

1. 本論文の目的と意義
2. 研究の背景と動機
3. 研究の目的と意義
4. 研究の範囲と対象
5. 研究の方法と手順
6. 研究の結果と考察
7. 研究の結論と今後の展望

第 7 章

NC 工作機械を校正基準とした 本システムの位置計測精度の 検証実験

第 7 章

NC 工作機械を校正基準とした本システムの 位置計測精度の検証実験

7.1 緒言

本章では開発した位置・姿勢自動追尾計測システムの位置計測精度を、精度 $1\mu\text{m}$ の工作機械（大阪機工（株）製、NCフライスマシン、型式 MHA400II）を校正基準として検証することを目的とする。

本研究で開発した超音波距離計測システムの計測精度が第 5 章で述べたように 1m の測定範囲で $\pm 0.1\text{mm}$ 以内、 2m の測定範囲で $\pm 0.3\text{mm}$ であることを考慮すると、NC 工作機械の $1\mu\text{m}$ の精度は本位置・姿勢自動追尾計測システムの計測精度を検証するのに十分である。また今回用いた NC 工作機械の可動範囲は $X \times Y \times Z$ が $1000 \times 400 \times 400\text{mm}$ であり、比較的広い測定空間内での本システムの計測精度を検証することが可能である。実験は以下の 2 種類について行った。

- (1) 発信器を $X \times Y \times Z$ が $900 \times 400 \times 400\text{mm}$ の空間内の 36 個の格子点に NC 工作機械を用いて $1\mu\text{m}$ の精度で位置決めし、その位置を測定することにより本システムの 3 次元静的位置計測精度を検証する。
- (2) NC 工作機械を用い、発信器に $1\mu\text{m}$ の精度で円軌道、直線軌道を描かせ、その位置を自動追尾計測することにより本システムの 3 次元動的 position 計測精度を検証する。

さらに本章ではこれらの結果を基に、本計測システムの位置計測誤差がどのような要因で生じているのかを総合的に検討する。

7.2 静的位置計測実験

7.2.1 実験装置のセットアップ

NC工作機械のチャックに発信器を固定する，ベッドに3個の受波器をその受波面の中心の高さ等しくなるように固定する．また4個目の受波器を取り付け治具を介してベッドの上方に固定する．

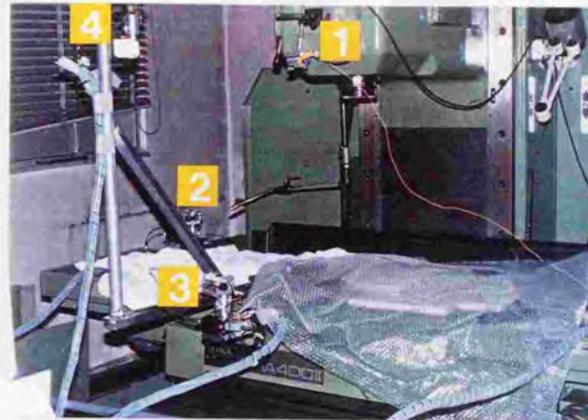
本NC工作機械においてはチャックはZ方向にしか動かず，チャックのXY方向の動作はベッドが移動することにより相対的に実現されている．音速補正センサは，NC工作機械の設置されている工場の床面上の，工作機械に可能な限り近い場所に設置した．

実験状況を図7.1～図7.4に示す．



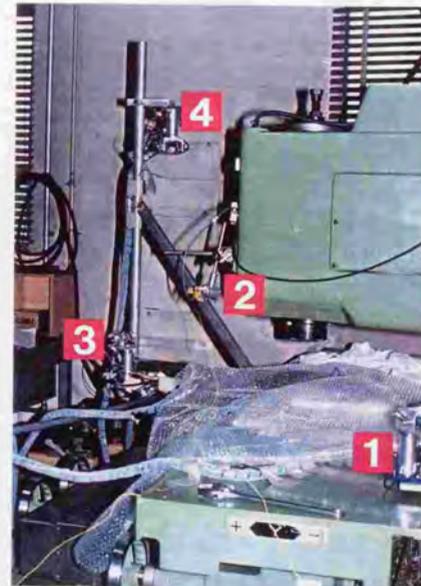
- 1 : コンピュータ1と拡張ユニット
- 2 : コンピュータ2と拡張ユニット

図7.1 実験状況(その1)



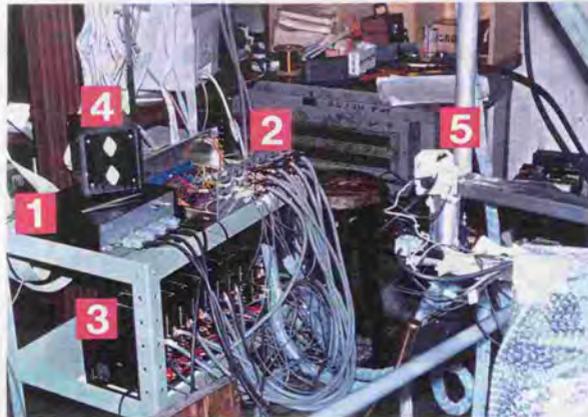
- 1 : 発信器
- 2 : 受波器2
- 3 : 受波器3
- 4 : 受波器4

図7.2 実験状況(その2)



- 1 : 受波器1
- 2 : 発信器
- 3 : 受波器3
- 4 : 受波器4

図7.3 実験状況(その3)



1 : 受波器プリアンプ 2 : モータ信号分配回路
 3 : モータドライバ 4 : 直流電源 (モータ信号分配回路用)
 5 : 受波器3

図 7.4 実験状況 (その 4)

7.2.2 実験方法

発信器を図 7.5 に示す 36 個の格子点上に精度 $1\mu\text{m}$ で位置決めし、その 3 次元位置座標を本計測システムで計測した。発信周波数は 10Hz に設定し、計測は 1000 回行った。

計測に際しては、まず最初に目視により各受波器が発信器の正面を向くように受波器のだいたいの回転角度を見積り、その角度に受波器を位置決めし、この状態から自動追尾計測を行った。このため最初の計測においては受波器が正確に発信器の正面を向いていないが、一旦発信器の座標が計算された後はその情報をもとに受波器は速やかに発信器の正面を向き精度が高い計測が行われる。

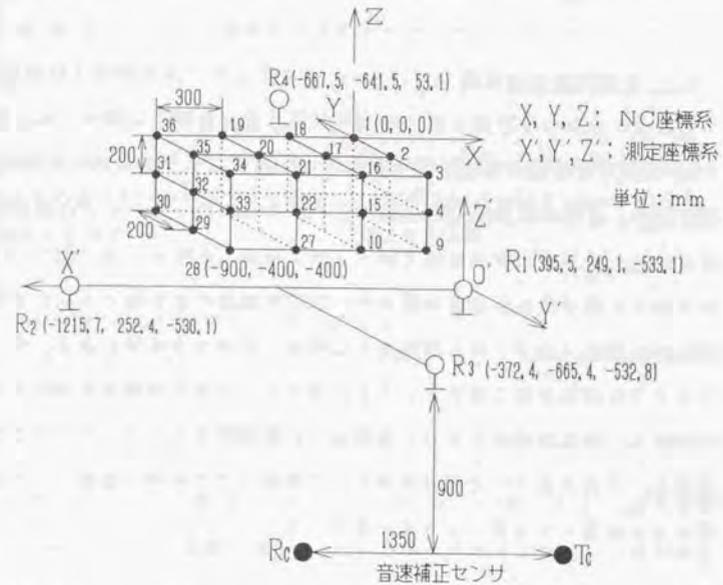


図 7.5 実験条件 (NC 座標系)

また、座標計算手法としては 3 章で述べた「音速推定法」を用いたが、計測座標のみでなく、発信器の 1000 回の各放電における発信器と各受波器との間の超音波パルスの伝播時間、音速データ等も計算機上のメモリに退避しておき、1 つの格子点の計測終了後にファイルにセーブした。このため、実験終了後にこれらの同一データをもとに「三点法」、「四点法」を用いて同じ条件で座標計算を行い、各計測手法の計測精度の比較を行うことが可能となった。この結果については、後の 7.2.4 節～7.2.7 節において詳述する。

7.2.3 測定座標系からNC座標系への座標変換

a) 座標変換の必要性

本システムにより計測された座標（以下「測定座標」と呼ぶ）は、図7.5に示す受波器の設置位置を基準として構成された座標系（以下「測定座標系」と呼ぶ）における座標である。それに対して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）は、図7.5に示すように格子点1の位置を原点として工作機械の駆動軸に平行に想定された座標系（以下「NC座標系」と呼ぶ）における座標である。従ってNC工作機械を校正基準として本計測システムの計測精度を検証するためには、測定座標系からNC座標系への座標変換式を何らかの方法で推定し、それに基づいて測定座標をNC座標系での座標に変換し、その値とNC座標とを比較してやる必要がある。

b) 多点のマッチングによる座標変換式の推定

座標変換式を推定するためには、測定座標系、NC座標系の外部に第3の座標系を設置し、この座標系に基づいた別の計測システムを用いて両座標系の関係を測定する方法が考えられる。しかしながらこの手法は、

- (1) NC工作機械、受波器とも、けがき線等の原点基準となるべきものが存在しないので、外部測定機器による測定が困難である。
- (2) レーザ測長器等の高価な外部測定機器が必要である。

等の理由により実現困難であると思われる。

そこで本研究では、測定座標とNC座標が最も一致するような座標変換式を数学的に求め、これを用いることにする。今、格子点 i の測定座標を $TS_i(x_i, y_i, z_i)$ 、同点のNC座標を $TN_i(X_i, Y_i, Z_i)$

とする ($i=1\sim 36$)。また座標変換式の回転要素（オイラー角）を θ, ϕ, ψ とし、平行移動要素（3次元ベクトル）を (l, m, n) とする。この時以下の関係式が成立する。

$$\begin{pmatrix} \cos\theta \cos\phi \cos\psi - \sin\theta \sin\psi & -\cos\theta \cos\phi \sin\psi - \sin\theta \cos\psi \\ \sin\theta \cos\phi \cos\psi + \cos\theta \sin\psi & -\sin\theta \cos\phi \sin\psi + \cos\theta \cos\psi \\ -\sin\phi \cos\psi & \sin\phi \sin\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

式(7.1)において変数は $\theta, \phi, \psi, l, m, n$ の6個であり、1個の格子点に付き x, y, z 座標に関して3個の等式が成立するので、36個の内2個の格子点について式(7.1)を構築し、これを解けば座標変換式が求められる。しかしながら、測定座標 $TS_i(x_i, y_i, z_i)$ には測定誤差が含まれているので、2個の格子点の測定データのみを用いて座標変換式を求めることは精度的に好ましくない。

以上のことを考慮し、本研究においては36個の格子点のうち8個の格子点を選択し、それらの測定座標をNC座標系での座標に変換したものと、NC座標とが最も一致（マッチング）するような座標変換式を最小二乗法により求めることにした。

c) マッチング点数を8点にした理由

本計測システムの計測誤差の主な要因は、後で7.4節で述べるように音速が場所・時間によりばらつき、それを正確に補正することが難しいことである。第3章の精度分布図のシミュレーションにおいては到達時

間が正規分布に従ってばらつくと仮定したが、これは音速の分布が場所・時間の変化に伴い正規分布に従ってばらつくと仮定したことになる。この仮定のもとでは、36個の格子点における誤差分布図を作成すると、それらは正規分布に従ってランダムな様相を呈するはずである。この場合、測定座標とNC座標が最も一致するような座標変換式を求めるためにマッチングさせる格子点の数をむやみに多くしても、座標変換式の精度は頭打ちしてしまうことが予想される^{*)}。第3章のシミュレーションの結果を参考にするとマッチング点は4点程度で良いと思われる。

しかしながら本章の精度検証実験においては、

- 1) 実際の音速の空間・時間分布は、測定空間内の温度・湿度分布、空気の流れの分布等の影響を受けて正確な正規分布には従わない。
- 2) 本システムの計測誤差の要因は音速の補正誤差のみでなく、初期座標系の設定誤差等の様々な要因がある(7.4節参照)。

等の理由により、マッチング点はなるべく多くとった方が座標変換式の精度は向上すると思われる。一方、

- 3) 本実験においては、明らかに発信器の電極支持部やイグニッションコイルの装填部が受波器への超音波パルスの進路を遮り、受波器がそれによる回折音、反射音を拾ってしまったと思われる格子点が数点ある(7.2.6節の図7.10の測定誤差分布図参照)。これら異常値をマッチング点に採用すると、得られる座標変換式は大きな誤差を含んでしまう^{*)}。

- 4) マッチング点が少ない方が解析に要する時間・手間が省ける。

等の事情もある。これら1)2)および3)4)を総合的に考慮し、それらを折衷するものとして、本章ではマッチング点を8点に決定した。

d) 最小二乗法のアルゴリズム

以下最小二乗法の処理について具体的に述べる。まず簡単のため、式(7.1)の変換式における行列の各要素を以下のようにおく。

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= \cos \theta \cos \phi \cos \psi - \sin \theta \sin \psi \\
 K_{12} &= -\cos \theta \cos \phi \sin \psi - \sin \theta \cos \psi \\
 K_{13} &= \cos \theta \sin \phi \\
 K_{21} &= \sin \theta \cos \phi \cos \psi + \cos \theta \sin \psi \\
 K_{22} &= -\sin \theta \cos \phi \sin \psi + \cos \theta \cos \psi \\
 K_{23} &= \sin \theta \sin \phi \\
 K_{31} &= -\sin \phi \cos \psi \\
 K_{32} &= \sin \phi \sin \psi \\
 K_{33} &= \cos \phi
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

次に残差として以下の $r_1 \sim r_{24}$ を考える。

$$\begin{aligned}
 r_1 &= K_{11} x_{i(1)} + K_{12} y_{i(1)} + K_{13} z_{i(1)} + l - X_{i(1)} \\
 r_2 &= K_{21} x_{i(1)} + K_{22} y_{i(1)} + K_{23} z_{i(1)} + m - Y_{i(1)} \\
 r_3 &= K_{31} x_{i(1)} + K_{32} y_{i(1)} + K_{33} z_{i(1)} + n - Z_{i(1)} \\
 &\quad \dots \dots \\
 r_{22} &= K_{11} x_{i(8)} + K_{12} y_{i(8)} + K_{13} z_{i(8)} + l - X_{i(8)} \\
 r_{23} &= K_{21} x_{i(8)} + K_{22} y_{i(8)} + K_{23} z_{i(8)} + m - Y_{i(8)} \\
 r_{24} &= K_{31} x_{i(8)} + K_{32} y_{i(8)} + K_{33} z_{i(8)} + n - Z_{i(8)}
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

ここで $i(1) \sim i(8)$ はマッチング点として選択した8個の格子点の通し番号を示している。例えば 1, 9, 14, 16, 20, 25, 32, 34番目の格子点を選択した場合 $i(8) = 34$ となる。これらの残差を用いて評価関数として残差二乗和

$$\eta(\theta, \phi, \psi, l, m, n) = \sum_{j=1}^{24} r_j^2 \tag{7.4}$$

を考え、これを最小にするような $\theta, \phi, \psi, l, m, n$ を最小二乗法により

求める***)

残差偏微分行列 A (24×6) を考えその要素 a_{jk} ($j=1\sim 24, k=1\sim 6$) を次式で定義する。

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{\partial r_1}{\partial \theta} & a_{12} &= \frac{\partial r_1}{\partial \phi} & a_{13} &= \frac{\partial r_1}{\partial \psi} \\ a_{14} &= \frac{\partial r_1}{\partial l} & a_{15} &= \frac{\partial r_1}{\partial m} & a_{16} &= \frac{\partial r_1}{\partial n} \end{aligned} \quad (j=1\sim 24) \quad (7.5)$$

各変数による評価関数 η の偏微分 G_k ($k=1\sim 6$) はこれらを用いて、

$$G_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x_k} = r_1 a_{1k} + r_2 a_{2k} + \dots + r_{24} a_{24k} \quad (k=1\sim 6) \quad (7.6)$$

のように表される。

ここで、変数(解)ベクトル \mathbf{x} (6×1)、残差ベクトル \mathbf{r} (24×1)、残差偏微分ベクトル \mathbf{G} (6×1) を次式により定義する。

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \\ \psi \\ l \\ m \\ n \end{pmatrix} \quad \mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{24} \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_6 \end{pmatrix} \quad (7.7)$$

これらを用いると式(7.6)の関係は次式で表現し直せる。

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}^T \mathbf{r} \quad (7.8)$$

解ベクトルを

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x} \quad (7.9)$$

とおき、 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ での残差ベクトルを \mathbf{r}_0 とする。このとき微量

$\Delta \mathbf{x}$ に対して以下の線形近似式が成立すると仮定する。

$$\mathbf{r} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{r}_0 \quad (7.10)$$

式(7.10)を式(7.8)に代入すると、

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{A}^T \mathbf{r}_0 = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{G}_0 \quad (7.11)$$

ようになる。評価関数 η が最小になる際、残差偏微分ベクトル \mathbf{G} は $\mathbf{0}$ とならねばならない。従って式(7.11)の値が $\mathbf{0}$ になる条件より、

$$\Delta \mathbf{x} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{G}_0 \quad (7.12)$$

のように $\Delta \mathbf{x}$ が求められる。これを式(7.9)に代入すると解ベクトル \mathbf{x} が求められる。しかしながらこの新しい \mathbf{x} で計算した \mathbf{G} は線形近似のために完全には $\mathbf{0}$ にならない。従って次にこの \mathbf{x} を新たに \mathbf{x}_0 とおきなおして以上の式(7.1)~式(7.12)の計算を行い、この操作を逐次繰り返していく。逐次算出される新しい \mathbf{x} は、もし評価関数 η の非線形性があまり大きくなければ急速に正しい解に相当する点に収束していく。

実際のデータの解析においては、 \mathbf{x}_0 の初期値を実験条件に基づいて適当に推測して定め、繰返し演算を200回行うことにより座標変換式を求めた。

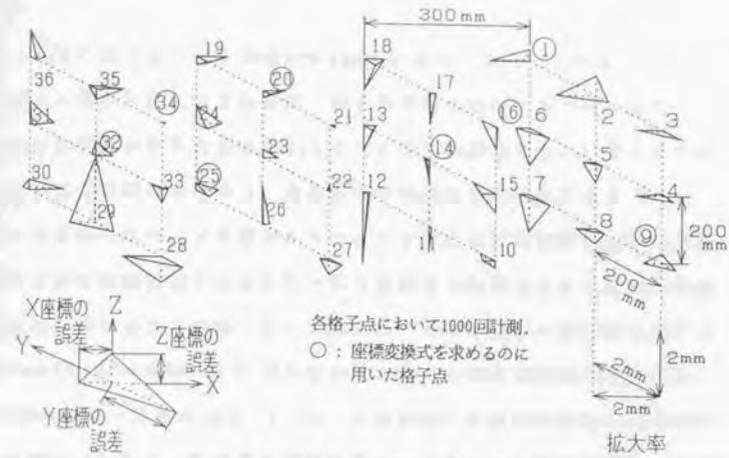
7.2.4 三点法による位置計測結果

a) 測定誤差分布図の作成

計測実験によりセーブされたデータのうち、発信器から受波器 R_1 へ R_3 への3個の到達時間データと音速補正センサから得られる音速データを用い、第3章で述べた三点法を用いて座標計算を行った。図7.6に測定誤差の結果を分布図にして示す。図7.6の作図手順を以下に箇条書きにして示す。

- (1) まず各点ごとに1000回計測した測定座標の平均を求める。
- (2) このうち図中○印のついた8個の格子点を座標変換のマッチングとし、前節で述べた手法で測定座標系からNC座標系への座標変換式を計算する。
- (3) 残りの28個の格子点の測定座標は全てこの座標変換式に従ってNC座標系での値に変換する。
- (4) NC座標系に変換された測定座標と、校正基準であるNC座標との誤差をX, Y, Zの各成分について求める。
- (5) 図中に示す拡大率に従ってX, Y, Zの各成分の誤差を拡大し、三角錐で誤差を表示することにし、各格子点にこれを書き込む。

例として1番目の格子点の測定誤差は $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = (-1.19, 0.13, 0.36)$ であるので、図中の格子点1の位置からX軸方向に拡大率(ここでは格子の1辺が2mmに相当)に従って-1.19mmの点をプロットする。同様にY軸方向に0.13mm, Z軸方向に0.36mmの点をプロットし、プロットされ



36点における誤差の平均値		36点における標準偏差の平均値	
$\Delta X = 0.50$ mm		$\sigma_x = 0.16$ mm	
$\Delta Y = 0.28$		$\sigma_y = 0.19$	
$\Delta Z = 0.60$		$\sigma_z = 0.49$	
$\Delta = 0.94$			

図7.6 三点法による各格子点の測定誤差分布図

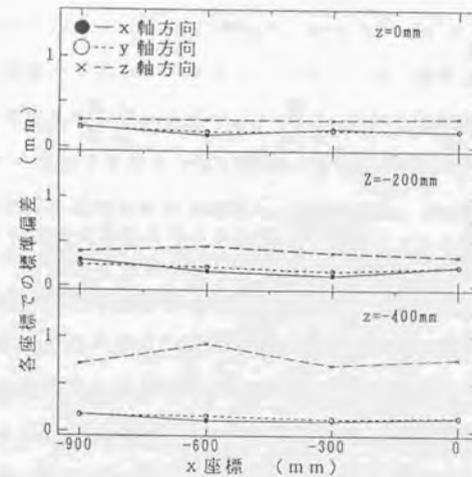


図7.7 三点法による各格子点の測定座標の標準偏差
(平面 $Y = -200$ mm 上の格子点でのデータ)

た3点間を直線で結んで三角錐を作図している。

この図において三角錐の体積が大きい格子点では、本システムの測定誤差が大きいことを意味している。また、三角錐のある頂点が他の頂点に比べて大きく格子点から離れている場合、その方向の成分の測定誤差が他の成分の測定誤差に比べて大きいことを意味している。すなわちこの図を用いることにより、どの格子点でどの成分の測定誤差が大きいかの判断が視覚的に容易にでき、測定誤差分布の傾向の把握が容易になる。

なお図中に36点における偏差の平均値 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 、および36点における測定座標の標準偏差の平均値 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ を併せて示す。また各36点において測定座標とNC座標との間の距離を計算し、その平均を求めたものを Δ として図中に併せて示す。これらの関係を式で表すと以下のようになる。

$$\Delta X = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} |x_i - X_i| \quad \Delta Y = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} |y_i - Y_i| \quad \Delta Z = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} |z_i - Z_i|$$

$$\Delta = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \sqrt{(x_i - X_i)^2 + (y_i - Y_i)^2 + (z_i - Z_i)^2}$$

$$\sigma_x = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \sigma_{xi} \quad \sigma_y = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \sigma_{yi} \quad \sigma_z = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \sigma_{zi} \quad (7.13)$$

ただし

x_i, y_i, z_i : i 番目の格子点における座標変換後の測定座標
 X_i, Y_i, Z_i : i 番目の格子点におけるNC座標
 $\sigma_{xi}, \sigma_{yi}, \sigma_{zi}$: i 番目の格子点における測定座標の標準偏差

b) マッチング点の選択理由

ここでは36個の格子点のうちどの8点をマッチング点として選択するかについて述べる。まず狭い範囲からのみマッチング点を選択する(例え

ば1~8番の格子点のみを選択する)場合、それらの点を精度良くマッチングする座標変換式ができるが、残りの点をそれに従ってNC座標系に変換した場合大きな変換誤差が生じてしまう可能性がある。従ってなるべく大きな範囲からまんべんなく格子点を選択する必要がある。

また測定誤差が大きな格子点をマッチング点として選択した場合、得られる座標変換式にもそれに伴い大きな誤差が生じてしまうことが予想される。

以上のことを考慮してX座標が一定の4平面(すなわち $X = 0\text{mm}$, $X = -300\text{mm}$, $X = -600\text{mm}$, $X = -900\text{mm}$)から2点ずつマッチング点を選択することにし、これらの組み合わせを様々に換えて式(7.4)の評価関数を計算し、これが小さい値になる1, 9, 14, 16, 20, 25, 32, 34番の格子点をマッチング点として選択することにした。

c) 測定結果の考察

図7.6より36個の格子点における測定誤差の平均は $\Delta X = 0.50\text{mm}$, $\Delta Y = 0.28\text{mm}$, $\Delta Z = 0.60\text{mm}$ である。これより、X, Y座標の測定誤差に比べてZ座標のそれがやや大きい。このことは、誤差分布図において三角錐がZ方向に伸びている格子点が多いことから確認できる。

図7.6より各格子点において1000個の測定座標の標準偏差を計算し、その36点における平均を求めた結果は $\sigma_x = 0.16\text{mm}$, $\sigma_y = 0.19\text{mm}$, $\sigma_z = 0.49\text{mm}$ である。また図7.7にNC座標が $Y = -200\text{mm}$ である格子点(すなわち格子点2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35)におけるX, Y, Z座標の1000回の計測における標準偏差を示す。これらよりX, Y座標にくらべてZ座標の測定値のばらつきが大きいことが判る。

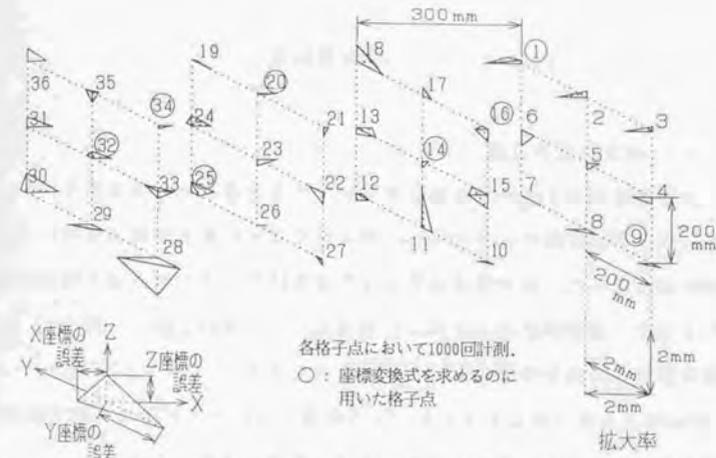
以上のように三点法を用いた場合、Z座標の計測精度がX, Y座標の計測精度に比べて悪く、測定値のばらつきも大きくなってしまふ。これは第3章で述べたように3個の受波器 $R_1 \sim R_3$ の3個の受波器で構成され

る平面から発信器までの距離が十分でない場合に、距離測定誤差が大きな感度でZ座標の測定誤差に効くためである。このことは、図7.7において $Z = -400\text{mm}$ の場合のZ座標の標準偏差が $Z = -200\text{mm}$, $Z = 0\text{mm}$ の場合のそれに比べて大きいことから裏付けられる。

7.2.5 四点法による位置計測結果

計測実験によりセーブされたデータのうち、発信器から受波器 R_1 ~ R_4 への4個の到達時間データと音速補正センサから得られる音速データを用い、第3章で述べた四点法を用いて座標計算を行った。この時ガウスニュートン法の近似計算繰返し数は2回とした。図7.8に測定誤差の結果を分布図にして示す、また図7.9にNC座標が $Y = -200\text{mm}$ である格子点におけるX, Y, Z座標の1000回の計測における標準偏差を示す。これらの図の見方は三点法の場合と同様である。

図7.8より36個の格子点における測定誤差の平均は $\Delta X = 0.53\text{mm}$, $\Delta Y = 0.29\text{mm}$, $\Delta Z = 0.30\text{mm}$ である。また各格子点における1000回の座標計測における標準偏差を計算し、その36個の格子点における平均値を求めた結果は $\sigma_x = 0.17\text{mm}$, $\sigma_y = 0.16\text{mm}$, $\sigma_z = 0.18\text{mm}$ である。これらの結果より、冗長な受波器を測定空間の上方に設置して四点法を用いることで、三点法に比べてZ座標の測定誤差が減少し測定値のばらつきも小さくなることが判る。このことは図7.9においてZ座標の測定値の標準偏差がX, Y座標に比べて同程度であり、三点法の場合に比べて改善されていることから裏付けられる。これらの実験結果は第3章で述べた精度分布シミュレーションの結果とよく一致している。



各格子点において1000回計測。 ○：座標変換式を求めるのに 用いた格子点	
36点における誤差の平均値	36点における標準偏差の平均値
$\Delta X = 0.53\text{mm}$	$\sigma_x = 0.17\text{mm}$
$\Delta Y = 0.29$	$\sigma_y = 0.16$
$\Delta Z = 0.30$	$\sigma_z = 0.18$
$\Delta = 0.76$	

図7.8 四点法による各格子点の測定誤差分布図

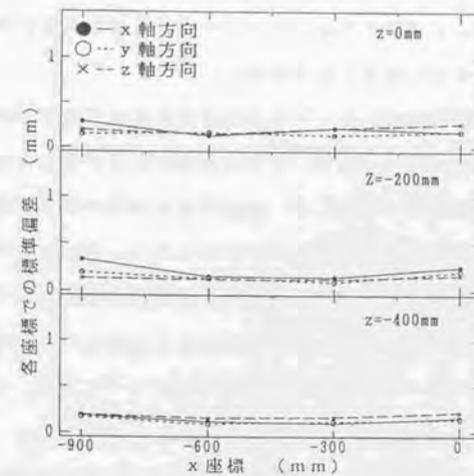


図7.9 四点法による各格子点の測定座標の標準偏差
(平面 $Y = -200\text{mm}$ 上の格子点でのデータ)

7.2.6 音速推定法による位置計測結果

a) 測定結果の考察

計測実験によりセーブされたデータのうち発信器から受波器 $R_1 \sim R_4$ への4個の到達時間データを用い、第3章で述べた音速推定法を用いて座標計算を行った。なお音速推定法は到達時間データから音速を推定計算するので、音速補正センサからの音速データは使用しない。図7.10に測定誤差の結果を分布図にして示す。また図7.11にNC座標が $Y = -200\text{mm}$ である格子点におけるX, Y, Z座標の1000回の計測における標準偏差を示す。これらの図の見方は三点法の場合と同様である。

図7.10より36個の格子点における測定誤差の平均は $\Delta X = 0.39\text{mm}$, $\Delta Y = 0.25\text{mm}$, $\Delta Z = 0.32\text{mm}$ である。また各格子点における1000回の座標計測における標準偏差を計算し、その36個の格子点における平均値を求めた結果は $\sigma_x = 0.19\text{mm}$, $\sigma_y = 0.19\text{mm}$, $\sigma_z = 0.20\text{mm}$ である。これらの結果より、四点法を用いた場合と同様に冗長な受波器を用いて音速推定法を用いることで、三点法に比べてZ座標の測定誤差が減少し測定値のばらつきも小さくなることが判る。

音速推定法を用いた場合X, Y座標の測定誤差の平均値が四点法を用いた場合のそれと比べて小さい。これは音速推定法が測定空間内の正確な音速を推定計算するのに対して、四点法では実験の都合上測定空間から1m程度下方に設置し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。これらの実験結果は第3章で述べた精度分布シミュレーションの結果、および2次元平面内での予備計測実験の結果とよく一致している。

図7.10より28番目の格子点のX, Y, Z座標および11番目の格子点のZ座標の測定誤差が他の測定誤差に比べて顕著に大きなことがわかる。



36点における誤差の平均値		36点における標準偏差の平均値	
$\Delta X = 0.39\text{mm}$		$\sigma_x = 0.19\text{mm}$	
$\Delta Y = 0.25$		$\sigma_y = 0.19$	
$\Delta Z = 0.32$		$\sigma_z = 0.20$	
$\Delta = 0.64$			

図7.10 音速推定法による各格子点の測定誤差分布図

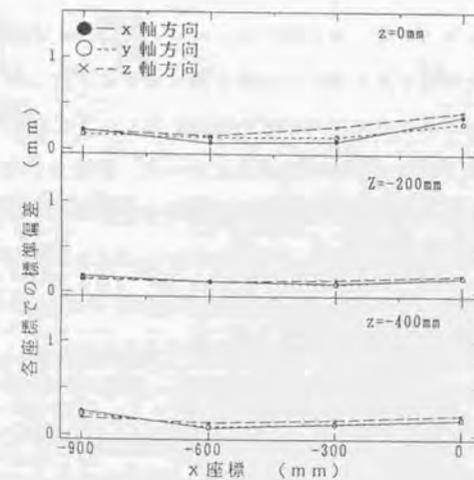


図7.11 音速推定法による各格子点の測定座標の標準偏差 (平面 $Y = -200\text{mm}$ 上の格子点でのデータ)

この傾向は図7.8に示す四点法を用いた場合の計測結果でも同様であり、音速の補正法を変更してもこれらの測定誤差が除去できないことがわかる。従ってこれらの測定誤差は音速の補正誤差によるものではなく、受波器 R_4 が発信器を見つらなかったためであると思われる。すなわち11番、28番の格子点とも測定空間の下方に位置しており、発信器における電極針の支持部分やイグニッションコイルを装填している部分が測定空間の上方に設置した受波器 R_4 への超音波パルスの進路を遮り、受波器がこれらによる回折音を拾ってしまったものと思われる。

b) 隣接する格子点において誤差分布の様子が違う理由

図7.10において隣接する格子点において誤差分布の様子が異なり、格子点番号の増加に伴って三角錐の形状が連続的に変化していない。例えば格子点1ではZの正方向の誤差が大きく、格子点2ではXの負方向の誤差が大きく、格子点3ではYの負方向の誤差が大きいといった具合である。

これは本実験においては1個の格子点における1000回の位置計測実験が終了してから次の格子点における実験に移行するまでに、第6章6.5.1節で述べたように各受波器が発信器の正面を向くように目視により大まかに位置決めする操作等を行わなければならない。最低でも5分間程度の時間が消費されたためである。この間に音速の空間分布の様子が経時変化してしまい、隣接する格子点であるにもかかわらず各受波器への超音波パルスの伝播経路における音速の補正誤差が異なった傾向をとってしまい、誤差分布の様子が類似しなかったものと思われる。

c) 測定空間を制限した場合の本システムの計測精度

図7.10に示すようにX座標の測定誤差の平均値がY、Z座標に比べて0.1mm程度大きい。これは測定空間の範囲 $X \times Y \times Z$ が $900 \times 400 \times$

400mmでありX座標の測定範囲が他の座標に比べて大きいためである。第3章でシミュレーションしたように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。このため図7.10に示すように測定空間の端の方である $X = 0\text{mm}$, -900mm の2平面内の格子点(1~9番および28~36番の格子点)におけるX座標の測定誤差が中央付近の $X = -200\text{mm}$, $X = -400\text{mm}$ の2平面内の格子点(10~18番および19~27番の格子点)におけるX座標の測定誤差に比べて大きくなっている。以上を考慮して、高い精度で計測が可能である測定空間の中央付近の18個の格子点(10~18番および19~27番の格子点)のみを抽出して解析対象とし、これらの座標をセーブされた発信器から4個の受波器への到



図7.12 測定空間を制限した場合の測定誤差分布図(音速推定法使用)

達時間データから音速推定法で計算した。結果を図7.12に示す。座標変換のマッチング点としては図中○印の付いている10, 12, 16, 18, 19, 21, 25, 27番の格子点を選択した。18個の格子点における測定誤差の平均は $\Delta X = 0.15\text{mm}$, $\Delta Y = 0.20\text{mm}$, $\Delta Z = 0.30\text{mm}$ であり、測定空間を制限することにより各座標の計測精度が向上することがわかる。これらの格子点のうち実験の都合上受波器 R_4 が発信器の位置を捉えにくかったと思われる11番のデータを解析対象から削除すると $\Delta Z = 0.22\text{mm}$ となり、この値が本計測システムの本来の計測誤差であると考えられる。

7.2.7 実験結果の考察

以上三点法、四点法、音速推定法で校正基準であるNC工作機械の格子点の座標を計測した際の結果（測定誤差の平均値、測定座標の標準偏差）をまとめて表7.1に示す。これより音速推定法が三者の中で最も測

表7.1 各種計測法の比較

計測法		三点法	四点法	音速推定法	
				測定空間を制限した場合	
測定範囲 ($X \times Y \times Z$ mm)		600×400×400		300×400×400	
測定格子点数		36		17	
36個(または17個)の格子点における測定誤差の平均値	ΔX mm	0.50	0.53	0.39	0.15
	ΔY mm	0.28	0.29	0.25	0.20
	ΔZ mm	0.60	0.30	0.32	0.22
	Δ mm	0.94	0.76	0.64	0.38
36個(または17個)の格子点における標準偏差の平均値	σ_x mm	0.16	0.17	0.19	0.12
	σ_y mm	0.19	0.16	0.19	0.13
	σ_z mm	0.49	0.18	0.20	0.17

(注1) Δ はNC座標と測定座標との間の距離を示す。

(注2) 音速推定法で測定空間を制限した場合のデータは、受波器が発信器をとらえられなかったと思われる11番の格子点の計測データを除いて計算したものである。

定誤差の平均値が小さいことがわかる。これは音速推定法が測定空間内の正確な音速を推定計算するのに対して、三点法、四点法では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。またシステムから音速補正センサを省けることから音速推定法が最も有利であると思われる。

測定空間を4個の受波器が囲む空間の中央付近に制限した場合の音速推定法による計測結果も表7.1に併せて示す。

結局本研究で開発した計測システムの3次元静的位置計測精度は、座標計測手法として音速推定法を用いた場合以下の通りである。

(1) 測定空間 $X \times Y \times Z$ が $900 \times 400 \times 400\text{mm}$ の場合、座標の測定誤差が $\Delta X = 0.40\text{mm}$, $\Delta Y = 0.25\text{mm}$, $\Delta Z = 0.32\text{mm}$ 以内であり、標準偏差が $\sigma_x = 0.19\text{mm}$, $\sigma_y = 0.19\text{mm}$, $\sigma_z = 0.20\text{mm}$ 以下である。

(2) 測定空間 $X \times Y \times Z$ が $300 \times 400 \times 400\text{mm}$ の場合、座標の測定誤差が $\Delta X = 0.15\text{mm}$, $\Delta Y = 0.20\text{mm}$, $\Delta Z = 0.22\text{mm}$ 以内であり、標準偏差が $\sigma_x = 0.12\text{mm}$, $\sigma_y = 0.13\text{mm}$, $\sigma_z = 0.17\text{mm}$ 以下である。

これらの両者の結果からもわかるように、測定空間の大小に対応して受波器の配置位置を適当に定めることにより計測精度はさらに向上するものと思われる。

第2章で述べたようにロボットの絶対位置決め精度が比較的悪く、キャリブレーションを行う前の6自由度多関節型のもので5~20mmであることを考慮すると^{2*) 2**)}、本システムは実際のロボットの精度評価に対して十分な計測精度を持つと言える。

以下本論文においては、特に断りのない限り座標計算方法はすべて音速推定法を用いることにする。

7.2.8 計測に必要なスペースについての考察

本節のNC工作機械を校正基準とした精度評価実験において、図7.5に示すように受波器4個を測定空間の周囲に配置したが、それらを配置するのに必要なスペースをここでは考察してみる。

図7.5より各受波器間の距離のうち最大のものは R_1 と R_2 の間のもので1611mmである。従って本システムでは計測の際に1.5m立方程度のスペースを必要とすることになる。この時本システムは音速推定法を用いた場合 $X \times Y \times Z$ が $900 \times 400 \times 400$ mmの測定空間内の3次元座標を ± 0.3 mm程度、また $X \times Y \times Z$ が $300 \times 400 \times 400$ mmの測定空間内の3次元座標を ± 0.2 mm程度の精度で計測することが可能である。本実験においては測定空間が立方体ではなく $X \times Y \times Z$ の辺の長さが様々に異なったので正確なことは言えないが、本システムでは a mm立方の空間内の3次元座標を計測する場合約 $3a \sim 4a$ mm立方程度のスペースがあれば実用的な計測精度が得られることになる。

本システムは半減角が $\pm 6^\circ$ と指向の比較的鋭い受波器を用い、それを水平・鉛直方向に回転させることにより受波面が常に発信器の正面を向くように制御をしている。このことにより受波器の指向性が測定精度に与える影響は無視できる程度である。これに対して従来の指向性が比較的広い受波器を固定して用いるシステムでは、各受波器の指向性により正確な超音波パルスの到達時間が計測できる発信器の存在領域は図7.13(a)に示すような円錐内となり、計測システムとして実用的な計測精度が得られる範囲は図7.13(b)に示すような各円錐の交わる領域となる。これより従来のシステムではかなり狭い範囲でしか高い精度が得られず、また広い空間内で精度を得ようとする受波器を設置するためのスペースを大きくとらなければいけないことになる¹²⁾。これらのシステムの研究報告例では4個目の受波器を測定空間の上方に設置することを考えていないので本システムとの定量的な比較は困難であるが、それら

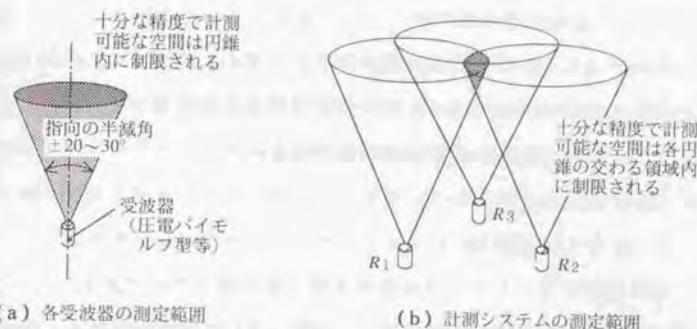


図7.13 指向の広い受波器を固定して用いる方式の測定範囲

の計測精度が ± 1 mm程度と低いことを考慮すると、 a mm立方の空間内の3次元座標を ± 0.3 mm程度の精度で計測するためには少なくとも $5a$ mm立方以上のスペースが必要であることが予想される¹²⁾¹³⁾。

以上を総合的に考慮すると、本システムは指向の比較的鋭い受波器を回転させることにより、従来の指向の比較的広い受波器を固定して用いる方式に比べて計測に必要なスペースが体積で1/2程度で済むことがNC工作機械を用いた本実験により確認された。このことは逆に計測の際受波器の設置のために確保できるスペースが限られている場合、 ± 0.3 mm程度の実用的な精度で計測できる空間が本システムでは従来のシステムに比べて2倍程度に拡大されることを意味している。

7.3 動的位置計測実験

本節ではNC工作機械を校正基準として用い、発信器に $1\mu\text{m}$ の精度で円軌道、直線軌道を描かせ、その動的位置を自動追尾計測することにより本システムの3次元経路計測精度を検証する。

7.3.1 実験方法

実験装置のセットアップは静的位置計測実験と同様である。NC工作機械のチャックに発信器を固定し、図7.14に示す円軌道および直線軌道を $4\text{m}/\text{min}$ の速度で移動させた。各軌道の接続順序は①→②→③→④→⑤→⑥である。発信器の放電周波数は 30Hz に設定し、本計測システムで移動中の発信器の座標を計測した。座標計算手法としては音速推定法を用いた。

計測に際しては、まず最初に目視により各受波器が軌道のスタート点

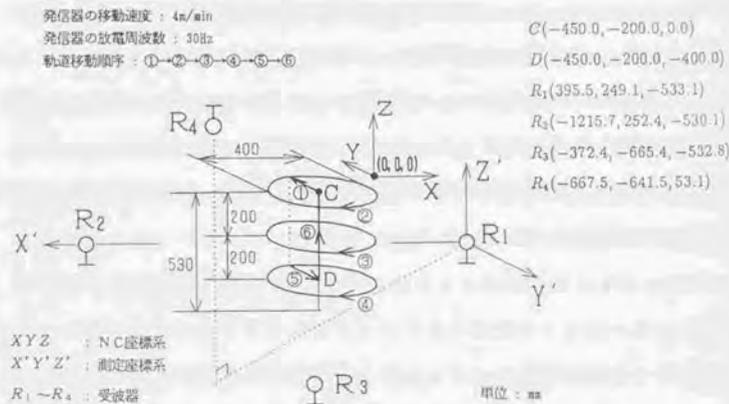


図7.14 動的位置計測実験における発信器の移動軌道

(図のC点)を向くように受波器のだいたいの回転角度を見積り、その角度に受波器を位置決めした状態から自動追尾計測を行った。このため最初の計測においては受波器が正確に発信器の正面を向いていないが、一旦発信器の座標が計算された後はその情報をもとに受波器は速やかに発信器の正面を向き、それ以降は常に受波面が発信器の正面を正確に向くように受波器の回転角度がDCサーボモータにより制御される。

