、本システムでは受波器の設置に留意すればロボット作業領域と受波器とは1m以上離せることを考慮すると、 $a = 2$ m/s, $b = 1$ m の場合の計算結果より最大に見積もって $0.024 \cdot \tan^{-1}(a/b) = 1.5^\circ$ の受波器回転角度の定常偏差が生じる。正確な発信器・受波器間の距離計測が行えるための受波器回転角度の位置決め許容誤差が $\pm 3^\circ$ であることが確認されているので¹⁵⁾、本制御系は十分な発信器追尾性能を有していることがわかる。

2.3 受波器回転角度のフィードフォワード制御

本システムの発信器の放電周波数は、ミスファイアが生じない条

件、前回の放電による超音波が受波器に到達してから次の超音波を発信しなければいけない条件等から100Hz以下に制限される。例として放電周波数が50Hzでロボットの速度が2m/sの場合、発信器は放電周期の間に40mm進むことになる。前節と同様受波器の正面1m先を発信器が横切る場合を想定すると、この距離は受波器回転角度で $\tan^{-1}(40/1000) = 2.3^\circ$ に相当する。これは前述の許容誤差 $\pm 3^\circ$ の範囲内ではあるが、除去することが望ましい。この他超音波パルスが発信してから受波器に到達するまでの時間、発信器の位置計算時間、モータの位置決め時間等のロスタイムがあるので、計算により求めた現在の発信器の位置に受波器を向かせては遅れが生じてしまう。そこで本システムでは図3に示すように直前の発信位置および現在の発信位置をもとに時間外挿することで次の発信位置を予測して、そこに受波器を向かせるようなフィードフォワード制御を行っている。ロボットの手先が急に運動方向を切り替えたとしても、現在普及している減速機を用いたロボットの固有振動数が数Hz~10Hzであることを考慮すると、計測周波数(放電周波数)を50Hzと仮定した場合本計測システムで十分予測が可能であると考えられる。

3. 6自由度多関節型ロボットの静的位置計測実験

ISO 9283で定義されているロボットベース座標系を基準とした絶対位置決め精度を評価するためには、この座標系と計測座標系との相対位置関係を正確に知る必要があるが⁹⁾、基準面等がロボットに用意されていない現状では困難である。このため本論文では、格子点群にロボットを位置決めし、ロボットにより実現された格子がどの程度歪むかを計測座標系において評価することにより^{5) 6)}、絶対位置決め精度を評価することにする。

3.1 実験装置および実験方法

計測対象ロボットとして6自由度多関節型のPUMAロボット(川崎重工業(株)製、型式560)⁹⁾を採用した。仕様書によると本ロボットの位置繰返し精度は ± 0.1 mm である(ダイヤルゲージを用いて様々な条件下でこの値を確認した結果、確かに ± 0.1 mm 以内であった)。しかしながら絶対位置決め精度は仕様書に表記されていない。ロボットの手に発信器を固定し、図4に示すような36個の格子点にロボットを位置決めし、その位置を本システムで計測した。

比較のためレーザトラッキングシステム(ライカ(株)製、型式SMART310、公称静的計測精度 ± 10 ppm(μ m/m)、同動的計測精度 $\pm 20 \sim 50$ ppm)⁹⁾を用いて同じ格子点の計測を行った。このシステムは再帰型反射鏡であるキャッツアイを追尾しながらその中心に常にレーザビームを照射する。この際のビームの水平角、仰角およびレーザ干渉計により測定されるビームの往復距離からキャッツアイの3次元位置が求められる。キャッツアイのロボット先端への固定に際しては、ロボットフランジ面中心に対する超音波発信器の位置およびキャッツアイ中心の位置が互いに一致するように、またロボットの付加重量が互いに一致するように固定治具を設計し、本システム(超音波による計測システム)とレーザトラッキングシステムを用いた実験条件が同一になるように留意した。