7.3.2 動的位置の計測結果

a) 測定誤差の表示法

図7.15(a)(b)(c)に動的位置の自動追尾計測結果を示す。各測定座標は、前節の格子点の静的位置の計測結果(図7.10)から求めた座標変換式を用い、これに従ってNC座標系での値に変換した。

これらの図においてはNC工作機械が指令する真の軌道を実線で示し、それからの測定座標の誤差を図中に示す誤差棒の方向に拡大してデータをプロットした。すなわち円軌道においては円の中心Cから測定座標Mまでの距離を計算しそれと円の真の半径R(ここでは 200mm)との差 $|\overline{CM}| - R$ をとり、これに図中に誤差棒で示す倍率 λ (ここでは40倍)を掛けてプロット座標Pを以下のように計算している。

$$\overline{CP} = \frac{R + \lambda(|\overline{CM}| - R)}{R} \cdot \overline{CM} \quad (7.14)$$

また直線軌道の場合には測定座標Mから真の直線におろした垂線の足Hまでの距離に倍率 λ (40倍)を掛けてプロット座標Pを以下のように計算している。

$$\overline{HP} = \lambda \cdot \overline{HM} \quad (7.15)$$

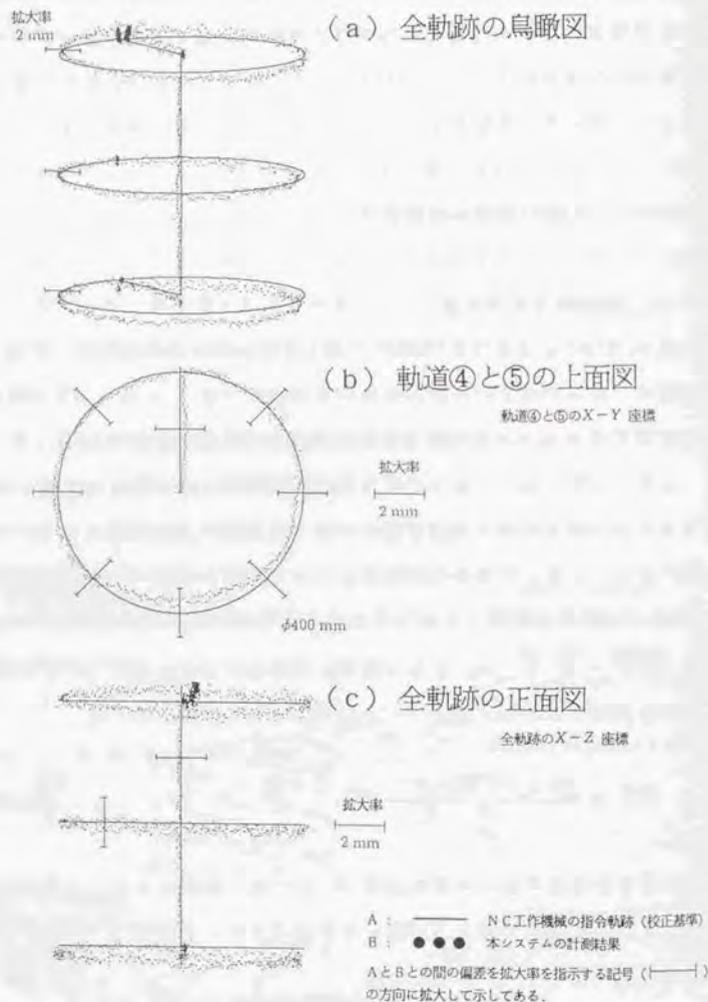


図7.15 動的位置の自動追尾計測結果

b) 測定結果の考察

まずX, Y座標の計測精度について図7.15(b)に基づいて考察する。この図より測定対象が直線軌道の場合、本計測システムの経路計測精度は $\pm 0.2\text{mm}$ 以内であることがわかる。また測定対象が円軌道の場合、本計測システムの経路計測精度は $\pm 0.5\text{mm}$ 以内であることがわかる。

次にZ座標の計測精度について図7.15(c)に基づいて考察する。この図より本計測システムは測定空間の中央付近に位置する円軌道③においては $\pm 0.2\text{mm}$ 以内の測定誤差でZ座標を計測可能であるが、測定空間の上方に位置する円軌道②と下方に位置する円軌道④ではZ座標の測定誤差は局所的には $\pm 0.8\text{mm}$ にも達している。またこの図から円軌道②および④では円軌道が水平面から傾いて計測されてしまっていることが判る。これらの測定誤差の要因として以下のようなことが考えられる。

- (1) 座標変換式を作成する基になる格子点の静的位置計測の実験をした翌日にこの動的位置の計測実験を行った。このため両者の実験において受波器の設置位置が治具の熱膨張や固定具の緩み等により微妙にずれ、座標変換式に誤差が含まれていた。
- (2) 各受波器毎に信号増幅回路等の電気系の特性や振動膜の共振周波数等の機械系の特性において固体差があり、受波器間の相互距離を測定して初期座標系を校正する際に初期座標設定誤差が生じてしまった。
- (3) 発信器が移動することによりその周辺の空気の状態が乱れ、音速の補正が正確に行えなかった。
- (4) 音速推定法は測定空間内の音速が一定と仮定して音速を推定計算しているが、本動的計測実験の際に温度分布が均一でなく(例えば測定空間の上方の方が下方よりも温度が高い等)、この仮定が

成立していなかった。

等が考えられる。測定空間内の空気の温度等の安定化に留意し、座標変換式を作成する格子点計測実験のすぐ後に動的位置計測実験を行えば、本計測システムの経路計測精度はさらに向上するものと思われる。

なお上記(1)~(4)を含めた本計測システムの誤差要因の検討については次の7.4節で詳述する。

7.3.3 受波器の発信器追尾精度の検証実験結果

本節では各受波器がどの程度の角度精度で発信器の正面を向いているのかについて、NC工作機械を用いた動的位置計測実験の結果を基に考察する。

a) 実験方法

受波器の発信器追尾精度を検証するために図7.16に示すようなアルゴリズムを用いて自動追尾位置計測を行った。コンピュータ1は発信器が放電した正確な時刻を精密タイマ回路(第6章の図6.11参照)により検出し、この瞬間にDCサーボモータの制御を担当しているコンピュータ2に割り込みをかける。コンピュータ2はその時点でのモータの目標値、モータの実際の回転位置をメモリにセーブする。一方コンピュータ1は発信器の座標を超音波パルスの伝播時間データから算出し、それを用いて第6章の6.5.2節で述べたフィードフォワード制御に基づいて各受波器のモータ目標値を算出し、コンピュータ2に割り込みをかけてこの値を送出している。

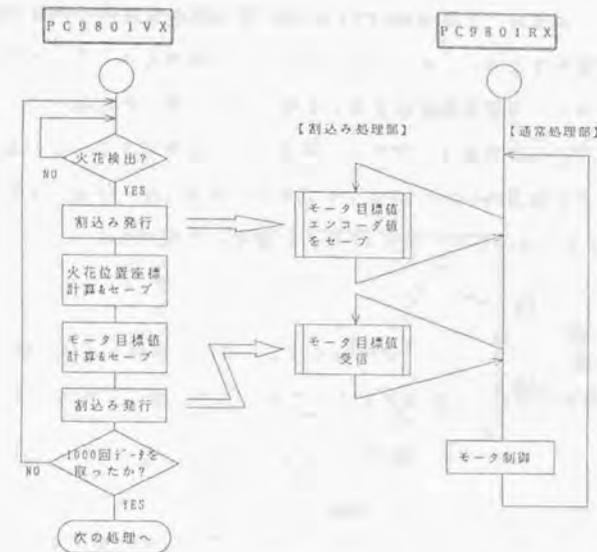


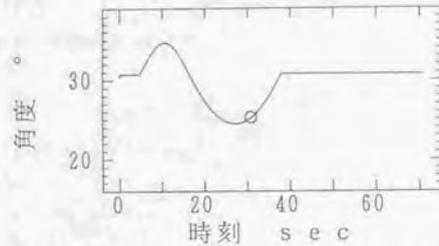
図7.16 追尾精度検証アルゴリズム

b) 実験結果とその考察

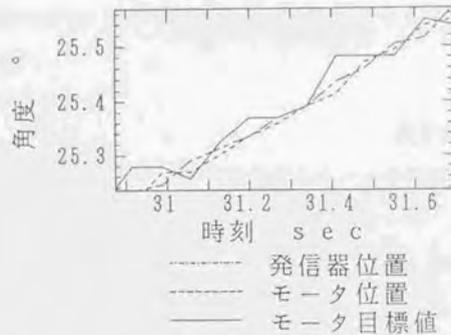
横軸を時間軸にとり縦軸をモータの回転角度にとり、放電時刻と発信器位置、モータ目標値、モータ回転位置との関係をプロットした結果を図7.17に示す。実験に際しては全てのモータについてデータを採集したが、ここでは受波器R₃の水平軸駆動モータについてのデータのみを示す。図中の「発信器位置」は、実際に計測された発信器の位置に対して受波器が正確に正面を向く回転角度を算出したものである。すなわちこの値に「モータ位置」が一致していれば受波器が正確に発信器の正面を向いていたことになる。

図(b)より「発信器位置」に対して「モータ目標値」、「モータ位置」はフィードフォワード制御により0.05°以下の精度で遅れることなく追隨していることがわかる。第6章で述べたように受波器は発信器に対し

て $\pm 3^\circ$ の精度で正面を向いていれば、受波器の位置決め誤差は計測精度に影響を与えない。従ってこの 0.05° の追尾精度は、本システムで実際のロボットの経路精度を評価する際に十分な値である。



(a) 全体図



(b) ○部拡大図

図7.17 受波器 R₃ 水平軸駆動モータの発信器追尾精度

7.4 本システムの位置計測誤差要因の検討

7.4.1 緒言

前節までの NC 工作機械を校正基準として用いた精度検証実験により、本システムの静的・動的計測精度が $\pm 0.2 \sim \pm 0.3 \text{ mm}$ 程度であることが判明した。これらの誤差の要因は図 7.18 のフローチャートに示すように、

- I) 発信器と受波器との間の距離計測誤差
- II) 初期座標系の校正誤差 (すなわち受波器同志の距離計測誤差)

に大別できる。I) を生じさせる要因として、

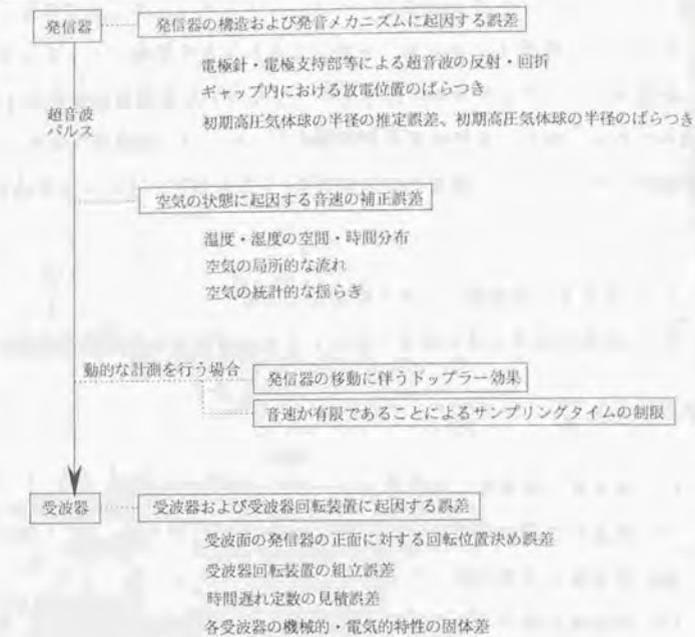
- 1) 発信器の構造および発音メカニズムに起因する誤差
- ii) 空気の状態に起因する音速の補正誤差
- iii) 発信器の移動に伴うドップラー効果
- iv) 音速が有限であることによるサンプリングタイムの制限
- v) 受波器および受波器回転装置に起因する誤差

の 5 種類が挙げられる。これらのうち ii) と v) は II) を生じさせる要因でもある。

本節ではこれら i) ~ v) の各々がどの程度であり、またこれらが I) の距離計測誤差、II) の初期座標系の校正誤差にどの程度影響を与えるかについて検討する。

I) の距離計測誤差が本システムの位置計測精度に与える影響については既に第 3 章において精度分布シミュレーションを行って検討した。そこで本節では II) の初期座標系の校正誤差の影響を精度分布シミュレーションにより検討することにする。

発信器と受波器との間の距離計測誤差



初期座標系の校正誤差（受波器同志の距離計測誤差）

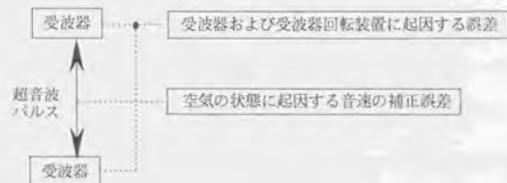


図 7.18 誤差要因の候補

7.4.2 発信器の構造および発音メカニズムに起因する誤差

a) 電極針・電極支持部等による超音波の反射・回折

第4章で述べたように受波器が電極針、電極支持部の存在する平面内に存在する場合、受波面が発信器を見込む角度が 50° を越えると受信波形の音圧が落ち、ゼロクロス点が後方にずれ、この角度が 80° の時 0.15mm 程度の距離計測誤差を生じることが確認されている。

しかしながら通常の3次元位置計測においては受波器は電極針、電極支持部の存在する平面内には存在せず、電極針・電極支持部が測定精度に与える影響はほとんどないことが確認されている（第4章4.7節参照）。

b) ギャップ内における放電位置のばらつき

第5章の図5.1.3に示したように、音速補正センサを含めた超音波距離計測システムを密閉された風洞内に設置し、近似的な無風状態において距離計測実験を行った結果、 1m の距離測定において 0.04mm 程度の誤差しか生じないことが確認されている。これと通常の実験室内では距離測定値のばらつきは 0.1mm 程度であることを考え合わせると、距離計測誤差は発信器のギャップ内における電気火花の放電位置のばらつきに起因するのではなく、その大部分が測定空間の空気の揺らぎに起因していると言える（第5章5.5節参照）

c) 初期高圧気体球の半径の推定誤差、初期高圧気体球の半径のばらつき

本システムでは超音波パルスの受信波形の観察より初期高圧気体球の半径 a を推定しているが、その際 0.1mm 程度の推定誤差があることが第4章で検証されている。さらに放電現象の不安定性により初期高圧気体球の半径自体も放電の度に統計的に変化しているものと思われる。

本研究では第5章で述べたように電気火花放電による音源を等価的に半径 a の球音源とみなし、超音波の伝播距離 r を以下の式

$$r = a + Ct \quad \text{ただし, } C: \text{音速} \quad (4.5 \text{ 再掲})$$

に基づいて求めているので、本超音波距離計測システムは潜在的に 0.1 mm 程度の距離計測誤差を持っているといえる(第4章4.6.6節参照)。

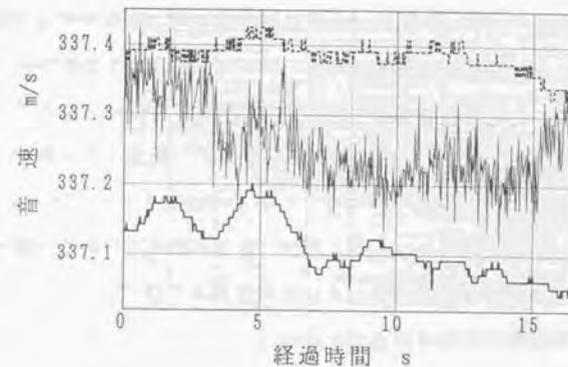
7.4.3 空気の状態に起因する音速の補正誤差

本システムでは超音波パルスの到達時間を測定し、それに音速を乗じて距離を計算している。従って音速補正を正確に行うことが距離計測精度を向上させる必要条件となる。

密閉しない通常の実験室内では、場所・時間によって温度・湿度が異なり、空気も局部的に流れている。また空気はこれらの影響を受けて統計的に揺らいでいることが第5章の風洞内での距離計測実験により確認されている。このような状態では音速は空間・時間的に分布し、ある一箇所での音速を音速補正センサでモニタするのみでは音速を正確に補正することはできない。

このため本研究では測定空間内の音速 C を変数としてリアルタイムで推定計算する「音速推定法」を開発した。また実際にそれを用いて位置計測精度の検証実験を行ったところ音速をモニタする「三点法」「四点法」に比べて高い計測精度が得られた(第3章および本章7.2.6節参照)。

しかしながら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ため、さらに計測精度を向上させるためには厳密に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音速を別個のものとして取扱いそれぞれ補正してやらねばならない。



- 上の音速補正センサのモニタ値
- 下の音速補正センサのモニタ値
- 音速推定法による推定値

図7.19 音速の空間分布の一例

例としてNC工作機械を用いた精度検証実験において、測定空間の上方(工作機械のベッドから900mm上方)と下方(同900mm下方)に2台の音速補正センサを設置し格子点28(図7.5参照)の座標を音速推定法により計測した際の、モニタされた音速と推定計算された音速の時間推移の様子を図7.19に示す。この例では測定空間の上方で温度が高く、下方で温度が低かったものと思われる。測定空間の上方の方が下方よりも音速が大きい。また音速推定法により計算された音速はそれらモニタされた2つの音速の間の中間的な値をとりながら推移している。すなわち音速推定法では測定空間内の平均的な音速を推定計算していることがこの例から判る。このような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ことになる。

図7.19の例ではモニタされた音速と推定計算された音速の誤差は0.1m/s程度であるが、実際の発信器は測定空間の中央付近に存在するので推定誤差はこれより小さいものと考えられ、その1/2程度の0.05m/sと仮定する。この時1mの距離を測定する場合、

$$1000 \div 340 \times (340 + 0.05) - 1000 = 0.15 \text{ mm}$$

程度の距離計測誤差が生じてしまう。ただし図7.19は一例であり、これよりも空気の状態が安定している場合もあれば不安定である場合もあるので定量的な評価は困難である。

7.4.4 動的な計測を行う際の誤差要因

本節では移動する発信器の動的な位置を計測する場合の誤差要因として、ドップラー効果、サンプリングタイムの制限の2つを検討する。

a) ドップラー効果の影響

測定空間内の音速を C 、発信器の移動速度を v 、超音波パルスの周波数を f 、波長を λ 、受波器が観測する超音波パルスの周波数を f' 、波長を λ' とする。簡単のため発信器は受波面の法線上を直線運動すると仮定する。この時ドップラー効果により以下の式が成り立つ。

$$\lambda' = \lambda \left(1 - \frac{v}{C}\right) = \frac{C}{f} \left(1 - \frac{v}{C}\right) \quad (\text{発信器が受波器に近づく場合}) \quad (7.16)$$

$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{v}{C}\right) = \frac{C}{f} \left(1 + \frac{v}{C}\right) \quad (\text{発信器が受波器から遠ざかる場合}) \quad (7.17)$$

例として $v = 1\text{m/s}$ 、 $C = 340\text{m/s}$ 、 $f = 100\text{kHz}$ と仮定する。この条件のもとで発信器が受波器に近づく場合、式(7.16)より超音波パルスの波

長は $\lambda = 3.40\text{mm}$ から $\lambda' = 3.39\text{mm}$ に変化する。また発信器が受波器から遠ざかる場合式(7.17)より $\lambda' = 3.41\text{mm}$ に変化する。すなわち波長は0.01mm程度変化するにすぎず、波長の変化に伴うゼロクロス点の変動、またそれに起因する距離計測誤差も0.01mm程度であると予想される。空気の揺らぎに起因する本距離計測システムの計測値の標準偏差が0.1mm程度であることを考慮すると、ドップラー効果の影響は無視できると考えて差し支えない。

b) 音速が有限であることによるサンプリングタイムの制限

発信器が超音波パルスを送信してから受波器に到達するまでに、測定距離を 1m/s 、音速を 340m/s として約 3ms の時間がかかる。このため放電周波数を高めると、直前に発信された超音波パルスが各受波器に到達しない間に次の超音波パルスが発信されることになる。本システムではハードウェアの制約上1回の座標計算が終了するまで次の超音波パルスを受け付けることができないので、放電周波数(すなわちサンプリングタイム)を最高 100Hz 程度に制限して位置計測を行っている。

このため発信器の移動速度が速い場合計測が飛び飛びにしか行われず、DDモータを用い最大速度が 7m/s といった高速型のロボット²⁾等の動的精度(経路精度、速度精度等)を正確に検証することは本システムでは困難であると思われる。また本システムでは第6章の6.5.2節で述べたように次の発信器が放電する位置を予測して受波器回転角度をフィードフォワード制御しているものの、サンプリングタイムに制限があるために、極端に発信器の移動速度が大きい場合は受波器が発信器の位置を見失ってしまい、計測が中断してしまう可能性もある。

将来的に4チャンネル到達時間計測回路の各チャンネルが複数のゼロクロス点を検出できるようにハードウェアの改良を行い、高い放電周波数に対応できるようにすることを検討中である。

7.4.5 受波器および受波器回転装置に起因する誤差

a) 受波面の発信器の正面に対する回転位置決め誤差

本距離計測システムでは受波器が発信器の正面に対して $\pm 3^\circ$ 程度の精度で位置決めされていれば、受波器の指向性に起因する距離計測誤差は無視できる程度である(第6章6.2節参照)。

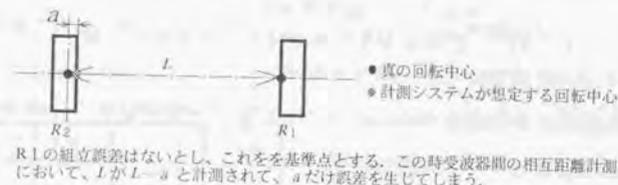
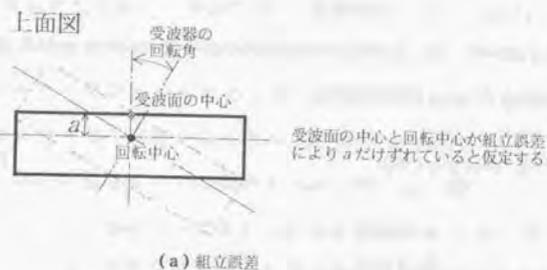
受波器回転装置のサーボ特性を検証した結果、ステップ応答、ランプ応答ともに位置決め誤差はエンコードの分解能程度の小さな値であった(第6章6.3.3節参照)。またNC工作機械を用いて受波器の発信器追尾精度の検証実験を行った結果、発信器の移動速度が 4m/min と遅かったものの、受波器は発信器の正面に対して 0.05° 以下の精度で遅れることなく追隨していることが確認された(第7章7.3.3節参照)。

以上を考慮すると受波面の発信器の正面に対する回転位置決め誤差は無視できる程度であり、距離計測精度に影響を与えないと思われる。

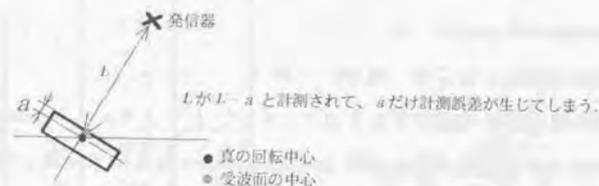
b) 受波器回転装置の組立誤差

受波器回転装置を組み立てる際には、水平・鉛直方向の各回転軸が交わりかつその交点と受波面の中心が正確に一致するように、治具、計測器等を用いて十分に注意した(第6章6.3.1節参照)。しかしながら製作・組立公差の都合により誤差が混入するおそれがあるので、ここではそれが位置計測精度に及ぼす影響について検討する。

簡単のため2次元平面内に発信器が存在する場合を考え、図7.20(a)に示すように受波面の中心と受波器の回転中心が組立誤差に伴い a だけずれているとする。受波器間の距離を測定して初期座標系の校正を行う際、受波器に組立誤差があると図7.20(b)に示すように初期座標系の校正誤差が a だけ生じてしまう。次に実際に計測を行う場合、図7.20(c)に示すように距離計測誤差が a だけ生じてしまう。



(b) 初期座標系の校正誤差への影響



(c) 発信器・受波器間の距離計測誤差への影響

図7.20 受波器回転装置の組立誤差の影響

このように組立誤差 a は初期座標系の校正誤差、距離計測誤差に直接影響するので、これを小さく抑える必要がある。本研究においては公差 0.1mm 以下で受波器回転装置の製作・組立を行ったので、初期座標系の校正誤差、距離計測誤差も 0.1mm 以下の値に抑えられていると思われる。

c) 時間遅れ定数の見積誤差

第5章で述べたように本超音波距離計測システムでは発信器から受波器までの距離 r を以下の式に従って求めている。

$$r = a + C(t - t_0) \quad (5.1再掲)$$

- ここで、 a : 初期高圧気体球の半径 (= 1.6mm)
 C : 音速補正センサより得られる音速
 t : ゼロクロス点の到達時間
 t_0 : 計測に先立ち求められる時間遅れ定数

この時間遅れ定数はデジタルストレージスコープで受信波形を数十回観測することにより求めているが、波形の立下がり時点での微係数は有限の値をとるため、この時点を正確に波形から読みとることは困難であり誤差が生じてしまうおそれがある。

表7.2に約1m離れた発信器からの超音波パルスの波形を観測し、時間遅れ定数を20回測定した結果を示す。これより測定値は $\pm 0.15 \mu s$ 程度のばらつきを持ち、これは音速を340m/sと仮定した場合 $\pm 0.05mm$ の距離計測誤差に相当する。しかしながら t_0 は受波器の機械的特性、増幅回路の電気的特性により定まる定数であるので、数十回の測定値の平均値をとってその値を採用することにより、このばらつきの影響は除去できるものと思われる。

表7.2 時間遅れ定数 t_0 の測定例

1回目	5.48 μs	11回目	5.24 μs
2	6.20	12	6.20
3	5.12	13	6.52
4	6.32	14	6.32
5	6.32	15	6.32
6	6.32	16	6.78
7	6.32	17	6.20
8	5.52	18	6.32
9	6.24	19	6.48
10	6.32	20	6.50
		平均	6.35 μs
		標準偏差	0.15 μs

注) 発信器を約1m離して約1分おきに波形観測を行い t_0 を計測した。

d) 各受波器の機械的・電気的特性の固体差

各受波器の機械的特性(振動膜の共振周波数)、電気的特性(増幅回路のゲイン等)に固体差があると、同一距離を測定しているにもかかわらず受波器間で測定距離に偏差が生じてしまうおそれがある。特に受波器同志の相互距離を測定して初期座標系を校正する際に、この受波器の固体差が大きく影響すると思われる。

本システムでは受信信号を自作の「受波器プリアンプ」「4チャンネル到達時間計測回路」により処理してゼロクロス点の検出を行っている。これらの回路においてオペアンプはオフセット電圧が調整可能なFET入力のものを用い、抵抗は温度特性変化の少ない金属皮膜のものを用い、可変抵抗器は高精度の多回転型のものを用いる等の工夫を施すことにより、なるべく各回路の電気的な特性が揃うようにしている。実際に1個の受波器を用いて約1m離れた発信器と組み合わせて距離計を構成し、その受信信号を4個の「受波器プリアンプ」「4チャンネル到達時間計測回路」の各チャンネルにそれぞれ継いで距離を計測したところ、各測定値の間には $\pm 0.1mm$ 以下の偏差しか生じなかった。このことにより自作の電気回路の諸特性(増幅回路のゲイン・位相遅れ、デジタルICの立下がり時間等)が各チャンネル毎に揃っていることが確認された。

なお「受波器」「受波器付属プリアンプ」「受波器プリアンプ」「4チャンネル到達時間計測回路」の全てを含めた各チャンネルの機械的・電気的特性の固体差もほとんどないことが、受波器同志を向かい合わせた相互距離測定の実験により確認されているが、これについては次節で説明する。

7.4.6 初期座標系の校正誤差

本システムでは初期座標系を校正する際に受波器同志で超音波パルスをやりとりして相互に距離測定を行う。この計測誤差が初期座標系の校正誤差となる。ここではまず相互距離測定の誤差要因について検討する。次に初期座標系の校正誤差が計測システムの3次元位置計測精度にどのような影響を与えるかについてシミュレーションにより検討する。

a) 相互距離測定の誤差要因

受波器同志の距離測定の誤差要因として最も影響の大きいのは7.4.3節で述べた空気の状態に起因する音速の補正誤差であると思われる。本システムにおいてはこの影響を取り除くため、超音波パルスの往復距離を2285mmと長く設定した相互距離測定専用の音速補正センサを開発した。この音速補正センサを図7.21に示すように三脚に固定し、受波



1: 受波器4
2: 受波器2
3: 相互距離測定専用音速補正センサ

図7.21
受波器間の相互距離測定における音速補正

器間の超音波パルスの伝播経路にできる限り近い位置に設置した。これにより距離測定を行う空間と音速をモニタする空間との間で温度・湿度、空気の局所的な流れ等の条件を同一にし、正確な音速の補正を可能にしている。

次に7.4.5節で述べた受波器回転装置の組立誤差も相互距離測定の精度に影響を与えるが、受波器回転装置の製作・組立には誤差が生じないように十分留意したので、これに起因する計測誤差は±0.1mm以内に入れていると思われる。

また7.4.5節で述べた各受波器の機械的・電気的特性の固体差も相互距離測定の精度に影響を与える。表7.3に受波器間の距離を測定した例を示す（これは後で第9章で述べるスカラロボットの計測に先だって初期座標系を計測した時のものである）。これより各受波器の発信機能、

表7.3 受波器間の相互距離の測定例

発信器番号	受波器番号	音速補正センサによる音速 m/s	測定距離 mm	偏差 mm	偏差/距離 $\times 10^{-4}$
1	2	341.860	2848.26	0.02	0.1
2	1	341.903	2848.26		
2	3	341.941	2697.56	0.33	1.2
3	2	341.932	2697.25		
3	1	342.065	1904.08	0.14	0.7
1	3	342.063	1904.22		
1	4	342.405	3212.01	0.32	1.0
4	1	342.460	3212.33		
2	4	342.382	2067.57	0.23	1.1
4	2	342.391	2067.80		
3	4	342.480	1849.79	0.07	0.4
4	3	342.457	1849.86		

- 注1) 第9章のスカラ型ロボット計測に先だて行われた初期座標系の校正結果を示した。
注2) 各データとも発信周波数は30Hzに設定し、1000回の距離測定を行い、その平均値を示した。
注3) 偏差の欄には、発信器と受波器を入れ換えた場合の2つの測定距離の偏差を示した。

受波機能を入れ換えても、測定値の偏差は測定距離の 10^{-4} （すなわち $\pm 0.1\text{mm/m}$ ）程度であり、測定距離に大きな変化が生じないことがわかる。音速の補正誤差の影響も存在するので定量的なことは言えないが、この結果より「受波器」「受波器付属プリアンプ」「受波器プリアンプ」「4チャンネル到達時間計測回路」の全てを含めた各チャンネルの特性の固体差がほとんどないことが確認された。

以上を総合的に考慮すると、受波器同志を向き合わせる相互距離測定における誤差（すなわち初期座標系の校正誤差）は $\pm 0.1\text{mm/m}$ 程度であると言える。

b) 初期座標の校正誤差を考慮した3次元精度分布シミュレーション

ロボットの作業領域として半径 $a = 1000\text{mm}$ の半球面内を考え、図7.2.2(a)に示すように4個の受波器 $R_1 \sim R_4$ を配置する場合を考える。真の受波器の座標を $R_{10} \sim R_{40}$ と表記することになると、これらは

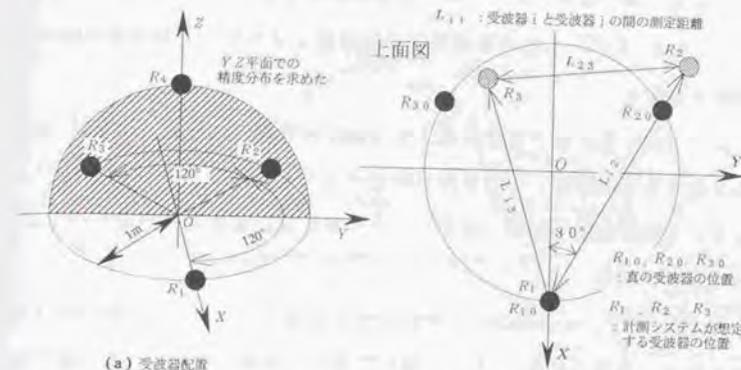
$$\begin{aligned} R_{10}(a, 0, 0) \quad R_{20}\left(-\frac{a}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}a, 0\right) \quad R_{30}\left(-\frac{a}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}a, 0\right) \\ R_{40}(0, 0, a) \end{aligned} \quad (7.18)$$

となる。ここで先にa)で検討した結果より、受波器間の測定距離の誤差が平均値 0.0mm 、標準偏差 0.1mm/m の正規分布に従うと仮定する。この仮定に基づき R_{i0} と R_{j0} との間の真の距離を L_{ij0} 、 ξ を正規分布 $N(0, 10^{-4})$ に従う乱数として、測定距離 L_{ij} を

$$L_{ij} = L_{ij0}(1 + \xi) \quad (i=1 \sim 4, j=i+1 \sim 4) \quad (7.19)$$

のように計算機内に発生させる。

図7.2.2(b)に示すように R_1 の位置は $(a, 0, 0)$ に固定されており、 R_2 はXY平面で R_1 からX軸と 30° をなす線分上に存在し、



R_1 と R_{10} は一致し、 R_2 は R_1 からX軸と 30° をなす線分上に存在し、 R_3 はXY平面上に存在すると仮定する。
この仮定のもと受波器間の測定距離 L_{ij} ($i=1 \sim 3, j=i+1 \sim 4$)を計算機内に発生させて、初期座標系 $R_1 \sim R_4$ を校正する。

(b) 初期座標系の校正誤差

図7.2.2 シミュレーションの条件

R_3 はXY平面上に存在すると仮定する。これらの仮定のもと式(7.19)の測定距離を用いて $R_1 \sim R_2$ の座標を計算し、初期座標系を計算機内で校正するものとする。すなわち受波器間の距離計測誤差に起因して $R_{10} \sim R_{40}$ が $R_1 \sim R_4$ に設定されてしまい初期座標系の校正誤差が生じたことになる。

ここで真の発信器の座標を $T_0(X_0, Y_0, Z_0)$ とし、測定空間内の音速は $C = 340\text{m/s}$ で空間・時間的に一定であると仮定する。この時真の超音波パルスの到達時間 t_{i0} は

$$t_{i0} = \frac{|R_{i0}T_0|}{C} \quad (i=1 \sim 4) \quad (7.20)$$

となり、これを用いて先ほど計算機内で校正した初期座標系 $R_1 \sim R_4$ に

おける発信器の座標 $T(X, Y, Z)$ を音速推定法を用いて計算機内で求める。この時 $|\overline{T_0 T}$ が初期座標系の校正誤差により生じた発信器の位置計測誤差となる。

式(7.19)に基づいて初期座標系を1000回計算機内に作り、 $|\overline{T_0 T}$ を求める操作を1000回行いその平均値を求める。この値は $T_0(X_0, Y_0, Z_0)$ において初期座標系の校正誤差がどの程度位置計測誤差に影響を与えるかの指標になる。

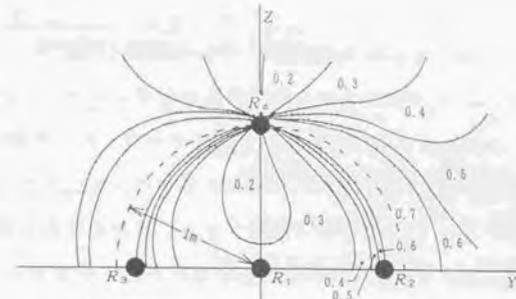
以上の $|\overline{T_0 T}$ の1000回の平均値を求める操作をロボットの動作領域内およびその周辺の多数の T_0 において適当な間隔をおいて行い、精度分布図を求めた結果を図7.23(a)に示す。

実際の計測においては初期座標系の校正誤差の他に、発信器と受波器の間の距離にも音速の補正誤差等に基づいて計測誤差が生じる。従って ζ_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、超音波パルスの到達時間の計測値 t_i を

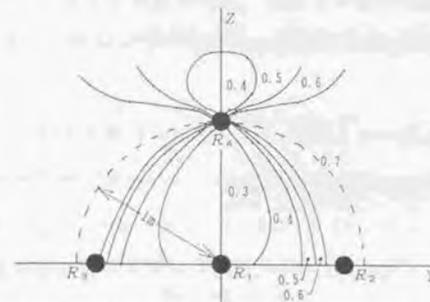
$$t_i = \frac{|R_{i0} T_0|}{C} (1 + \zeta_i) \quad (i=1 \sim 4) \quad (7.21)$$

のように式(7.20)の代わりに計算機内に発生させ、これを用いて同様の精度分布図を求める操作を行った。この結果を図7.23(b)に示す。

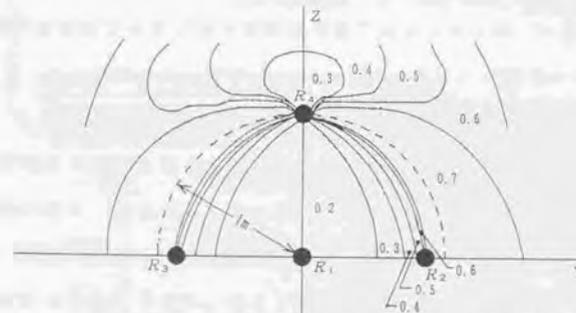
比較のため初期座標系の校正誤差は無く、距離測定値のみが誤差を持つと仮定して精度分布をシミュレーションした第3章の図3.15(b)の結果を図7.23(c)に再掲する。



(a) 初期座標の校正誤差のみが存在する場合



(b) 初期座標の校正誤差、距離計測誤差の両方が存在する場合



(c) 距離計測誤差のみが存在する場合 (図3.15(b)の再掲)

※ 例えば 0.3 は誤差 $\Delta = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$ が 0.2mm~0.3mm の精度で計測可能な空間領域を表す。

図7.23 初期座標の校正誤差の影響

c) シミュレーション結果の考察

図7.23(a)より初期座標系の校正誤差の影響により、0.2mm以下の精度で計測可能な領域は測定空間の中央付近のかなり狭い範囲に限られ、測定空間内における平均的な誤差は0.3mm程度になってしまうことがわかる。これを図7.23(c)の結果と比較すると、初期座標系の校正誤差が位置計測精度に与える影響は、距離計測誤差の影響と同程度かそれ以上であることがわかる。また図7.23(b)より初期座標系の校正誤差と距離計測誤差の両方が存在する場合、さらに精度は劣化してしまい測定空間の中央付近でも0.2~0.3mm程度の精度でしか計測が行えないことがある。

本章の7.2.6節で示したように、NC工作機械を用いた位置精度の検証実験の結果本システムは $\pm 0.2\text{mm} \sim \pm 0.3\text{mm}$ の位置計測精度を持つことが確認されているが、図7.23(b)のシミュレーション結果はこれと同程度の精度を示しており、シミュレーションの妥当性が裏付けられる。

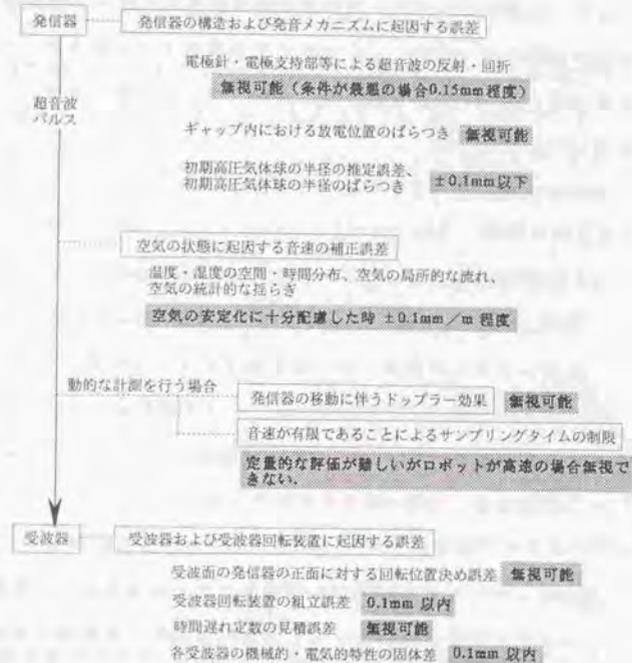
7.4.7 本節の総合的考察

本7.4節では本システムの位置計測誤差を生じさせる要因を列挙し、これら各々の影響についてシミュレーション等により検討した。その結果をもう一度フローチャートにして示すと図7.24のようになる。

本システムの誤差要因は、発信器と受波器との間の距離計測誤差と初期座標系の校正誤差に大別される。これら2つの誤差は、本節で検討してきたように測定空間内の温度・湿度分布、局所的な空気の流れ、空気の揺らぎ等に伴う音速の変化を本計測システムが正確に補正しきれないことから主に生じており、対策としては測定空間の空気の状態をなるべく安定化するしかない。従って空気中を伝播する超音波を用いる限り、NC工作機械を用いた実験およびシミュレーションで示された $\pm 0.2 \sim \pm 0.3\text{mm}$ の精度は実現でき得る限界の値であると思われる。

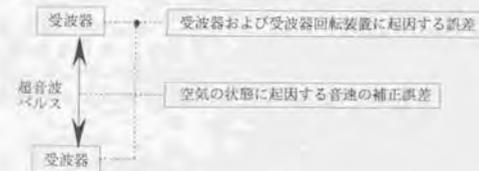
発信器と受波器との間の距離計測誤差

以下の様々な要因の影響を受けて $\pm 0.1\text{mm/m}$ 程度の誤差が生じる



初期座標系の校正誤差 (受波器同志の距離計測誤差)

音速補正センサを周辺に設置する、各受波器間の特性を揃える等の工夫により $\pm 0.1\text{mm/m}$ 程度の誤差に抑えられている



シミュレーションによりこれら2つの要因(距離計測誤差、初期座標系の校正誤差)が3次元位置計測精度に与える影響は $\pm 0.3\text{mm}$ 程度。これはNC工作機械を用いた実験の結果と一致する。

図7.24 本計測システムの位置計測誤差要因とその影響の程度

7.5 本章の概要および結言

本章では開発した位置・姿勢自動追尾計測システムの静的および動的計測精度を、精度 $1\mu\text{m}$ のNC工作機械を校正基準として検証した。また本計測システムの位置計測誤差がどのような要因で生じているのかを総合的に検討した。

本章の主な結果は以下の通りである。

(1) NC工作機械のチャックに発信器を取り付け、 $X \times Y \times Z$ が $900 \times 400 \times 400\text{mm}$ の範囲内の36点の格子点に位置決めさせ、その座標を本計測システムで計測した。測定座標をNC座標系での値に変換したものとNC座標とを比較することにより本計測システムの静的位置の計測精度を検証した。座標変換式は8点をマッチング点として最小二乗法を用いて求めた。

(2) セーブされた発信器から各受波器への超音波パルスの到達時間データおよび音速データから三点法、四点法、音速推定法を用いて発信器の座標を計算し、各手法の計測精度を比較した。

この結果三点法はZ座標の計測精度が悪く、四点法および音速推定法では冗長な4個目の受波器を測定空間の上方に設置することでZ座標の計測精度が改善されることが判った。

また四点法より音速推定法の方が、音速補正センサを用いずに測定空間内の正確な音速を推定計算するため若干 (0.1mm 程度) 計測精度が高いことが判明した。

(3) 測定空間を4個の受波器が囲む空間の中央付近に制限した場合、本システムの計測精度が向上することが判明した。これは第3章のシミュレーションの結果を裏付けている。