3.2 計測結果とその考察

図5(a)に本システムによる計測結果を、同図(b)にレーザトラッキングシステムによる計測結果を示す。結果の解析において、図中○印を付した点における計測座標とロボット座標(ロボットコントローラが表示する座標)と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、それによってすべての座標をロボットベース座標系での値に変換した。なお計測座標系は受波器間の距離測定(精度0.1mm以内)によりロボットの計測に先立ち校正

Fig.4 Experimental condition of 3-D position measurement of PUMA robot

(a) Error distribution obtained by ultrasonic measuring system

(b) Error distribution obtained by laser tracking system

Fig.5 Results of static position measurement of PUMA robot

しており、この距離は本最小二乗推定で推定されるパラメータではない¹³⁾¹⁵⁾（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）。

PUMA ロボットの位置繰返し精度は±0.1mm 以内と高いため、誤差分布は何回格子点群への位置決め試行を行っても同一となるはずである。図 5(a) (b) より誤差分布の傾向は測定装置が変化しているにもかかわらず比較的良く似通っていることから（例えば 27 番の格子点で Z 正方向の誤差が大きい等）、これらの誤差は本システムの計測誤差に起因しているのではなくロボット自身の機構の寸法誤差に起因していることがわかる。従って本システムによりロボットの絶対位置決め精度（誤差分布）の評価や、次章で述べるロボットの機構誤差パラメータのキャリブレーションが行える可能性が十分あると考える（ただし図 5(a) (b) より得られた Δ の値はロボットにより実

現された格子がどの程度歪むかを表したものであり、ISO 9283 で定義されているロボットベース座標系を基準とした絶対位置決め精度とは異なる。レーザトラッキングシステムを用いてロボットベース座標系と計測座標系との正確な相対位置関係をキャリブレーションすることにより本ロボットの絶対位置決め精度を評価した結果、Δ = 4mm 程度であることが筆者らにより確認されている⁹⁾。

また図(a)と図(b)のロボットベース座標系に変換後の各 XYZ 座標の両者の計測値の偏差は 36 点における平均で ΔX_{LU} = 0.29, ΔY_{LU} = 0.13, ΔZ_{LU} = 0.36 mm である。またロボットベース座標系を介さず、本システムによる 36 点すべての計測座標をレーザトラッキングシステムの計測座標系での値に変換して両者を直接比較すると、ΔX_{LU} = 0.29, ΔY_{LU} = 0.14, ΔZ_{LU} = 0.31 mm である。これらよりレーザトラッキングシステムを校正基準として、本システムの計測精度は各座標計測で±0.3mm 程度であることが推論できる。この値は前報¹⁵⁾で精度 1μm の NC 工作機械を校正基準として検証した値と同程度である。本システムの計測誤差は前報で検討した通り、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計測座標系の校正誤差（計測に先立ち行う受波器間の距離測定における誤差）に起因していると考えられる。

4. スカラロボットのキャリブレーション

4.1 本実験の意義

ロボットのキャリブレーションの手法として、ロボットを多数の点に位置決めしてその位置を計測し、これと順運動学モデルが予測する位置とが最も一致するようにモデル内の機構パラメータを最小二乗法により推定する方法（以下多点位置決め法と呼ぶ）が広く採用されている^{3)~6)}。超音波を用いた本システムでは計測精度の制約から、6 自由度多関節型ロボットのすべての機構パラメータ（DHパラメータ⁹⁾）を正確に推定することは困難であると考えられる。そこで本章では 6 自由度多関節型ロボットに比べて機構の寸法誤差の発生箇所が少ないスカラロボットを対象とし、エンコードのオフセット誤差、リンク長誤差等の位置決め誤差に対して感度が高い機構パラメータのみを考慮してモデルを構築し、これらを推定する簡易的なキャリブレーションを行う。