(4) 本研究で開発した計測システムの3次元静的位置計測精度は、座標計測手法として音速推定法を用いた場合以下の通りである。

a) 測定空間 $X \times Y \times Z$ が $900 \times 400 \times 400\text{mm}$ の場合、座標の測定誤差が $\Delta X = 0.40\text{mm}$, $\Delta Y = 0.25\text{mm}$, $\Delta Z = 0.32\text{mm}$ 以内であり、標準偏差が $\sigma_x = 0.19\text{mm}$, $\sigma_y = 0.19\text{mm}$, $\sigma_z = 0.20\text{mm}$ 以下である。

b) 測定空間 $X \times Y \times Z$ が $300 \times 400 \times 400\text{mm}$ の場合、座標の測定誤差が $\Delta X = 0.15\text{mm}$, $\Delta Y = 0.20\text{mm}$, $\Delta Z = 0.22\text{mm}$ 以内であり、標準偏差が $\sigma_x = 0.12\text{mm}$, $\sigma_y = 0.13\text{mm}$, $\sigma_z = 0.17\text{mm}$ 以下である。

(5) NC工作機械を校正基準として用い、発信器に $1\mu\text{m}$ の精度で円軌道、直線軌道を描かせ、その動的な位置を自動追尾計測することにより本システムの3次元経路計測精度を検証した。

発信器の移動速度を 4m/min に設定し、発信器の発信周波数を 30Hz に設定した場合、本システムの経路計測精度は

a) 測定対象が直径 400mm の円軌道の場合 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。

b) 測定対象が直線軌道の場合 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内。

であることが判明した。

測定空間内の空気の安定化、座標変換式の構築を実験直前に行うこと等によりこれらの精度はさらに向上するものと思われる。

(6) ロボットの絶対位置決め精度、絶対経路精度が悪く、それらの高精度な測定手段が実用化されていない現状を鑑みれば、以上検証してきた本計測システムの静的および動的位置の計測精度はロボットの位置・姿勢計測の用途に十分耐えられるものであると思われる。

(7) 本計測システムの位置計測誤差を生じさせる要因を、

- I) 発信器と受波器との間の距離計測誤差
- II) 初期座標系の校正誤差

に分類し、さらに I) を生じさせる要因を

- i) 発信器の構造および発音メカニズムに起因する誤差
- ii) 到達時間測定の際の空気の状態に起因する音速の補正誤差
- iii) 発信器が移動することに伴うドップラー効果
- iv) 音速が有限であることによるサンプリングタイムの制限
- v) 受波器および受波器回転装置に起因する誤差

の5種類に分類した。これらのうちii)とv)は II) を生じさせる要因でもある。

(8) 距離計測誤差、初期座標系の校正誤差が本計測システムの位置計測精度におよぼす影響を大型計算機を用いてシミュレーションした結果、本システムの計測精度は測定空間の中央付近で $\pm 0.3\text{mm}$ 程度であり、この精度はNC工作機械を用いた精度検証実験の結果と同程度であった。

(9) 本システムの位置計測誤差の要因は発信器と受波器との間の距離計測誤差と初期座標系の校正誤差である。これら2つの誤差は測定空間内の温度・湿度分布、局所的な空気の流れ、空気の揺らぎ等に伴う音速の変化を本計測システムが正確に補正しきれないことから主に生じており、本システムで実現された $\pm 0.2 \sim \pm 0.3\text{mm}$ の精度は限界の値であると思われる。

第 8 章

本システムの姿勢計測精度の 検証実験

本システムの姿勢計測精度の検証実験

8.1 緒言

本章ではハーモニックドライブ減速機付きDCサーボモータを2軸に配した姿勢基準器(角度分解能 0.01125°)を製作し、これを校正基準として開発した位置・姿勢自動追尾計測システムの姿勢計測精度を検証することを目的とする。

本来ならNCコントローラの付属した角度割り出し盤等の精度が保証できる校正基準を用いるべきであるが、このような装置で2軸駆動可能なものが市販されていないこと、研究室での実験が容易であることを考慮して姿勢基準器を自作することにした。

実験は以下の2種類について行った。

(1) 姿勢基準器の2軸のうち1軸を固定した状態で残りの1軸を一定の角度回転させ、その回転角度を計測することにより本システムの静的姿勢計測精度を検証する。

(2) 姿勢基準器の2軸のうち1軸を固定した状態で残りの1軸を一定速度で回転させ、その回転角度を自動追尾計測することにより本システムの動的姿勢計測精度を検証する。

8.2 DCサーボモータを用いた姿勢基準器の開発

図8.1に製作した姿勢基準器の諸元を示し図

8.2にその外観を示す。なお本章においてはこれ以降図8.1に示すように回転角度 θ 、 ϕ の原点と回転方向を定義する。

姿勢基準器の各軸には第6章で述べた受波器回転装置に使用したものと同一のDCサーボモータ（ハーモニックドライブシステムズ(株)製, RH-5. 出力軸に減速比 1:80 のハーモニックドライブが

付属している)により駆動される。このモータの出力軸の回転角度は付属のエンコーダ(100パルス/1回転)で読み取られ電氣的に4連倍されるので、結局1回転につき $80 \times 100 \times 4 = 32000$ パルスが発生することになる。従って本姿勢基準器の位置決め分解能は、

$$(\text{分解能}) = 360^\circ / 32000 = 0.01125^\circ$$

となる。モータの制御系は第6章で述べた受波器回転装置の制御系と同一のものを構成し、コンピュータ2(第6章の図6.1.1参照)により制御することにした。

第6章で述べたように3次元位置測定誤差を0.1mmと仮定した場合の本システムの姿勢測定誤差は0.11°で見積られるので、開発した姿勢基

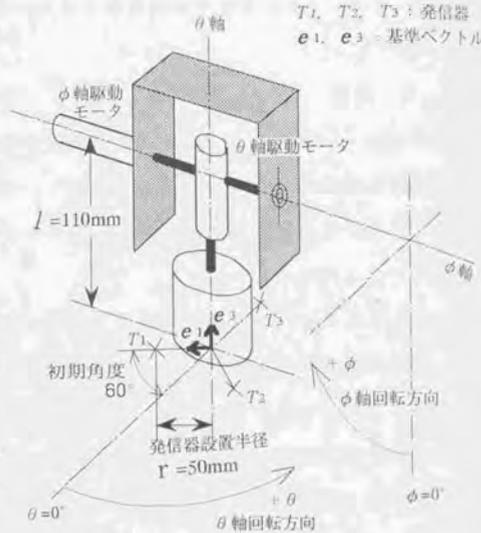
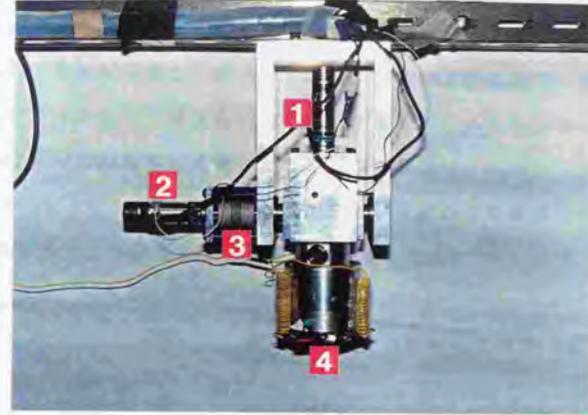
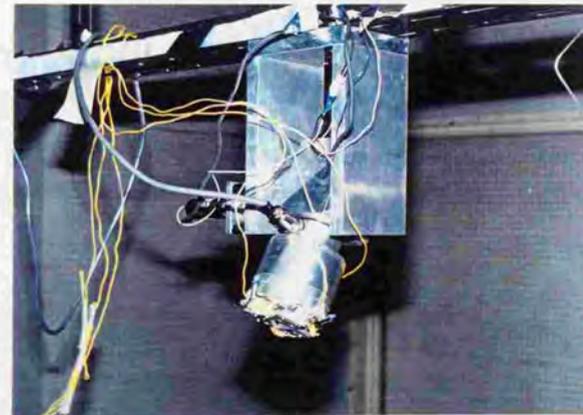


図8.1 姿勢基準器の諸元



- 1 : θ 軸駆動用DCサーボモータ
- 2 : ϕ 軸駆動用DCサーボモータ
- 3 : カップリング
- 4 : 3個組発信器

(a) $\phi = 0^\circ$ の場合



(b) $\phi = 40^\circ$ の場合

図8.2 姿勢基準器の外観

準器の位置決め分解能は校正基準として十分であると言える。ただし被計測物である3個組発信器はフレキシブルカップリングを介してモータ出力軸に接続されているので、特に回転軸が ϕ 軸の場合重力によりカップリングがたわんで3個組発信器の位置決め誤差が生じてしまう可能性がある。これについては次節以降の実験結果の考察において詳述する。

なお姿勢基準器の製作、組立の際には、図8.1に示す e_1 ベクトルと θ 軸、および e_3 ベクトルと ϕ 軸が正確に垂直をなすように十分留意した。

8.3 静的姿勢計測精度の検証実験

8.3.1 実験方法

図8.3に示す位置関係で受波器4個と姿勢基準器を配置した。3個の発信器の静的座標を音速推定法により計算し、それらをもとに第3章で述べた計算方法に従って姿勢ベクトル e_1, e_2, e_3 を計算した。実験においては θ 軸、 ϕ 軸のうち一軸を固定した状態で残りの1軸を一定角度ずつ回転させ、その回転角度を本システムで計測した。

実験においては図8.1で定義した原点付近に目視によりモータを位置決めし、その位置を $\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$ としてエンコーダパルスのカウンタをリセットした。以下の実験においてはこの位置を基準としたインクリメンタルな回転角度を取り扱うことにする。

具体的な実験手順を以下に示す。

(1) θ 軸計測実験の場合、図8.4(a)に示すように $\phi=0^\circ$ に固定した状態で θ 軸を回転させ $\theta=-60^\circ, -45^\circ, -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ において位置決めし、各状態で500回ずつ姿勢ベクトルを計算する。

ϕ 軸計測実験の場合、図8.4(b)に示すように $\theta=20^\circ$ に固定した状態で ϕ 軸を回転させ $\phi=-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ において位置決めし、各状態で500回ずつ姿勢ベクトルを計算する。

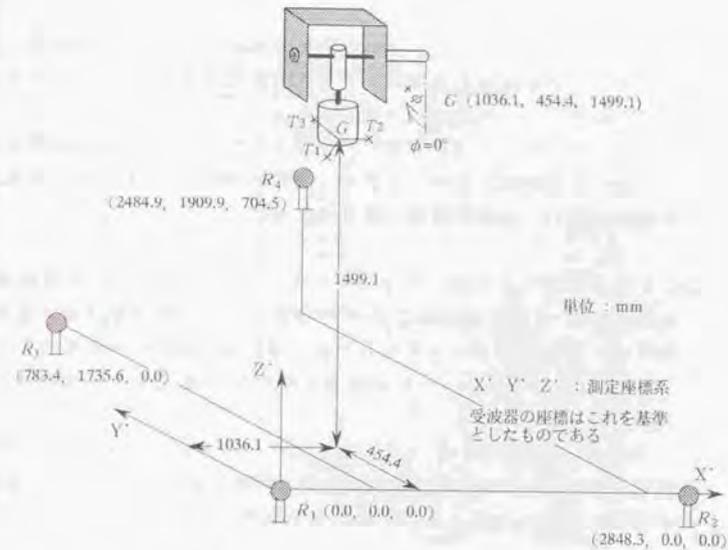
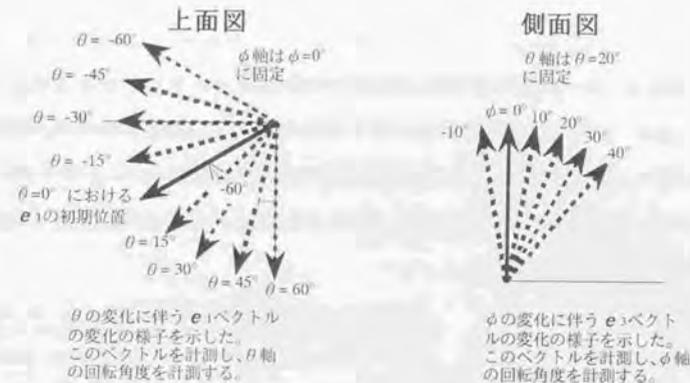


図8.3 受波器と姿勢基準器の位置関係



(a) θ 軸回転の場合

(b) ϕ 軸回転の場合

図8.4 静的姿勢計測実験における計測ベクトル

(2) θ 軸計測の際、 $\theta = 0^\circ$ において計測された e_1 ベクトルを基準として、それと各位置決め角度において計測された e_1 ベクトルとがなす角度を計算し、回転角度の計測値とする。

ϕ 軸計測の際、 $\phi = 0^\circ$ において計測された e_3 ベクトルを基準として、それと各位置決め角度において計測された e_3 ベクトルとがなす角度を計算し、回転角度の計測値とする。

(3) 計算においては原点 ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$) でのベクトル (θ 軸計測の場合 e_1 , ϕ 軸計測の場合 e_3) の計測データと各位置決め角度でのベクトルの計測データのうち、同じ通し番号のもの同志をとりだし 500 個のペアを作り、それらのなす角度を 500 個求めて平均値および標準偏差を計算した。

本来なら実際に $\theta = 0^\circ$ (または $\phi = 0^\circ$) の状態から各角度への位置決めを 500 回行いその回転角度を逐一計算するべきであるが、実験の容易さを考えて以上のような手法を採用した。

(4) 以上のようにして求めた回転角度の計測値と、位置決め角度 (エンコーダの分解能を基準とした校正基準) とを比較し、本計測システムの静的姿勢の計測精度を検証する。

8.3.2 θ 軸計測実験の結果および考察

表 8.1 に θ 軸の回転角度の測定結果を示す。回転角度の測定誤差の平均値は 0.2° 以内であり、標準偏差は 0.15° 程度である。 $\theta = -60^\circ$, -45° において測定誤差がそれぞれ 0.3° , 0.2° と他の場合に比べて大きい。誤差の要因として、

(1) 音速の補正誤差、初期座標系の設定誤差等により本計測システムに姿勢測定誤差が生じていた。

(2) 軸の支持部における固体摩擦等の外力によりカップリングがたわみ、3 個組発信器の正確な位置決めが行われなかった。

表 8.1 静的姿勢角度の測定結果 (θ 軸)

エンコーダの読み (A)	計測した e_1 の回転角度 (B)	計測角度の標準偏差	測定誤差 (B-A)
-60.00°	-59.70°	0.16°	0.30°
-45.00°	-44.81°	0.14°	0.19°
-30.00°	-29.95°	0.10°	0.05°
-15.00°	-15.01°	0.12°	-0.01°
0.00°	回転角度基準	—	—
15.00°	15.00°	0.12°	0.00°
30.00°	30.00°	0.14°	0.00°
45.00°	45.01°	0.12°	0.01°
60.00°	60.04°	0.17°	0.04°
	平均	0.13°	0.08°

各角度において 500 回計測

(注 1) エンコーダの読みが 0.00° での e_1 の計測値を基準とし、それと各回転角度における e_1 の計測値とのなす角度より回転角度を計算した。

(注 2) 測定誤差の平均の欄には、各データの絶対値の平均を記した。

等が考えられる。このうち、(1) は本計測システムに起因するものであり、(2) は校正基準となるべき姿勢基準器に起因するものであるが、本実験の結果からだけでは原因を特定できない。これら $\theta = -60^\circ$, -45° のデータを除けば本システムの静的姿勢測定誤差は、 θ 軸が回転軸の場合 0.05° 以内、標準偏差 0.15° 以下である。

8.3.3 ϕ 軸計測実験の結果および考察

表 8.2 に ϕ 軸の回転角度の測定結果を示す。回転角度の測定誤差の平均値は 0.6° 以下であり、標準偏差は 0.5° 程度である。

測定誤差の主な原因は、重力により姿勢基準器の ϕ 軸においてカップリングがたわみ、3 個組発信器の位置決めが正確に行われなかったためと思われる。カップリングは三木プーリ (株) 製、型式 ACRM-100 を用いて

表8.2 静的姿勢角度の測定結果(φ軸)

エンコーダの読み (A)	計測した e_3 の回転角度 (B)	計測角度の標準偏差	測定誤差 (B-A)	カップリングのたわみ角計算値
-10.00°	-9.56°	0.49°	0.44°	0.13°
0.00°	回転角度基準	—	—	—
10.00°	9.89°	0.48°	-0.11°	-0.13°
20.00°	19.73°	0.42°	-0.27°	-0.25°
30.00°	29.65°	0.51°	-0.35°	-0.37°
40.00°	39.44°	0.46°	-0.56°	-0.47°
	平均	0.47°	0.35°	

各角度において500回計測

(注1) エンコーダの読みが0.00°での e_3 の計測値を基準とし、それと各回転角度における e_3 の計測値とのなす角度より回転角度を計算した。

(注2) 測定誤差の平均の欄には、各データの絶対値の平均を記した。

おり、カタログによるとねじり剛性は $1.53 \text{°} / (\text{N} \cdot \text{m})$ である^(*)。姿勢基準器の実際のデータに基づいて図8.5のようなモデルを考え、カップリングのたわみ角を概算した結果を表8.2に併せて示す。これらは本計測システムの測定誤差と0.1°以内の誤差で精度で良く一致する。このことより

- (1) 本実験においては校正基準となるべき姿勢基準器の側に位置決め誤差があり、本計測システムの姿勢角度の計測精

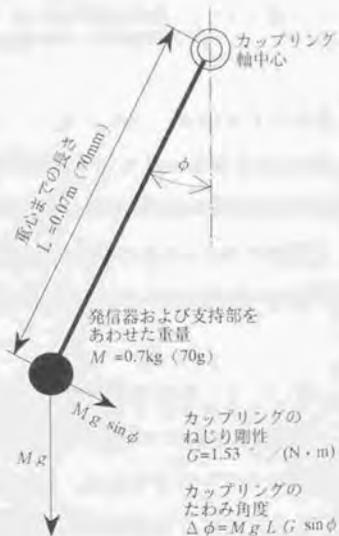


図8.5 カップリングのたわみ角度の計算モデル

度は、計測値とエンコーダの読みとを比較することによっては検証できない。

- (2) 計測値とカップリングのたわみ角の計算値との一致の度合いを考慮すると、本システムの静的姿勢測定誤差は φ 軸が回転軸の場合 0.2° 程度であると思われる。

等のことが言える。

また姿勢角度計測値の標準偏差がθ軸が回転軸の場合に 0.15° 程度であるのに対して、φ軸が回転軸の場合 0.5° 程度と大きい。以下この理由について考察する。まずθ軸を回転させる場合に3個の発信器のZ座標はほぼ一定値を保つのにに対して、φ軸を回転させる場合には発信器のZ座標が大きく変化する。すなわち e_3 ベクトルの計測精度には各発信器のZ座標の計測精度が大きく影響する。ところが受波器 R_4 が3個の発信器の全ての位置をとらえることを可能にするため、受波器 R_4 の設置位置を姿勢基準器よりも上方に設置することができず、図8.3に示すようにそれより低い高さにしか設置できなかった。このためZ座標の計測精度が第8章で述べたNC工作機械を校正基準とした実験の時に比べて劣ってしまい、それに伴い e_3 ベクトルの測定誤差および計測値の標準偏差が大きくなったものと思われる。発信器の構造を工夫し受波器 R_4 を3個組発信器よりも高い位置に設置可能にすれば、φ軸の計測精度はθ軸の計測精度程度まで向上することが予想される。

8.4 動的姿勢計測精度の検証実験

8.4.1 実験方法

受波器および姿勢基準器の位置関係は図8.3に示す静的姿勢の計測実験の場合と同一のものを用いた。姿勢基準器の2軸のうち1軸を固定した状態で残りの1軸を一定速度で回転させ、その回転角度を第3章で述べた方法を用いて自動追尾計測することにより本システムの動的姿勢計測精度を検証した。実験条件は以下の通りである。

- (1) θ 軸計測実験の場合、 $\phi = 0^\circ$ に固定した状態で θ 軸を -60° から 60° まで回転させる。
- (2) ϕ 軸計測実験の場合、 $\theta = 20^\circ$ に固定した状態で ϕ 軸を -10° から 40° まで回転させる。

回転角度は各軸ともに $3^\circ/s$ 、 $6^\circ/s$ の2種類において計測を行った。

実験において発信器の周波数は 90Hz に設定した。第7章で述べたように3個の発信器を順番に放電させた後に1周期分の無音状態を設けるので、結局1個の発信器の放電周波数は $90/(3+1) = 22.5\text{Hz}$ となる。本システムでは1個の発信器が放電した瞬間の残りの2個の発信器の位置座標を時間外挿することで推測計算するので、姿勢ベクトルのサンプリング周波数は 90Hz となる。ただし4周期に1回は無音状態なので姿勢ベクトルはサンプリングされない。

静的実験の場合と同様に θ 軸計測の場合は e_1 ベクトルの変化から、 ϕ 軸計測の場合は e_3 ベクトルの変化から各放電時刻における回転角度を求め、同時刻におけるエンコーダの読み(校正基準)と比較した。

8.4.2 θ 軸計測実験の結果および考察

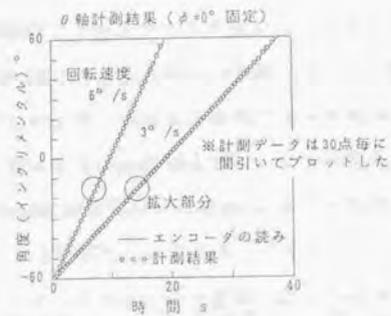
図8.6(a)~(d)に θ 軸の回転角度を自動追尾計測した結果を示す。図(a)は全体図であり、図の見やすさを考慮して計測データは30点ごと之間引いてプロットした。図(b)は回転速度 $3^\circ/s$ の場合のデータを図(a)に○で示す範囲において拡大して表示したものである。図(c)は図(b)に○で示す範囲をさらに拡大して表示したものである。図(d)および図(e)は回転速度 $6^\circ/s$ の場合のデータを同様に拡大して表示したものである。

図(c)および図(e)より、姿勢ベクトルのサンプリングが 90Hz おきに行われ、4周期に1周期無音状態があることが確認できる。

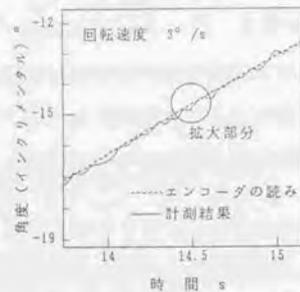
図8.7に測定誤差と回転角度の関係を示す。図(a)は回転速度が $3^\circ/s$ の場合、図(b)は回転速度が $6^\circ/s$ の場合である。図中には比較のため前節で述べた静的姿勢の計測結果を併せて示す。

これらの結果から本システムの動的姿勢の計測精度について以下のようなことが言える。

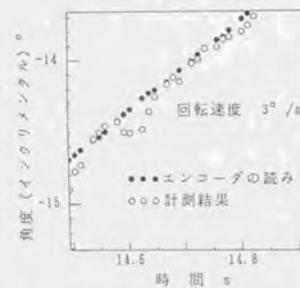
- (1) 本システムの動的姿勢計測誤差は θ 軸が回転軸の場合 0.1° 程度である。
- (2) 姿勢角の計測精度は回転速度が $3^\circ/s$ 、 $6^\circ/s$ の場合とも同程度であり、測定対象物の姿勢変化に本システムの動的姿勢推測計算法が有効に機能していることがわかる。
- (3) 動的姿勢の計測結果は静的姿勢の計測結果とよく一致している。特に静的姿勢の測定誤差が大きい $\theta = -60^\circ$ 、 -45° の付近では動的姿勢の測定誤差もそれに対応して大きくなっている。



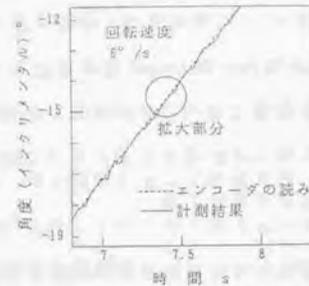
(a) 全体図



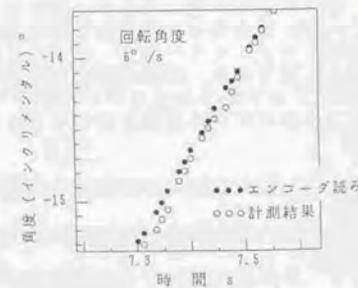
(b) 回転速度 3°/s の拡大図 I (図 (a) の○部を拡大)



(c) 回転速度 3°/s の拡大図 II (図 (b) の○部を拡大)

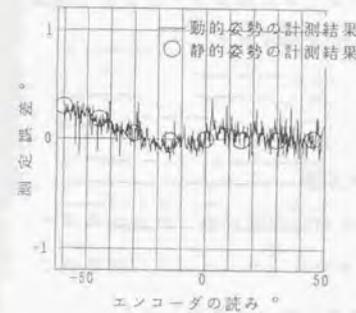


(d) 回転速度 6°/s の拡大図 I (図 (a) の○部を拡大)

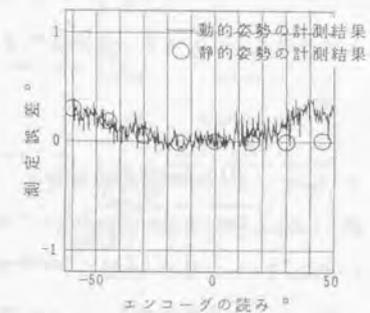


(e) 回転速度 6°/s の拡大図 II (図 (d) の○部を拡大)

図 8.6 θ 軸回転角度の自動追尾計測結果



(a) 回転速度 3°/s の場合



(b) 回転速度 6°/s の場合

図 8.7 測定誤差と回転角度との関係 (θ 軸)

測定誤差の理由としては、

- (1) 音速の補正誤差, 初期座標系の設定誤差等により本計測システムに発信器の位置測定誤差が生じていた。
- (2) 動的姿勢の推測計算においては, 放電していない発信器の位置を直前および 2 回前の放電位置をもとに時間外挿により推定する。このため位置測定誤差が姿勢計測精度に与える影響が静的姿勢計測の場合に比べて大きい。
- (3) 軸の支持部における固体摩擦等の外力によりカップリングがたわみ, 3 個組発信器が回転むらを起こしていた。

等が考えられる。このうち, (1)(2)は本計測システムに起因するものであり, (3)は校正基準となるべき姿勢基準器に起因するものである。本実験の結果からのみでは断定的なことは言えないが, 静的姿勢の測定誤差

と動的姿勢の測定誤差の傾向が精度良く一致していることを考慮すると、カップリングのたわみに起因して校正基準である姿勢基準器自体に位置決め誤差があったと考える方が自然であると思われる。

8.4.3 ϕ 軸計測実験の結果および考察

図8.8(a)~(d)に ϕ 軸の回転角度を自動追尾計測した結果を示す。また図8.9(a)(b)に測定誤差が回転角度によりどのように推移するかを示す。これらの図の見方は θ 軸計測実験の場合と同様である。

これらの結果から本システムの動的姿勢の計測精度について以下のようなことが言える。

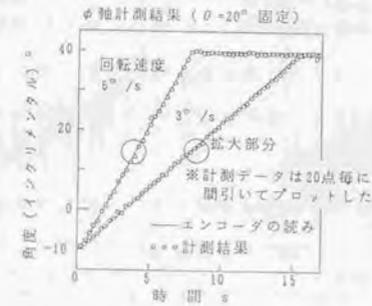
(1) 本システムの動的姿勢計測誤差は ϕ 軸が回転軸の場合 0.5° 程度であり、 θ 軸計測の場合に比べて誤差が大きい。

誤差の傾向としては、計測値がエンコーダの読み値に比べて常に小さめに測定されている。

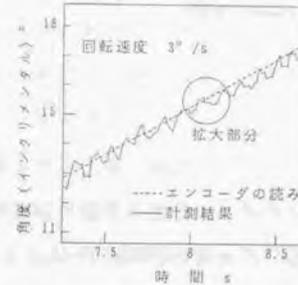
(2) 計測結果は θ 軸計測の場合に比べて振動的に変化している。すなわち計測値の標準偏差が θ 軸計測の場合に比べて大きい。

(3) 姿勢角の計測精度は回転速度が $3^\circ/s$ 、 $6^\circ/s$ の場合とも同程度であり、測定対象物の姿勢変化に本システムの動的姿勢推測計算法が有効に機能していることがわかる。

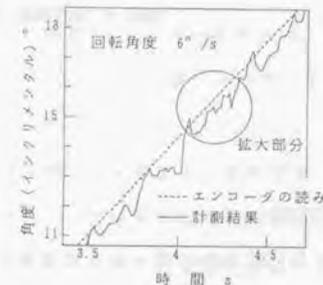
(4) 動的姿勢の計測結果は静的姿勢の計測結果とよく一致している。すなわち測定誤差は ϕ 軸の回転角度が大きくなるのに比例して大きくなる。



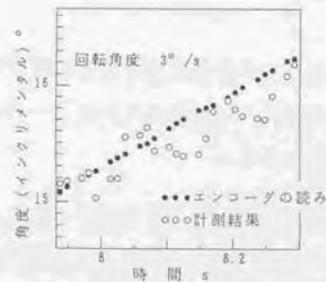
(a) 全体図



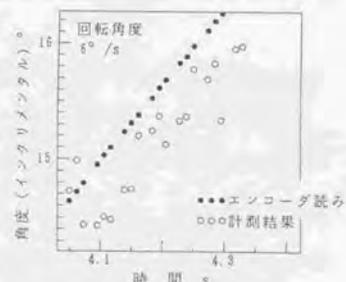
(b) 回転速度 $3^\circ/s$ の拡大図I
(図(a)の○部を拡大)



(d) 回転速度 $6^\circ/s$ の拡大図I
(図(a)の○部を拡大)



(c) 回転速度 $3^\circ/s$ の拡大図II
(図(b)の○部を拡大)



(e) 回転速度 $6^\circ/s$ の拡大図II
(図(d)の○部を拡大)

図8.8 ϕ 軸回転角度の自動追尾計測結果

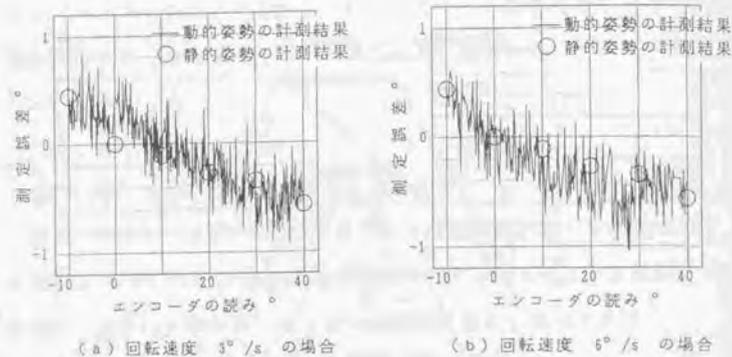


図8.9 測定誤差と回転角度との関係(ϕ 軸)

測定誤差の主な原因は、静的姿勢計測の項で述べた通り重力により姿勢基準器の ϕ 軸においてカップリングがたわみ、3個組発信器の位置決めが正確に行われなかったためと思われる。これは(3)で述べたように動的姿勢の計測結果と静的姿勢の計測結果が精度良く一致することにより裏付けられる。以上のことを考慮すると、

- (1) 本実験においては校正基準となるべき姿勢基準器の側に位置決め誤差があり、本計測システムの姿勢角度の計測精度はエンコーダの読みと比較することによっては検証できない。
- (2) 静的姿勢の計測結果と動的姿勢の計測結果の一致の度合いを考慮すると(図8.9参照)、本システムの静的姿勢測定誤差は ϕ 軸が回転軸の場合 0.2° 程度であると思われる。

等のことと言える。

8.5 本章の概要および結言

本章ではハーモニックドライブ減速機付きDCサーボモータを2軸に配した姿勢基準器(角度分解能 0.01125°)を製作し、これを校正基準として開発した位置・姿勢自動追尾計測システムの姿勢計測精度を検証した。本章の主な結果は以下の通りである。

- (1) 姿勢基準器の2軸のうち1軸を固定した状態で残りの1軸を一定角度ずつ回転させてその回転角度を計測し、これとエンコーダの読み(校正基準)とを比較することにより本システムの静的姿勢計測精度を検証した。

θ 軸計測の場合は $\theta=0^\circ$ の状態からの e_1 ベクトルの変化から、 ϕ 軸計測の場合は $\phi=0^\circ$ の状態からの e_3 ベクトルの変化から回転角度を計算した。

- (2) 本計測システムの静的姿勢計測精度は、カップリングのたわみによる校正基準自体の位置決め誤差を考慮すると、以下の通りである。
 - a) θ 軸計測の場合、測定誤差が 0.05° 程度、計測値の標準偏差が 0.15° 以下である。
 - b) ϕ 軸計測の場合、測定誤差が 0.2° 程度、計測値の標準偏差が 0.5° 以下である。

ϕ 軸の計測精度が θ 軸のそれに比べて劣るのは、実験の都合上4番目の受波器を3個組発信器の上方に設置できず、発信器のZ座標の計測精度が劣化したためである。3個組発信器の構造を工夫し、受波器の設置条件を変更すれば ϕ 軸の計測精度は θ 軸の計測精度程度までに向上することが予想される。

(3) 姿勢基準器の2軸のうち1軸を固定した状態で残りの1軸を一定速度で回転させ、その回転角度を自動追尾計測することにより本システムの動的姿勢計測精度を検証した。

(4) 本計測システムの動的姿勢計測精度は、カップリングのたわみによる校正基準自体の位置決め誤差を考慮すると、 θ 軸計測の場合 0.1° 程度であり、 ϕ 軸計測の場合 0.2° 程度である。

これらの精度は回転速度が $3^\circ/\text{s}$ 、 $6^\circ/\text{s}$ の場合ともに同様であり、測定対象物の姿勢変化に対して本システムの動的姿勢推測計算法が有効に機能していることが確認された。

第 9 章

実際のロボットの 静的位置・姿勢計測

9.1 緒言

本章では開発した3次元位置・姿勢計測システムを用いて実際のロボットの静的位置・姿勢を計測する。測定対象としてはDDロボット、小型6自由度多関節型ロボット（通称PUMA）、大型6自由度多関節型ロボット（通称Panarobo）、小型教育用5自由度多関節型ロボット（通称ムーブマスター）、3自由度スカラ型ロボットを採用した。本章ではこのように構造、大きさ、用途、精度の異なる様々なロボットの静的位置・姿勢を本システムで測定することで、

- (1) 本システムが実際のロボットの精度検証およびキャリブレーションの用途に対してどの程度実用に供するかを検討する。
- (2) 実際のロボットの絶対位置決め精度がどの程度であるか、またロボットの種類によりそれがどの程度異なるかについて検討する。

の2点を目的とする。

なお第2章で述べたように、ロボットの静的な位置を高精度で計測できるシステムはセオドライト方式をはじめとして多数存在するが、ロボットの動的な位置を高精度、非接触、リアルタイムで計測できるシステムは現在数少なく実用段階には至っていない。このような趨勢からもロボットの動的な精度を検証することがいかに困難で、重要な課題であるかが窺い知れる。従って本計測システムがロボットの静的な精度のみならず動的な精度まで検証できることは特筆すべきことであり、本論文ではこのことを強調するために動的な計測実験については別に章を設けて次の第10章において述べることにした。

9.2 DDロボットを用いた本システムの静的位置・姿勢計測精度の検証実験

9.2.1 本実験の意義

DD (Direct Drive) ロボットは構造上各関節に減速機を有しないためその位置決め精度は本質的に高い。本研究では図9.1に示すようなDDロボット⁹⁾を用い、その第1リンクを固定し、第2リンクの先端に円軌道を描かせた。この場合先端の位置繰返し精度はモータ2の回転位置決め分解能に第2リンクの長さに乗じた $\pm 0.06\text{mm}$ であり、本システムの計測精度よりも高い。従って軌道上の数点におけるロボットの先端位置(精度 $\pm 0.06\text{mm}$)と第2リンクの姿勢(精度 $\pm 30\text{arcsec} = \pm 0.008^\circ$)を較正基準とし、それを測定することで本システムの実際のロボットに対する測定能力を検証した。

なおDDロボットを2軸同時に動かした時はリンク長、軸の心ずれ等の機構の寸法誤差により精度はこの場合より劣るので、DDロボットは本システムの較正基準には成り得ず、減速器を用いたロボットと同様に本システムの測定対象に成り得ると考える。

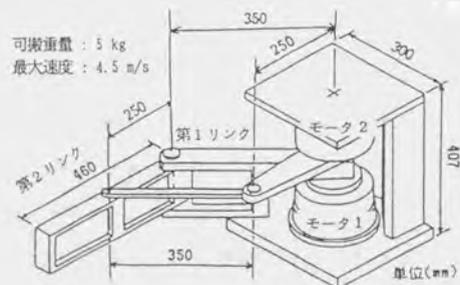
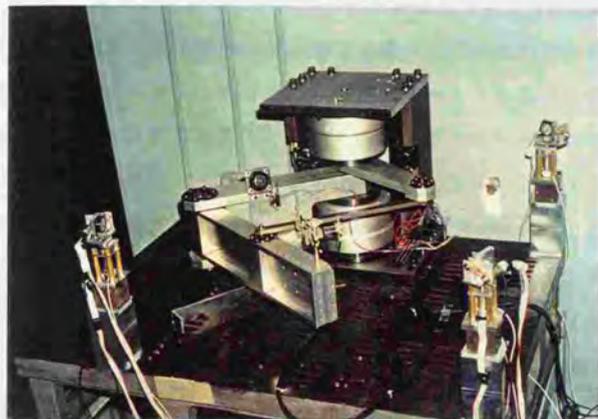


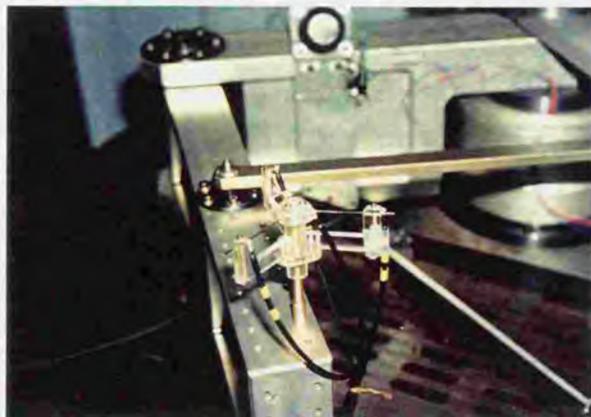
図9.1 DDロボットの外観

9.2.2 位置・姿勢計測結果

図9.2(a)(b)に実験状況を示し、図9.3(a)に実験条件を示す。なおこの実験は研究の初期の段階において行われたため、受波器回転装置、3個組発信器、音速補正センサ等は第4章~6章で述べたものとは



(a) 全体図



(b) 発信器の取付け

図9.2 実験状況

異なっているが、構造、動作原理は基本的には同一である。また受波器回転装置が3台しかなかったために座標計算方法は三点法を用いている。

ロボット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9.1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9.3(a)中の P_i 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9.3(b)および表9.1、表9.2に結果を示す。表9.1中 Z_M および E_z の欄には測定Z座標の平均値 -22.1mm からの偏差を示した。図9.3(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。XY座標の測定誤差は 0.4mm 以下であり、その標準偏差は 0.1mm 以下であった。これに対してZ座標の標準偏差は大きく、最大で 0.5mm に達している。姿勢角測定誤差は 0.4° 以下であり、標準偏差は 0.2° 以下であった。

9.2.3 実験結果の考察

位置計測誤差の要因は、座標計算方法に三点法を用いており、3個の受波器が構成する平面(XY平面)と発信器の移動する平面との距離が実験の都合上 22.1mm と小さくしか設定できなかったためである。このことはZ座標の測定値の標準偏差がXY座標のそれに比べて大きいことから確認できる。冗長な受波器をZ軸上方に設置し、座標計算方法に

図9.3 DDロボットの位置・姿勢計測

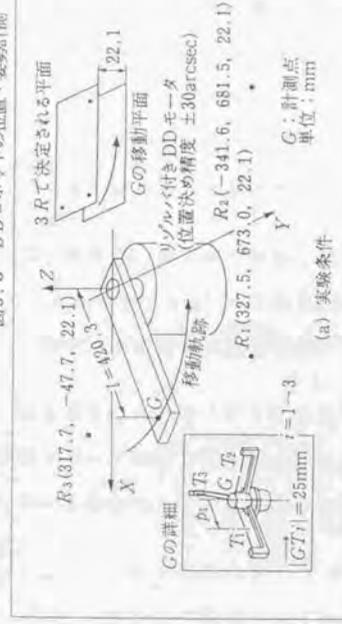


表9.1 位置計測結果

No.	(X, Y, Z) _A (真値)	(X, Y, Z) _M	E_x	σ_x	E_y	σ_y	E_z	σ_z
1	(389.5, 157.7, 0.0)	(389.5, 157.7, -0.2)	座標変換に用いた				-0.2	0.2
2	(356.2, 223.0, 0.0)	(356.2, 223.0, 0.2)	マッチング点				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
4	(258.4, 331.4, 0.0)	(258.5, 331.2, -0.1)		0.1	0.1	-0.2	0.1	-0.1
5	(197.0, 371.2, 0.0)	(197.0, 371.2, 0.0)		0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
6	(129.8, 399.7, 0.0)	(130.1, 400.1, -0.2)		0.3	0.1	0.4	0.1	-0.2

単位: mm

(X, Y, Z)_A: アームの先端座標 (校正基準)
 (X, Y, Z)_M: 計測座標
 E_x, E_y, E_z : 計測座標の誤差の平均値
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: 計測座標の誤差の標準偏差
 Gの位置及びアームの姿勢を各点において100回計測した

表9.2 姿勢計測結果

No.	θ_A (True)	θ_M	E_θ	σ_θ
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°

θ_A : アームの姿勢角 (校正基準)
 θ_M : 計測姿勢角
 E_θ, σ_θ : 計測姿勢角の誤差の平均値および標準偏差

四点法または音速推定法を用いれば位置計測精度は改善されると思われる。

また位置測定結果の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、位置測定精度はさらに改善されると思われる。

姿勢角は3個の発信器の位置計測結果をもとに計算しているので、位置計測精度が改善されれば同様に姿勢計測精度も改善されると思われる。

以上のように座標計算方法として精度の出にくい三点法を用いているにもかかわらず、本システムの位置測定誤差は0.4mm以下、姿勢角測定誤差は 0.4° 以下であり、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十分持つことが確認された。

9.3 小型6自由度多関節型ロボットの位置決め精度評価実験

9.3.1 本実験の意義

本節では代表的な6自由度多関節型ロボットの1つであり、ロボット工学の研究分野において研究装置・研究対象として頻りに採用されているPUMAロボット(通称)を測定対象とし、その静的位置・姿勢を計測する。本実験の目的は以下の2点である。

(1) PUMAロボットの位置繰返し精度はカタログデータで $\pm 0.1\text{mm}$ であり、位置決めの再現性が高い。このためPUMAロボットのアーム先端位置を受波器の配置、気温等の測定条件を変化させて数回測定し、それらの一致の度合いから本システムの静的座標計測精度の再現性を評価することができる。

このようにPUMAロボットの高い位置繰返し精度を校正基準として、本計測システムが実際のロボット計測に対してどの程度利用できるかについて検討する。

(2) 第7章、第8章で検証した本計測システムの計測精度(位置 $\pm 0.2\text{mm}$ 、姿勢 $\pm 0.1^\circ$)を根拠としてPUMAロボットの絶対位置決め精度、姿勢精度を評価する。