4.2 実験装置およびキャリブレーション前の位置計測結果

図 6 にスカラロボットの外観を示す。本ロボットは部品給配を目的として、市販のロボットの水平面内の駆動部分（リンク 1, 2）を利用し、これを 90° 回転させて鉛直面内で作業を行うように改造されている¹⁷⁾。仕様書に記された位置繰返し精度は±0.03mm である。

36 点の格子点にスカラロボットを位置決めさせ、その静的位置を本計測システムで計測した。本ロボットのコントローラは逆変換機能を有していないため、手先の目標座標を実現するような各関節の

Fig.6 Configuration of SCARA robot

Fig.7 Results of static position measurement of SCARA robot

(c) Mounting error of robot-base

Fig.8 Parameters to be calibrated

Parameter	Nominal	Calibrated	Deviation
α	0.0°	-0.5°	-0.5°
β	0.0°	0.7°	0.7°
L_1	250.0mm	247.8mm	-2.2mm
L_2	250.0mm	252.7mm	2.7mm
H	545.0mm	547.9mm	2.9mm
ϵ	0.0°	0.4°	0.4°

回転角度を解析的に求め、その値をコントローラに与えた。実験においてはティーチングボックスを用いて目測によりロボットにリンク1, 2両方が鉛直上方に伸びた初期姿勢をとらせ、そこでの第1, 2軸の角度を関節角原点とし、エンコーダ（軸の回転角度センサ）の出力を0にリセットした（ロボットには原点復帰機能があるが、この原点は本実験で採用するロボットの初期姿勢とは全く無関係な位置に設定されているのでこのような措置を講じた）。

実験結果を図7(a)に示す。これより本ロボットの絶対位置決め精度は、キャリブレーションを行わない場合 $X \times Y \times Z$ が $450 \times 200 \times 200$ mmの範囲で $\Delta X=0.5$, $\Delta Y=0.9$, $\Delta Z=1.1$ mm程度である。誤差

の主な理由は、関節角の原点を目測により定めたため大きなエンコーダのオフセット誤差（リンク1, 2が正確に鉛直上方に向く際の軸の回転角度と、エンコーダ原点における軸の回転角度との偏差。図8(a)参照）があったためである。

4.3 キャリブレーションの手順

ここでは校正すべきパラメータを図8に示す α , β , L_1 , L_2 , H , ϵ の6個に特定する。この時ロボットの先端は36個の格子点で理論的に以下の式で示される座標にずれて位置決めされるはずである（ $i=1 \sim 36$ ）。

$$X_i = X_{NCi} + \sin \epsilon \{L_1 \sin(\theta_i + \alpha) + L_2 \sin(\theta_i + \alpha + \phi_i + \beta)\} \quad (2)$$

$$Y_i = \cos \epsilon \{L_1 \sin(\theta_i + \alpha) + L_2 \sin(\theta_i + \alpha + \phi_i + \beta)\} \quad (3)$$

$$Z_i = L_1 \cos(\theta_i + \alpha) + L_2 \cos(\theta_i + \alpha + \phi_i + \beta) + H \quad (4)$$

ここで θ_i , ϕ_i はロボットに誤差が無い場合（全てのパラメータが公称値通りである場合）に i 番目の格子点にロボットを位置決めする際の第1, 2軸の関節角度指令値である。 X_{NCi} も同様にロボットに誤差が無い場合の X 座標の指令値である。次に i 番目の格子点での本システムで計測した発信器の位置座標を X_{Mi} , Y_{Mi} , Z_{Mi} として以下の残差二乗和を考える。

$$\eta(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \epsilon) = \sum_{i=1}^{36} \{(X_i - X_{Mi})^2 + (Y_i - Y_{Mi})^2 + (Z_i - Z_{Mi})^2\} \quad (5)$$