第2章で述べたように比較的広い3次元空間内において6自由度多関節型ロボットの絶対位置決め精度、姿勢精度を測定した例は過去の研究において数少なく、その観点からも本節の実験は意義のあるものと考えられる。

9.3.2 PUMAロボットの仕様^{*)}

PUMAロボットとして、川崎重工業(株)製、型式 川崎ユニメート560を用いた。図9.4にPUMAロボットの外観図を示す。図中に外形寸法、動作軸、ロボット座標系を併せて示す。以下本節における動作軸の表記、ロボット座標の表記についてはこの図に準拠するものとする。表9.3にPUMAロボットの基本的な仕様を示す。

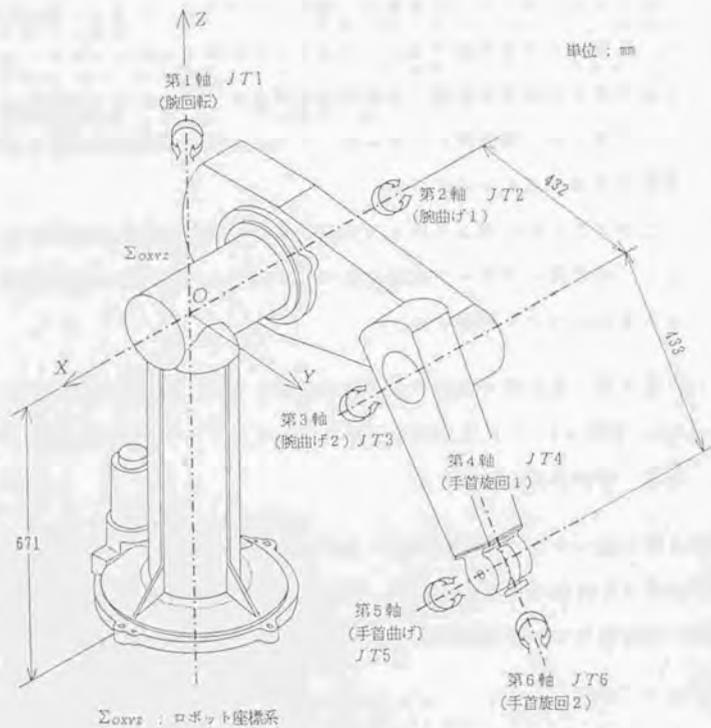


図9.4 PUMAロボットの外観図(回転軸、座標系定義)

表9.3 PUMAロボットの基本仕様

型式	川崎ユニメート560	制御方式	コンピュータ制御電気サーボ
座標系	関節型	制御軸数	完全同時6軸
自由度	6	再現方式	完全直線補間, 各軸補間
可搬重量	2.5kg	教示方式	ティーチングプレイバック方式
最大速度	500mm/s	速度設定	任意時変更可(1~500mm/s)
位置繰返し精度	±0.1mm	設定可能座標系	ジョイント, ワールド, ツールモード
自重	95kg		

9.3.3 ダイアルゲージによる位置繰返し精度の検証

a) 実験目的

表9.3に示した通りカタログデータによるとPUMAロボットの位置繰返し精度は±0.1mmであり、位置決め再現性は非常に良いことがわかる。本節ではこのことを確認するために、ダイアルゲージ(東京計測器製作所製、分解能0.001mm、測定範囲1mm)を用いてロボットの位置繰返し精度を実際に評価する実験を行った。

b) 実験方法

次節の図9.6に示す36個の格子点(これは静的位置計測実験において使用するものである)のうち7番、36番の格子点を採用し、そこにロボットをX, Y, Z方向から11回位置決めし、1回目の位置を基準としてそこからの偏差をダイアルゲージで測定した。実験状況を図9.5に示す。

なお格子点36におけるX座標については、ロボットを各関節が原点をとる位置・姿勢(ready状態と呼ぶ)に一度戻してから位置決めを行わせた場合や、ロボットの電源を切り一定時間放置した後に位置決めを行わせた場合の位置繰返し精度も併せて測定した。これらの実験の途中でダイアルゲージの設置位置が一定に保たれるように細心の注意を払った。



図9.5 ダイアルゲージによる位置繰返し精度検証実験風景

c) 実験結果および考察

実験結果を表9.4に示す。これよりPUMAロボットの位置繰返し精度は同一方向から短時間に数10回の位置決めを行うのであればカタログデータ(±0.1mm)より高い±0.02mm程度の値をとることが判明した。

ロボットをready状態に戻したり、ロボットの電源を切ったり、長時間放置した場合、位置繰返し精度は±0.1mm程度まで劣化するが、それでもカタログデータの値は保証されており、PUMAロボットの位置決め再現性は非常に高いと言える。

表9.4 PUMAロボットの位置繰返し精度

(a) 格子点7における位置繰返し精度

評価座標	X座標(mm)	Y座標(mm)	Z座標(mm)
接近方向	格子点12→7番	格子点8→7番	格子点6→7番
0回目	0.000 (基準)	0.000 (基準)	0.000 (基準)
1	-0.004	0.000	0.001
2	-0.003	0.001	0.000
3	-0.009	0.001	0.001
4	-0.005	0.001	0.006
5	-0.002	0.000	0.001
6	-0.003	0.001	0.000
7	-0.002	0.002	0.001
8	-0.004	0.001	0.002
9	-0.005	0.000	0.006
10	-0.002	0.000	-0.001

(b) 格子点36における位置繰返し精度

評価座標	X座標(mm)	Y座標(mm)	Z座標(mm)
接近方向	格子点19→36番	格子点35→36番	格子点31→36番
0回目	0.000 (基準)	0.000 (基準)	0.000 (基準)
1	0.000	-0.002	0.002
2	0.000	-0.003	0.009
3	0.006	-0.003	0.011
4	0.001	-0.007	0.012
5	0.024	-0.010	0.014
6	0.009	-0.004	0.017
7	0.016	-0.005	0.014
8	0.023	-0.005	0.015
9	0.023	-0.011	0.015
10	0.016	-0.011	0.020
11	0.071	ロボットを各関節角が原点をとる位置・姿勢(ready状態)に一度戻してから位置決めを行った。	
12	0.056	ロボットを各関節角が原点をとる位置・姿勢(ready状態)に一度戻してから位置決めを行った。	
13	0.056	ロボットを各関節角が原点をとる位置・姿勢(ready状態)に一度戻してから位置決めを行った。	
14	0.189	ロボットの電源を切り、24時間放置した後に位置決めを行った。ただしready状態には戻してない。	
15	0.136	ロボットの電源を切り、24時間放置した後に位置決めを行った。ただしready状態には戻してない。	
16	0.142	ロボットの電源を切り、24時間放置した後に位置決めを行った。ただしready状態には戻してない。	
17	0.034	ready状態に戻した後に測定。	
18	0.001	2時間放置後に測定。	
19	0.135	2時間放置後に測定。	
20	-0.103	2時間放置後に測定。	

(注1) 分解能 0.001mm, 測定範囲 1mm のダイヤルゲージを用いて測定した。

(注2) 最初の10回の測定は連続して行った(所要時間10分程度)。

(注3) 格子点36におけるX座標の11~20回目の計測は、表中の右欄に示すような条件で測定を行った。

9.3.4 静的位置計測結果

a) 実験目的

本節ではPUMAロボットに図9.6に示すような36点の格子点への位置決めを行わせ、その位置を本システムで計測することによりロボットの誤差分布を求める。この実験の目的は、

(1) PUMAロボットの位置繰返し精度は前節でダイヤルゲージにより確認した通り $\pm 0.1\text{mm}$ 以下と非常に良い。従ってロボットの誤差分布は何回実験しても同一となるはずである。

そこでロボットの誤差分布を受波器の配置、気温等の条件を変化させて数回測定し、それらの一致の度合いより本システムの静的座標計測精度の再現性を評価する。

(2) 数回の実験から得られた誤差分布の傾向が似ていれば、誤差は本計測システムに起因しておらず、ロボット自身（機構の寸法誤差等）に起因していることになる。

従って誤差分布図の傾向が似ていることを確認した上で、本システムの計測精度（ $\pm 0.2\text{mm}$ 程度）に基づいてPUMAロボットの絶対位置決め精度を評価する。（ただし第7章で述べた計測システムの様々な誤差要因の影響で誤差分布が生じている可能性もあるが、これについては実験結果の考察の項で詳述する。）

の2点である。

b) 実験方法

実験方法は第7章のNC工作機械を用いた静的位置計測実験の際と基本的に同じである。格子点の選択に当たっては、ロボット動作領域内で

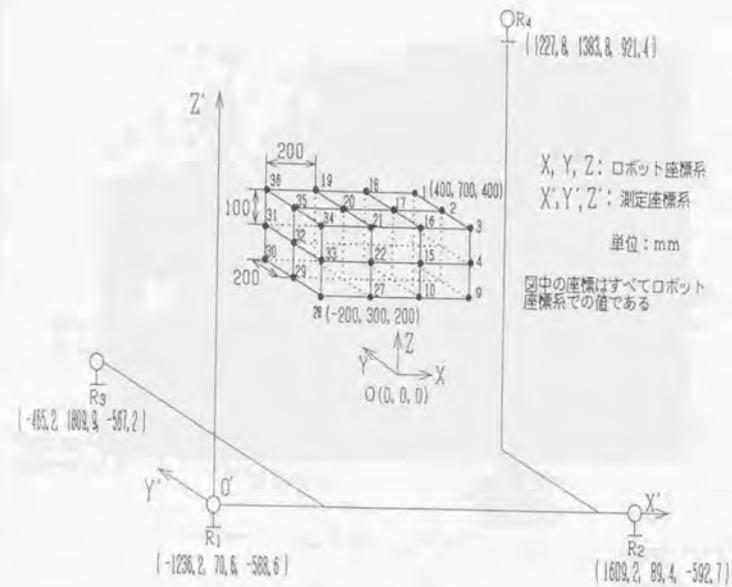


図9.6 PUMAロボットの位置決め点（第3, 4巡目の実験条件）

なるべく格子全体の占める体積が大きくなるように配慮した。発信周波数は30Hzであり、各点において500回の計測を行った。座標計算方法としては音速推定法を用いた。

36点の格子点の位置の測定実験を1セットとして、4セットの実験を行った。以下これらの実験を「1巡目」～「4巡目」と呼ぶ。1セットに要する測定時間は約1時間である。これらの実験における受波器の配置および実験条件は図9.7および表9.5に示す通りである。各配置における実験風景を図9.8(a)および(b)に示す。各受波器が発信器の位置を捉えられなければいけないという拘束条件があったのでドラステックに受波器の配置を変化させることができず、配置IとIIは比較的似通ったものになっている。また3巡目の実験は早朝に行い、意図的に気温の低い状態で行った。

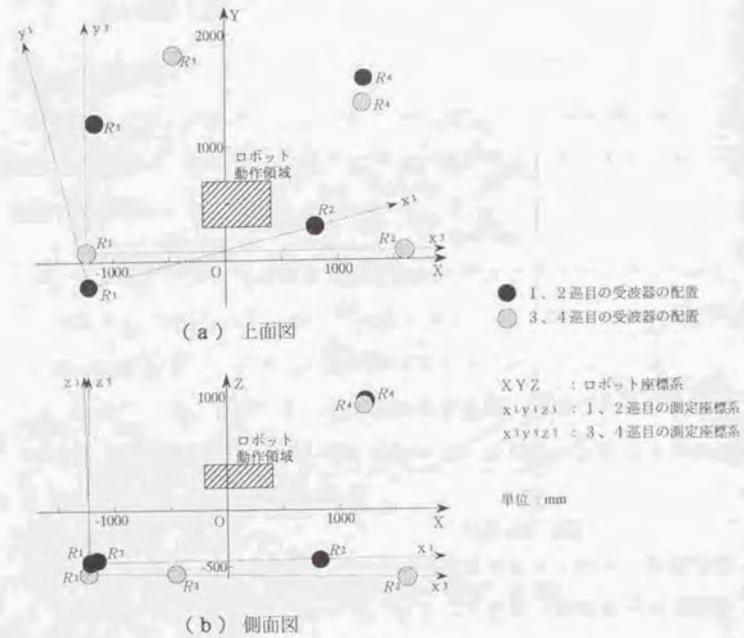


図9.7 PUMAロボット計測における受波器の配置

表9.5 PUMAロボット静的位置計測実験の条件

	受波器の配置	実験時間	気温		湿度	
			開始時	終了時	開始時	終了時
1 巡目	配置 I	(基準)	17.5 °C	19.0 °C	76 %	72 %
2 巡目	配置 I	24時間後	19.0 °C	19.5 °C	71 %	71 %
3 巡目	配置 II	36時間後	12.0 °C	14.0 °C	68 %	68 %
4 巡目	配置 II	72時間後	20.0 °C	20.5 °C	73 %	73 %



1 : 受波器 1 2 : 受波器 2

(a) 配置 I 実験風景



1 : 受波器 1

(b) 配置 II 実験風景

図9.8 PUMAロボットの静的位置計測実験風景

実験は密閉性の高い音響室内で行い、窓、扉等は全て締め、空調、暖房装置等室内の空気を乱す可能性のあるものは一切使用せず、空気の安定化に留意した。また同様の理由によりパーソナルコンピュータ、ロボットコントローラ等の熱源、送風源となり得るものは実験室の隅の方に寄せて配置し、測定空間から極力遠ざけた。

c) 実験結果および座標変換における注意点

図9.9(a)~(d)に実験結果を示す。これらの図の見方は第7章で述べた通りであり、図中○印をつけた測定座標とロボットコントローラが想定する座標(以下「ロボット座標」と呼ぶ)とが最も一致するような座標変換式を求めて、全ての測定座標をこれに従ってロボット座標系での座標に変換した。これとロボット座標との偏差を計算し、図中に示す拡大率で拡大して三角錐の形で表示した。なお図中に36点における偏差の平均値 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 、および36点における測定座標の標準偏差の平均値 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ を併せて示す。また各36点において測定座標とロボット座標との間の距離を計算し、その平均を求めたものを Δ として図中に併せて示す。これらの関係を式で表すと以下のようなになる。

$$\Delta X = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} |x_i - X_i| \quad \Delta Y = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} |y_i - Y_i| \quad \Delta Z = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} |z_i - Z_i|$$

$$\Delta = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \sqrt{(x_i - X_i)^2 + (y_i - Y_i)^2 + (z_i - Z_i)^2}$$

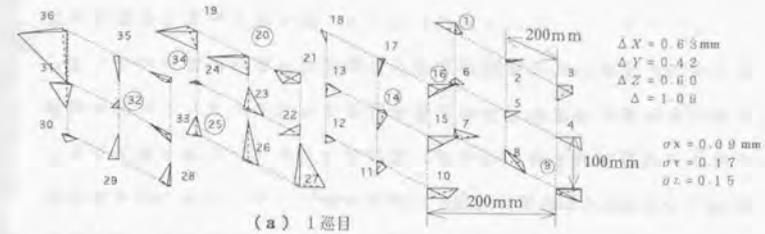
$$\sigma_x = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \sigma_{xi} \quad \sigma_y = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \sigma_{yi} \quad \sigma_z = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \sigma_{zi} \quad (9.1)$$

ただし

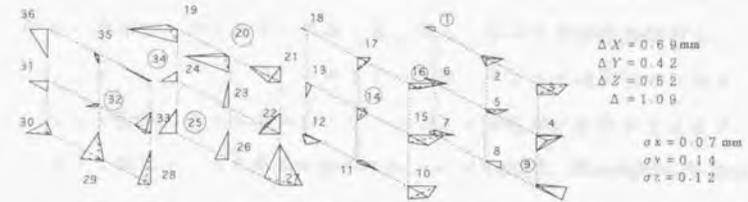
x_i, y_i, z_i : i 番目の格子点における座標変換後の測定座標

X_i, Y_i, Z_i : i 番目の格子点におけるロボット座標

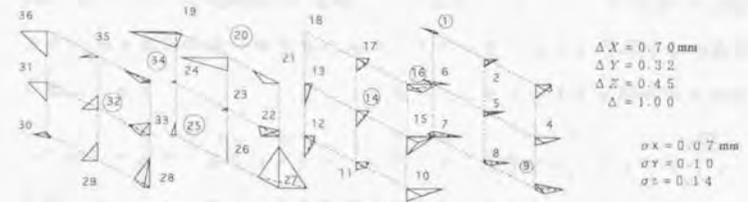
$\sigma_{xi}, \sigma_{yi}, \sigma_{zi}$: i 番目の格子点における測定座標の標準偏差



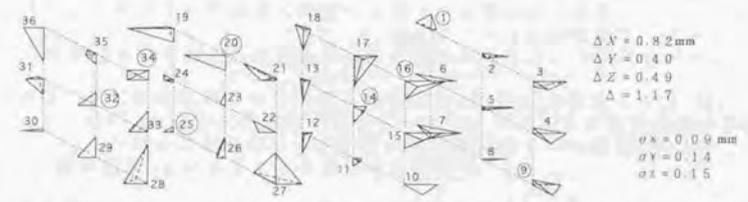
(a) 1 巡目



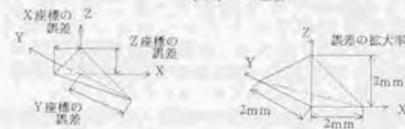
(b) 2 巡目



(c) 3 巡目



(d) 4 巡目



各点において500回計測

○は座標変換式を求め
るのに用いた格子点

図9.9 PUMAロボットの静的位置計測結果

次に座標変換についての注意点を述べる。第7章のNC工作機械を校正基準とした実験の場合発信器が正確に格子点に位置決めされていることが保証されているが、本節の実験の場合PUMAロボットの絶対位置決め精度が保証されていないので、発信器は格子点からある誤差をもって位置決めされている。このように誤差を持って歪んでいる格子を測定した結果をロボットコントローラが想定する理想的な格子に一致させるような座標変換式を求めることは、測定座標系とロボット座標系との間の正確な位置関係を求めることにはつながらない。

このような問題を回避する方法として、座標変換式のみならずロボットのリンク長誤差、関節角オフセット誤差等の機構の寸法誤差までをパラメータとしてそれらを全て推定するキャリブレーション法が種々提案されている²²⁾²⁴⁾。これらの手法は、500~1000点程度の多点への位置決めをロボットに行わせ、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ものであるが、問題点として、

- (1) ロボットの誤差要因となり得るパラメータが膨大であり、採用すべきパラメータを決定するのが困難である。またパラメータの数を増やすほどロボットのモデルが複雑となり、パラメータの推定計算において解が収束しにくくなる。
- (2) 広い3次元空間内における多点の計測データが必要であり、しかもその計測データは高い精度を持っていなければならない。

等が挙げられる。このようにロボットのキャリブレーションは複雑で労が多い作業である。また本研究の目的はキャリブレーションではなく第2章で述べたように上記(2)の問題を解決するための測定手段の開発である。このようなことを考慮して本節においてはパラメータ推定の手法は採らず、先に述べたように単に計測座標とロボット座標が最も一致する

ような座標変換式を求めることにした。

従って座標変換式には変換誤差(座標系回転オイラー角の誤差、座標系平行移動ベクトルの誤差)が含まれており、誤差分布図が各格子点からオフセットをもってある一定の方向に片寄るおそれがある。しかしながら図9.9(a)~(d)をながめると、誤差は各格子点からX, Y, Zの方向に正負まんべんなく分布しているので、座標変換式の誤差は比較的小さかったものと思われる。

d) 考察

図9.9(a)~(d)より4巡の実験における誤差分布の傾向は良く似通っていることがわかる。実際にこれらの類似の度合いがどの程度であるかを調べるために、表9.6に例として各格子点における2巡目と3巡目の測定座標値の偏差を計算した結果を示す。これより2巡目、3巡目は受波器の配置、気温ともに異なった条件下での実験が行われたにもかかわらず、その計測結果の偏差は各座標ともに0.2mm程度と小さな値を示している。

PUMAロボットの位置繰返し精度が $\pm 0.1\text{mm}$ 以下であることを踏まえて、このように受波器の配置や気温等の実験条件を変化させても同様の誤差分布図を得られる理由としては以下のようなことが考えられる。

- 1) ロボット自身に機構の寸法誤差があり、ロボットの絶対位置決め精度が図9.9に示すような誤差分布を持つ。
- 2) 第7章で述べた計測システムの様々な誤差要因の影響で、本システムの計測精度が図9.9に示すような誤差分布を持つ。

しかしながら、図9.9の誤差分布の様子が第7章の図7.10で示したNC工作機械を用いた計測精度の検証実験における誤差分布の様子と

表9.6 2巡目, 3巡目の測定座標値の偏差

格子No.	X座標	Y座標	Z座標
1	-0.1791	0.0432	0.0389
2	0.2136	0.2497	-0.0328
3	0.4601	-0.4006	0.1732
4	0.0119	0.1298	-0.3605
5	0.1545	-0.2113	0.0452
6	-0.1427	0.0469	-0.0147
7	-0.3780	-0.0137	0.0426
8	-0.4348	-0.5024	-0.1861
9	0.1269	-0.6247	-0.0491
10	-0.3093	-0.3465	-0.0412
11	-0.3118	-0.2884	0.1672
12	-0.5472	-0.1355	0.3716
13	-0.3339	-0.0165	0.2520
14	-0.1083	-0.0637	0.1343
15	0.3864	-0.5605	0.4109
16	0.2691	0.1711	-0.0652
17	0.1055	0.0993	0.0740
18	-0.0175	0.1285	-0.0172
19	-0.0128	0.4483	0.1295
20	0.0759	0.2253	-0.0957
21	0.1109	0.1245	0.5427
22	-0.1274	-0.2082	0.6010
23	-0.0445	-0.0005	0.8674
24	-0.2710	-0.0045	0.3279
25	-0.5508	-0.1221	0.4331
26	-0.4413	-0.1219	0.0900
27	-0.2632	-0.0742	0.0693
28	-0.2150	-0.2504	0.2034
29	-0.1808	-0.2327	0.2761
30	-0.3076	-0.1225	0.3270
31	-0.0630	-0.0178	0.2409
32	0.0656	0.2750	-0.3412
33	0.0923	-0.2210	0.2790
34	0.3005	0.0960	-0.0549
35	0.4092	0.1271	-0.4023
36	0.3613	0.0788	-0.0650
平均	0.2329	0.1884	0.2173

単位 mm

- (注1) 2巡目の実験における座標変換後の測定座標から3巡目の実験における座標変換後の測定座標を引き去った偏差を計算した結果である。
 (注2) 平均の欄には各点におけるデータの絶対値を合計し、それを36で除した値を記してある。

異なり、また全格子点における誤差の平均値も図9.9の方が図7.7に比べて大きいことを考慮すると、上記2)の理由の可能性は低いと思われる。一方第7章でNC工作機械を校正基準として検証したように本システムは±0.2mm程度の計測精度を持っており、これを根拠とすれば1)の理由の正当性は高いと思われる。従って図9.9の誤差分布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と考えの方が自然であると思われる。(別のPUMAロボットをもう1台用意し、同様の格子点計測実験を行って同様の精度分布が得られれば2)の可能性も高いと言えるが、このような実験を行うことはコスト・時間の都合上不可能であった。)

本実験の結果判明したことをまとめると以下のようになる。

- (1) 本システムの静的座標計測精度の再現性は±0.2mm程度と非常に高く、この値は第7章で検証した本システムの位置計測精度と矛盾しない。
 (2) PUMAロボットの絶対位置決め精度は位置繰返し精度に比べて劣っており、その値はX×Y×Zが500×400×200mm程度の範囲で
 $\Delta X = \pm 0.7\text{mm}$, $\Delta Y = \pm 0.4\text{mm}$, $\Delta Z = \pm 0.5\text{mm}$ 程度である。

9.3.5 関節角度にオフセットを有するロボットの静的位置計測

結果

a) 実験目的

本節ではPUMAロボットの第3軸(JT3, 図9.4参照)を意図的に $+2^\circ$ ずらして前節と同じ36個の格子点への位置決めを行わせ, その先端位置を本計測システムで計測した. この実験は第3軸の関節に $\pm 2^\circ$ の関節角オフセット誤差があるロボットを計測した場合を想定している.

本実験ではロボットのコントローラの表示位置から得られる誤差分布図を校正基準として, それと本システムの計測結果から得られる誤差分布図との一致の度合いを比較することにより, 本システムのロボットのキャリブレーションへの応用可能性を検討することを目的とする.

b) 実験方法および結果

実験条件は前節の図9.6に示すものと同一である. 実験手順を以下に簡条書きにして示す.

- (1) ワールドモード(ロボットに座標を数値データで与えるモード, コントローラは逆変換により各関節角度を計算する.)の状態で, ロボットを格子点に正しく位置決めさせる.
- (2) ジョイントモード(ロボットに各関節角のデータを与えるモード.)に変更し, ティーチングボックスを用いてコントローラの表示を見ながら第3軸のみを正確に $+2^\circ$ 動かす. この際他の軸は決して動かさないように細心の注意を払った.
- (3) コントローラのモニタ機能を用いて第3軸がずれた状態でのアーム先端の座標を読みとる. これはコントローラが想定するロボット

の幾何学的モデルに基づいた座標である.

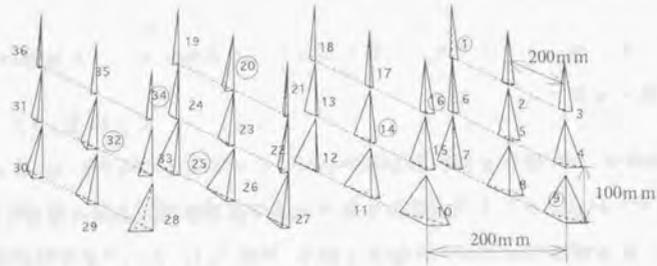
- (4) 本計測システムを用いて第3軸がずれた状態でのアーム先端の座標を測定する.

以上(1)~(4)の動作を各36個の格子点において繰返し行った. (3)のコントローラから読みとった座標値と正しい格子点の座標との間の偏差を計算し, 誤差分布図を作成した結果を図9.10(a)に示す. また(4)で本システムを用いて求めた測定座標と正しい格子点の座標との間の偏差を計算し, 誤差分布図を作成した結果を図9.10(b)に示す.

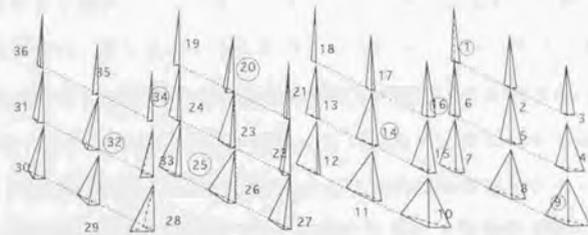
c) 考察

図9.10(a)と(b)を見比べると, 誤差の分布の傾向は良く一致していることがわかる. これより本システムは第3軸の関節角オフセットを持ったロボットの位置決め誤差の分布を正確に測定できていると言える. このことは, 関節角度のオフセット誤差, リンク長誤差等を推定するロボットのキャリブレーションに本システムが利用できる可能性を持つことを示唆している.

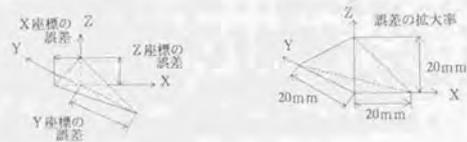
ただし本実験ではロボットのコントローラの表示が正しいものと仮定して図9.10(a)を校正基準としたが, これには前節で述べたように $\pm 0.7\text{mm}$ 程度のロボットの絶対位置決め誤差が含まれている. 従ってこのような誤差分布図の比較では本システムの計測能力の定量的な評価はできないことを付言しておく.



(a) ロボットコントローラのデータから求めた誤差分布



(b) 本システムの計測結果から求めた誤差分布



各点において500回計測

○は座標変換式を求め
るのに用いた格子点

図9.10 第3軸に関節角オフセットを持つロボットの位置計測結果

d) パラメータを特定したキャリブレーション

ここでは本システムがロボットのキャリブレーションに応用可能であるかを検討するため、ロボットの誤差パラメータを第3軸の関節角オフセットに特定して簡単なキャリブレーションを行ってみる。

まずロボットの幾何学的モデルとして以下のようなものを考える。

$$P^0 = D_1(\theta_1)D_2(\theta_2)D_3(\theta_3)D_4(\theta_4)D_5(\theta_5)D_6(\theta_6)P^6 \quad (9.2)$$

ここで $P^0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ はロボット座標系 Σ_0 におけるワーク先端の位置座標であり、 $P^6 = (X_6, Y_6, Z_6)$ はワーク座標系 Σ_6 におけるワーク先端の位置座標である。また $D_1 \sim D_6$ はロボットの幾何学モデルに基づいた座標変換行列であり、 $\theta_1 \sim \theta_6$ は各関節の回転角度である。本実験の場合ワーク座標系の原点はロボットのフランジ中心であり、ワーク先端は発信器に相当している。これらの位置関係を図9.11に示す。今第3軸の関節角に α のオフセット誤差があると仮定し、 i 番目の格

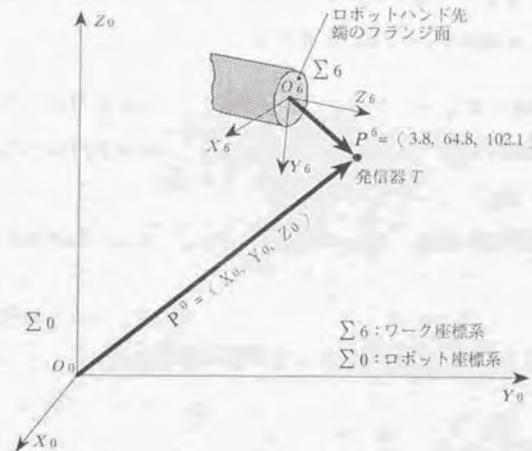


図9.11 ワーク座標系における発信器の位置

子点においてずれて位置決めされた発信器の位置座標（ロボット座標系表示）を $P_i^0 = (X_i^0, Y_i^0, Z_i^0)$ と表記することにする。この時式(9.2)は以下のようなになる。

$$P_i^0 = D_1(\theta_{1i})D_2(\theta_{2i})D_3(\theta_{3i} + \alpha)D_4(\theta_{4i})D_5(\theta_{5i})D_6(\theta_{6i})P^0 \quad (i=1 \sim 36) \quad (9.3)$$

ただし $\theta_{1i} \sim \theta_{6i}$ は第3軸の関節角にオフセット誤差が無い状態で第*i*番目の格子点にロボットを位置決めする際の関節角度であり、これらは格子点の位置座標と式(9.2)から逆変換計算を用いて求められる既知の値である。従って P_i^0 は α のみの関数となり以下のように表すことにする。

$$P_i^0(\alpha) = (X_i^0(\alpha), Y_i^0(\alpha), Z_i^0(\alpha)) \quad (i=1 \sim 36) \quad (9.4)$$

なお本節の実験においてはロボットコントローラの表示から $\theta_{1i} \sim \theta_{6i}$ の値を求めた。

次に*i*番目の格子点における本システムで計測した発信器の位置座標（ロボット座標系での値に変換済みのもの）を $P_{iM} = (X_{iM}, Y_{iM}, Z_{iM})$ として、以下の残差 $r_1 \sim r_{108}$ を考える。

$$\begin{aligned} r_1 &= X_1^0(\alpha) - X_{1M} & r_2 &= Y_1^0(\alpha) - Y_{1M} & r_3 &= Z_1^0(\alpha) - Z_{1M} \\ r_4 &= X_2^0(\alpha) - X_{2M} & r_5 &= Y_2^0(\alpha) - Y_{2M} & r_6 &= Z_2^0(\alpha) - Z_{2M} \\ & \dots & & \dots & & \dots \\ r_{106} &= X_{36}^0(\alpha) - X_{36M} & r_{107} &= Y_{36}^0(\alpha) - Y_{36M} & r_{108} &= Z_{36}^0(\alpha) - Z_{36M} \end{aligned} \quad (9.5)$$

これらの残差を用いて評価関数として残差二乗和

$$\eta(\alpha) = \sum_{j=1}^{108} r_j^2 \quad (9.6)$$

を考え、これを最小にするような α を最小二乗法により求める。最小二乗法の計算方法は第7章で述べたものと同様である。

以上の計算を行った結果 $\alpha = 2.08^\circ$ と推定された。実際の第3軸の関節角度オフセットは 2° であり、極めて高い精度でパラメータ推定が行えたことになる。推定誤差の要因としては、パラメータを1個に特定して推定したためであり、他の機構の寸法誤差まで考慮してキャリブレーションを行えば推定精度はさらに向上するものと思われる。以上の実験結果およびキャリブレーションの結果を総合的に考慮すると、本計測システムは6自由度多関節型ロボットのキャリブレーションに十分対応できる可能性を持つと言える。

9.3.6 静的姿勢計測結果

a) 実験目的

本節ではPUMAロボットの静的姿勢を本研究で開発したシステムで計測する。本実験の目的は以下の通りである。

- (1) 本システムの実際のロボットの姿勢計測に対する応用可能性を検証する。
- (2) 本システムの姿勢計測精度 ($\pm 0.1^\circ$) を校正基準として、PUMAロボットの姿勢精度を検証する。

ただし本実験においてはPUMAロボット、本計測システム以外に校正基準となるべき第3の測定手段(9.3.3節の実験におけるダイヤルゲージに相当するもの)を用いることができなかったため、被測定物であるロボットの側に姿勢誤差があるのか、測定手段である本システムの側に測定誤差があるのかが明確に特定できないことを付言しておく。

b) 実験方法および結果

図9.12に示すようにロボットの手先に3個組発信器を取り付け、図9.13に示すように第4, 5, 6軸のうち1軸を他の軸を固定した状態で一定角度ずつ回転させ、その回転角度を本システムで計測した。受波器の配置等の実験条件は前節の負荷重量をロボットに加えた場合の実験と同一である。発信器の放電周波数は30Hzに設定し、各回転角度において500回ずつ計測を行った。以下各軸の実験方法および結果について具体的に述べる。



図9.12 静的姿勢計測実験風景

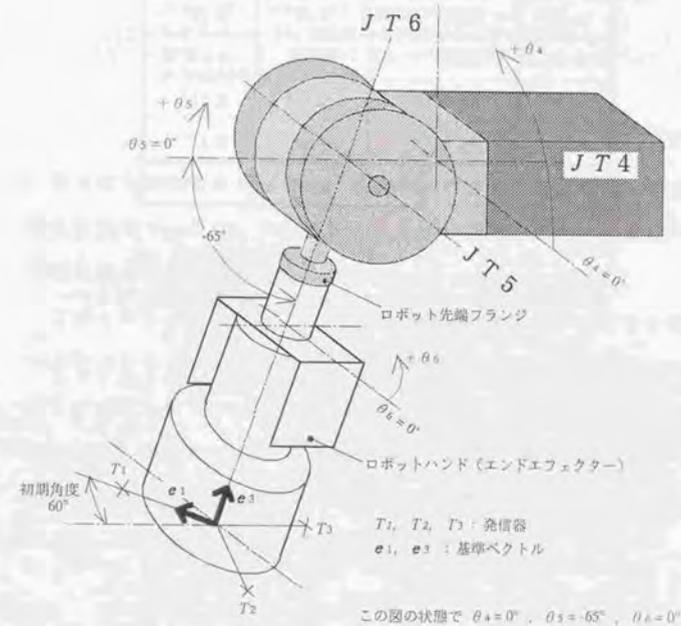


図9.13 静的姿勢実験条件

(1) 第6軸の回転角度の測定に際しては $\theta_6 = 0^\circ$ の場合を基準として、それよりの e_1 ベクトルの変化より回転角度を計算し、ロボットコントローラの指令回転角度と比較した。表9.7に結果を示す。

表9.7 静的姿勢の計測結果 (第6軸)

ロボット指令角度 (A)	e_1 ベクトルの増分より求めた計測角度 (B)	偏差 (B-A)	計測角度の標準偏差
-60.00°	-60.16°	-0.16°	0.10°
-45.00°	-45.14°	-0.14°	0.09°
-30.00°	-30.15°	-0.15°	0.08°
-15.00°	-15.07°	-0.07°	0.10°
0.00°	(基準)	—	—
15.00°	15.08°	0.08°	0.11°
30.00°	30.07°	0.07°	0.13°
45.00°	45.06°	0.06°	0.11°
60.00°	59.99°	-0.01°	0.11°
平均		0.09°	0.10°

(注1) ロボットの他の軸は $\theta_1 = -90^\circ$, $\theta_2 = -90^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$, $\theta_4 = 0^\circ$, $\theta_5 = -65^\circ$ に固定して計測を行った。
 (注2) 各点において500回計測。Bの値はその平均値である。
 (注3) 偏差(A-B)の平均の欄には、各回転角度におけるデータの絶対値の平均を記した。

(2) 第5軸の回転角度の測定に際しては $\theta_5 = -65^\circ$ の場合を基準として、それよりの e_3 ベクトルの変化により回転角度を計算し、ロボットコントローラの指令回転角度と比較した。表9.8に結果を示す。

表9.8 静的姿勢の計測結果 (第5軸)

ロボット指令角度 (A)	e_3 ベクトルの増分より求めた計測角度 (B)	偏差 (B-A)	計測角度の標準偏差
-65.00°	(基準)	—	—
-60.00°	-59.98°	0.02°	0.34°
-55.00°	-55.07°	-0.07°	0.31°
-50.00°	-50.00°	0.00°	0.35°
-45.00°	-44.98°	0.02°	0.30°
-40.00°	-39.96°	0.04°	0.38°
-35.00°	-34.85°	0.15°	0.41°
平均		0.05°	0.35°

(注1) ロボットの他の軸は $\theta_1 = -90^\circ$, $\theta_2 = -90^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$, $\theta_4 = 0^\circ$, $\theta_5 = 20^\circ$ に固定して計測を行った。
 (注2) 各点において500回計測。Bの値はその平均値である。
 (注3) 偏差(A-B)の平均の欄には、各回転角度におけるデータの絶対値の平均を記した。

(3) 第4軸を回転させた場合は、 $e_1 \sim e_3$ のいずれも回転軸と垂直をなさないで、第5、6軸の場合のように計測ベクトルの変化から回転角度を測定することはできない。

このためロボットコントローラが表示するオイラー角からロボット先端のフランジ面の法線ベクトルを計算し、これと本システムにより計測された e_3 ベクトルとを比較することにした。表9.9に結果を示す。表中の e_3 ベクトルは、測定座標系での計測ベクトルを36点への格子点への位置決め実験結果から求めた座標変換式に従ってロボット座標系での値に変換したものである。

表9.9 静的姿勢の計測結果(第4軸)

ロボット 指令角度	ロボットコントローラの読み から求めたアーム先端フラン ジ面の法線ベクトル(A)	本システムにより計測された e_3 ベクトル (B)	AとBのな す角度 (C)	Cの標準 偏差
-15.00°	(-0.229, -0.469, 0.853)	(-0.228, -0.471, 0.852)	0.271°	0.176°
-10.00°	(-0.153, -0.469, 0.870)	(-0.155, -0.470, 0.869)	0.253°	0.167°
-5.00°	(-0.077, -0.469, 0.880)	(-0.079, -0.468, 0.880)	0.281°	0.191°
0.00°	(0.000, -0.469, 0.883)	(-0.001, -0.468, 0.884)	0.354°	0.289°
5.00°	(0.077, -0.469, 0.880)	(0.075, -0.469, 0.880)	0.287°	0.192°
10.00°	(0.153, -0.469, 0.870)	(0.151, -0.470, 0.870)	0.311°	0.252°
15.00°	(0.229, -0.469, 0.853)	(0.226, -0.468, 0.855)	0.309°	0.184°
		平均	0.295°	0.209°

- (注1) ロボットの他の軸は $\theta_1 = -90^\circ$, $\theta_2 = -90^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$, $\theta_5 = -62^\circ$, $\theta_6 = 25^\circ$ に固定して計測を行った。
 (注2) 各点において500回計測。B, Cの値はその平均値である。
 (注3) フランジ面の法線ベクトル(A)は長さが1になるように正規化してある。
 (注4) AとBのなす角度は絶対値であり符号を持たない。平均の欄にはこれらの平均値を記した。

c) 考察

表9.7~9.9より以下のようなことがわかる。

- (1) ロボットの指令回転角度と本システムで計測した回転角度は第6軸において0.09°, 第5軸において0.05°程度の誤差で一致する。本システムの姿勢角計測精度が±0.1°であることを考慮すると、これらの誤差はPUMAロボットの関節角度位置決め誤差に起因しているのか本システムの計測誤差に起因しているのかは特定できない。しかしながらPUMAロボットが少なくとも±0.1°以内の高い関節角度位置決め精度を持っていることが判明した。

- (2) 第6軸の計測角度の標準偏差の平均値が0.10°であるのに対して、第5軸のそれは0.35°とばらつきが大きい。これは第5軸の回転角度の計測にZ座標の計測精度が必要とされる e_3 ベクトルを用いているが、受波器が3個の発信器の全てを捉えることができるという条件を満たすために受波器4の設置位置を低く設定せざるを得ず、Z座標の計測精度が悪かったためと思われる。

- (3) 第4軸の実験において、ロボットコントローラの読みから求めたフランジ面の法線ベクトルと本システムにより計測された e_3 ベクトルは0.3°程度の偏差を持っている。この値は第5, 6軸の計測の際の偏差が0.1°以内であるのに比べてやや大きい。

第5, 6軸の計測結果が良好であったことを考慮すると、第4軸の計測で偏差が大きかった理由は本システムの計測誤差によるものではなく、3個組発信器のロボットへの取り付けがうまくいっておらず、フランジ面の法線ベクトルと発信器の e_3 ベクトルがあらかじめ0.3°程度ずれていたためと思われる。

以上の実験結果より本計測システムが実際のロボットの姿勢計測に十分応用可能であること、PUMAロボットの各関節角の位置決め精度が±0.1°以内と非常に高いことが判明した。

PUMAロボットは減速機としてバックラッシを有する平歯車、かさ歯車を用いているものの、歯車の軸間距離を変化させることによりバックラッシを調整できる構造をとっており¹¹⁾、出荷前には入念な調整がメーカーにより行われている。このため各関節の位置決め精度が高いものと思われる。

9.3.7 本節の総合的考察

本9.3節においてはPUMAロボットを測定対象とし、その静的位置、静的姿勢を本システムにより計測した。またこれらの計測実験においてロボット、本計測システム以外の第3の校正基準としてダイヤルゲージを適用し、本システムによる計測データの信頼性を保証した。これらのデータを総合的に考慮すると、本システムの実際のロボットに対する計測能力について以下のようなことが言える。

- (1) 本システムは $\pm 0.2\text{mm}$ 程度の高い静的位置計測精度を持ち、実際のロボットの絶対位置決め精度の検証、キャリブレーション等に十分応用可能である。
- (2) 本システムはロボットの関節角度の回転精度の検証や姿勢精度の検証に十分応用可能である。

また本システムの計測精度を校正基準としてPUMAロボットの位置決め精度について以下のようなことが言える。

- (3) PUMAロボットは $\pm 0.1\text{mm}$ 以下の高い位置繰返し精度を持つが、絶対位置決め精度はそれに比べて劣り、その値は $\Delta X = \pm 0.7\text{mm}$, $\Delta Y = \pm 0.4\text{mm}$, $\Delta Z = \pm 0.5\text{mm}$ 程度である。
- (4) PUMAロボットの姿勢を司る第4, 5, 6軸は、 $\pm 0.1^\circ$ 以下の高い回転角度位置決め精度を持つ。これはPUMAロボットが歯車のバックラッシを調整できる構造をとっているためと思われる。

9.4 大型6自由度多関節型ロボットの位置決め精度評価実験

9.4.1 本実験の意義

前節で取り扱ったPUMAロボットは比較的小型で組立等の高い精度が要求される用途を想定している。このためロボットの製作・組立誤差等が少なく、絶対位置決め精度は $\pm 0.7\text{mm}$ 程度と比較的高いものと思われる。これに対してPUMAロボットより大型で、溶接・塗装等の要求精度が比較的低い用途に用いられるロボットの絶対位置決め精度は、PUMAロボットのそれよりも劣ることが予想される。