この評価関数を最小にする α , β , L_1 , L_2 , H , ϵ を最小二乗法により求める。計算結果を表1に示す。

本実験では4.1節で述べたように簡易的なキャリブレーションを行うため、姿勢の変化も考慮した軸のコンプライアンス（本ロボットは鉛直面内で作業を行うためこれが大きく先端位置決め制御に影響すると予測される）のモデル化や⁵⁾、軸間の倒れやねじれのモデル化⁶⁾は行っていない。これらモデル化されない誤差が最小二乗法の意味で式(5)で示した6個のパラメータに転嫁されると考える。このため表1の L_1 , L_2 , H パラメータにおいて公称値と校正値の間で3mm程度の比較的大きな偏差が生じていると考える。

4.4 キャリブレーション後の位置計測結果

キャリブレーションの結果求められたパラメータを用いてロボットの順運動学モデルを修正し、これに基づいて X 方向に全体的に75mmずらした別の36点の格子点への位置決めをロボットに行わせ、その静的位置を本計測システムで計測した。実験結果を図7(b)に示す。キャリブレーションを行うことによりスカラロボットの絶対位置決め精度は $\Delta X=0.4$, $\Delta Y=0.3$, $\Delta Z=0.4$ mmまでに改善された。これらの誤差は計測精度の程度であり、これ以上の精度を達成するためには軸の芯ずれや傾き等の感度の低いパラメータも含めてより正確なモデルを作り、精度の高い計測システムを使用してこれらパラメータまで正確に推定する必要があると考える。このような精度上の問題は本システムは、エンコーダのオフセット誤差等の、位置決め誤差に対する感度が高い機構誤差パラメータをキャリブレーションしてロボットの絶対位置決め精度を向上させる用途に対して有効であることが確認できた。

5. 6自由度多関節型ロボットの動的位罫計測実験

5.1 直線経路の計測結果

3章と同じ実験条件において、図4に示す格子点18→19番の直線経路を50mm/sの速度でロボットに描かせ、その動的位置を本システムとレーザトラッキングシステムにより計測した結果（ただし3章で求めた座標変換式に基づいてロボットベース座標系に変換した座標値）を XZ 座標について図9に示す。また先端チップ直径0.5mmの市販

Fig.9 Results of dynamic measurement for linear path of PUMA robot

Fig.10 Results of dynamic measurement for cornering paths of PUMA robot

のボールペンをロボット先端に固定し、厚さ2mmの鉄板上に固定したプロッタ用紙に描かせたペン書きによる経路（コピー機により縦方向に縮尺を4倍に拡大した）を図中にあわせて示す（厳密にはペンのロボット手首に対する取り付け誤差の影響があるが、ここでは考慮していない）。

この図より本システムによる計測結果はペン書き結果および校正基準であるレーザトラッキングシステムによる計測結果と高い精度で一致しており、ロボットが重力や動的な力の影響を受けてZ方向に振動する様子、機構の寸法誤差により軌道の中央付近で座標が山型に増加する様子を忠実にとらえていることがわかる。

5.2 コーナリング経路の計測結果

図4に示す格子点19→18→17番の90°進行方向が変化するコーナリング経路を25, 50, 150mm/sの速度でロボットに描かせ、その動的位置を本システムとレーザトラッキングシステムにより計測した。各条件においてロボットコントローラが有するCP制御機能（コーナで経路の曲率が連続するようにロボット先端を制御する機能）を利用した場合と、利用しない場合について2通りの計測を行った。XY座標に関する結果を図10に示す。また図中に縮尺を合わせて計測結果と重ね合わせたペン書き結果もあわせて示す。

これより本システムの計測結果は、CP制御を行う場合ロボットが

等速を保って曲線軌道を描き、CP制御を行わない場合ロボットがコーナで減速、停止、加速をしている様子や、ロボットの速度が150mm/sと比較的速い場合にコーナリング後の軌跡はCP制御を行う場合、行わない場合ともに動的な力の影響を受けて振動的になる様子等を正確にとらえていることがわかる。

5.3 動的計測における誤差要因の検討

動的な計測を行うことに伴う誤差要因として想起されるものとして、1)ロボットの動作に伴う空気の状態の乱れ（音速の補正誤差を招来する）、2)受波器の発信器の正面に対する位置決め誤差、3)ドップラ効果の影響、がある。これらのうち2)については、2章で述べたようにロボットの速度が最大2m/sの場合にも対応できるように受波器回転角の制御系を設計しているため、無視できるものと考えられる。本章の実験においても、採用したロボット速度が最大でも150mm/sと緩和された条件下ではあるが、受波器回転角度が発信器に対して0.05°以内の精度で遅れなく追従していることが確認された（データは紙面の都合上省略）。3)は測定空間内の音速 C を340m/s、発信器の移動速度 v を2m/s、超音波の波長を $\lambda=3.4$ mm（周波数100kHz）と仮定すると、 λ はドップラ効果により $\Delta\lambda=\lambda \times (v/C)=0.02$ mm変化する。しかしながらこれに伴うゼロクロス点¹³⁾のずれ（距離測定誤差に相当する）は、本システムの距離計測精度が ± 0.1 mm程度である

こと¹³⁾を考慮すると無視できる程度である。以上より、定量的な解析が難しい¹⁾の空氣の乱れについての議論の余地が残るものの、ロボットの速度が比較的遅い場合については動的な計測精度は静的な計測精度と同等であると考えられる。このことは図9, 10に示した本章の実験結果によっても裏付けられる。

5.4 本章の総合的考察

本章の実験結果より、本システムは例えば溶接・塗装ロボットがティーチングポイント付近をどのような軌跡、振動状態で通過しているのか等の評価を簡便・安価に行える可能性があることが判明した。よって本システムは、従来ロボットの軌跡の測定手段としてその簡便性から工場現場でよく用いられているペン書き方式の代替手段として有望である。また要求精度とコストとの兼ね合いがあるものの、レーザトラッキングシステム等の高価・高精度な動的計測システムの代替として、本システムをロボットの動的な絶対経路精度の評価に適用することも可能であると考えられる。

6. 結 言

超音波を用いた3次元位置計測システムの、実際のロボットの静的・動的な位置計測に対する実用性を検討した。結果を以下に記す。

- 1) 直前および現在の発信位置から次の発信位置を予測してそこに受波器を向かせることにより、発信器を遅れなく自動追尾する動的な位置計測システムを提案・開発した。
- 2) 6自由度多関節型ロボット（PUMAロボット）の静的な位置計測を行った。得られた誤差分布の傾向は校正基準であるレーザトラッキングシステムにより得られたそれと0.3mm程度の偏差で一致し、本システムがロボットの絶対位置決め精度の評価に適用可能であることが確認された。
- 3) 本システムによる計測結果を用いてスカラロボットの機構誤差をキャリブレーションした結果、絶対位置決め精度が0.4mm程度までに向上した。これより本システムがロボットキャリブレーションに適用可能であることが確認された。
- 4) PUMAロボットの動的な位置計測を直線経路、コーナリング経路について行った。結果はレーザトラッキングシステムによる計測結果およびペン書き結果と精度良く一致し、本システムが絶対経路精度等のロボットの動的特性を安価・簡便かつ高精度に評価できることが確認された。