本節では実際に溶接用の大型6自由度多関節型ロボット(通称Pana Robo)の絶対位置決め精度を本研究で開発した計測システムを用いて評価することを目的とする。

9.4.2 Pana Roboの仕様^{9.2)}

Pana Roboとしては、松下電器産業(株)製、型式AW-8060を用いた。図9.14にPana Roboの外観図を示す。図中に外形寸法、ロボット座標系を併せて示す。表9.10にPana Roboの基本的な仕様を示す。

これらのデータを前節の図9.4、表9.3に示したPUMAロボットの仕様と比べると、Pana RoboはPUMAロボットと比べて動作領域が広く(XY方向の最大到達距離2.4倍、Z方向の最大到達距離1.8倍)、可搬重量が大きい(24倍)という長所を持つ一方で、自重が大きく(13倍)、位置繰返し精度が低い(1/2倍)という短所を持ちあわせていることがわかる。

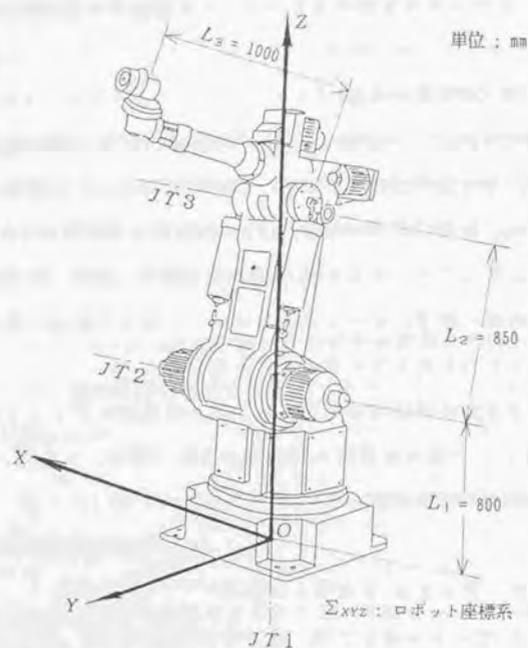


図9.14 Pana Roboの外観図

表9.10 Pana Roboの基本仕様

型式	AW-8060 YA-8061AM	制御方式	コンピュータ制御電気サーボ
座標系	関節型	制御軸数	完全同時6軸
自由度	6	再現方式	直線補間, 円弧補間, 各軸補間
可搬重量	60kg	教示方式	ティーチングプレイバック方式
最大速度	999mm/s	速度設定	任意時変更可 (1~999mm/s)
位置繰返し精度	±0.2mm	設定可能座標系	ジョイント, ワールド, ツールモード
自重	1300kg		

9.4.3 静的位置計測結果

図9.15に実験風景を示す。図9.16に示すような36点の格子点にPana Robo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。格子点の選択に当たっては、ロボット動作領域内であるべく格子全体の占める体積が大きくなるように配慮した。発信器の放電周波数は30Hzに設定し、各格子点において1000回の計測を行った。座標計算方法としては音速推定法を用いた。

Pana Roboは溶接用ロボットであるためマニュアルティーチングによりのみ使用されることをメーカーは想定しており、コントローラは逆変換機能を有していない。従って本実験においてはカタログの寸法仕様に基づいてロボットの幾何学的モデルを構築し、ロボット手先の目標座標を実現するような各関節の回転角度を数値解法により求め、この値をコントローラに与えた。

実験結果を図9.17に示す。この図の見方は先に述べたPUMAロボットの計測結果と同じである。



図9.15 Pana Roboの静的位置計測実験風景

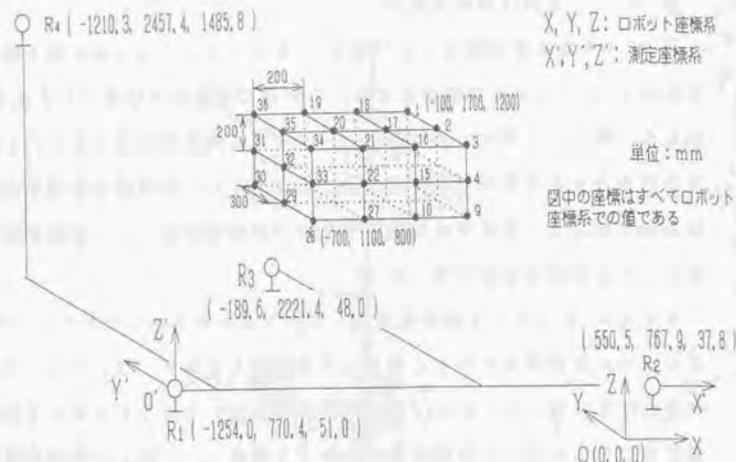


図9.16 Pana Roboの静的位置計測実験条件

各格子点において1000回計測。
○：座標変換式を求めるのに
用いた格子点



図9.17 Pana Roboの静的位置計測結果

9.4.4 実験結果の考察

図9.17よりPana Roboの絶対位置決め精度は $X \times Y \times Z$ が $600 \times 600 \times 400$ mm程度の範囲で $\Delta X = \pm 0.9$ mm, $\Delta Y = \pm 1.5$ mm, $\Delta Z = \pm 0.7$ mm程度である。

比較のためPUMAロボットの絶対位置決め精度を再記すると, $X \times Y \times Z$ が $600 \times 400 \times 200$ mm程度の範囲で $\Delta X = \pm 0.7$ mm, $\Delta Y = \pm 0.4$ mm, $\Delta Z = \pm 0.5$ mm程度である。

このようにPana Roboの絶対位置決め精度がPUMAロボットのものに比べて劣る理由として以下のようなことが推測される。

(1) PUMAロボットが組立等の高い精度が要求される用途を想定して製作されているのに対して、Pana Roboは溶接等の要求精度が比較的低い用途を想定して製作されている。このためメーカーにおけるPana Roboの製作精度の公差、出荷時の検査の基準等はPUMAロボットのそれらに比べて低く設定されているものと思われる。このためPana Roboは機構の寸法誤差が大きく、絶対位置決め精度も低い値を示していると思われる。

(2) Pana RoboはPUMAロボットに比べて大型で動作領域も大きい。一般にロボットの動作領域が大きくなれば、各関節の角度誤差は大きな感度で手先の位置決め誤差に変換される。またロボットが大型になるほどリンク長、リンクの自重も大きくなり、たわみの影響も無視できなくなる。このような理由からPana Roboの絶対位置決め精度が劣っているものと思われる。

また図9.17の誤差分布をながめると、X座標が同一の4つの平面($X = -100$, $X = -300$, $X = -500$, $X = -700$)を考えた場合それらに含まれる9個の格子点での誤差の分布の様子は各平面間において比較的似通っ

ている。このことよりPana Roboの機構の寸法誤差に関して以下のようなことが予想される。

- i) 手先のX座標の変化を主に司る第1軸(図9.14のJT1)の位置決めが正確に行われている。
- ii) 手先のY,Z座標の変化を主に司る第2軸(図9.14のJT2)、第3軸(同JT3)に角度原点のオフセット等に起因する位置決め誤差がある可能性がある。
- iii) 手先のY,Z座標の位置決め精度に大きな影響を与える第2リンク(図9.14のL2)、第3リンク(同L3)のリンク長に誤差がある可能性がある。

ただしこれらの誤差パラメータを正確に推定するキャリブレーション作業は複雑で労力のかかるものであるので、ここでは単に誤差分布図からロボットの誤差要因を定性的に示唆するにとどめることにする。

本節の実験によりPana Roboの絶対位置決め精度が $\pm 1.5\text{mm}$ 程度とかなり悪いことが明らかになったが、そもそもPana Roboは絶対位置決め精度に基づいたオフラインティーチングを想定して製作されているわけではなく、このことはコントローラに逆変換機能が無いことから明らかである。従って本実験の結果は決してメーカーを誹謗するものではなく、溶接、塗装等に用いられる大型の多関節型ロボットの絶対位置決め精度がカタログに記載されている位置繰返し精度に比べていかに低いものであるかを警鐘するものであると言える。

9.5 小型教育用5自由度多関節型ロボットの位置決め精度評価実験

9.5.1 本実験の意義

本節では主にロボット工学の研究・教育の用途を目的として大学、高校等の教育機関に多数導入され、ムーブマスターの通称で親しまれている5自由度多関節型ロボットの絶対位置決め精度を評価することを目的とする。

本実験で用いたムーブマスターは型式が古く、メーカーも教育用に用途を絞っているため、その絶対位置決め精度は低いものと予想される。ただし現在のムーブマスターは様々な改良を加えられ、コントローラもオフラインプログラミングに対応すべく逆変換機能を装備しており、実際に組立等の精度の要求される作業に用いられていることを付言しておく。

9.5.2 ムーブマスターの仕様⁹⁾⁾

本実験においては精度評価対象ロボットとして、三菱電機(株)製、型式ムーブマスターII MELFA RM-501を用いた。図9.18にムーブマスターの外観図を示す。図中に外形寸法、ロボット座標系を併せて示す。表9.11にムーブマスターの基本的な仕様を示す。

これらのデータを9.3.2節の図9.4、表9.3に示したPUMAロボットの仕様と比べると、ムーブマスターはPUMAロボットに比べて動作領域が狭く(XYZ各方向の最大到達距離とも0.5倍)、可搬重量が小さく(0.5倍)、位置繰返し精度が低い(1/5倍)という短所を持っていることがわかる。

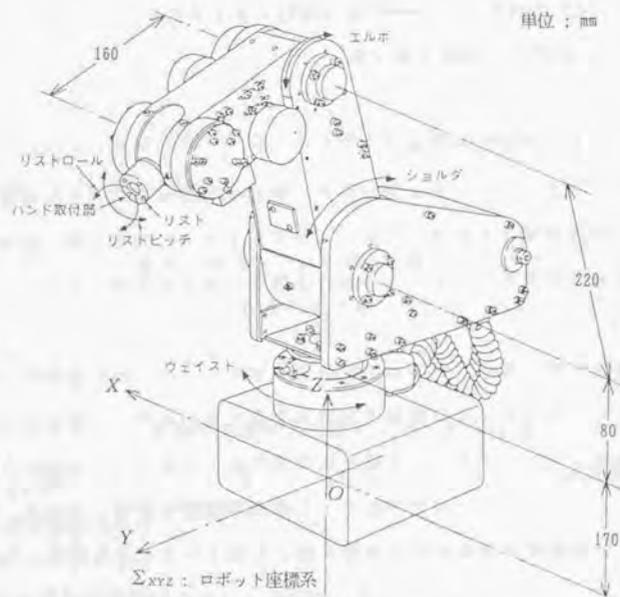


図9.18 ムーブマスターの外観図

表9.11 ムーブマスターの基本仕様

型式	MELFA RM-501形	自重	約27kg
座標系	関節型	制御方式	コンピュータ制御電気サーボ
自由度	5	制御軸数	完全同時5軸
可搬重量	1.2kg	再現方式	各軸補間
最大速度	400mm/s	教示方式	ティーチングプレイバック方式
位置繰返し精度	±0.5mm	設定可能座標系	ジョイントモード

9.5.3 静的位置計測結果

図9.19に示すような36点の格子点にムーブマスターを位置決めさせ、その静的位置を本計測システムで計測した。

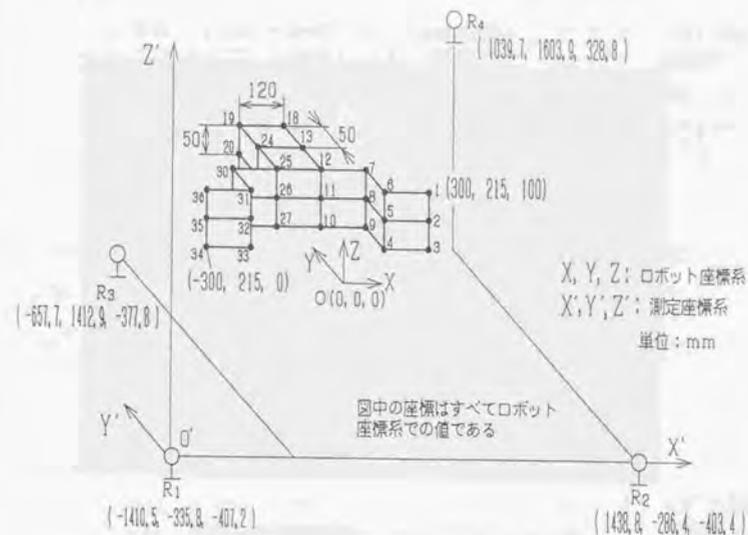


図9.19 ムーブマスターの静的位置計測実験条件

ムーブマスターの動作領域はかなり狭く、その中で直方体の格子点を設定しようとするとも体積が小さくなり、格子間隔がPUMAの実験の場合に比べて1/3程度になってしまう。ロボットの位置決め精度は一般に動作領域が大きくなるほど劣化するので、このような小さい領域で絶対位置決め精度を測定することはムーブマスターの精度を過当に良く評価することにつながりかねない。そこで本実験においてはロボットの動作領域が球面状をしていることを考慮して、その領域内で格子点ができるべく広く分布するように配慮したため、図9.19に示すような変則的な格子点を採用することになった。

発信器の放電周波数は50Hzに設定し、各格子点において500回の計測を行った。座標計算方法としては音速推定法を用いた。図9.20に実験風景を示す。

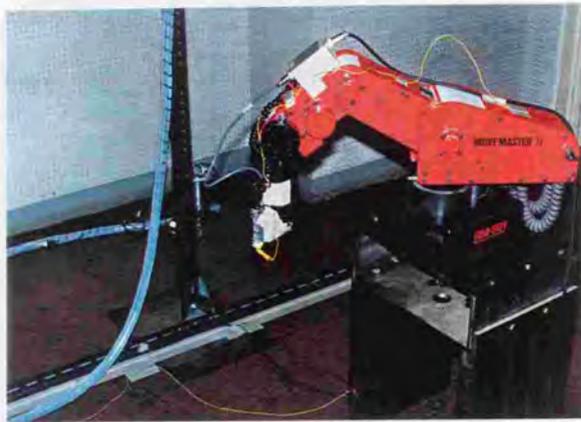


図9.20 ムーブマスターの静的位置計測実験風景

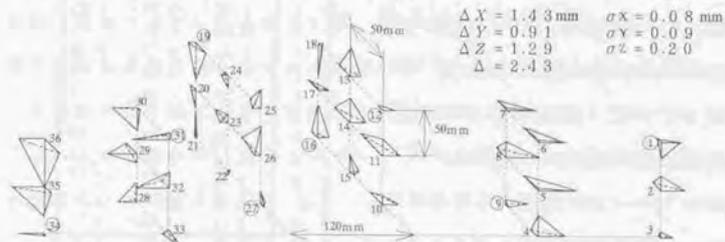
ムーブマスターの型式が古いいためコントローラは逆変換機能を有していない。従って本実験においてはカタログの寸法仕様に基づいてロボットの幾何学的モデルを構築し、ロボット手先の目標座標を実現するような各関節の回転角度を解析的に求め、この値をコントローラに与えた。

実験結果を図9.21(a)(b)に示す。図(a)は格子点1~36まで番号順に位置決めした場合(以下「番号順位置決め」と呼ぶ)の計測結果であり、図(b)は格子点36~1まで番号が減少する順番で位置決めした場合(以下「番号逆順位置決め」と呼ぶ)の計測結果である。

座標変換式

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.999849 & -0.017849 & -0.001060 \\ 0.017829 & 0.999715 & -0.016400 \\ 0.001344 & 0.016379 & 0.999865 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1410.491159 \\ -335.772229 \\ -507.232639 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} X, Y, Z : \text{ロボット座標} \\ x, y, z : \text{測定座標} \end{array}$$

単位 : mm

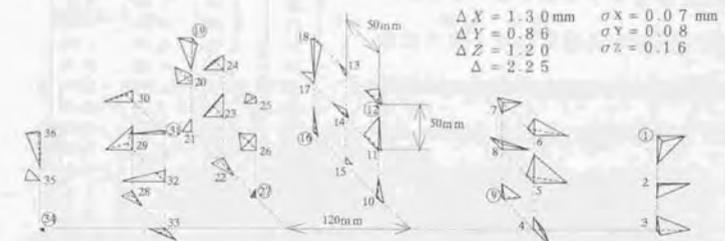


(a) 1~36の番号順に位置決めした場合

座標変換式

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.999933 & -0.011544 & 0.000778 \\ 0.011550 & 0.999902 & -0.007893 \\ -0.000687 & 0.007901 & 0.999969 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1413.564740 \\ -331.907224 \\ -499.700405 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} X, Y, Z : \text{ロボット座標} \\ x, y, z : \text{測定座標} \end{array}$$

単位 : mm



(b) 36~1の番号逆順に位置決めした場合



図9.21 ムーブマスターの静的位置計測結果

9.5.4 実験結果の考察

まず最初に図9.21(a)および(b)中に併記した座標変換式に注目すると、両者の平行移動ベクトルは各座標成分ともに数mmのオーダーで食い違っている。これは歪んでいる位置決め格子を測定した結果をロボットコントローラが想定する理想的な格子に無理矢理に一致させるような座標変換式を求めたためである。従って座標変換式には大きな変換誤差が含まれており、変換後のデータからはロボットの絶対位置決め精度の正確な評価をすることはできない。

そこで番号順位置決めと番号逆順位置決めの際の座標変換前の計測座標の偏差を計算した結果を表9.12に示す。これらは同一の座標系での値であるので比較が可能であり、両者は $\Delta X = \pm 1.8\text{mm}$, $\Delta Y = \pm 0.7\text{mm}$, $\Delta Z = \pm 1.2\text{mm}$ 程度食い違っていることがわかる。本システムの計測座標の再現性が $\pm 0.2\text{mm}$ と高いことを考慮すると、この食い違いはムーブマスターの位置繰返し精度の低さに起因していることがわかる。

以上のことを踏まえた上で改めて

表9.12 番号順, 番号逆順位置決めの際の測定座標値の偏差

No.	X座標	Y座標	Z座標
1	0.30	-0.75	0.73
2	0.16	-0.94	1.97
3	-1.08	-1.82	-1.01
4	2.42	0.74	0.50
5	1.37	-0.61	-2.56
6	0.54	-1.28	-1.76
7	2.16	-0.51	0.32
8	1.69	-1.79	0.28
9	1.32	-2.00	-1.39
10	2.54	0.93	-1.23
11	2.46	0.03	-1.65
12	2.17	-1.50	-1.71
13	2.35	0.21	1.92
14	2.56	-0.73	0.54
15	2.25	-0.98	1.03
16	2.57	-0.13	-0.44
17	2.67	-0.07	-1.98
18	2.47	0.06	-0.71
19	2.35	-0.29	-1.46
20	2.52	-0.47	-0.25
21	2.54	-0.42	0.07
22	2.54	0.72	-1.58
23	2.53	0.49	-1.88
24	2.62	-0.52	-2.92
25	1.70	0.44	1.06
26	2.03	0.03	0.93
27	2.02	-1.32	0.16
28	0.47	1.56	1.15
29	1.08	1.26	-2.44
30	1.83	-0.04	-2.78
31	1.13	1.09	0.78
32	1.77	0.37	0.88
33	1.76	0.19	1.29
34	1.60	1.13	0.78
35	0.54	0.21	-1.72
36	0.00	-0.06	-0.45
平均	1.78	0.71	1.23

単位 mm

(注1) 番号順に位置決めした際の格子点の測定座標から、番号逆順に位置決めした際の格子点の測定座標を引き去った偏差を記入した。これらの座標値は測定座標系での値である。

(注2) 平均の欄には各点におけるデータの絶対値の平均を記してある。

図9.21(a)および(b)の誤差分布の様子を比較した場合、両者は比較的似通っていることがわかる。これは座標変換を行うことにより位置繰返し誤差に基づく両者の計測座標の食い違いがオフセットとして引き去られて解消されているためである。従ってこれらの分布図における位置決め誤差は位置繰返し誤差には起因せず、関節角の原点オフセット、リンク長誤差等の機構の寸法誤差に起因していると言える。

これらの考察より、結局ムーブマスターの位置決め精度について以下のようなことが言える。

- (1) ムーブマスターは $\Delta X = \pm 1.8\text{mm}$, $\Delta Y = \pm 0.7\text{mm}$, $\Delta Z = \pm 1.2\text{mm}$ 程度の位置繰返し誤差を有する。これは各関節の駆動にバックラッシュを有する歯車や、伝達精度が低いローラチェーンが用いられているためである。このことはロボットが位置決めされた状態で人間が適当な力を加えてアームを押してやると、根元の関節が $2^\circ \sim 3^\circ$ 程度簡単に動いてしまうことによっても確認できる。
- (2) ムーブマスターは機構の寸法誤差に起因する位置決め誤差を有しており、その値は $X \times Y \times Z$ が $600 \times 150 \times 100\text{mm}$ 程度の範囲において、 $\Delta X = \pm 1.4\text{mm}$, $\Delta Y = \pm 0.9\text{mm}$, $\Delta Z = \pm 1.3\text{mm}$ 程度である。
- (3) 位置繰返し誤差および機構の寸法誤差による誤差を合計すると、ムーブマスターの絶対位置決め精度は $X \times Y \times Z$ が $600 \times 150 \times 100\text{mm}$ 程度の範囲において $\Delta X = \pm 3.2\text{mm}$, $\Delta Y = \pm 1.6\text{mm}$, $\Delta Z = \pm 2.5\text{mm}$ 程度である。

本節の実験の結果、ムーブマスターの絶対位置決め精度はPUMAロボットやPanabo等の産業用ロボットに比べてかなり低いことが判明した。これは本実験で用いたロボットの型式が古く、用途も精度の要求されない学校教育に絞られているためである。

9.6 スカラロボットの位置決め精度評価実験

9.6.1 本実験の意義

本節では産業用ロボットとして最も普及しているタイプであるスカラロボットの絶対位置決め精度を評価することを目的とする。

スカラロボットは基本的には平面内およびそれに垂直な軸方向の3自由度の運動しか行わないため、構造が6自由度多関節型ロボットに比べてシンプルである。従って誤差の要因となる機構の寸法誤差（関節角原点のオフセット、リンク長誤差等）が発生する箇所が少なく、その絶対位置決め精度は他の構造のロボットに比べて高いことが予想される。このことはロボットのキャリブレーションを行う場合に誤差パラメータの候補を特定することが容易であり、キャリブレーションが行いやすいことも意味している。

以上のスカラロボットの特徴を踏まえた上で、本実験では以下のようなことを目的とする。

- (1) スカラロボットの絶対位置決め精度を本研究で開発した計測システムを用いて評価し、スカラロボットの精度が一般に言われているように本当に良いかどうかを確認する。
- (2) スカラロボットの誤差パラメータを関節角の原点オフセット、リンク長誤差に特定し、36個の格子点へ位置決めした際の手先位置の計測結果を利用して実際にロボットのキャリブレーションを行う。
- (3) キャリブレーションの結果をもとにロボットの幾何学モデルを構築し直し、再び36個の格子点へ位置決めを行わせる。この結果とキャリブレーションを行わない状態での位置決め結果を比較し、キャリブレーションがうまく行えたかどうかを確認する。

9.6.2 スカラロボットの仕様^{*)}

本実験においては精度評価対象ロボットとして、ヤマハ発動機(株)製、型式 YK5012 を用いた。図9.22にスカラロボットの外観を示す。図中に外形寸法、ロボット座標系を併せて示す。表9.13にスカラロボットの基本的な仕様を示す。

このロボットは多段フィードから組み付けステーションへのパーツのハンドリングを行わせることを目的として、ヤマハ発動機(株)に特注品として製作を依頼したものである^{*)}。従って通常市販されているスカラロボットの水平面内の駆動部分（図9.22のリンク1およびリンク2の部分）を流用し、これを90°回転させて鉛直面内で作業を行うように改

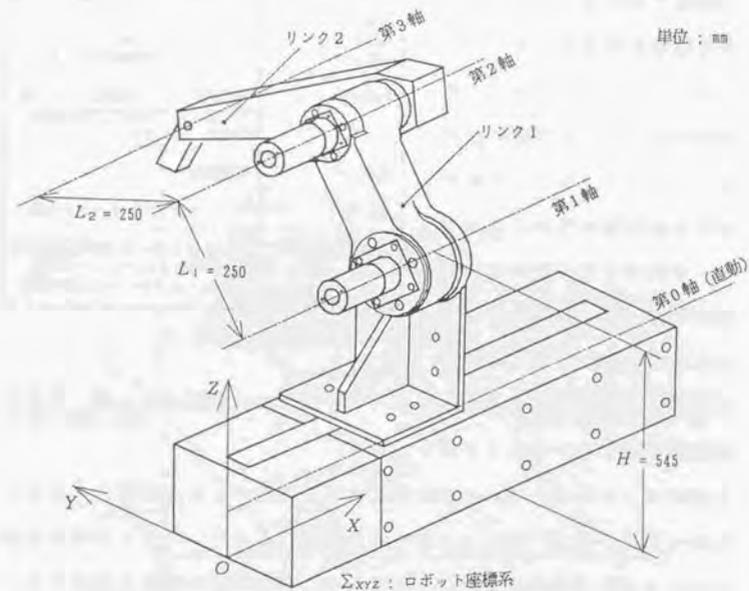


図9.22 スカラロボットの外観図（厳密には垂直多関節型ロボット）

良されている，従ってこのロボットは厳密には垂直多関節型ロボットに分類されるが，スカラロボットの開発者である牧野の「選択的コンプライアンス構造を持つロボット」の定義に従って本論文では以下スカラロボットと呼ぶことにする^{*)}。

本ロボットには，ロボット全体のX軸方向の移動を可能にするためにボールねじにより直線運動を行うアクチュエータモジュールが組み合わされている。さらに手先にはタイミングベルトを介して駆動される回転軸が付加されており，手先の姿勢を鉛直面内で指定することが可能になっている。本節では直動部分を第

0軸，リンク1の回転軸を第1軸，リンク2の回転軸を第2軸，手首の回転軸を第3軸と呼ぶことにする。

本ロボットの第0軸には伝達精度が高い代表的な直動機構であるボールねじが用いられ，第1～3軸には減速機としてバックラッシの少ないハーモニックドライブが用いられており，各軸の回転角度を検出するエンコーダの分解能も高い。このため表9.13に示すようにロボットの位置繰返し精度が $\pm 0.03\text{mm}$ と高い値を示している。

表9.13 スカラロボットの基本仕様

型式	YK5012 (ただし部品供給用に改造が施されている)
座標系	水平多関節型 (スカラ)
自由度	4 (ただし1軸は直動関節)
可搬重量	8kg
最大速度	第0軸: 400mm/s 第1軸, 第2軸合成: 3100mm/s 第3軸: $360^\circ/\text{s}$
減速機構および減速比	第0軸: ボールねじ, リード20mm 第1軸: ハーモニックドライブ, 1/80 第2軸: ハーモニックドライブ, 1/80 第3軸: ハーモニックドライブ, 1/50
各軸の位置決め分解能 (1回転または1mmあたりのエンコーダ脈数)	第0軸: 500パルス/mm 第1軸: 32000パルス/1回転 第2軸: 32000パルス/1回転 第3軸: 10000パルス/1回転
位置繰返し精度	$\pm 0.03\text{mm}$
自重	46.5kg
制御方式	コンピュータ制御電気サーボ
制御軸数	同時4軸 (ただし各軸とも同じ速度で動くので各軸の位置決め終了時刻は一致しない)
再現方式	各軸補間
教示方式	ティーチングプレイバック方式
設定可能座標系	ジョイントモード (専用治具穴を用いてリンクパラメータを校正した後ワールドモードも対応可能)

9.6.3 キャリブレーション前の静的位置計測結果

a) 実験方法

図9.23に示すような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。発信器の放電周波数は50Hzに設定し，各格子点において500回の計測を行った。図9.24に実験風景を示す。

本実験で用いたスカラロボットは特注品であり，標準品とはロボットの幾何学モデルが異なるためコントローラの逆変換機能を使用することができなかった。従って本実験においては仕様に基づいてロボットの幾何学的モデルを構築し，ロボット手先の目標座標を実現するような各関節の回転角度を解析的に求め，この値をコントローラに与えた。図9.25に逆変換を行う際に想定した関節角度とロボット座標系との関係を

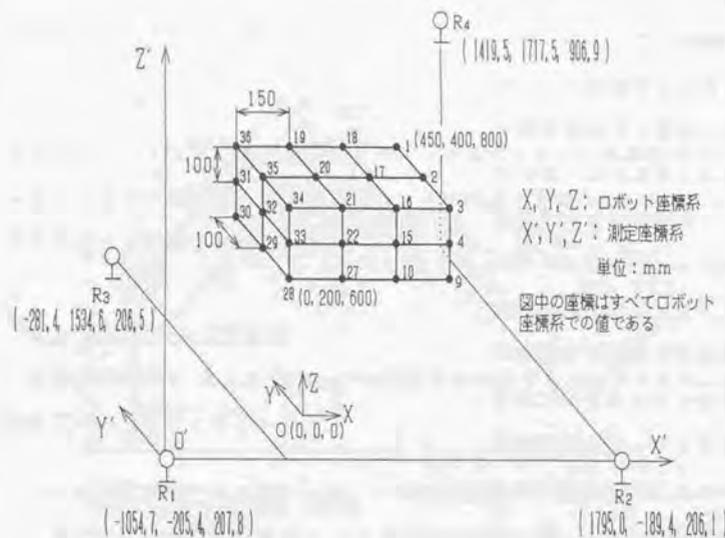


図9.23 スカラロボットの静的位置計測実験条件

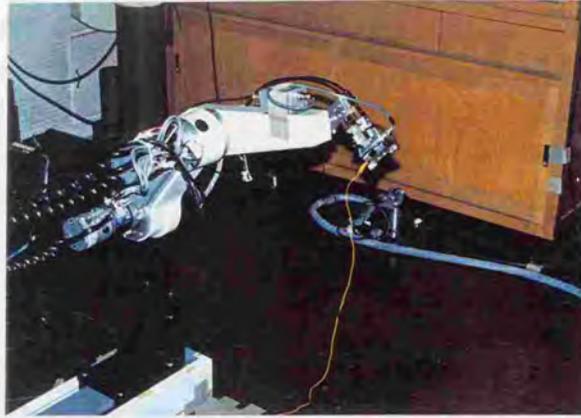


図9.24 スカラロボットの静的位置計測実験風景

示す。 $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$ の場合 (リンク1, リンク2ともに鉛直上方に伸びた状態) を初期姿勢と呼ぶことにする。本ロボットは各軸において近接スイッチおよびエンコーダ・ゼロ信号により関節角原点を検出する機能が備わっているが、この原点は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。従って本実験においてはティー

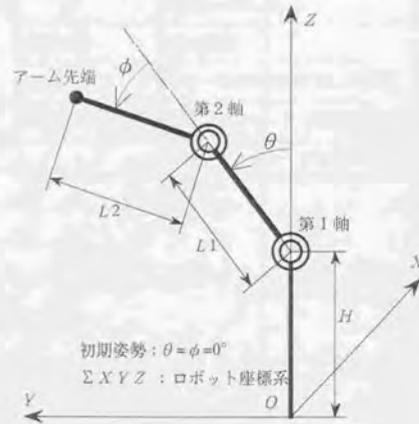
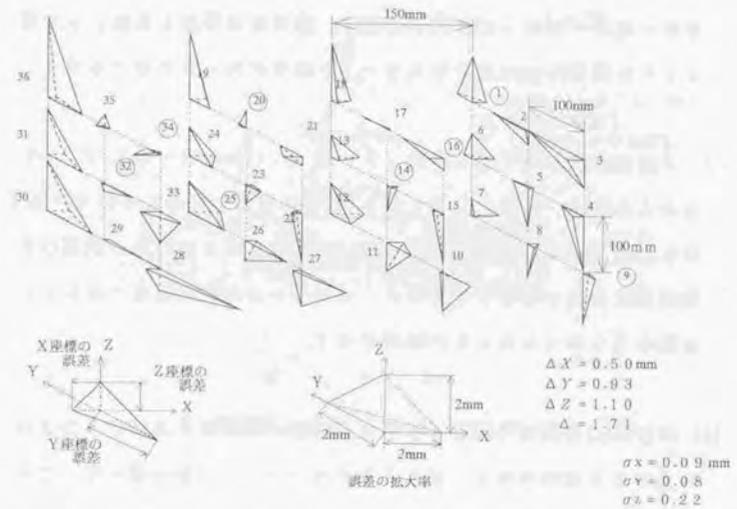


図9.25 関節角度とロボット座標系との関係



各点において500回計測
○は座標変換式を求めるのに用いた格子点

図9.26 スカラロボットの静的位置計測結果 (キャリブレーション前)

チングボックスを用いて目測によりロボットにだいたいの初期姿勢をとらせ、そこでの第1軸, 第2軸のエンコーダパルスを読みとって、この角度を改めて関節角原点とした。

b) 実験結果および考察

実験結果を図9.26に示す。この誤差分布の様子を検討することにより以下のようなことがわかる。

- (1) 本実験で用いたスカラ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 $450 \times 200 \times 200 \text{ mm}$ 程度の範囲で $\Delta X = \pm 0.5 \text{ mm}$, $\Delta Y = \pm 0.9 \text{ mm}$, $\Delta Z = \pm 1.1 \text{ mm}$ 程度である。

このように精度が出やすい構造がであるにもかかわらず絶対位置決め精度が悪かった最大の理由は、関節角の原点を目測により定めたため関節角度に大きなオフセット誤差があったためである。

(2) X座標が同一の4つの平面 ($X = 0, X = 150, X = 300, X = 450$) を考えた場合、それらに含まれる9個の格子点での誤差の分布の様子は各平面間において良く似通っている。これよりこれらの誤差は計測誤差に起因するものではなく、ロボット自体の機構の寸法誤差に起因するものであることが確認できる。

(3) 全体的にX座標の増加に伴ってZ座標の誤差が正方向から負方向に推移する傾向がある。例えば格子点36, 19, 18, 1番の順に従ってZ方向の誤差は正の値をとりつつしだいに減少し、格子点28, 27, 10, 9番の順に従ってZ方向の誤差は負の値をとりつつしだいに増加している。この理由として以下の2つが考えられる。

i) X軸の駆動を担当するボールねじに「そり」があり、真直度がでていなかった。このためX座標の変化に従ってアーム先端のZ座標が変化してしまった。

ii) 座標変換に誤差が含まれていた。

(4) X座標が同一の4つの各平面内において、Y座標が増加するに従いX座標の誤差が負の値から正の値に推移する傾向がある。すなわちアームが伸びるほど先端はXの正方向に偏って位置決めされる。

この理由は図9.27に示すようにロボットのベース部分がボールねじに対して ε の組立誤差をもって取り付けられていたためであると思われる。

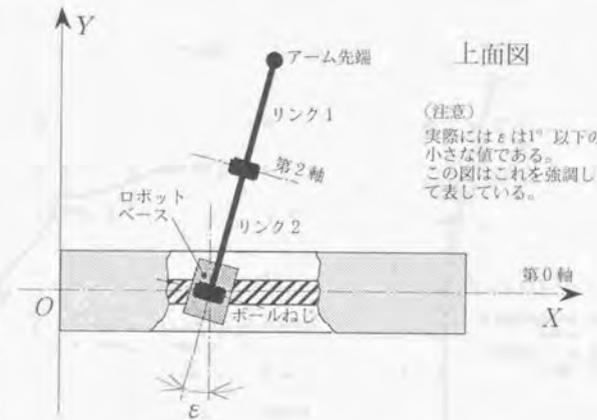


図9.27 ロボットベースの取り付け誤差

9.6.4 キャリブレーションの実行

ここではキャリブレーションすべきロボットのパラメータを、

- ・第1軸における関節角のオフセット誤差 (α)
- ・第2軸における関節角のオフセット誤差 (β)
- ・リンク1のリンク長 (L_1)
- ・リンク2のリンク長 (L_2)
- ・第1軸中心の床面よりの高さ (H)
- ・ロボットベースのボールねじへの取り付け角誤差 (ε)

の6個に特定してキャリブレーションを行うことにする。これらのパラメータを図9.28に図示する。

このようなパラメータを用いた場合、ロボットの先端は36個の格子点において理論的に以下の式で示される座標 (X_i, Y_i, Z_i) にずれて位置決めされるはずである ($i=1\sim 36$)。

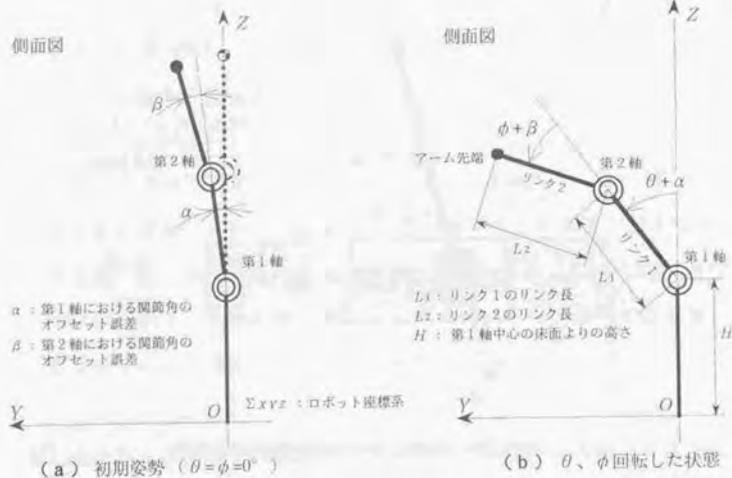


図9.28 キャリブレーションするパラメータ

$$X_i = X_{NCi} + \sin \varepsilon (L_1 \sin(\theta_i + \alpha) + L_2 \sin(\theta_i + \alpha + \phi_i + \beta)) \quad (9.7)$$

$$Y_i = \cos \varepsilon (L_1 \sin(\theta_i + \alpha) + L_2 \sin(\theta_i + \alpha + \phi_i + \beta)) \quad (9.8)$$

$$Z_i = L_1 \cos(\theta_i + \alpha) + L_2 \cos(\theta_i + \alpha + \phi_i + \beta) + H \quad (9.9)$$

ここで θ_i, ϕ_i はロボットに誤差が無い場合(すなわち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軸, 第2軸の関節角度指令値である。また X_{NC} 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。これらの値は格子点の位置座標とロボットの幾何学モデルから逆変換計算を用いて求められる既知の値であり、キャリブレーション前の格子点計測実験の際にロボットコントローラに与えた値である。従って (X_i, Y_i, Z_i) はパラメータ $\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon$ の関数となり、以下のように表すことにする。

$$\begin{pmatrix} X_i(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon), \\ Y_i(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon), \\ Z_i(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) \end{pmatrix} \quad (9.10)$$

次に i 番目の格子点における本システムで計測した発信器の位置座標(ロボット座標系での値に変換済みのもの)を (X_{iM}, Y_{iM}, Z_{iM}) とし、以下の残差 $r_1 \sim r_{108}$ を考える。

$$\begin{aligned} r_1 &= X_1(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) - X_{1M} & r_2 &= Y_1(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) - Y_{1M} \\ r_3 &= Z_1(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) - Z_{1M} \\ r_4 &= X_2(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) - X_{2M} & r_5 &= Y_2(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) - Y_{2M} \\ r_6 &= Z_2(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) - Z_{2M} \\ &\dots \dots & \dots \dots & \dots \dots \\ r_{106} &= X_{35}(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) - X_{35M} \\ r_{107} &= Y_{35}(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) - Y_{35M} \\ r_{108} &= Z_{35}(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) - Z_{35M} \end{aligned}$$

$$(9.11)$$

これらの残差を用いて評価関数として残差二乗和

$$\eta(\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{108} r_j^2 \quad (9.12)$$

を考え、これを最小にするような $\alpha, \beta, L_1, L_2, H, \varepsilon$ を最小二乗法により求める。最小二乗法の計算方法は第7章で述べたものと同様である。以上のキャリブレーションを行った結果を表9.14に示す。

表9.14 キャリブレーション結果

キャリブレーションするパラメータ	公称値	校正値
第1軸関節角オフセット α	0.000°	-0.481°
第2軸関節角オフセット β	0.000°	0.691°
リンク1のリンク長 L_1	250.000mm	247.758mm
リンク2のリンク長 L_2	250.000mm	252.735mm
第1軸中心の床面よりの高さ H	545.000mm	547.935mm
ベースの取り付け角度誤差 ε	0.000°	0.358°

9.6.5 キャリブレーション後の静的位置計測結果

a) 実験方法

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幾何学モデルを修正し、それに基づいて改めて格子点に正確にロボットが位置決めされるような各関節角度の指令値を計算した。これらの値をコントローラに与えて再び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。

b) 実験結果および考察

実験結果を図9.29に示す。この図を検討することより以下のようなことがわかる。

- (1) 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 $X \times Y \times Z$ が $450 \times 200 \times 200\text{mm}$ 程度の範囲で $\Delta X = \pm 0.4\text{mm}$, $\Delta Y = \pm 0.3\text{mm}$, $\Delta Z = \pm 0.4\text{mm}$ 程度までに改善される。特に Y , Z 座標の精度がキャリブレーション前に比べて格段に改善されていることが図9.26と比較することによりわかる。



図9.29 スカラロボットの静的位置計測結果 (キャリブレーション後)

この結果よりキャリブレーションが精度よく行われたことが確認でき、表9.14に示した校正値が信頼性の高いものであることが判明した。

- (2) キャリブレーション前の実験の項で述べた X 座標の増加に伴って Z 座標の誤差が正方向から負方向に推移する傾向は、キャリブレーションを行った後も、度合いが小さくなっているものの完全には解消されていない。キャリブレーションを行っても傾向が同じであることより、これは座標変換誤差によるものでなくボールねじのそりによるものであると思われる。

(3) 本実験ではパラメータを6個に特定したが、ロボットの幾何学的な誤差要因は関節における軸の芯ずれ、傾き等他にも多数ある。またボールねじのそりをはじめとして数式によりモデル化が難しい非幾何学的な誤差要因も考えられる。これらを全て考慮してキャリブレーションを行い、それらの結果をもとにロボットに位置決めを行わせれば絶対位置決め精度はさらに改善される可能性がある。

しかしながらパラメータの増加に従ってキャリブレーションの計算は飛躍的に煩雑で解が収束しにくいものとなり、実際の手先の位置の測定点も500~数1000個に増やさなければいけない²⁴⁾²⁷⁾。またパラメータが正確に推定されたとしても、ロボットの自由度が限られているため制御によりそれらが完全には補正できないことも予想される。

このようなことを考慮すると本実験で採用した6個のパラメータはロボットの精度を向上させるにあたって実用的で適当なものであったと思われる。

9.6.6 本節の総合的考察

本実験によりスカラロボットは構造上精度がやすいものの、キャリブレーションを全く行わない状態では絶対位置決め精度が1mm程度までに劣化してしまうことが判明した。また表9.1.4より、ロボットの製作精度がかなり低く、リンク長誤差が2~3mm程度もあることがわかる。

この理由としては、本実験で用いたロボットは基本的にマニュアルテイチングにより用いられることを想定しており、メーカーにおける製作公差が低かったものと思われる。このことはメーカーから供給されているロボットコントローラが逆変換機能を有しているものの、その基準座標系の設定は等間隔で配置された基準穴を有する専用治具を用いてユーザが自ら行わなければならないことによっても裏付けられる²⁴⁾。

キャリブレーション後のスカラロボットの絶対位置決め精度は ± 0.4 mm程度であり、PUMAロボットの絶対位置決め精度(± 0.7 mm程度)に比べてかなり高い。これはスカラロボットが精度の出やすい構造をとっているためである。

また本実験の結果から、本システムが高い計測精度を持ち、ロボットの実際のキャリブレーションに十分応用可能であることが確認できた。

9.7 本章の概要および結言

本章では開発した3次元位置・姿勢計測システムを用いて実際のロボットの静的位置・姿勢を計測した。測定対象としてはDDロボット、小型6自由度多関節型ロボット（通称PUMA）、大型6自由度多関節型ロボット（通称Pana Robo）、小型教育用5自由度多関節型ロボット（通称ムーブマスター）、3自由度スカラロボットを採用した。

本章の実験の結果、本システムの計測能力について判明したことは以下の通りである。

(1) DDロボットを校正基準として本システムの計測精度を検証した。

その結果精度が出にくい三点法を用いた場合でも本計測システムは $\pm 0.4\text{mm}$ 、 $\pm 0.4^\circ$ の位置・姿勢計測精度を持ち、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。（この実験は研究の初期の段階で行われており、現在のシステムの精度は第7章、第8章で述べたように $\pm 0.2\text{mm}$ 、 $\pm 0.1^\circ$ 程度に改善されている。）

(2) PUMAロボットの静的位置を計測した。その際ダイヤルゲージをロボット、本システム以外の第3の校正基準として用いて計測データの信頼性を保証した。その結果本システムは $\pm 0.2\text{mm}$ 程度の高い静的位置計測精度を持ち、実際のロボットの精度検証、キャリブレーション等に十分応用可能であることが確認された。

(3) PUMAロボットの姿勢精度を本システムで計測した。その結果本システムが実際のロボットの関節角度の回転精度の検証や姿勢精度の検証に対応できる可能性を持つことが確認された。

(4) スカラロボットの関節角オフセット、リンク長等を本システムの静的位置計測結果を用いてキャリブレーションしたところ、絶対位置決め精度が格段に（1mm程度）向上した。これより本システムが実際のロボットのキャリブレーションに十分対応可能であることが確認された。

次に本システムの計測精度（ $\pm 0.2\text{mm}$ 、 $\pm 0.1^\circ$ ）を根拠として本章の実験によりロボットの絶対位置決め精度を検証した結果を表9.15にまとめて示す。これより現在の産業用ロボットの位置決め精度について判明したことは以下の通りである。

(5) ロボットの絶対位置決め精度は通常カタログに表示されている高い位置繰返し精度に比べてかなり悪く、代表的な組立ロボットであるPUMAロボットで $\pm 1\text{mm}$ 程度にも達する。

(6) 構造上一般に精度が高いと言われているスカラロボットの場合でも、関節角オフセット、リンク長等のパラメータを全くキャリブレーションしない状態では $\pm 1\text{mm}$ 程度の絶対位置決め誤差を生じてしまう。

(7) ロボットの絶対位置決め精度はロボットの構造、大きさ、用途、等により異なり、スカラロボット（校正後）、PUMAロボット、Pana Robo、ムーブマスターの順に高い値をとる。

(8) 水平多関節型のロボット（スカラロボット）の方が垂直多関節型のロボット（PUMAロボット、Pana Robo）に比べて絶対位置決め精度が高い。これは水平多関節型ロボットは自由度が低い

かわりにシンプルな構造をとっており、機構の寸法誤差の発生箇所が少ないからである。

(9) PUMAロボットとPana Roboの精度を比較すると、ロボットが大型で可搬重量が大きくなるほど絶対位置決め精度が低下することがわかる。これはロボットが大型になると i) 関節角の誤差が大きな感度で手先の位置決め誤差に効く ii) リンク重量が大きくなりたわみも無視できなくなる ためである。

(10) 組立を用途としたロボットの絶対位置決め精度が比較的高いのに対して溶接、教育を用途としたロボットのそれはかなり低く、特にムーブマスターでは±4mmにも達する(ただし位置繰返し誤差も含んだ値)。これは用途によりロボットに要求される精度が異なり、それとコストとの兼ね合いにより、構造、使用するエレメント、製作公差、検査基準等が各ロボット間で様々に異なるためである。

表9.15 本研究で扱った各ロボットの絶対位置決め精度

製造会社および型式	PUMAロボット	Pana Robo	ムーブマスター	スカラロボット	
				校正前	校正後
	川崎重工業(株) 川崎ユニメータ560	松下電器産業(株) AW-8060	三菱電機(株) MELFA RM-501	ヤマハ発動機(株) YK5012	
自由度および構造	6自由度多関節型	6自由度多関節型	5自由度多関節型	3自由度水平多関節型	
測定範囲 (X × Y × Z mm)	600 × 400 × 200	600 × 600 × 400	600 × 150 × 100	450 × 200 × 200	
測定範囲の体積 mm ³	4.8 × 10 ⁷	14.4 × 10 ⁷	0.24 × 10 ⁷	1.8 × 10 ⁷	
絶対位置決め精度	ΔX mm	±0.9	±3.2	±0.5	±0.4
	ΔY mm	±0.4	±1.5	±1.6	±0.3
	ΔZ mm	±0.5	±0.7	±2.5	±1.1
	Δ mm	1.1	2.0	4.4	1.7
位置繰返し精度 mm	±0.1	±0.2	±0.5	±0.03	
可搬重量 kgf	2.5	60	1.2	8	
自重 kgf	95	1300	27	46.5	
可搬重量/自重	2.6 × 10 ⁻²	4.6 × 10 ⁻²	4.4 × 10 ⁻²	17.2 × 10 ⁻²	
最大速度 mm/s	500	999	400	3100	
主要な用途	組立	溶接	教育	組立、部品供給	

(注1) 絶対位置決め精度は36点の格子点にロボットを位置決めさせ、その静的位置を本システムで計測することにより求めた。
 (注2) Δ は格子点 (位置決め目標) と実際の位置決め点との間の距離を示す。
 (注3) 測定範囲の体積はロボットの動作領域の目安となるものであるが、ロボットの実際の動作領域はこれよりも大きい。
 (注4) ムーブマスターの絶対位置決め精度は位置繰返し誤差を含んだ値である。
 (注5) スカラロボットの校正に際しては、関節角オフセット、リンク長、基準点の高さ、ベースの取り付け角をパラメータとして推定した。

Table with multiple columns and rows, containing technical data or a schedule. The text is very faint and difficult to read.

第 10 章

実際のロボットの動的位置計測

10.1 緒言

本章では開発した3次元位置・姿勢計測システムを用いて実際のロボットの動的位置を計測する。測定対象としては第9章の9.3節で取り扱った小型6自由度多関節型ロボット（通称PUMA）を採用した。

第2章で述べたようにロボットの動的な位置を高精度、非接触、リアルタイムで計測できるシステムは現在数少なく実用段階には至っていない。従って本計測システムがロボットの静的な精度のみならず動的な精度まで検証できることは重要な特長である。

本章では、第9章のPUMAロボットの静的位置の計測実験で用いた36個の格子点を用いそれら格子点間の動的な直線軌道、コーナリング軌道を本システムで計測し、その結果とペン書き方式により得られた軌跡とを比較する。またロボットに負荷重量を加えた状態で疑似円軌道を描かせ、それを本システムで計測し、ロボットのたわみがどの程度であるかを評価する。本章ではこれらの実験により、

- (1) 本システムが実際のロボットの動的な精度（絶対経路精度、速度精度等）の検証の用途に対してどの程度実用に供するかを検討する。
- (2) 本システムの動的位置計測精度（ $\pm 0.2\text{mm}$ ）を校正基準として、実際のロボットの動的な精度、たわみ、振動状態等を検討する。

の2点を目的とする。

なお本章における実験においてはロボットの移動は全て完全直線補間方式を用いた。従って指令点間のロボット先端の移動速度は始点、終点における加減速時を除いて等速である。

10.2 格子点間の動的位置計測結果

10.2.1 実験目的

本節では第9章の9.3.4節と同じ格子点を用い、PUMAロボットに格子点間を結ぶ直線軌道を描かせてその動的位置を本システムで計測する。本実験の目的は以下の通りである。

(1) 誤差がロボットの機構の寸法誤差に起因するものであれば、誤差分布は各格子点と格子点の間の空間で急激に変化することではなく、漸次変化するはずである。従って動的位置計測結果が静的位置計測結果を滑らかに結ぶことを確認し、第9章の9.3.4節で求めた静的位置計測結果の信頼性を再確認する。(もし滑らかに結ばなければ、誤差分布は計測座標のばらつきに起因していることになる。)

(2) PUMAロボットの位置繰返し精度が $\pm 0.1\text{mm}$ と高いので、格子点における位置計測結果は静的、動的な計測ともにこの程度の精度で一致しなければならない。このことを確認することで、本システムの動的位置計測精度を検証する。

(3) PUMAロボットの直線軌道における絶対経路精度を本システムの動的位置計測精度($\pm 0.2\text{mm}$)を根拠として評価する。

10.2.2 実験方法および結果

実験条件は第9章の9.3.4節の図9.6に示すものと同一である。ロボットに描かせる軌道として、

- ① 格子点 1→18→19→36
- ② 格子点 3→16→21→34
- ③ 格子点 1→2→3

④ 格子点 16→17→18

の4種類を採用し、これらを本システムで計測した。発信器の放電周波数は50Hzに設定し、ロボットの速度は50mm/sに設定した。軌道の途中の格子点において位置決めを行うようにプログラミングをしたので、それらの点でロボットは減速、位置決め、加速を行っており座標計測の時間頻度が大きくなっている。

図10.1～図10.4に結果を示す。これらの動的位置計測結果は第9章の9.3.4節の第3巡目の静的座標の計測結果から求められた座標変換式によって測定座標をロボット座標系での値に変換したものである。また図中に第3巡目の静的座標の計測結果を○印を用いて併せて示す。

10.2.3 考察

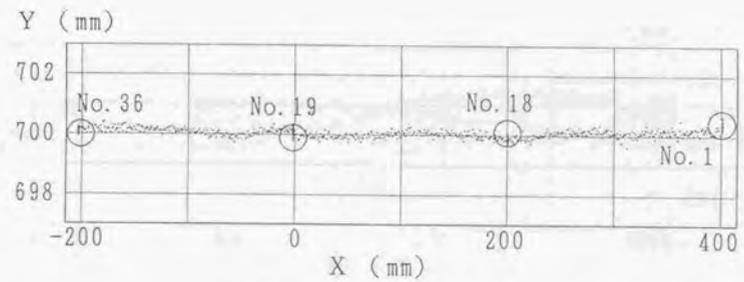
各軌道ともに動的位置の計測結果は格子点と格子点の間で滑らかに変化しており、動的位置の計測結果と静的位置の計測結果は各格子点において $\pm 0.1\text{mm}$ 程度の高い精度で一致している。

このことより、第9章の9.3.4節で求めた誤差分布図(図9.9)はロボットの機構の寸法誤差に起因するロボットの絶対位置決め誤差の様子を正確に表していることが確認できる。

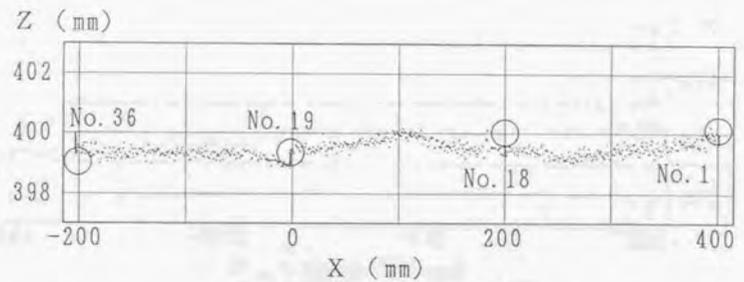
またPUMAロボットの位置繰返し精度が $\pm 0.1\text{mm}$ と高く、動的、静的な位置計測結果がこの程度の精度で一致することを考慮すると、本システムの動的位置計測精度が静的位置計測精度(第7章でNC工作機械を用いて検証した結果 $\pm 0.2\text{mm}$)と同程度であることが言える。このことより本システムにおける自動追尾計測機能が精度良く稼働していることが確認できる。

次に、本システムの計測精度を根拠としてPUMAロボットの絶対経路精度を検討してみる。図10.1～図10.4をながめるとロボットは

各格子点間を直線補間するような制御が行われているにもかかわらず、
 実現されている軌道は目標軌道から $\pm 1\text{mm}$ 程度の比較的大きな誤差をも
 ってずれていることが確認できる。この理由として、機構の寸法誤差
 (リンク長誤差、軸の芯ずれ・傾き、関節角のオフセット等) が最も有
 力であると思われる。



(a) Y座標変化図

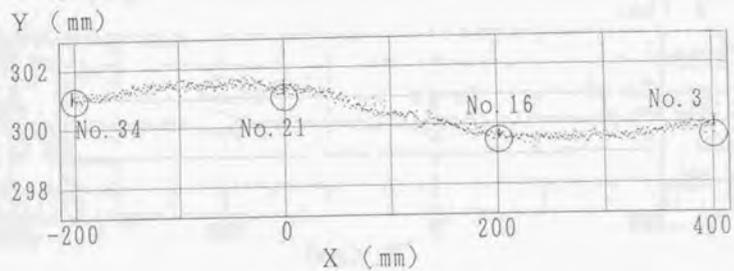


(b) Z座標変化図

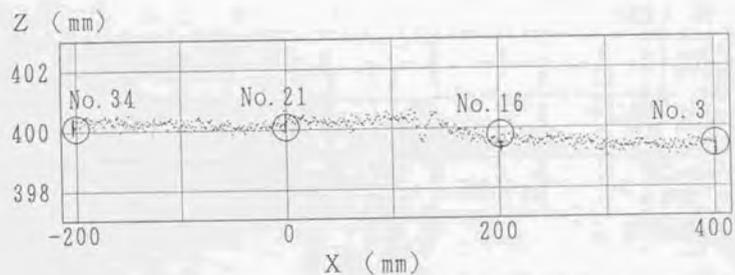
放電周波数 : 50Hz · 動的計測座標
 ロボット速度 : 50mm/s ○ 静的計測座標

図10.1 軌道①における動的位置の計測結果

軌道① : 格子点 1→18→19→36



(a) Y座標変化図

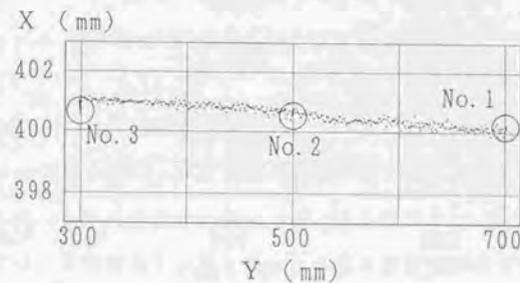


(b) Z座標変化図

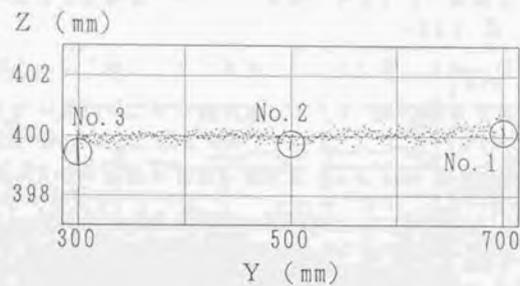
放電周波数 : 50Hz ・ 動的計測座標
 ロボット速度 : 50mm/s ○ 静的計測座標

図10.2 軌道②における動的位置の計測結果

軌道② : 格子点 3→16→21→34



(a) X座標変化図

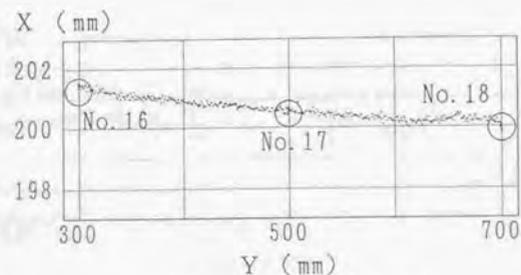


(b) Z座標変化図

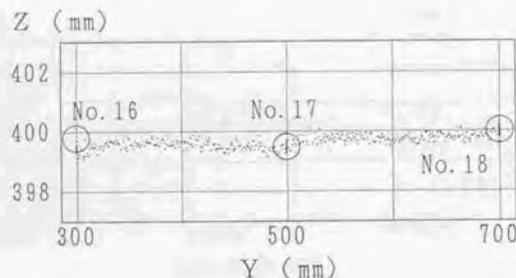
放電周波数 : 50Hz ・ 動的計測座標
 ロボット速度 : 50mm/s ○ 静的計測座標

図10.3 軌道③における動的位置の計測結果

軌道③ : 格子点 1→2→3



(a) X座標変化図



(b) Z座標変化図

放電周波数 : 50Hz ・ 動的計測座標
 ロボット速度 : 50mm/s ○ 静的計測座標

図10.4 軌道④における動的位置の計測結果

軌道④ : 格子点 16→17→18

10.3 ペン書きによる軌跡と計測軌跡との比較

10.3.1 実験目的

本節では格子点16番→19番の直線軌道をロボットに描かせ、その動的位置を本システムで計測した結果と、ペン書きにより得られた軌跡とを比較する。

PUMAロボットは直線補間運動を行う場合、Z軸方向に肉眼でもわかる程のびびり振動を行い、この振動は特に移動速度を低く設定した場合に顕著である。さらに格子点18番→19番(第9章図9.6参照)の直線軌道においては、手首姿勢を一定に保つために手首旋回関節である第4軸(第9章図9.4のJT4)が180°回転し、その際に特に激しい振動を生じることが肉眼により観察される。本実験の目的は以下の通りである。

- (1) ペン書きによる軌跡を校正基準とし、本計測システムがロボットの振動および経路を正確に計測できるかどうかを検証する。
- (2) 本計測システムの動的位置計測精度(±0.2mm)を校正基準として、PUMAロボットのびびり振動の程度について検証する。またロボットの絶対経路精度についても検討する。

10.3.2 実験方法および結果

実験条件は第9章9.3.4節の図9.6に示すものと同一である。ロボットに格子点1→18の直線補間を行わせ、その動的な位置を本計測システムで計測した。発信器の放電周波数は50Hzに設定し、ロボットの速度は25mm/s, 50mm/s, 150mm/sの3種類について実験を行った。

一方、同じ軌道において先端チップ直径0.5mm、線幅0.3mmの市販のボールポイントペン(セイラー万年筆社製 商標SLA ROLLER)およびプロッタ用紙(GRAPHTEC社製 型式PL501)を用いて図10.5に示すよう

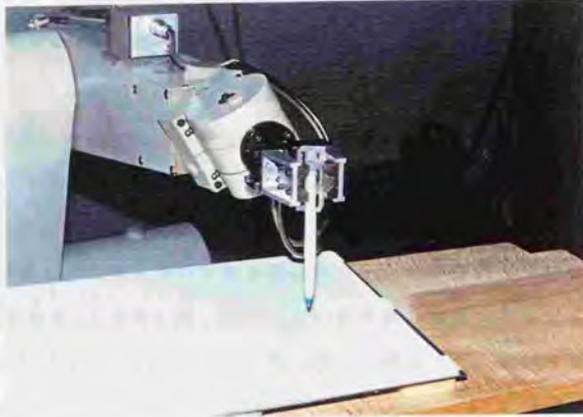


図10.5 ペン書きによる軌道測定実験風景

にペン書きを行わせた。なおプロッタ用紙は厚さ 2mm の鉄板上に固定し、筆圧を一定にするため鉄板はスポンジを介して固定台に設置した。

図10.6～図10.8に各速度における結果を示す。これらの図において横軸の縮尺は実物大であり、縦軸の縮尺は実寸の4倍である。ペン書き軌跡をこのように拡大するにあたっては、縦横の拡大率を独立に設定できるコピー機械を用いた。図中X座標が 150～160mm の付近においてロボットの第4軸が 180° 回転している、この付近での軌跡をロボットの速度が 10mm/s の場合について適当な縮尺で拡大して図10.9に示す。

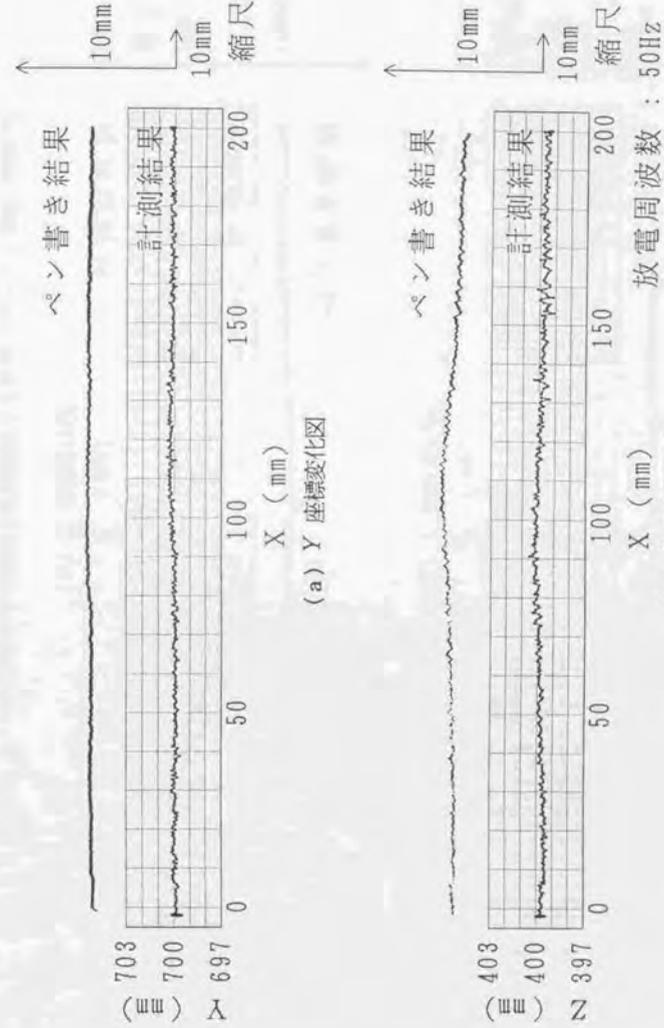


図10.6 ペン書きによる軌跡と計測軌跡との比較(ロボット速度 25mm/s)

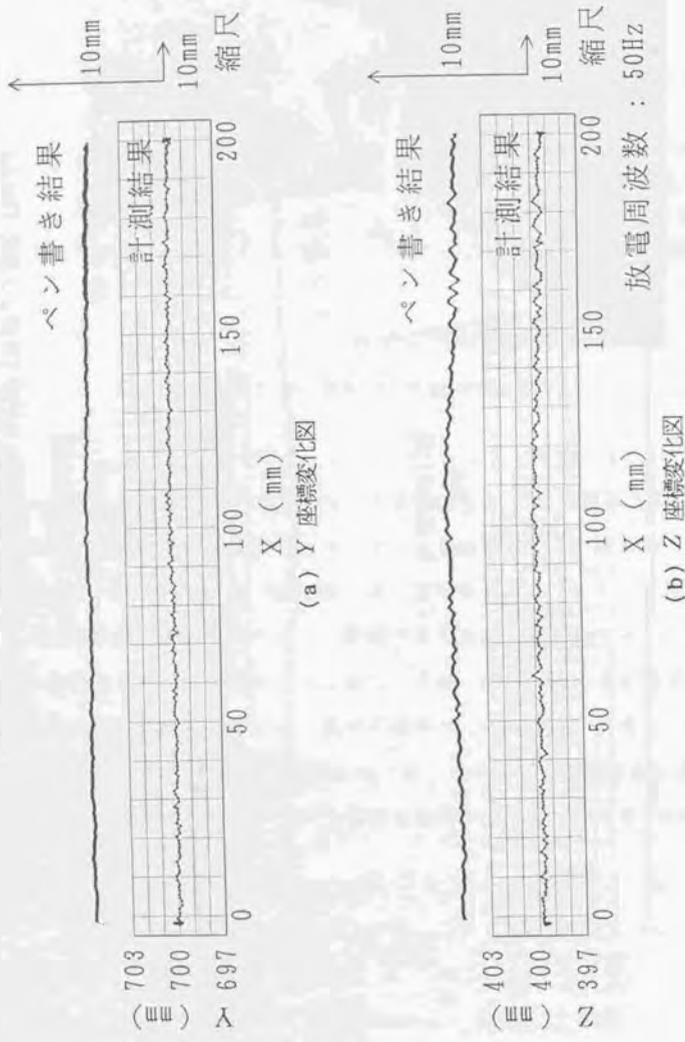


図10.7 ペン書きによる軌跡と計測軌跡との比較 (ロボット速度 50mm/s)

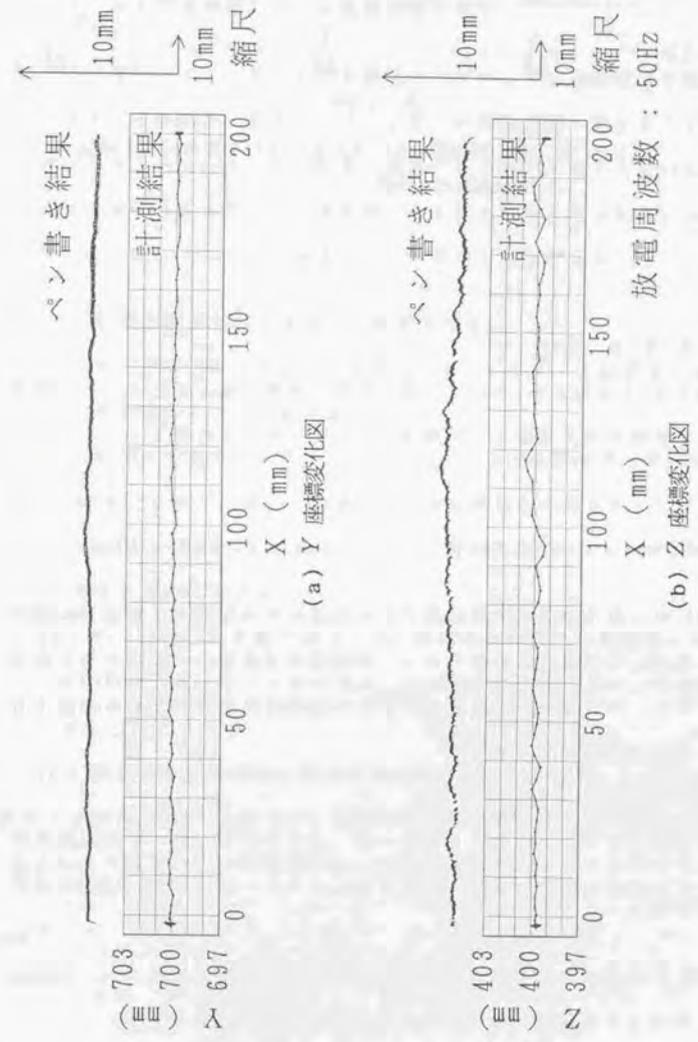


図10.8 ペン書きによる軌跡と計測軌跡との比較 (ロボット速度 150mm/s)

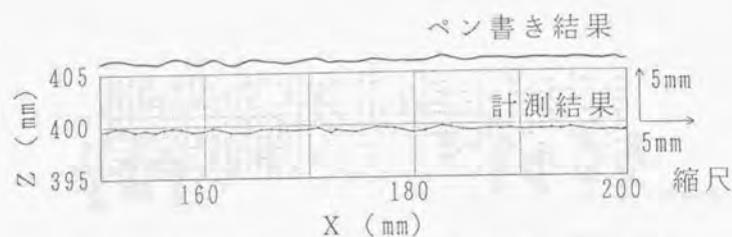


図10.9 手首が旋回する付近におけるペン書きによる軌跡と計測軌跡の拡大図

10.3.3 考察

図10.6～図10.9のペン書き結果と計測結果を見比べ、ペン書きによる軌跡を校正基準とした場合以下のようなことが判る。

- (1) ペン書き結果と計測結果は高い精度で一致しており、本システムはロボットの振動の状態を正確に計測する能力を持っている。
- (2) ペン書き結果、計測結果ともに軌道の中央付近でZ座標が山型に増加している。これはロボットの機構の寸法誤差に起因するものであり、本計測システムはロボットの絶対経路誤差を正確に評価する能力を持っている。

次に本計測システムの動的計測精度 ($\pm 0.2\text{mm}$) を校正基準とした場合、PUMAロボットの振動状態および経路精度について以下のようなことが判る。

- (3) Y方向に比べてZ方向の方がびびり振動の振幅が大きい。これはロボットの振動に重力が大きく影響しているためである。

(4) 手首が旋回する付近においては振動の振幅が増加する。

(5) ロボットの動作速度が速くなるとびびり振動は少なくなるが、ロボットの手首旋回に伴う振動は低減しない。

以上より本システムの動的計測能力はロボットの振動状態を観察できる程高いと言える。またペン書き結果と計測結果が一致することから、本計測システムはロボットの軌跡を測定する手段としてよく用いられているペン書き方式と同等の能力を持つことがわかる。さらに本システムを用いることにより、ペン書き方式に付随する欠点である

- (a) 計測空間が2次元平面内に限定される。
- (b) 得られるのは相対的な軌跡精度であり、ロボット座標系に基づいた絶対精度については評価できない。
- (c) 時間の情報が失われるので、ロボットの速度精度等の評価ができない。
- (d) 筆圧を一定に保つのが困難であり、軌跡が太くなったりかすれたりする可能性がある。
- (e) ペンの剛性が有限であるため、加減速が大きい軌道測定においては動的な力によりペンがたわみ、正確な軌跡が得られない可能性がある。
- (f) 実験に膨大な時間と労力がかかる。

等の問題点が一気に解決される。従って本システムはペン書きに取って代わる新しい軌跡計測システムとして非常に有望であると思われる。

10.4 コーナリング軌跡の計測結果

10.4.1 実験目的

本節ではロボットに 90° 進行方向が変化するコーナリング軌跡を描かせ、その動的位置を本システムで計測する。その際、ロボットに連続軌跡制御(CP: Continuous Path 制御)を行わせた場合と非連続軌跡制御を行わせた場合の2種類の軌跡について計測を行う。またこれらの計測結果とペン書きによる結果とを比較する。本実験の目的は以下の通りである。

- (1) CP制御を行う場合、2つの直線軌道はコーナーにおいて滑らかな曲線でつなぎ合わされる。一方CP制御を行わない場合、コーナーにおいてロボットは減速、停止、加速を行う。この2つの軌跡の違いを本システムが識別できるかどうかを調べることで、本システムの動的位置計測能力を検証する。
- (2) コーナリング軌跡における速度、加速度等を本システムが計測できるかどうかを調べることで、本システムの速度・加速度計測能力を検証する。
- (3) ペン書き結果を校正基準とし、それと本システムの計測結果を比較することで、本システムのコーナリング軌道に対する動的位置計測能力を検証する。
- (4) 本計測システムの動的位置計測精度($\pm 0.2\text{mm}$)を校正基準としてPUMAロボットのコーナリングにおける絶対経路精度、速度精度等を検証する。

10.4.2 実験方法および結果

実験条件は第9章9.3.3節の図9.6に示すものと同一である。コーナリング軌道として、

- ① 格子点 19→18→17
- ② 格子点 19→18→13

の2つを設定し、これら各々の軌道についてロボットコントローラに

- (i) 連続軌跡制御(CP制御)
- (ii) 非連続軌跡制御(CP制御無し)

を行わせた。ロボットの速度は 25mm/s 、 50mm/s 、 150mm/s の3種類について実験を行った。

図10.10および図10.11に結果を示す。これらの図の作成にあたっては、計測結果とペン書き結果の縮尺が同一になるようにペン書き軌跡のコーナー付近を拡大コピーした。またペン書き軌跡が計測結果の点をなるべく通るように各々の図を重ね合わせて表示した。ペン書き軌跡はロボット座標系に基づいた絶対的な値ではなく、相対的な値なのでこのような手法を用いて両者を比較した。

10.4.3 考察

図10.10、図10.11より本システムのコーナリング軌跡に対する計測能力について以下のようなことがわかる。

- (1) 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ーで減速、停止、加速をしている様子を正確に捉えている。
- (2) 本計測システムの計測軌跡とペン書き軌跡とは $\pm 0.1\text{mm}$ 程度の非常

に高い精度で一致しており、ペン書き結果を校正基準とした場合本システムはコーナリング軌道に対する高い動的位置計測能力を持つと言える。

(3) CP制御を行わない場合、本計測結果はコーナーでの停留を正確にとらえているのに対して、ペン書き軌跡はコーナーを通過せずに軌跡に「だれ」が生じてしまっている。

これはペン書きにおける実験の際、コーナーで加減速による動的な力を受けてペンがたわみ、正確な軌跡が得られなかったためであると思われる。

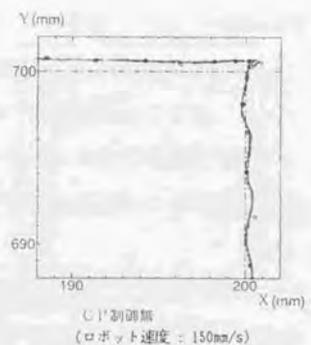
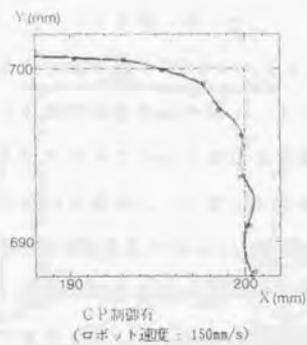
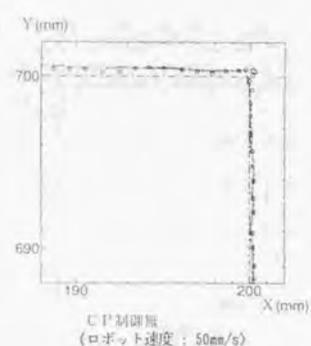
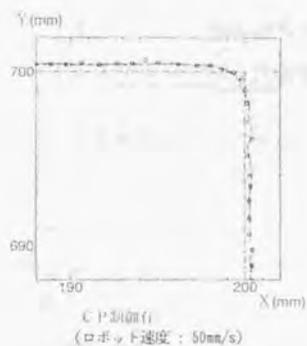
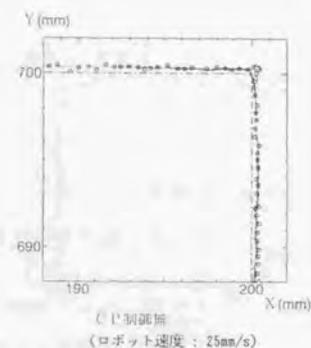
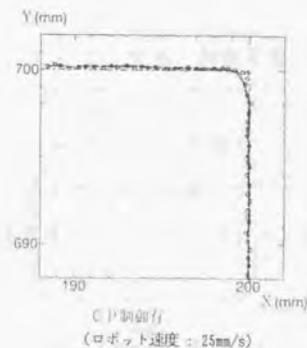
以上をまとめると、本システムは非常に高い動的位置計測能力および速度・加速度計測能力を持つと言える。特に溶接ロボット等でティーチングポイント付近をロボットがどのように通過しているかを検証する用途等に対して本システムは非常に有効であると思われる。

次に本システムの動的位置計測精度 ($\pm 0.2\text{mm}$) を校正基準とした場合PUMAロボットのコーナリングにおける絶対経路精度、速度精度等について以下のようなことがわかる。

(1) ロボットの速度が 25mm/s 、 50mm/s と比較的遅い場合、コーナーにおけるCP制御および位置決め制御 (CP制御無し) が正確に行われている。

(2) ロボットの速度が 150mm/s と比較的速い場合、コーナ付近における軌道はCP制御を行う場合、行わない場合ともに振動的になる。

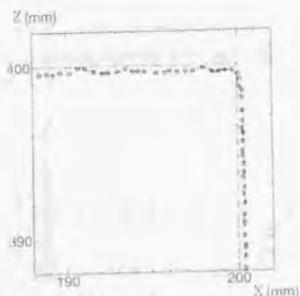
この理由として、コーナリング時の動的な力が大きいためロボットコントローラのモデル同定誤差 (非線形項の無視) が大きく影響したものである。



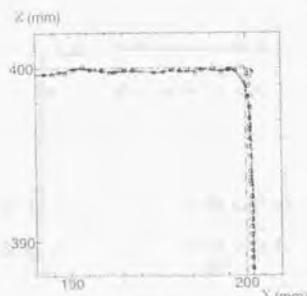
----- : 目標軌道 ——— : ペン書き結果 ○○○ : 計測結果

(注) 格子点 19→18→17 の軌道計測結果

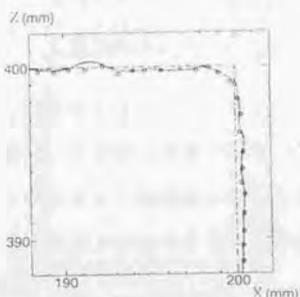
図10.10 コーナリング軌跡の計測結果 (XY座標の変化)



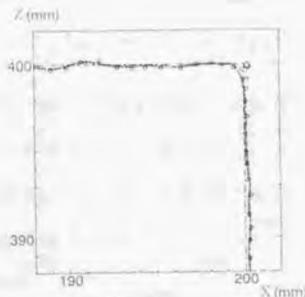
ＣＰ制御有
(ロボット速度：25mm/s)



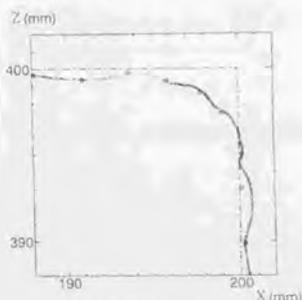
ＣＰ制御無
(ロボット速度：25mm/s)



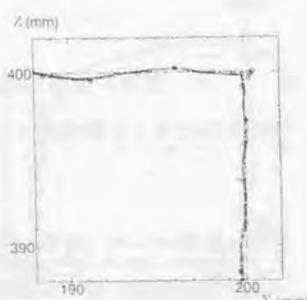
ＣＰ制御有
(ロボット速度：50mm/s)



ＣＰ制御無
(ロボット速度：50mm/s)



ＣＰ制御有
(ロボット速度：150mm/s)



ＣＰ制御無
(ロボット速度：150mm/s)

----- : 目標軌道 ———— : ペン書き結果 ○○○ : 計測結果

(注) 格子点 19→18→13 の軌道計測結果

図10.11 コーナリング軌跡の計測結果 (XZ 座標の変化)

10.5 先端に負荷重量を加えた場合の軌跡計測結果

10.5.1 実験目的

本節では手先に負荷重量を加えた場合ロボットがどの程度たわむかを本計測システムで計測する。本実験の目的は以下の通りである。

- (1) ダイヤルゲージによる計測結果を校正基準とし、本システムがロボットのたわみをどの程度正確に計測できるかを検証する。
- (2) 本システムの静的位置計測精度 ($\pm 0.2\text{mm}$) を校正基準として、PUMA ロボットが負荷重量によりどの程度たわむかを検証する。
- (3) 負荷重量を加えた場合、ロボットコントローラのサーボ系が不安定状態に推移してロボットの鉛直方向の振動が顕著に現れることが肉眼により観察できる。本システムの動的位置計測精度 ($\pm 0.2\text{mm}$) を校正基準としてこの振動の程度を検証する。

10.5.2 実験方法

ロボット先端に図10.12に示すように負荷重量 (3kgf, 6kgf) を加えた状態で図10.13に示すような多角形近似による円軌道を描かせ、その動的位置を本計測システムで計測した。負荷重量としては、ロボットのカタログ上の可搬最大重量が 2.5kgf であるのでこの近傍の値として 3kgf を採用し、ロボットのたわみおよび振動を顕著にするために可搬重量の2倍程度である 6kgf を採用した。

多角形の各頂点においてロボットが1秒間停留するようにプログラミングを行った。ロボットの移動速度は 75mm/s であり、発信器の放電周波数は 50Hz である。円軌道の設定においてはロボットの動作領域内で半径がなるべく大きくなるように考慮した。



図10.12 負荷重量を加えた場合の軌跡計測実験風景

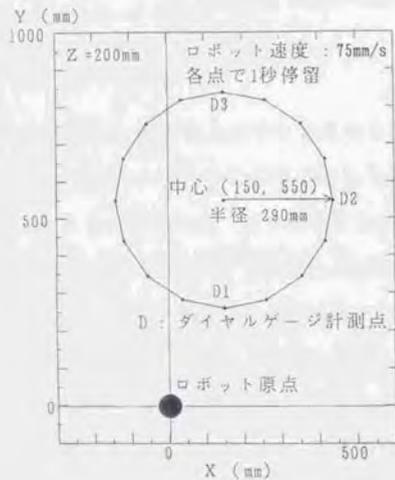


図10.13 多角形近似による円軌道

受波器の配置位置
(ロボット座標系での値)

- $R_1 (-1247, 74, -580)$
- $R_2 (1603, 95, -594)$
- $R_3 (-475, 1815, -560)$
- $R_4 (1227, 1990, 145)$

受波器の配置位置は図10.13中に示す通りであり、前節までの実験と異なり受波器4の設置高さを低くした。円軌道の測定実験の前にあらかじめ第9章の9.3.4節で述べたような36点への格子点への位置決め実験を行い、測定座標系からロボット座標系への座標変換式を求めた。以下本節における動的位置の計測結果は、測定座標をこの変換式に従ってロボット座標系での値に変換したものである。

比較のため図10.13に示すD1, D2, D3において、ダイヤルゲージ(精度0.01mm, 測定範囲10mm)を用いて無負荷の場合を基準としたロボットの鉛直方向のたわみ量を測定した。

10.5.3 実験結果

図10.14に計測結果の側面図を示す。またD1~D3における無負荷の場合のダイヤルゲージの読みと計測結果とが一致するようにして、ダイヤルゲージの計測結果を図中に○印を用いて併記した。

図10.15~図10.17に停留点D1, D2, D3近傍における軌跡計測結果(平面図)を拡大して示す。

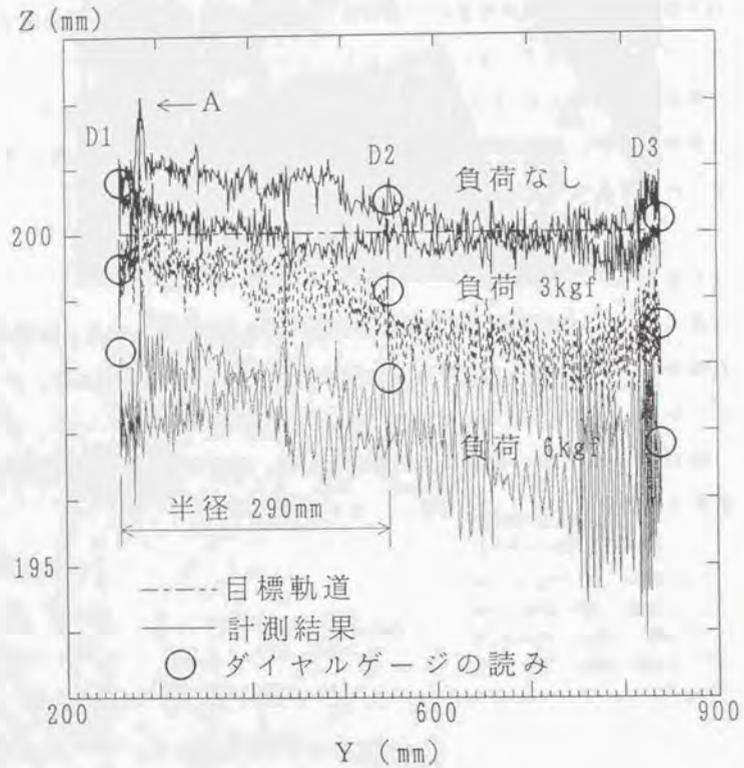


図10.14 負荷重量を加えた場合の軌跡計測結果 (側面図)