参 考 文 献

- 1) 遠山茂樹：ロボットのキャリブレーション，機械の研究，45, 3 (1993) 345.
- 2) 平成11年度通商産業省工業技術院委託「プラント用知能ロボットの標準化に関する調査研究」成果報告書，(社)日本ロボット工業会，(2000) 31.
- 3) 石井 優，坂根茂幸，柿倉正義，三上芳夫：3次元モデルに基づくロボットシステムのためのマニピュレータ・キャリブレーション，日本ロボット学会誌，7, 2 (1989) 182.
- 4) B.W.Mooring and S.S.Padavala: The Effect of Kinematic Model Complexity on Manipulator Accuracy, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, (1989) 593.
- 5) D.E.Whitney, C.A.Loizinski and J.M.Rourke: Industrial Robot Forward Calibration Method and Results, J. Dyn. Syst. Meas. Contr., 108, 1 (1986) 1.
- 6) R.P.Judd and A.I.B.Knasinski: A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification, IEEE Trans. Robotics and Automation, 6, 1 (1990) 20.
- 7) Manipulating Industrial Robots Performance Criteria and Related Test Methods, Draft Int. Standard ISO/DIS 9283, (1998) 1.
- 8) 小関義彦，新井建生，杉本浩一，高辻利之，後藤充夫：レーザ追尾式座標測定システムを用いたパラレルメカニズムの精度評価，計測自動制御学会論文集，34, 7 (1998) 726.
- 9) 青柳誠司，藤岡 潤，石井一久，関 啓明，神谷好承：レーザトラッキングシステムを用いたロボットのキャリブレーションに関する研究（第1報）—ロボットの絶対位置決め精度の検証と対偶軸同定法の問題点の指摘—，精密工学会誌，65, 7 (1999) 1035.
- 10) 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.
- 11) H.W.Stone: Kinematic Modeling, Identification, and Control of Robotic Manipulators, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Mass., (1987) 1.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 青柳誠司，神谷好承，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2報）—発信器の開発と距離計測における誤差要因の検討—，精密工学会誌，61, 2 (1995) 273.
- 15) 青柳誠司，神谷好承，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3報）—3次元位置計測精度の検討—，精密工学会誌，61, 7 (1995) 964.
- 16) 荒木光彦：デジタル制御理論入門，朝倉書店，(1991) 123.
- 17) 李 沢群，神谷好承，青柳誠司，岡部佐規一，横山恭男：部品給配ロボットの開発（第2報）—その運動性能の評価—，精密工学会誌，57, 4 (1991) 635.

編 集 後 記

荷電ビームは応用分野が広く、産業を多方面から支える基礎技術として非常に重要であるとの認識から、全体を概観しつつ最近のトピックも織り込んだ特集を組もうということにしました。今回、その特集を無事仕上げる事が出来ました。これもひとえに執筆の先生方の御協力・御努力の賜と、この紙面を借りて御礼申し上げます。

荷電ビームの応用範囲の広さは、家庭のテレビから、顕微鏡、リソグラフィ、ビーム溶接、X線源、分析など、非常に多岐にわたりますが、鷹岡先生の論文では、これらの利用分野を荷電ビームが持つ特徴と関連付けて整理していただいて、本技術分野の幅の広さとともに奥の深さを改めて認識しました。

鷹岡先生の論文にありますように、電子ビームが発見されたのが約100年前で、その約30年後には電子顕微鏡が発明され、さらにその約30年後には半導体や溶接などの加工への応用が本格化しました。その後現在までの約40年間に、応用分野を拡げる

と共に、利用実績の積重ねと装置としての完成度向上とが成し遂げられました。約40年という歴史は加工技術としては短い方に属しますが、新しい特殊な技術という段階から、産業を支える基盤的技術へと既に成熟してきたと思います。

昨今、ナノテクノロジーへの期待が内外で高まっていますが、これを支える最重要な技術として荷電ビーム技術があると考えられます。この点については、執筆の先生方の多くが同様の展望を述べておられます。ナノ領域の観察、加工、分析を、高速で行うことの出来る技術は荷電ビームを利用した技術をおいて他に無く、ナノテクノロジーの牽引という役目がまさに期待されます。

今回の特集が、荷電ビーム利用技術者・研究者の現時点での技術の整理と今後の技術開発の一助にならんことを期待するとともに、異分野の技術者・研究者の荷電ビーム技術に関する理解促進によりさらに利用分野が拡大する機会となること念願します。

(森田博文)