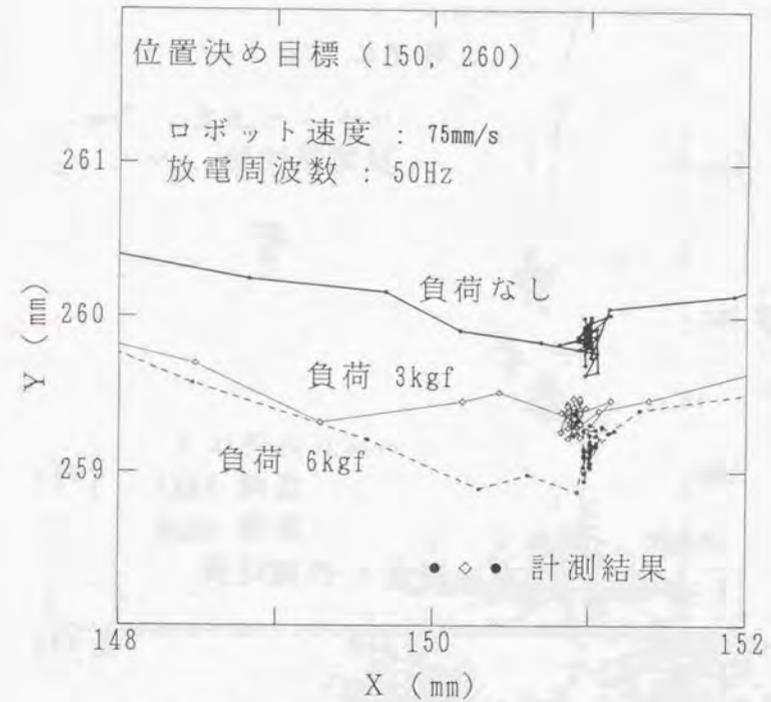


図10.15 D1近傍における軌跡計測結果 (平面図)

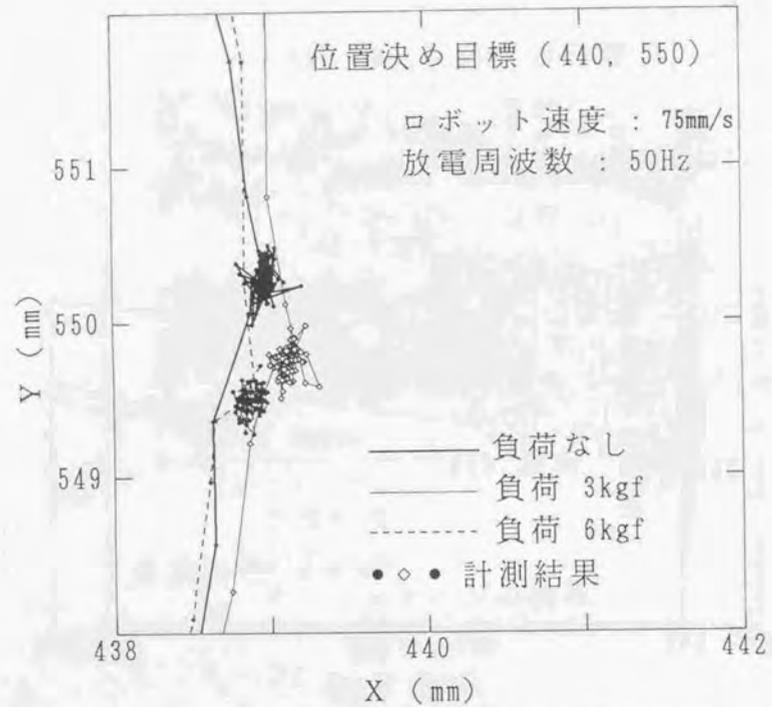


図10.16 D2近傍における軌跡計測結果 (平面図)

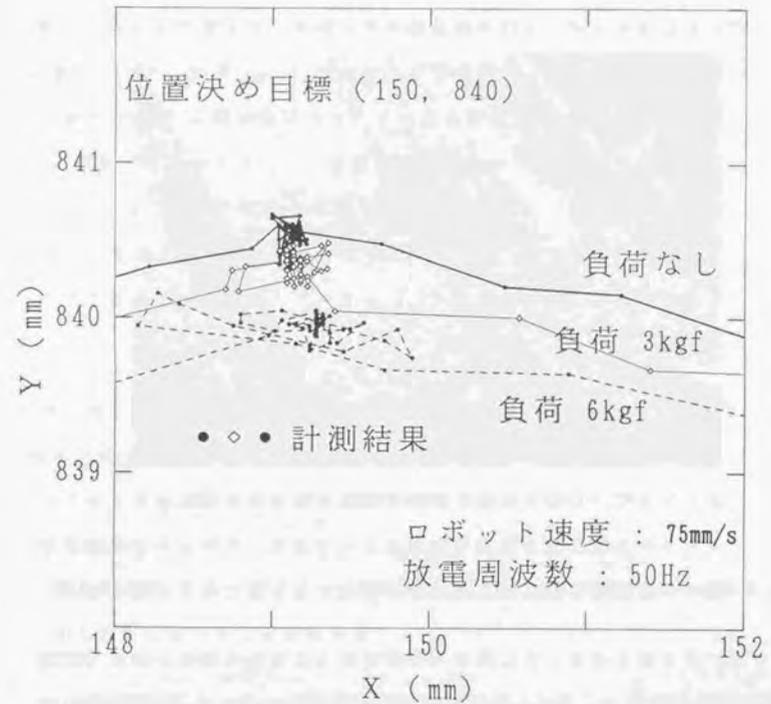


図10.17 D3近傍における軌跡計測結果 (平面図)

10.5.4 考察

図10.14の側面図より以下のようなことがわかる。

(1) ダイヤルゲージの読みと本計測システムの計測結果は0.2mm程度の誤差で一致する。これより本システムがロボットのだわみを測定する用途に十分対応できる計測能力を持つことが判る。

(2) PUMAロボットは可搬重量程度の負荷（本実験では3kgf）が加えられた場合、アームを伸ばした状態で2.0mm程度、アームを縮めた状態で1.5mm程度先端がたわむ。また可搬重量の2倍程度の負荷（本実験では6kgf）が加えられた場合、アームを伸ばした状態で3.5mm程度、アームを縮めた状態で3.0mm程度先端がたわむ。

これらの結果より、負荷重量が加わった場合PUMAロボットのZ方向の絶対位置決め精度は数mmのオーダーで劣化してしまうことが判明した。

(3) ロボットのだわみは軌道のY座標が大きいほど大きくなるが、その値は片持ちはりのたわみのように単純にY座標の3乗に比例して大きくなり、たわみ曲線は複雑な様相を呈する。これはPUMAロボットが多関節型の複雑な機構をとっており、ロボットの姿勢の変化により鉛直方向の剛性が複雑に変化するためであると思われる。

(4) PUMAロボットに最大可搬重量以上の負荷を加えた場合（本実験では6kgf）、サーボ系が不安定状態に推移してアーム先端が鉛直方向に数mmのオーダの振幅で振動する。この振動はアームが伸びた状態（Y座標が750mm以上の場合）で顕著になる。

(5) 図中「A」で示した箇所（Y = 280mm 付近）において各負荷の場合ともにZ座標が突出して増大している。これは図10.18に示す

ようにアームを縮めた状態においてロボットのリンク同士が取り付けねじの頭によりかじってしまうためである。本来ならこのような姿勢はあらかじめロボットコントローラのチェック機能により排除されるべきものである。このように本システムはメーカーの出荷検査の網をくぐるような小さなミスを発見する程の高い位置計測能力を持つ。



図10.18 アームを縮めた状態でのロボットの「かじり」

次に図10.15～図10.17の停留点近傍における拡大図（平面図）より以下のようなことがわかる。

(6) PUMAロボットがZ方向にたわむことに伴い、Y座標の位置決め精度も劣化する。その度合いは負荷に比例し、負荷が3kgfの場合0.2mm、負荷が6kgfの場合0.4mm程度である（但し無負荷の場合のY座標からの偏差）。

またこの結果から、本システムがロボットのだわみに起因するY方向のわずかな位置決め誤差までも検証する能力を持つと言える。

10.6 本章の概要および結言

本章においてはPUMAロボットを測定対象とし、その動的位置（直線軌道、コーナリング軌道）およびアーム先端に負荷重量を加えた場合のたわみを本システムにより計測した。またこれらの計測実験においてロボット、本計測システム以外の第3の校正基準としてダイヤルゲージ、ペン書き軌跡等をできる限り適用し、本システムによる計測データの信頼性を保証した。これらのデータを総合的に考慮すると、本システムの実際のロボットに対する計測能力について以下のようなことが言える。

- (1) 本システムは $\pm 0.2\text{mm}$ 程度の高い動的位置計測精度を持ち、実際のロボットの絶対経路精度（直線経路、コーナリング経路等）、速度精度等の検証に十分応用可能である。
- (2) 本システムはロボットの振動状態、負荷重量によるたわみ等を検証する用途にも使用可能である。

また本システムの計測精度を校正基準としてPUMAロボットの位置決め精度について以下のようなことが言える。

- (3) PUMAロボットの直線軌道に対する絶対経路誤差は場所によっては $\pm 1\text{mm}$ 程度の悪い値をとる。これは機構の寸法誤差に起因するものである。
- (4) PUMAロボットは速度が遅い場合Z方向に振幅 0.2mm 程度のびびり振動を生じる。また手首が旋回する場合動的な力を受けてZ方向に振幅 1mm 程度の振動を生じる。
- (5) PUMAロボットは速度が 50mm/s 程度と遅い場合、コーナにおいてCP制御、位置決め制御（CP制御無し）が正確に行われる。速度が 150mm/s 程度に速くなると、コーナリング後の軌跡が動的な力の

影響で振動的になる。

- (6) PUMAロボットは可搬重量程度の負荷（ 3kgf ）が加わった場合、先端が 2mm 程度たわんでしまう。また過大な負荷（ 6kgf ）が加わった場合たわみは 3.5mm 程度に達し、制御系が不安定になるためZ方向に数 mm の振幅の振動を生じる。

第 10 章
第 1 節
第 2 節
第 3 節
第 4 節
第 5 節
第 6 節
第 7 節
第 8 節
第 9 節
第 10 節
第 11 節
第 12 節
第 13 節
第 14 節
第 15 節
第 16 節
第 17 節
第 18 節
第 19 節
第 20 節
第 21 節
第 22 節
第 23 節
第 24 節
第 25 節
第 26 節
第 27 節
第 28 節
第 29 節
第 30 節
第 31 節
第 32 節
第 33 節
第 34 節
第 35 節
第 36 節
第 37 節
第 38 節
第 39 節
第 40 節
第 41 節
第 42 節
第 43 節
第 44 節
第 45 節
第 46 節
第 47 節
第 48 節
第 49 節
第 50 節
第 51 節
第 52 節
第 53 節
第 54 節
第 55 節
第 56 節
第 57 節
第 58 節
第 59 節
第 60 節
第 61 節
第 62 節
第 63 節
第 64 節
第 65 節
第 66 節
第 67 節
第 68 節
第 69 節
第 70 節
第 71 節
第 72 節
第 73 節
第 74 節
第 75 節
第 76 節
第 77 節
第 78 節
第 79 節
第 80 節
第 81 節
第 82 節
第 83 節
第 84 節
第 85 節
第 86 節
第 87 節
第 88 節
第 89 節
第 90 節
第 91 節
第 92 節
第 93 節
第 94 節
第 95 節
第 96 節
第 97 節
第 98 節
第 99 節
第 100 節

第 11 章

本 研 究 の 結 論

本研究では超音波パルスの伝播時間測定による距離計測を応用してロボットの静的、動的な位置・姿勢を計測する手法を提唱し、それに基づいて簡便・安価で高精度なロボットの運動性能評価システムを開発した。

またそのシステムを用いて数種類の産業用ロボットの絶対位置決め精度を実際に評価した。さらに本システムを用いて実際にスカラロボットをキャリブレーションし、その絶対位置決め精度を改善することに成功した。

本研究の結論は以下の通りである。

1. ロボットの運動性能とその評価システムについて

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、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、関節角のオフセット、リンク長、各軸の芯ずれ等の機構の寸法誤差や減速機のバックラッシ、アームのたわみ等が挙げられる。このような絶対位置決め精度をはじめとするロボットの特性・機能の評価するためには、ロボットの手先の位置・姿勢を外部から何らかの方法で正確に測定するシステムが必要となる。

また三次元空間内でロボットの絶対的な位置・姿勢を測定することは、ロボットの機構誤差の正確なキャリブレーションに必要不可欠な作業である。このキャリブレーションによるロボットの絶対位置決め精度の向上は、ロボットの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条件となる。従って、ロボットの特性・機能の

評価手段のみならず、オフラインプログラミングの普及の手段としても、ロボットの位置・姿勢計測システムの開発は重要な意味を持っていると言える。

しかしながら、広い3次元空間内を任意の軌道を取りながら移動するロボットハンドの位置・姿勢を非接触、リアルタイムに、しかも高精度で計測するシステムは現状では実用段階には至っていない。これは、システムの開発に極めて高度な計測・制御技術、加工技術等が必要とされ、開発に膨大な費用がかかるためである。

このような状況を鑑みると、メーカー、ユーザ双方が手軽に使用できる安価、簡便でしかも精度の高いロボットの位置・姿勢計測システムを開発することは、産業用ロボットの運動性能の評価およびオフラインプログラミングの普及のために現在焦点の急を迫られている重要な事項であると言える。

2. 超音波パルスを用いる方式の利点について

従来研究されている3次元座標の非接触測定法のうち、比較的広い3次元空間内を任意の軌道を取りながら移動するロボットの位置・姿勢を非接触、リアルタイムに測定できる可能性があるのは、LED光を用いたカメラ方式、レーザービームを用いたレーザー方式、超音波パルスを用いた超音波方式の三者であり、一部商品化されているものもある。

このうち前二者は、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、各メーカー、ユーザが独自でシステムを所有するのは困難である。またレーザー方式は姿勢を測定することが極めて困難である。

これに対して超音波方式は、超音波素子が安価であるため他方式に比べてシステム全体が格段に安価、簡便に構成できる。また、計測精度は

空気の揺らぎ等の影響を受け易い音速を利用するためレーザー方式に比べて劣るものの、精度の出やすい距離を用いた三角測量を行うためロボットへの応用に十分なものが得られる。さらに測定空間も比較的大きくとれ、姿勢計測も可能であるので、メーカー、ユーザ双方が手軽に使用できるロボットの運動性能評価システムとして有望なものであると思われる。

以上を考慮して、本研究ではロボットの位置・姿勢計測システムとして、超音波パルスの伝播時間測定による距離計測を応用して距離を用いた三角測量を行う方式を採用した。

3. 3次元位置・姿勢計測原理について

第3章では無指向性点音源近似できる超音波発信器、および水平、鉛直方向に回転可能な指向性の鋭い超音波受波器の存在を仮定し、発信器の3次元位置座標を測定する手法を提唱した。以下それらについて具体的に述べる。

3.1 初期座標系の校正について

計測に先立ち、座標計測の基準となる測定座標系を定めるため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を求めることが可能である。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。

3.2 3次元位置計測原理について

測定座標系が定まった後に、超音波発信器の位置を計算する手法について「三点法」「四点法」「音速推定法」の3種類を提唱した。

「三点法」は3個の受波器を用いた計測手法である。3個の受波器から発信器への各距離が求められれば、3個の受波器の設置位置を中心とし、測定距離を半径とした3球の交点として発信器の位置が求められる。

「四点法」は、冗長な受波器を1個以上用いて合計4個以上の受波器を用い、冗長な距離情報から非線形最小二乗法（ガウス-ニュートン法）により発信器の位置を計算する手法である。

本システムの超音波距離計は、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、音速の補正を行っている。前出の「三点法」および「四点法」はこの音速モニタ法の一つである。この手法では、測定条件等の制限により音速補正センサの設置場所が測定空間と離れてしまい、両者の場所で気温、湿度、空気の流れ等が異なるため正確な音速の補正が行えない場合が生ずる。この問題を解決するため、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、測定空間の音速を変数として取扱い、合計4個の変数を4個の到達時間情報から実時間で計算する「音速推定法」を開発した。

音速推定法の計測原理を以下に簡単に示す。4個の受波器およびその座標を $R_1(0, 0, 0)$ 、 $R_2(a, 0, 0)$ 、 $R_3(b, c, 0)$ 、 $R_4(d, e, f)$ とし、発信器 $T(X, Y, Z)$ と受波器 R_i との間の超音波パルス伝播時間の測定値を t_i とする($i=1\sim 4$)。このとき測定空間内における音速を C として以下の4式が成立する。

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = (C \cdot t_1)^2 \quad (3.11 \text{ 再掲})$$

$$(X-a)^2 + Y^2 + Z^2 = (C \cdot t_2)^2 \quad (3.12 \text{ 再掲})$$

$$(X-b)^2 + (Y-c)^2 + Z^2 = (C \cdot t_3)^2 \quad (3.13 \text{ 再掲})$$

$$(X-d)^2 + (Y-e)^2 + (Z-f)^2 = (C \cdot t_4)^2 \quad (3.14 \text{ 再掲})$$

これらの式において $a\sim f$ は計測に先立ち求められる既知の定数であり、 $t_1\sim t_4$ は計測により求められる定数である。従って求めるべき変数は X, Y, Z, C の4個であり、(3.11)~(3.14)は4元2次連立方程式となるので解析的に解ける。なお C を求める際の複号については解が340m/sに近くなるものを採用する。

3.3 3次元姿勢計測原理について

相対位置関係が既知である3個の発信器を用い、各々の位置を前述した位置測定手法のうちいずれかを用いて測定すれば、ロボットの姿勢を求めることができる。

本システムでは3個の発信器は混信が生じない時間間隔において順番に発信しなければならない、ところが姿勢ベクトルは3個の発信器の位置座標が同時に求まらなければ計算できないので、時間とともに変化するロボットの姿勢を計測する場合、ある1つの発信器が発信した時刻での発信していない他の2つの発信器の位置座標を何らかの方法で推測する必要が生ずる。そこで本研究では、直前および2回前の実際に計測された発信器の位置座標ベクトルを用い、時間外挿することで任意の時刻における位置座標ベクトルを推測計算する手法を考案した。この方式により本計測システムはロボットの動的な姿勢をリアルタイムで計測することが可能である。

4. 電気火花を用いた超音波発信器の開発について

ロボットは様々な位置・姿勢をとるので、本システムで用いる超音波発信器は、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。また超音波パルスが到達した瞬間が正確に検出されるために、立ち上がり鋭い超音波パルスを発信することが要求される。これらを満足すべく、本研究では電気火花を用いた超音波発信器を開発し、

その発信原理、発信器の特性、実際の発信器の設計・製作等について第4章で詳述した。

本発信器はほぼ完全な無指向性点音源とみなせ、このことは他の発信器では実現できない大きな特長である。また放電電気回路を工夫することにより音圧の強力化に成功した。さらに機械振動系を用いないので立上がりがかたくかつ残留振動のない超音波パルスが得られるという特長を持つ。以上を考慮すると、本発信器はロボットの位置・姿勢計測システムにおいてロボットの手先に取り付ける発信器として最適であると思われる。本発信器の主要な特徴を以下に箇条書きにして示す。

- ・ 放電電気回路にC D I (Condenser Discharge Ignition) 方式を採用した。この回路はトリガ素子としてサイリスタを用いているため、放電時刻の電氣的な制御が容易である。またイグニッションコイルを用いて昇圧するため装置が小型化でき、放電の周波数も100Hz以上に設定可能である。
- ・ 放電電気回路のイグニッションコイルの2次側に数100pFの高耐圧セラミックコンデンサを並列に挿入し、火花放電のエネルギー配分を誘導性火花放電から容量性火花放電に片寄せさせることにより、発生する超音波パルスの音圧を約10倍に高めた。
- ・ 本発信器はギャップの正面軸に対して約 $\pm 80^\circ$ まで音圧が一定値を保ち、ほぼ完全な無指向性を実現できる。
- ・ 放射ノイズ対策としてシールドを施し、電源ノイズ対策としてノイズカットトランスを用いた。

5. 超音波距離計測システムの開発について

第5章では電気火花を用いた超音波発信器とコンデンサ型の受波器を組み合わせて超音波距離計測システムを構成した。本距離計測システムは、ゼロクロス点の採用、音速のリアルタイム補正により従来の市販の超音波距離センサに比べて高い距離測定精度を実現している。

1 μ mの位置決め精度を持つNC工作機械を校正基準として本距離計測システムの精度を検証した結果、測定誤差の平均値は1mの測定範囲で ± 0.1 mm以内、2mの測定範囲で ± 0.3 mm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。

風洞を用いて近似的な無風状態で距離計測を行った結果、通常の密閉しない実験室内に比べて高い精度が得られた。これより測定空間の空気の安定化に配慮すれば、本距離計測システムの精度はさらに向上するものと思われる。

6. 位置・姿勢自動追尾計測システムの開発について

第6章では、第5章で開発した超音波距離計測システムと受波器回転装置を組み合わせて用い、実際にロボットの位置・姿勢自動追尾計測システムの開発を行った。

本システムで用いる受波器は半減角が $\pm 6^\circ$ とかなり指向性が鋭い。このため受波器をハーモニックドライブ減速機付きDCサーボモータにより水平、鉛直方向に回転可能にし、常に受波面が発信器に対して正確に正面を向くように制御することにした。このことにより従来の固定された受波器を用いるシステムに共通な、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。このことは受波器を測定空間であるロボット作業領域のすぐ外側に設置することが可能であり、計測に必要なスペースが小さくて済むという利点も生み出している。

7. NC工作機械を校正基準とした本システムの位置計測精度の検証実験について

第7章では開発した計測システムの静的および動的な位置計測精度を精度 $1\mu\text{m}$ のNC工作機械を校正基準として検証した。

実験に際しては発信器を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した。発信器を測定空間内の36点の格子点にNC工作機械を用いて精度 $1\mu\text{m}$ で位置決めし、各点の座標を本システムで計測した。

この実験の結果、位置計算方法として音速推定法を用いた場合本システムは、 $X \times Y \times Z$ が $900 \times 400 \times 400\text{mm}$ の範囲内において静止点の $X Y Z$ 各座標を誤差 $\pm 0.3\text{mm}$ 以下、標準偏差 0.2mm 以内で計測できることが確認できた。また測定範囲を $300 \times 400 \times 400\text{mm}$ の範囲内に制限した場合これらの値は $\pm 0.2\text{mm}$ 、 0.1mm までに改善される。

NC工作機械に円軌跡、直線軌跡を描かせ、その軌跡を測定した。この結果本システムが、発信器の移動速度が $4\text{m}/\text{min}$ の場合、直線経路を $\pm 0.2\text{mm}$ 以内、円経路を $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の誤差で計測できることが確認できた。

ロボットの絶対位置決め精度、絶対経路精度が悪く、それらの高精度な測定手段が実用化されていない現状を鑑みれば、本計測システムの静的および動的な位置の計測精度は実際のロボット計測の用途に十分耐えられるものであると思われる。

また第7章では、本計測システムの位置計測誤差を生じさせる要因を、i) 発信器と受波器との間の距離計測誤差、ii) 初期座標系の校正誤差に分類し、これらが本計測システムの位置計測精度におよぼす影響を大型計算機を用いてシミュレーションした。この結果本システムの計測精度は測定空間の中央付近で $\pm 0.3\text{mm}$ 程度であり、この精度はNC工作機械を用いた精度検証実験の結果と同程度であった。これら2つの誤差（距

離計測誤差、初期座標系校正誤差）は測定空間内の温度・湿度分布、局所的な空気の流れ、空気の揺らぎ等に伴う音速の変化を本計測システムが正確に補正しきれないことから主に生じており、本システムで実現された $\pm 0.2 \sim \pm 0.3\text{mm}$ の位置計測精度は限界の値であると思われる。

8. 本システムの姿勢計測精度の検証実験について

第8章ではハーモニックドライブ減速機付きDCサーボモータを2軸に配した姿勢基準器（角度分解能 0.01125° ）を製作し、これを校正基準として開発した計測システムの姿勢計測精度を検証した。

実験に際しては姿勢基準器の2軸のうち1軸を固定した状態で残りの1軸を回転させ、その回転角度を姿勢ベクトルの計測値の変化から計算し、これとエンコーダの読み（校正基準）とを比較した。

この結果本計測システムの姿勢計測精度は以下の通りであることが検証された。

- ・ 本システムは水平面内の静的な回転角度を、測定誤差 0.05° 以下、標準偏差 0.15° 以内で計測できる。また鉛直面内の静的な回転角度を、測定誤差 0.2° 以下、標準偏差 0.5° 以内で計測できる。
- ・ 本システムは水平面内の動的な回転角度を測定誤差 0.1° 程度、鉛直面内の動的な回転角度を測定誤差 0.2° 程度で計測できる（ただし回転角速度が $6^\circ/\text{s}$ の場合）。
- ・ 鉛直面内での計測精度が水平面内のそれに比べて劣るのは、実験の都合上4番目の受波器を発信器の上方に設置できず、発信器のZ座標の計測精度が劣化したためである。3個組発信器の構造を工夫し、受波器の設置条件を変更すれば鉛直面内での計測精度は向上することが予想される。

9. 実際のロボットの静的位置・姿勢計測について

第9章では開発した3次元位置・姿勢計測システムを用いて実際のロボットの静的位置を計測した。測定対象としては小型6自由度多関節型ロボット(通称PUMA)、大型6自由度多関節型ロボット(通称Panarobo)、小型教育用5自由度多関節型ロボット(通称ムーブマスター)、3自由度スカラロボットを採用した。またPUMAロボットに関して本システムを用いて静的姿勢を計測した。

これらの実験の結果、本システムの計測能力について以下のことが判明した。

- ・ PUMAロボットの静的位置を計測した。その際ダイヤルゲージをロボット、本システム以外の第3の校正基準として用いて計測データの信頼性を保証した。その結果本システムは $\pm 0.2\text{mm}$ 程度の高い静的位置計測精度を持ち、実際のロボットの精度検証に十分応用可能であることが確認された。
- ・ スカラロボットの関節角オフセット、リンク長等を本システムの静的位置計測結果を用いてキャリブレーションしたところ、絶対位置決め精度が格段に(1mm程度)向上した。これより本システムが実際のロボットのキャリブレーションに十分対応可能であることが確認された。

次に本システムの計測精度($\pm 0.2\text{mm}$, $\pm 0.1^\circ$)を根拠とした場合、産業用ロボットの位置決め精度について以下のようなことが判明した。

- ・ ロボットの絶対位置決め精度は通常カタログに表示されている高い位置繰返し精度に比べてかなり悪く、代表的な組立ロボットであるPUMAロボットで $\pm 0.7\text{mm}$ 程度にも達する。

- ・ 構造上一般に精度が高いと言われているスカラロボットの場合でも、関節角オフセット、リンク長等のパラメータを全くキャリブレーションしない状態では $\pm 1\text{mm}$ 程度の絶対位置決め誤差を生じてしまう。

- ・ ロボットの絶対位置決め精度はロボットの構造、大きさ、用途、等により異なり、スカラロボット、PUMAロボット、Panarobo、ムーブマスターの順に高い値をとる。

10. 実際のロボットの動的位置計測について

第10章ではPUMAロボットを測定対象とし、その動的位置(直線軌道、コーナリング軌道)およびアーム先端に負荷重量を加えた場合のたわみを本システムにより計測した。またこれらの計測実験においてロボット、本計測システム以外の第3の校正基準としてダイヤルゲージ、ペン書き軌跡等をできる限り適用し、本システムによる計測データの信頼性を保証した。

これらの実験の結果、本システムの計測能力について以下のことが判明した。

- ・ 本システムは $\pm 0.2\text{mm}$ 程度の高い動的位置計測精度を持ち、実際のロボットの絶対経路精度(直線経路、コーナリング経路等)、速度精度等の検証に十分応用可能である。
- ・ 本システムはロボットの振動状態、負荷重量によるたわみ等を検証する用途にも使用可能である。

また本システムの位置計測精度($\pm 0.2\text{mm}$)を校正基準としてPUMAロボットの動的な精度について以下のようなことが判明した。

- ・ P U M A ロボットの直線軌道に対する絶対経路誤差は場所によっては±1mm程度の悪い値をとる。これは機構の寸法誤差に起因するものである。
- ・ P U M A ロボットは速度が50mm/s程度と遅い場合、コーナにおいてC P 制御、位置決め制御（C P 制御無し）が正確に行われる。速度が150mm/s程度に速くなると、コーナリング後の軌跡が動的な力の影響で振動的になる。
- ・ P U M A ロボットは可搬重量程度の負荷（3kgf）が加わった場合、先端が2mm程度たわんでしまう。また過大な負荷（6kgf）が加わった場合たわみは3.5mm程度に達し、制御系が不安定になるためZ方向に数mmの振幅の振動を生じる。

以上が本研究で得られた結論である。これらをさらに要約すれば、本研究の成果は以下の2点に絞られる。

- (1) 電気火花放電を発信器として用い、それから測定空間の周囲に配置した複数の受波器への超音波パルスの伝播時間を利用して、1m立方程度の空間内における発信器の静的・動的位置を±0.2mmの高い精度で計測するシステムの開発に成功した。
- (2) 開発したシステムを用いてロボットの3次元位置を実際に計測し、現在の産業用ロボットの絶対位置決め精度がカタログに示されている高い位置繰返し精度に比べてかなり悪く、ロボットの種類によっては数mmに達してしまうことを実証してみせた。

本システムは計測精度が高く、カメラ方式やレーザ方式に比べて簡便、安価であるので、ロボットの位置・姿勢計測の他にも、クレーンの挙動を計測して揺れをリアルタイムで制動したり、病院で目まい患者の頭部の揺れを計測して病状を診断したり等の用途にも使用可能であることが予想され、その応用範囲は枚挙にいとまがない。今後しかるべきメーカーにより本研究の原理に基づいた計測システムの製品化・実用化が行われ、工業界をはじめとした様々な分野の発展に多少とも寄与することができるならば、筆者の望外の幸せである。

参考文献

第1章

- (1) ISO DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS 9238 (MANIPULATING INDUSTRIAL ROBOTS -PERFORMANCE CRITERIA AND RELATED TESTING METHOD), the International Organization for Standardization, (1988) 1.
- (2) 前田祐司: 産業用ロボットの性能試験法に関する規格と測定方法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91 講演論文集, (1991) 407.
- (3) 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.
- (4) 高野政晴: 精密ロボットにおける機構の改善, 精密工学会誌, 51, 11, (1985) 14.
- (5) 遠山茂樹: ロボットのモデリングとキャリブレーション, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 講演論文集, (1992) 455.
- (6) 「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.
- (7) K.Mori and Y.Maeda: Evaluation of Pose Accuracy by Using Cube-Method as Performance Test, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots(ISIR), (1989) 883.
- (8) M.Ishii, S.Sakane, M.Kakikura and Y.Mikami: A 3-D Sensor System for Teaching Robot Paths and Environments, The International Journal of Robotics Research, 6, 2, (1987) 45.
- (9) 齊藤正樹: 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.
- (10) J.A.Gilby and G.A.Parker: Laser Tracking System to Measure Robot Arm Performance, Sensor Review, 2, 4, (1982) 180.
- (11) ASLレーザ追跡変位測定システムLASERTRACE, AUTOMATIC SYSTEMS LABORATORIES LTD., (1992) 1.
- (12) 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.

- (13) K.Takamasu, R.Furutani and S.Ozono: Development of the Three Dimensional Coordinate Measuring System with Ultra-Sonic Sensors, Proc. of the International Symposium on Metrology for Quality Control in Production, (1984) 300.
- (14) GP-8-3D Sonic Digitizer Operator's Manual, Science Accessories Corp., (1985) 1.
- (15) 中村 収, 後藤充夫, 豊田幸司, 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, 精密工学会誌, 57, 5, (1991) 831.
- (16) K.Lau et al.: Automatic Laser Tracking Interferometer System for Robot Metrology, Prec.Eng., 8, 1, (1986) 3.
- (17) M.Riemensperger and R.Gottwald: KERN SMART 310 - Leica's Approach to High Precision Dynamic 3D Coordinate Determination, Leica Aarau Ltd, advertisement, (1992) 1.

第2章

- (18) 新井民夫: 産業用ロボットの精度論, 精密工学会誌, 51, 11, (1985) 3.
- (19) 牧野 洋: ロボットの精度論, 精密工学会誌, 51, 11, (1985) 7.
- (20) 後藤 晃, 若杉幸弘, 服部親将: スカラ型ロボットのキャリブレーションの1方法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91 講演論文集, (1991) 387.
- (21) 遠山茂樹, 波多江茂樹: スカラロボットの絶対位置決め精度の補正, 精密工学会誌, 58, 8, (1992) 79.
- (22) 古屋信幸, 牧野 洋: SCARA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) 69.
- (23) 毛利峻治, 宮川 晃, 大淵博光, 松浦義則: ニューラルネットワークによるロボットの機構誤差補正方式, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91 講演論文集, (1991) 391.
- (24) D.E.Whitney, C.A.Loizinski and J.M.Rourke: Industrial Robot Forward Calibration Method and Results, Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 108, March, (1986) 1.

- (25) J. Chen and L. M. Chao: Positioning Error Analysis for Robot Manipulators with All Rotary Joints, Proc. of 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1989) 1011-1016.
- (26) J. H. Borm and C. H. Menq: Determination of Optimal Measurement Configurations for Robot Calibration Based on Observability Measure, The International Journal of Robotics Research, 10, 1, (1991) 51.
- (27) P. Judd and A. B. Knasinski: A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification, Proc. of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1987) 351.
- (28) B. W. Mooring and S. S. Padavala: The Effect of Kinematic Model Complexity on Manipulator Accuracy, Proc. of 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1989) 593.
- (29) H. Makino and N. Furuya: Performance Tests for CP Motion with the SCARA Robot, Proc. of 15th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), (1985) 1011.
- (30) Ch. Hoffmann: Accuracy-Tests for Industrial Robots, Robot Control 1988 (SYROCO'88), (1988) 103.
- (31) 垣野義昭, 井原之敏, 富永賢二, 松浦 弘: D B B法による多関節ロボットの軌跡誤差の原因診断に関する研究(一第1報: 診断用ソフトウェアの開発と検証一), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91 講演論文集, (1991) 403.
- (32) ハーモニックドライブ社カタログ No. 2-2T-88, (1988) 18.
- (33) 神谷好承: ロボットの高速化・高精度化, 精密工学会誌, 51, 11, (1985) 20.
- (34) C. P. Day: Robot Accuracy Issues and Methods of Improvement, Proc. of 17th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), (1987) 5-1.
- (35) 中村 収: 四次元座標計測システムの動向調査, 計量研究所報告, (1990) 76.

- (36) 奥谷憲男, 上田富康, 増田一豊: 高分解能レーザエンコーダ, M&E, 4, (1987) 88.
- (37) 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.
- (38) 公門敬治, 石松隆和, 中里真一, 船川正哉: 2波長式超音波測距方式を利用する産業用ロボットの教示について, 第3回ロボット学会学術講演会, (1985) 5.
- (39) ULTRASONIC SENSOR APPLICATION MANUAL, (株)村田製作所, (1988) 1.

第3章

- (40) 中川 徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, (1982) 95.
- (41) C. Durieu and H. Clergeot: Navigation of a Mobile Robot with Ultrasonic Beacons.
- (42) 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.

第4章

- (43) 高山良一, 伊勢悠紀彦: 狭指向性超音波マイクロホン, 特許広報昭 60-25956, (1985) 267.
- (44) K. Matsuzawa: Condenser Microphones with Plastic Diaphragms for Airborne Ultrasonics, Journal of the Physical Society of Japan, 13, 12 (1958) 1533.
- (45) 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) 142.
- (46) 山内一郎: 超音波距離センサによる高精度非接触測定, 計測技術'88, 増刊号, (1988) 100.
- (47) UDM-2型超音波距離センサ(カタログ), 超音波工業株式会社, (1986) 1.
- (48) C. Biber, S. Ellin, E. Shenk and J. Stempeck: The Polaroid Ultrasonic Ranging System, Proc. of 67th Convention of an Audio Engineering Society, (1980) 1.

- (49) Condenser Microphones Data Handbook, Bruel & Kjaer, (1982) 1.
- (50) N. Takanashi, K. Higuchi, T. Horiguchi, H. Fukuchi and T. Tanigawa: A Robotic Ultrasonic Imaging System Using a Si Phased-array Receiver, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), (1990) 173.
- (51) 藤尾浩司, 大谷隆彦: 微小火花放電を用いた水中球面波音源, 超音波研究会資料 US87-50, (1988) 45.
- (52) 大谷隆彦, 山下一雄, ト部康正: 衝撃放電によるインパルス音波の発生とその伝播, 超音波研究会資料 US75-47, (1976) 25.
- (53) 中寺和哉, 渡辺好章, 大谷隆彦: 球面インパルス音波を用いた大気の音速吸収係数の測定に関する検討, 日本音響学会誌, 43, 12, (1987) 947.
- (54) J I S用語辞典 電気編, 日本規格協会, (1984) 582.
- (55) 前原八寿之, 井出栄三: アークサウンド, TRIGGER, 5, (1989) 52.
- (56) 中野義映: 高電圧工学, オーム社, (1968) 68.
- (57) 中野義映: 高電圧工学, オーム社, (1968) 5.
- (58) 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 US87-59, (1988) 37.
- (59) 大谷隆彦, 竹田正之: 衝撃放電により生ずるインパルス音波の生成過程, 日本音響学会講演論文集, (1984) 661.
- (60) 渡辺好章, 菖浦雅彦, ト部康正: 大気中における大勢力インパルス音波の伝播について, 日本音響学会講演論文集, (1988) 129.
- (61) 木下 和, 大谷隆彦: 衝撃火花放電音源の電極近傍における非線形伝播, 超音波研究会資料 US85-58, (1986) 29.
- (62) 渡辺好章, 大谷隆彦, ト部康正: 火花放電および細線爆発により発生する衝撃波のシュリーレン法による観測: 日本音響学会誌, 37, 6, (1981) 267.
- (63) 松川真美, 大谷隆彦: 微小火花放電の等価球音源, 日本音響学会講演論文集, (1987) 783.
- (64) 早坂壽雄, 吉川昭吉郎: 音響振動論, 丸善, (1974) 503.
- (65) 渡部一郎: 内燃機関, コロナ社, (19??) 150.
- (66) 古濱庄一: 内燃機関工学, 産業図書, (19??) 155.
- (67) 菅野玄之助, 真保吾一, 飯島敏雄: 内燃機関工学概論, (19??) 8-1.

- (68) 在田保信, 森 敏, 由宇義珍: 電力制御回路設計ノウハウ, C Q出版社, (1985) 206.
- (69) サイリスタ・エレクトロニクス編集委員会編: サイリスタの応用(下), 丸善, (1974) 110.
- (70) エミガード DSS710 D 223S 12-22 (カタログ), (株)村田製作所, (1985) 1.
- (71) 宅間 董, 柳父 悟: 高電圧大電流工学, 電気学会, (19??) 139.
- (72) 三井田惇郎: 音響工学, 昭晃堂, (1987) 16.
- (73) 中野義映: 高電圧工学, オーム社, (1968) 57.
- (74) 藤本正男: 電気接点材料, オーム社, (1956) 1.
- (75) 藤本正男: 電気接点材料, オーム社, (1956) 50.
- (76) 中高圧セラミックコンデンサ1kV~6.3kV (カタログ), (株)村田製作所, (1990) 1.
- (77) 砂川重信: 電磁気学, 岩波書店, (1977) 272.
- (78) 岡村迪夫: 解析ノイズメカニズム, C Q出版社, (1987) 1.
- (79) 実験で学ぶノイズ対策技術, トランジスタ技術, 24, 6, (1987) 331.
- (80) EMI/RFI SHIELDING PRODUCTS (カタログ), 太陽金網(株), (1988) 1.
- (81) T D Kノイズフィルタ (カタログ), T D K (株), (1988) 1.

第6章

- (82) 神谷好承, 青柳誠司, 岡部佐規一, 横山恭男: サーボ増幅器の性質を考慮したサーボ系の動特性の解析, 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 669.
- (83) 高木章二: デジタル制御入門, オーム社, (1986) 144.
- (84) 荒木光彦: デジタル制御理論入門, 朝倉書店, (1991) 123.
- (85) 有本 卓: カルマン・フィルター, 産業図書, (1977) 202.
- (86) 村田 智, 広瀬武志: 自律移動ロボットのリアルタイム位置計測, 第32回自動制御連合講演会前刷, (1989) 397.

第7章

- (87) 奥野忠一, 片山善三郎, 上郡長昭, 伊東哲二, 入倉則夫, 藤原信夫: 工業における多変量データの解析, 日科技連出版社, (1986) 17.

- (88) 日本物理学会編：計算機による物理実験データ処理，サイエンス社，
(1973) 111.

第8章

- (89) 伝動関連機器カタログ，(株)三木ブーリ，(1991) 5.

第9章

- (90) 上松昌哉，吉田佐智男，高野政晴，佐々木 健：障害物がある場合のロボットの最短時間制御（第2報）—2自由度DDロボットに適用した場合—，昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1987) 107.
- (91) 川崎ユニメート500型PUMA取扱い説明書，川崎重工業(株)油圧機械事業部，(1984) 8.
- (92) Pana Robo AW-8060カタログ，松下電器産業(株)溶接機事業部，(1989) 1.
- (93) ムーブマスターII取扱い説明書，三菱電機(株)，(1982) 1.
- (94) YAMAHA ROBOT YK5012 SERIES 取扱い説明書，ヤマハ発動機(株)，(1990) 1.
- (95) 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.
- (96) 牧野 洋：SCARAロボット開発論，精密工学会誌，53，11，(1987) 1697.

本研究に関する発表または論文は次の通り。

本研究に関する発表

精密工学会

- (97) 青柳，高野，佐々木：超音波によるロボットの位置・姿勢計測に関する研究，昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会論文集，(1987) 101.
- (98) 青柳，高野，佐々木：超音波によるロボットの位置・姿勢計測に関する研究（第2報）—3次元位置・姿勢計測結果—，昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会論文集，(1988) 49.
- (99) 青柳，岡部，佐々木，高野：超音波によるロボットの位置・姿勢計測に関する研究（第3報）—発信器の改良—，1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1989) 89.
- (100) 横橋，青柳，岡部，佐々木，高野：超音波によるロボットの位置・姿勢計測に関する研究（第4報）—積層型圧電素子を用いた発信器の開発—，1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1990) 1081.
- (101) 青柳，岡部，佐々木，高野：超音波によるロボットの位置・姿勢計測に関する研究（第5報）—受波器の個数と測定精度との関係—，1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1990) 1083.
- (102) 青柳，岡部，佐々木，高野：超音波によるロボットの位置・姿勢計測に関する研究（第6報）—2次元位置の自動追尾計測—，1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1990) 547.
- (103) 青柳，神谷，岡部，佐々木，高野：超音波によるロボットの位置・姿勢計測に関する研究（第7報）—姿勢の自動追尾計測—，1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1992) 1045.
- (104) 青柳，神谷，岡部，佐々木，高野：超音波によるロボットの位置・姿勢計測に関する研究（第8報）—NC工作機械を用いた計測精度の検証—，1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1992) 1047.

ロボット学会

- (105) 青柳, 岡部, 佐々木, 高野: 超音波センサによるロボットの位置・姿勢計測システム (第1報) - 冗長センサを用いた音速の精密補正 -, 日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集, (1991) 149.
- (106) 奥田, 青柳, 神谷, 岡部: 超音波センサによるロボットの位置・姿勢計測システム (第2報) - 強力超音波発信器の開発とその応用 -, 日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集, (1991) 151.
- (107) 後藤, 青柳, 神谷, 岡部: 超音波センサによるロボットの位置・姿勢計測システム (第3報) - 3次元自動追尾精度の検証 -, 日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集, (1991) 153.

超音波シンポジウム

- (108) 青柳, 神谷, 岡部: ロボット計測用強力超音波発信器の開発, 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集, (1991) 179.

日本機械学会

- (109) 青柳, 神谷, 岡部, 佐々木, 高野: 超音波を用いたロボットの位置・姿勢精度計測システムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92講演論文集 (Vol.B), (1992) 461.

本研究に関する論文

- (110) 青柳, 岡部, 佐々木, 高野: 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.
- (111) S.Aoyagi, Y.Kamiya, S.Okabe: Development of Powerful Airborne Ultrasonic Transmitter for Robot Metrology, Japanese Journal of Applied Physics, 31 (1992) Supplement 263.

国際会議等

- (112) S.Aoyagi, K.Sasaki and M.Takano: Measurement of 3-D Position and Orientation of a Robot Using Ultrasonic Sensor System, Proc. of China-Japan Symposium on Mechatronics, (1988) 138.

- (113) S.Aoyagi, S.Okabe, K.Sasaki and M.Takano: Measurement of 3-D Position and Orientation of a Robot Using Ultrasonic Waves, Proc. of International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), (1991) 2466.
- (114) S.Aoyagi, Y.Kamiya and S.Okabe: Development of Automatic Tracking System of 3-D Position of a Robot, Proc. of 1992 Japan-U.S.A Symposium on Flexible Automation, (1992) 111.

本研究に関する報告書

- (115) 青柳: 超音波センサを用いたロボットの3次元位置, 姿勢計測システムの開発, ハイアック・ニュース, 11, 4 (1991) 14.

本研究に関する解説記事

- (116) 青柳: 超音波センサによるロボットの位置・姿勢計測システム, センサ技術, 12, 12 (1992) 64.

本研究に関する特許

- (117) 青柳, 岡部, 佐々木, 高野: 超音波によるロボットの3次元位置・姿勢計測装置及びその計測方法, 特願平4-29236号, (1992) 1.

付録

ロボットの運動性能評価システムに関する文献調査結果

ロボットの精度評価システムについて概説したもの

- [1] S. Inagaki: A Discussion on Positioning Accuracy on Industrial Robots, Proc. of 9th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), (1979) 679-690.
[内容] ロボットの精度評価方法を列挙。文献が古く、3次元での経路精度評価装置は未開発となっている。
- [2] Bela Scheffer, Geometric Control and Calibration Method of an Industrial Robot, Proc. of 12th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Paris, France, (1982) 331-339.
[内容] ダイヤルゲージ方式 (分解能0.01mm, 範囲±15mm), セオドライト方式 (分解能0.001"), 多関節型座標測定器 (型名ETALO, 3自由度で各エンコーダは20arcsecの精度を持つ。絶対精度±0.15mm), キューブ方式等の例を出し、それらの実現可能性と要求される仕様を述べている。
- [3] 産業用ロボットの特性・機能測定方法, JIS B 8432, (1983) 1-14.
- [4] Z.S. Roth, B.W. Mooring and B. Ravani: An Overview of Robot Calibration, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 5, (1987) 377-385.
[内容] ロボットのキャリブレーションをレベル1から3に分類して説明している。
- [5] M. Wilson: Robot position sensing and performance testing, Measurement+Control (G. B. B.), Vol. 20, No. 5, (1987) 69-73.
[内容] キューブ方式, ケーブル方式, レーザ方式の各々について説明している。現在はSelspine社のシステムが一般的だが、将来的にはLau等のレーザ方式が期待されるとしている。また、コストの点からケーブル法も推奨している。
- [6] C.P. Day: Robot Accuracy Issues and Methods of Improvement, Proc. of 17th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Chicago, Illinois, (1987), 5-1 - 5-23.
[内容] 各種測定法の長短を表にまとめている。
- [7] 前田祐司, 稲垣荘司: ロボットの信頼性, 情報処理, Vol. 29, No. 2, (1988) 120-128.
- [8] 「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) 8-31.

- [9] S. Inagaki, Y. Ando and S. Suzuki: Characteristics of Measuring Equipments for Manipulating Industrial Robots, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1989) 987-992.

[内容] 計測装置の現況を調査、各計測法の優劣を比較表にしている。

- [10] 中村 収: 四次元座標計測システムの動向調査, 計量研究所報告, (1990) 76-85.

[内容] 三次元座標の他に、機能性あるいは測定時間の一次元を加えて、三次元座標計測システムを四次元座標計測システムと呼んでいる。リモートセンシングが可能な手法をほぼ完全に網羅している。レーザービームを用いて距離-距離計測を行う手法を推奨している。

- [11] 前田祐司: 産業用ロボットの性能試験法に関する規格と測定方法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 91 講演論文集, (1991) 407-408.

[内容] キューブ方式, カメラ方式, ダイヤルゲージ方式を比較し、位置繰返し精度の評価に限れば、コストが安く精度が高いキューブ方式が良いとしている。

- [12] 遠山茂樹: ロボットのモデリングとキャリブレーション, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 92 講演論文集, (1992) 455-460.

ダイヤルゲージ方式

- [13] C. Morgan: The Rationalisation of Robot Testing, Proc. of 10th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), (1980) 399-406.

[内容] ダイヤルゲージを用いてロボットの位置繰返し精度を評価する手法を述べている。またノギスと治具板を組合せた評価法も提案している。

近接センサ方式

- [14] V. Yeshnikov and R. Soudunsaari: PUMA-Robot Evaluation for Laser Manufacturing Applications, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1989) 485-493.

[内容] レーザーカッティング, レーザー溶接を用途として想定した場合のロボットの精度評価法を提案している。渦電流センサ (Mikron-02) を用いて、2.5次元的な測定を行なう。このセンサは3.7mmの測定範囲で0.0001mmの精度を持つ。

リニアスケール方式

- [15] J. M. Renders, E. Rossignol, M. Becquet and R. Hanus: Kinematic Calibration and Geometrical Parameter Identification for Robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 5, (1991) 721-732.

[内容] 磁気センサを備えた1次元測定器を自作 (精度0.1mm), それをロボットに1直線上で動かさせる。文献調査が詳しい。研究内容自体は貧弱。

レーザ干渉計方式

- [16] K. Shirase, N. Tanabe, M. Hirao and T. Yasui: New Approach to Calibrate an Articulated Robot Using Laser Interferometer, Second International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR '92), Tsukuba, Japan, (1992).

[内容] ロボット作業領域内の様々な場所に直線を設定し、その上に等間隔に5点程度の目標点を配置し、ロボットをそこに順次位置決めし、その際のロボットの移動距離をレーザ干渉計で測定した。その値とロボットの指令値とが最も一致するようなロボットの力学モデルを求めることにより、ロボットのリンクパラメータをキャリブレーションした。

基準穴挿入方式

- [17] L. P. Poulloy and R. B. Kelley: Improving the Precision of a Robot, Proc. of 1984 IEEE International Conference on Robotics, (1984) 62-67.

[内容] キューブに数1.0個の基準穴が設けてあり、そこにロボットの手首を挿入する。キャリブレーション後きれいに挿入可能になった。局所的なキャリブレーションに成功。

- [18] T.-W. Hsu and L. J. Everett: Identification of the Kinematic Parameters of a Robot Manipulator for Positional Accuracy Improvement, Proc. of the 1985 ASME International Computers in Engineering Conference and Exhibition, Boston, MA, (1985) 263-267.

[内容] ジグ板上の基準穴にピンを挿入する方式を提案。計算のみで実験は行っていない。

- [19] W. K. Veitschegger and C. H. Wu: A Method for Calibration and Compensating Robot Kinematic Errors, Proc. of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1987) 39-44.

[内容] ドウェルピン(直径0.25インチ)をスタンド(17×17インチ)に設けられた多数の基準穴(直径0.251インチ)に挿入して、ロボットのキャリブレーションを行なった。

- [20] 後藤 晃, 若杉幸弘, 服部親将: スカラ型ロボットのキャリブレーションの1方法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91 講演論文集, (1991), 387-390.

[内容] 2自由度スカラ型ロボットの先端に穴加工用のドリルユニットを取り付け、厚さ3.2mmの鉄板の300mm×300mmの領域に100mm間隔で格子状に16点の穴を加工する。作業後、座標投影機(公称分解能0.01mm)で穴の重心位置を求める。パラメータの補正前は1mm以下であった位置決め誤差(据え付け誤差, リンクパラメータの誤差に起因する)が、補正後には0.1mm以下に改善された。

ペン書き方式

- [21] H. Makino and N. Furuya: Performance Tests for CP Motion with the SCARA Robot, Proc. of 15th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1985) 1011-1020.

[内容] スカラロボットにボールペンを持たせ、直線経路(長さ250mm, 開始点と終了点の2点を教示)、円経路(直径100mm, 円周上の3点を教示状)、任意経路(スヌービーの絵, 経路上の数十点を教示)を紙に描かせる。実際に経路繰返し精度を測定した結果、直線経路では方向によっても異なるが、200mm/sの動作速度で4mmの標準偏差を生じた。円経路では、100mm/sの動作速度で2mmの標準偏差を生じた。任意経路では、50mm/sの動作速度でスヌービーの鼻の部分(曲率が大きく、加速度が大きい)で最大1mmの経路誤差を生じた。これらの誤差は動作速度に比例して大きくなる。

- [22] H. Abe: Testing Method for Mechanical Accuracy of Arc Welding Robots, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1989) 967-977.

[内容] 溶接用ロボットの測定法の基準を提唱した。エレクトリックペンとInspection paperを用いる。この組合せで、0.2mm以下の幅の線を片振幅が0.05mm以下の振動で書くことができる。

方眼紙方式

- [23] 逸山茂樹, 波多江茂樹: スカラロボットの絶対位置決め精度の補正, 精密工学会誌, Vol. 58, No. 6, (1992) 79-84.

[内容] 位置スケールとして、測定台上に作業領域全体をカバーする1mm目盛の方眼紙(材質: マーラー材)を貼る。ロボットハンド先端に取り付けられたCCDカメラで、方眼紙の拡大画像をカメラモニタ(画素数512×512)に映し出す。カメラモニタの中心をロボットの先端とし、モニタ画面上の方眼紙の目盛と画素数から絶対位置の測定を行なう。分解能は0.01mmである。キャリブレーションによりスカラロボットの絶対位置決め精度が0.25mmに改善された。

デジタイザ方式

- [24] 古屋信幸, 牧野 洋: SCARAロボット諸元のティーチングによる校正, 精密機械, Vol. 49, No. 9, (1983) 69-74.

[内容] 分解能0.04mm, 測定範囲350mm×250mm, 総合精度0.15mmのデジタイザを用いて、スカラロボットのキャリブレーションを行った。

- [25] 毛利峻治, 宮川 晃, 大淵博光, 松浦義則: ニューラルネットワークによるロボットの機構誤差補正方式, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91 講演論文集, (1991) 391-396.

[内容] デジタイザを用いて2自由度スカラロボットのキャリブレーションを行った。300×250mmの領域で0.2mmの絶対位置決め精度を達成。

ダブルボールバー方式

- [26] J. B. Bryan: A simple method for testing measuring machines and machine tools (Part 1: Principles and applications), PRECISION ENGINEERING, Vol. 4, No. 2, (1982), 61-69.
[内容] ダブルボールバーを提案した。バーの長さは100mmから1200mm程度のもまで製作可能。精度は長さによって変るが、 $0.125\mu\text{m}$ ~ $1.25\mu\text{m}$ 。伸縮式のバーの変位センサとしてLVDT (Linear Variable Differential Transducer)、モアレ縞等が用いられている。
- [27] 垣野義昭, 岩本祐一, 井原之敏, 亀井明敏, 伊勢 徹: 誤差ベクトルによる3次元測定機の補正とDBB検定法の評価。精密機械, Vol. 51, No. 6, (1985) 148-150。
[内容] 固定長ダブルボールバーを用いて, 3次元測定機を簡便, 安価にキャリブレーションする手法を提案した。試作したDBBの回転誤差は $0.3\mu\text{m}$ 以下で, 3次元測定機の検定装置として十分な精度を有している。
- [28] 垣野義昭, 井原之敏, 亀井明敏, 伊勢 徹: NC工作機械の運動精度に関する研究(第1報) - DBB法による運動誤差の測定と評価 -, 精密工学会誌, Vol. 52, No. 7, (1986) 85-90。
[内容] 総合精度が $0.5\mu\text{m}$ 程度の伸縮式のダブルボールバーを試作。これを用いて, NC工作機械の円運動精度を評価した。ダイレクトテスト(実際に円をエンドミルで切削し, 真円度測定機で精度を測定する)の結果とDBBによる測定結果とはほぼ一致した。
- [29] H. J. Warnecke, M. Schweizer and G. Shiele: System for Measuring 3-Dimensional Paths, Proc. of 15th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Brussels, Belgium, (1986) 945-953。
[内容] ダブルボールバーの分解能は $0.05\text{mm}/0.05^\circ$ 。可動範囲は $\pm 10\text{mm}/\pm 5^\circ$ 。測定手法のみを示し, 実際のデータは記されていない。
- [30] N. Vira and K. Lau: An Extensible Ball Bar for Evaluation of Robots' Positioning Performance, Journal of Robotic Systems, Vol. 4, No. 8, (1987) 799-814。
[内容] ダブルボールバーの線形移動距離は50mm (2inch) であり, その動きは $2.5\mu\text{m}$ (0.0001inch) の精度を持つ電気変換器によって測定される。ロボットの経路を測定する手法を提案しているが, 具体的なデータは無い。
- [31] 垣野義昭, 井原之敏, 富永賢二, 松浦 弘: DBB法による多関節ロボットの軌跡誤差の原因診断に関する研究(一第1報: 診断用ソフトウェアの開発と検証-)。日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '81 講演論文集, (1991) 403-407。
[内容] 伸縮式のダブルボールバーを用いて, ロボットの円経路に対する経路精度を評価した。ダブルボールバーは回転角度の検出が行えないので, 運動速度とサンプリングタイムから定まる見かけの回転角を求め, これとバーの伸縮変位量から誤差の極図を描いた。6自由度多関節型ロボットの2軸を動かし真円度を測定した結果 1.3mm であった。アーム長, 角度原点の位置誤差を補正し, 真円度を 0.8mm に改善した。関節反転時にバックラッシュ, ロストモーションによる突起が極図に生じる。

キュービック方式

- [32] H. J. Warnecke and B. Brodbeck: Test Stand for Industrial Robot, Proc. of 7th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), (1977) 443-451。
[内容] ロボット側にキューブを持たせ, 3軸のジナル構造をしたヘッドに対して位置決めを行う。ヘッドには渦電流センサが取り付けられている。本装置の計測精度は 0.1mm 以下である。各軸の回転角度をポテンショメータで測定することによりロボットの姿勢も測定できる。これとは別に, 2個の渦電流センサを取り付けたヘッドをロボットに持たせて, ロボットをルーラ(基準バー)に沿わせて移動させることにより, 経路精度を評価する装置も開発した。
- [33] E. Langmoen, T. K. Lien and E. Ramsli: Testing of Industrial Robots, Proc. of 14th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Gothenburg, Sweden, (1984) 201-207。
[内容] 概念のみを述べており, 実際にシステムを構築していない。
- [34] M. Tucker, N. D. Pereira and D. H. Hyman: A Pose Measurement Sensor, Proc. of 17th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Chicago, Illinois, (1987) 2-83-2-88。
[内容] LED光を光ファイバ, コリメータを介してビーム状にし, これを三面体の各面から2本ずつ計6本キューブに向けて照射し, 反射ビームをPSD (2次元半導体位置検出素子) で検出する手法を提唱している。この場合, 距離でなく角度を用いて三面体の位置・姿勢を測定することになる。計測精度は位置 0.0005inch , 姿勢 1ミリラジアン である。
- [35] P. E. Glibert, A. Delchambre and P. Gaspart: Adequacy Improvement between a Simulated and an Actual Robotized Cell, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1989) 891-898。
[内容] キューブの各面に2個ずつLVDTセンサを設置した装置を開発。
- [36] K. Mori and Y. Maeda: Evaluation of Pose Accuracy by Using Cube-Method as Performance Test, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1989) 883-890。
[内容] ロボットに持たせる錐側のヘッドの各面に渦電流センサを3個ずつ設置。測定範囲は 7mm , 計測精度は $1.25\mu\text{m}$ 。ヘッドの1辺は 100mm , 重量は 2.5kg 。カメラ方式(SELSPOT II), ダイアルゲージ方式との比較を行った。カメラ方式が $20\mu\text{m}$ 。キュービック方式が $1.25\mu\text{m}$ の精度を持ち, ダイアルゲージ方式が最も精度が劣ることを確かめた。
- [37] 森 和男, 前田祐司: キュービック方式による産業用ロボットの特性試験, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92 講演論文集, (1992) 467-472。
[内容] 文献[36]とほぼ同内容。

3次元測定機方式

- [38] M. Ishii, S. Sakane and M. Kakikura: A New Calibration System for Improving Absolute Positioning Accuracy of Robot Manipulators, Proc. of 16th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Brussels, Belgium, (1986) 1017-1025.
[内容] 3次元測定機により測定されたロボットの位置と、各関節のエンコーダの読みからロボットのリンクパラメータをキャリブレーションする手法を提唱している。
- [39] M. Ishii, S. Sakane, M. Kakikura and Y. Mikami: Kinematic Calibration of a Robot Manipulator for Integrated Robot System, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1989) 993-1000.
[内容] 3次元測定機(ミットヨ製, 測定範囲 $800 \times 500 \times 400\text{mm}$, 分解能 0.01mm)を用いて, DDロボットをキャリブレーションし, ハンドアイシステムの構築を行なった。ロボットの絶対位置決め精度の向上をキネマティックキャリブレーションとハンドアイシステムによって達成する試み。
- [40] L. J. Everett: Completing the Forward Calibration of Open Loop Manipulators when Single Point Position Sensors are Used, Journal of Robotic Systems, Vol. 6, No. 1, (1989) 19-33.
[内容] ロボットに持たしたツールの姿勢を求める手法を提唱している。直径 $0.5\text{インチ}(12.7\text{mm})$ の球を4個用い, 適応する4個の器具穴にはめあわせることにより, センサ座標系とツール座標系のキャリブレーションが可能となる。その測定の際に3次元測定機を用いている。
- [41] B. W. Mooring and S. S. Padavala: The Effect of Kinematic Model Complexity on Manipulator Accuracy, Proc. of 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1989) 593-598.
[内容] 3次元測定機(ミットヨ製CX-D2, 公称繰返し精度 0.01mm , 絶対精度 0.1mm , 可動範囲 $400 \times 500 \times 800\text{mm}$)を用いてロボットの手先の位置・姿勢を測定する手法を提唱している。5個のツーリングボールをロボット手先に取り付け, それをクッチプローブでタッチする。1ボールの表面を4点タッチしてボールの中心を求めている。3個のボールの中心がわかればロボットの姿勢も計測できる。
- [42] J. H. Borm and C. H. Menq: Determination of Optimal Measurement Configurations for Robot Calibration Based on Observability Measure, The International Journal of Robotics Research, Vol. 10, No. 1, (1991) 51-63.
[内容] 3次元測定機(Sheffield RS-3D Coordinate Measurement Machine)を用いて5自由度のロボットRM-501のキャリブレーションを行った。その結果, 絶対位置決め精度が 27.5mm から 0.6mm に改善された。
- [43] 小美濃武久, 赤石庄平, 石田 一, 鴨下隆志: 多関節型3次元測定機の精度向上, 精密工学会誌, Vol. 52, No. 8, (1986) 18-22.
[内容] 6自由度の測定アーム系を持った多関節型3次元測定機を紹介している。この装置の精度は 1000mm の刻長において, 標準偏差 0.2mm 以内である。絶対精度については触れられていない。

セオドライト方式

- [44] D. E. Whitney, C. A. Lozinski and J. M. Bourke: Industrial Robot Forward Calibration Method and Results, Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108, March, (1986) 1-8.
[内容] 幾何学的なパラメータの他に, 非幾何学的なパラメータ(ギアのトランスミッションエラー, 関節部の振れ, リンクのため, 歯車のバックラッシュ, 定盤の非水平性, 温度の影響等)も考慮してロボットのキャリブレーションを行なった。ロボットに直径 0.3mm の球を取り付け, それを2台のセオドライトによりマニュアルで測定した。PUMA560(繰返し精度 $\pm 0.1\text{mm}$)をキャリブレーションし, 絶対精度 0.13mm を達成した。
- [45] J. S. Shamma and D. E. Whitney: A Method for Inverse Robot Calibration, Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 109, March, (1987) 36-43.
[内容] ロボットの測定方式は文献[44]と同じ。
- [46] P. Judd and A. B. Knasinski: A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification, Proc. of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1987) 351-357.
[内容] ロボットに500点の位置決めを行わせ, その位置をセオドライトで測定した。測定精度等については触れてない。煩雑な操作を改善することがセオドライトの今後の課題であると述べている。
- [47] J. L. Caenen and J. C. Angue: Robot Calibration, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1989) 979-985.
[内容] セオドライトの精度は 10^{-5}rad であり, x, y, z 座標の計測精度はそれぞれ $\pm 0.02\text{mm/m}$ である。直径 2mm の球を円筒状のツールに取り付け, それをロボットに持たせた。セオドライトは人間が読取り, コンピュータに入力。2種類のロボットを測定した結果, 位置繰返し精度はそれぞれ 0.5mm , 0.3mm であった。各アーム長が 0.1m 狂い, エンコーダが 0.1° 狂ったと仮定して, 精度の限界を予測している。
- [48] R. P. Judd and A. B. Knasinski: A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 1, (1990) 20-30.
[内容] セオドライトを用いて, Automatrix社のAID-900ロボット(絶対精度 15.2mm 以下)を測定した。2台のセオドライトがターゲットを見込む角度をなるべく 90° にする必要がある。セオドライトの角度精度は 0.5秒 。半径 2032mm の範囲を測定する場合, このシステムの計測精度は理論上 $\pm 0.05\text{mm}$ となる。キャリブレーションには姿勢誤差の測定値も必要なので, 3個のターゲットを1組にして用いている。500点を任意に選んで計測した。誤差がキャリブレーションにより最終的に 16.6mm から 1.8mm にまで減った。各関節の角度のオフセットをキャリブレーションすること(零点調整をすること)が最も精度向上に効果があることが判明した。最大の問題点は測定に時間がかかりすぎることであり, 熟練者が関節オフセットをキャリブレーションする(全キャリブレーション作業の初期段階)のに2時間かかる。

ケーブル方式

- [49] Pohanno, Tanguy: Assessment of the Mechanical Performance of Industrial Robots, Proc. of 12th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Paris, France, (1982) 349-358.
[内容] 測定機器の精度については触れていないが、実際にロボットを測定した結果、位置繰返し精度は0.1~0.2mm程度であった。
- [50] D. Payanet, M. J. Aldon and A. Liegeois: Identification and Compensation of Mechanical Errors for Industrial Robots, Proc. of 15th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1985) 857-864.
[内容] 計測精度については触れていない。

カメラ方式

- [51] A. Dainis and M. Jurberts: Accurate Remote Measurement of Robot Trajectory Motion, Proc. of 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, (1985) 92-99.
[内容] Selspot I を改良したシステムを構築。LEDの出力を増大し、アンプの出力を1/4にしてS/N比を高めた。受光素子は2.5mm四方のPSD、レンズは50mm, f/1.0。受光部分が広がった場合も、重心の位置をPSDは出力するので、フォーカシングは必要ない。PSDの出力は積分回路でパルス整形、ノイズ除去を施されて、12bitA/Dコンバータに送られる。X, Y, I (出力強度) の関係を、XYプロッターにLEDを取り付けて格子点で位置決めすることにより校正。カメラから1.5m離れた3次元測定機を校正基準とし、1辺300mmの立方体内の格子点を計測した結果、誤差平均は画面の中央80%の部分で1/2000、90%の部分で1/1000であり、周辺部ほど精度が劣化する。サンプリングは3.3kHzで行なえるが、座標計算の時間より40Hzに制限されている(将来的には200Hzまで可能)。
- [52] 熊谷博史: ロボット3次元動作解析システム, 精機学会自動組立専門委員会 研究例会No. 85-2 講演前刷, (1985) 19-24.
[内容] セルスポットIIの性能紹介。
- [53] 斎藤正樹: 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, Vol. 18, No. 11, (1986) 117-122.
[内容] セルスポットIIの性能紹介。

- [54] J. M. Hollerbach and D. J. Bennett: Automatic Kinematic Calibration Using a Motion Tracking System, 4th International Symposium on Robotics Research (ISRR), Cambridge, MA, (1988) 191-198.
[内容] 複数のIRED (infrared light-emitting diode) と2台のlateral-effect photodiode cameraを用いたNorthern Digital Inc.社のWatsmart systemを用いている。Selspot II と同等の性能を持ち、サンプリング400Hz, 精度1:4000 (2mで1mm), 隠れた時も想定して6個のLEDを用い、1ftおきに長方形の外周上に配置し、その長方形をDDロボットに持たせ、125通りの位置姿勢を測定することによりロボットの校正を行なった。カメラはロボットから3m離れた位置に設置した。ロボットの絶対位置決め精度を測定した結果、1.3mmであった。
- [55] 石井 優, 板根茂幸, 三上芳夫: ロボットハンドの位置・姿勢センサの研究, 第1回ロボット学会学術講演会, (1983) 89-90.
[内容] 5個以上の既知であるLEDの3次元座標データとこれらに対応する2次元位置センサ (PSD) の出力値から、9個のパラメータ (PSDの原点、センサ座標系の各軸回りの回転角、光軸中心位置) をキャリブレーションした。位置・姿勢の測定は4個の相対位置が既知のLEDを用いた (150mm×50mmの長方形の頂点に配置)。ロボット指令値との誤差で本システムの計測精度を評価した結果、位置計測精度5mm以下、姿勢計測精度3.2°以下であった。
- [56] 石井 優, 板根茂幸, 柿倉正義, 三上芳夫: 3次元位置・姿勢センサを用いたロボットの作業と環境の教示ステレオビジョンの併用による作業空間の拡大, 第2回ロボット学会学術講演会, (1984) 71-72.
[内容] 2台のPSDカメラを用いて、立体視を行なった。各カメラおよび立体視による3種類の位置・姿勢が求められるので、計測の信頼性が向上する。物体形状 (ここでは角錐) の入力に利用。
- [57] M. Ishii, S. Sakane, M. Kakikura and Y. Mikami: A 3-D Sensor System for Teaching Robot Paths and Environments, The International Journal of Robotics Research, Vol. 6, No. 2, (1987) 45-59.
[内容] LEDを4個使用。PSD上での四辺形の見え方から、LEDプレートの位置・姿勢を決定。精度は480mm離れた場所、 x, y は0.3mm以内、 z は3.2mm以内。
- [58] T. Hasegawa and S. Kameyama: Geometric Modeling of Manipulation Environment with Interactive Teaching and Automated Accuracy Improvement, Proc. of 20th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Tokyo, JAPAN, (1989) 419-426.
[内容] 外部環境 (角柱等) を認識するシステム。CADデータを基本とし、レーザースポットを物体に照射し、その座標をカメラで測定するシステムを用いて、精度を向上させている。このシステムは、カメラから1400mm離れたカメラが400×400×270mmの範囲で0.9mmの計測精度を持つ。
- [59] M. R. Driels and U. S. Pathre: Vision-Based Automatic Theodolite for Robot Calibration, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, (1991) 351-360.
[内容] 直径25.4mmのポリエチレン製Vバルブ式点滅球が追跡対象。244×322画素のCCDで構成されたカメラを減速機付のモータ (水平、鉛直2台、精度0.01°) で回転させる装置を2組使用。3次元測定機を用いて精度を検証した結果、4m離れた2次元平面内で0.2mmの精度を得た (ただし、バルブの移動距離の測定誤差)。カメラパラメータを3次元測定機によりキャリブレーションしている。

レーザ方式Ⅰ（角度-角度計測）

- [60] J. A. Gilby and G. A. Parker: Laser Tracking System to Measure Robot Arm Performance, Sensor Review, Vol. 2, No. 4, (1982) 180-184.

[内容] 目標仕様は1m立方の測定範囲で精度0.01mm, 5m/sの追跡速度。フォトダイオードを用いたquadrantセンサの出力は、その中心と入射点との距離に対して非線形なので、その補正を行ないながら、ガルバノミラーの制御を行なう。リフレクターを捉えてさえいれば、quadrantセンサの誤差出力からリフレクターの中心が計算できる。5mWヘリウムネオンレーザーとコリメータ（倍率×10）で直径8mmのビームを作っている。概念のみで、実測値なし。

- [61] B. Mayor and G. A. Parker: Optical consideration in a 3D laser tracking instrument, 出典不明。

[内容] レーザ干渉計を2台用いたシステム。コーナキューブを3個組合せたもの（重い）、3個の相対位置のキャリブレーションが面倒、2個組合せたものを開発し、通常は30°の開口を広げようとしたが、結局キャッツアイが最適との結論に達した。キャッツアイは開口を170°までに広げることができる。概念のみで、実際の計測実験は行っていない。

- [62] ASLレーザ追跡変位測定システムLASERTRACE, AUTOMATIC SYSTEMS LABORATORIES LTD., (1992) 1-14.

[内容] ASL社（イギリス）の製品LASERTRACEの製品紹介。文献[62]の原理を製品化したもの。コーナキューブと2台のレーザポッドを用いている。レーザポッドはレーザヘッド、トラッキングミラー、4分割ダイオード（quadrant detector）とから成っている。ミラーの駆動は高出力サマリウムコバルトモータを用い、ダイレクトドライブを行っている。角度分解能は1回転65536パルスである。レーザポッドの視野：水平、鉛直とも±40°、動的応答 10Hz、精度±0.02%（1mで±0.15mm）、分解能 2.2arcsec（1mで0.012mm）、繰返し精度±2.2arcsec（1mで±0.012mm）、追跡速度 57° 毎秒（1mで1a/sec）、サンプリング100Hz。最大6個の多点のターゲットを用いて、87749/秒の速度で各リフレクタを追跡できる。リフレクタを見失った時はサーチモードでサーチが可能である。ISO 9238に基づいたロボット精度評価のソフトウェアが備わっている。価格は約3000万円。

- [63] T. A. G. Heeren and F. E. Veldpaus: An Optical System to Measure the End Effector Position for On-line Control Purposes, The International Journal of Robotics Research, Vol. 11, No. 1, (1992) 53-63.

[内容] 1m四方の2次元平面内で分解能 0.05mm/1mを達成。追尾速度5m/sec。3次元計測については概念のみ述べている。

レーザ方式Ⅱ（距離-角度計測）

- [64] K. Lau, R. J. Hocken and W. C. Haight: Automatic laser tracking interferometer system for robot metrology, Precision Engineering, Vol. 8, No. 1, (1985) 3-8.

[内容] キャッツアイやコーナキューブの代りに2自由度のターゲットミラーをロボットの手先に取り付ける。ターゲットミラーの回転角度より、ロボットの手首のピッチ、ロール角も測定できる。レーザ

干渉計はHP5501, xy lateral effectフォトダイオードは United Detector Technology社の UDT SC10 を用いている。ダイオードは2個用い、1個をトラッキングミラーのサーボループに、もう1個をターゲットミラーのサーボループに組込んでいる。16bitのコンピュータで制御し、ダイオードからのサンプリングは 5ms 毎に行なう。2次元での可能性テストを行ない、250×350mmの範囲で ±0.012mmのリピータビリティを得た。将来的には、3×3×3m立方の測定空間で0.04mmの計測精度を目指している。

- [65] M. Riemensperger and R. Gottwald: KERN SMART 310 - Leica's Approach to High Precision Dynamic 3D Coordinate Determination, Leica Aarau Ltd, advertisement, (1992) 1-18.

[内容] NBSのLauらのグループで原理を開発し特許取得（1987）したものの製品化。DDモータ、エンコーダ、Zeeman typeレーザ干渉計、2軸フォトセンサ（PSD）、キャッツアイ、IBM386/87システムを用いている。レーザ発信器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、キャッツアイに照射する。ターゲット移動に伴うビームの位置ずれをPSDで検出して、それを無くするようミラーの回転角度を常に制御し、この回転角度からミラーの存在する方位角を知り、これとレーザ干渉計で計測される距離とからキャッツアイの位置を計算する。コーナキューブの開口角度が±20°なのに対して、キャッツアイのそれは±60°と大きい、重くて大きいのが欠点。DDモータの制御にはPID制御ループが用いられている。長さ800mmの回転可能なボールバードミラーの傾き等の校正を行なう。見失った時は、キャッツアイを既知の参照点に再設置する。本装置のリピータビリティは10m離れた場所でも0.09mmであり、アキュラシーを3次元測定器を用いて検証した結果、2m離れた場所でも±0.024mm（RMS値）であった。（システムを2台用いた場合は0.014mm。）干渉計の距離精度の方がミラーの角度精度より良い。カタログによるとサンプリングレートは500回/秒。システムの価格は約5000万円。

レーザ方式Ⅲ（距離-距離計測）

- [66] 中村 収, 後藤充夫, 豊田幸司, 谷村吉久, 黒沢俊郎: 追尾式レーザ干渉計による座標計測システム, 精密工学会誌, Vol. 57, No. 5, (1991) 87-92.

[内容] レーザ干渉計2台と2連直角三面鏡を用いたシステムを開発。レーザ干渉計をDDモータにより回転させ、レーザビームを走査する。3次元測定機を校正基準として本システムの2次元での計測精度を検証した結果、400mm×200mm程度の面積内の各点を1μm程度の精度で測定できることがわかった。実験に際しては、レーザ干渉計とDDモータにより構成されるステーション間の距離を900mm程度にし、各ステーションから500から600mm程度離れた位置に中心を持つ長方形の辺に沿って、28点の座標を計測し、最小二乗法を用いた。追尾の途中でビームが遮られると、以後の計測ができなくなるので、冗長なステーションが必要であることとが問題。今後、システムの3次元化を進める予定。

- [67] 後藤充夫, 中村 収, 豊田幸司, 黒沢俊郎: トラッキングレーザによる座標測定機の精度評価と校正, 精密工学会誌, Vol. 57, No. 12, (1991) 157-161.

[内容] レーザ干渉計2台と2連直角三面鏡を用いたシステムを用い、3次元測定機の精度を ± 0.008 mm×600mmの2次元平面内で検証した。

- [68] T. Pfeifer: ニュープロダクションテクノロジーの研究開発, 精密工学会誌, Vol. 56, No. 4, (1990) 3-6.
 [内容] 4台のレーザ干渉計とキャッツアイ1個から成るシステム。計測精度は $1 \times 1 \times 1\text{m}$ の空間で約 0.1mm 。トラッキングミラー回転装置の加工。組立精度を高めれば, 理論的には 0.001mm の精度が実現可能。

その他のレーザ方式

- [69] 金森哉更, 梶谷 誠, 益田 正: 線状レーザ光を用いた三次元位置計測, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1988) 693-694.
 [内容] 点状に発射されるHeNeガスレーザ(出力 5mW)をロッドレンズで線状に拡散させ, これをモータにより等速で回転するミラーを用いてスキャンさせる(45rpm)。計測位置にはレーザデテクタ(光ファイバを通してフォトダイオードで光を検出する。外乱光を防ぎ, 受光状態を一定に保つことを狙っている。)を配置する。基準デテクタを既知の回転位置に2台設置し, それらを線状レーザ光が通過する時刻差を基準時刻とし, 計測デテクタを通過する時刻を測定することにより, 計測デテクタの方位を知る。 2000mm 離れた位置で, デテクタをNCフライスのベッドに固定して直線移動させ, その移動距離を本システムで計測した結果, 0.1mm 程度の精度を得た。広い計測範囲で, ボータブルで簡便, 安価なシステムの開発を目指している。
- [70] 大岩孝彰, 久曾神 稔, 鈴木 稔: スリットパターンレーザ光とボールミラーを用いた空間座標位置の測定, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 289-300.
 [内容] レーザ発信器からのビームを円筒面レンズによりスリットパターンとし, ミラーを用いたスキャナにより走査させ, 球形ミラーに投射する。反射光をレーザディテクタで受光し, 受光量がピーク値を取る時のスキャナの回転角度から, 球形ミラーの方位を知る。まだ計画段階。
- [71] 新井民夫, 山口龍一: CCDフォトアレイとレーザ光による位置姿勢測定システム—トラッキングによる動的測定—, 昭和60年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集, (1985) 699-700.
 [内容] 半径 1mm の円周上に64素子を埋め込んだCCDフォトアレイを2個組み込んだ測定子を用い, その中心をトラッキングミラーで方向が制御されるレーザ光で追跡。フォトアレイのうちレーザ光の当たっている4交点を求めるのに 7.5ms , トラッキング1ループに 50ms かかり, 追従できる測定子の速度が約 20mm/s と限られている。
- [72] Ch. Hoffmann: Accuracy-Tests for Industrial Robots, Robot Control 1988 (SYR000'88), Karlsruhe, FRG, (1988) 103-108.
 [内容] レーザビーム2本を用い, ロボットにPSD3個とトリロフレクターを設置するシステム。1本目のレーザと2つのPSDで x, y 座標と α 角, ピッチ角がわかり, 2本目のレーザと3個目のPSDで α 角がわかる。 α 座標はトリロフレクターからの反射光を干渉計で距離計測することにより求める。精度/範囲は x, y 座標が $10\mu\text{m}/\pm 10\text{mm}$, 角度が $0.003^\circ/\pm 3^\circ$ 。 α 方向は 10m まで測定でき, 10m/s まで追跡可能。線状光を頂角 7.5° で 3000 回/分回転させ, 円軌跡を描くロボットに固定されたPSDに照射する実験を行った。PSD上でビームの走った線軌跡とPSDの中心との距離が, ロボットの経路誤差を表す。ロボットの円軌跡の経路精度は $\pm 2\text{mm}$ 程度であった。

超音波方式I(パルス方式)

- [73] GP-8-3D Sonic Digitizer Operator's Manual, Science Accessories Corp., (1985) 1-85.
 [内容] Science Accessories社の製品 Sonic Digitizer のマニュアル。
- [74] W.E. Moritz, P.L. Shreve and I.E. Mace: Analysis of an Ultrasonic Spatial Locating System, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 25, No. 1, (1976) 43-50.
 [内容] Science Accessories Corporation社のソニックデジタイザの評価を行った。長さ 500mm の円筒状のコンデンサ型マイクを3個の α, β 軸上に配置。1回の測定につき8回火花を飛ばし, その平均をとることにより精度を向上させる。障害物がある場合8回のデータの分散が大きくなるので, それを利用して何回折るかどうかの判断を行なう。各センサから 90mm , 500mm 離れた点をそれぞれ100回ずつ計測した結果, 標準偏差 $\pm 0.13\text{mm}$, $\pm 0.47\text{mm}$ であった。このリピークビリティの誤差は音速の補正誤差と火花放電経路のばらつき(ギャップ長 0.8mm , 電極直径 0.4mm であり, 目視により放電中心は $\pm 0.2\text{mm}$ 程度ばらついていることがわかる)に起因している。何回もの放電の平均をとることによりこの影響を軽減している。 132mm から 500mm までの発信器の移動距離を測定した結果, 誤差は $0.11 \pm 0.15\text{mm}$, 標準偏差は $\pm 0.29\text{mm}$ ($\pm 3\sigma$)であった。このことより本システムは測定距離に対して $\pm 0.1\%$ のリニアリティを持つことがわかる。結局一辺 500mm の立方体内の座標を $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の誤差で測定可能。測定レートは, 音波が混信することを考慮し 100Hz が限度である。
- [75] H.W. Stone and A.C. Sanderson: A Prototype Arm Signature Identification System, Proc. of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Raleigh. (1987) 175-182.
 [内容] Science Accessories Corporation社のソニックデジタイザを用いて, ロボットのキャリブレーションを行なった。各センサは 300mm から 2500mm までの距離を分解能 0.1mm で測定可能。しかし各センサの開口角度と相対配置より測定可能な範囲は一辺 1430mm の立方体内に限られる。音速の不安定性より精度は $\pm 0.2\text{mm}$ 。 α 方向に線形に気温が変化するとして, 2本のロッド(各ロッドには2個の火花が設置されている)を上方, 下方に設置して音速の補正を行なった。
- [76] K. Takamasu, R. Furutani and S. Ozono: Development of the Three Dimensional Coordinate Measuring System with Ultra-Sonic Sensors, Proc. of the International Symposium on Metrology for Quality Control in Production, Tokyo, (1984) 300-305.
 [内容] 村田製作所の共振周波数 40kHz のセンサを用いた計測システム。一辺 200mm 程度の三角形の頂点に3個のセンサを設置して, 1個の発信器よりのパルス波を受信する。第1波目の立上りをしきい値を設けて検出することが困難であり, このため精度は測定距離の 0.1% である。測定空間内の精度分布図をシミュレーションにより求めている。
- [77] 古谷涼秋, 高増 淳, 大園成夫: 超音波を利用した3次元位置測定の研究(第3報)—試作機の改良と結果—, 昭和59年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集, (1984) 409-410.
 [内容] 文献[75]と同内容。3次元測定機を校正基準として本システムの位置計測精度を評価した結果, 0.18mm であった。

[78] 大橋健一, 山田陽哉, 土田健夫, 駒井又二: 超音波を用いた3次元移動物体の位置検出, 第5回ロボット学会学術講演会, (1987) 185-186.

[内容] 比較物体2個を配置し, 被測定物体とあわせて3個の物体からの反射を検出することで, 被測定物体の3次元空間内での座標移動を計測, 反射波を利用することで計測精度が悪い。

[79] 佐々木忠之, 小西周平, 伊藤部 達: コウモリの超音波反響定位をモデルとした障害物の認識, 第5回ロボット学会学術講演会, (1987) 183-184.

[内容] 円筒面に圧電フィルムを張ったコンデンサ型超音波発信器1個と, おなじ構造の超音波受信器2個を1組にした送受信器を開発した。被測定物体からの乱反射を用いて, 2つの受信器への到達時間の差から方位を知り, 到達時間から距離を知る。計測精度は悪い。盲人用。

超音波方式II (位相差方式)

[80] 公門政治, 石松隆和, 中里真一, 船川正哉: 2波長式超音波測距方式を利用する産業用ロボットの教示について, 第9回ロボット学会学術講演会, (1985) 5-6.

[内容] 2つの周波数 $f_1=41.278\text{kHz}$, $f_2=46.873\text{kHz}$ の超音波連続波を用いる手法。時刻 $[0, t_1]$ で送信器は周波数 f_1 の超音波を発信し, 時刻 t_1 において周波数を f_2 に切換える。送信機, 受信器の距離を l , 音速を C とすると時間 $[t_1, t_2=t_1+l/C]$ においては送信器が送信する超音波の波数と受信器が受信する波数の間に差 $D=(f_2-f_1)l/C$ が生じる。超音波が到達した時刻 t_2 は受信側で周波数が f_2 に変化する時間を検出して求める。波数 D に位相差まで考慮して $l=(\Delta N+\Delta\phi/2\pi)C/(f_2-f_1)$ により距離が求められる。この測距によりだいたいの N を求めて, 今度は f_1 のみを発信し, $l=(N+\phi/2\pi)C/f_1$ により正確な測距を行なう。精度は200~1000mmの範囲で $\pm 0.2\text{mm}$, 教示棒に500mmの間隔において2個の送信器を取り付け, PUMA560ロボットの上方向900mm程度の位置に受信器3個×2組(1組が1個の送信器に対応)設置して, ロボットの位置・姿勢を教示させた。測定可能範囲 $\alpha \times \beta \times \gamma = 600 \times 600 \times 400\text{mm}$ において誤差は $\pm 2\text{mm}$ 以内。送信器は村田製作所製MA40Lの中味を取りだしたもので, 受信器は同社のMA40S2Rを用いている。

[81] 荒木利男, 石松隆和, 公門政治: 超音波を利用する3次元ディジタル化について, SICB '86, (1986) 75-76.

[内容] 文献[79]とはほぼ同内容。受信器は3個に減らし, 2個の送信器は交互に超音波を送出するように改良した。

[82] 馬 樹元, 下河辺 明: 超音波多重位相差方式による3次元座標の測定, 精密工学会誌, Vol. 52, No. 2, (1986) 132-137.

[内容] 周波数の異なる3種類の超音波を順次発信し, 受信波形との位相差を測定して距離を求める。1次元で100mmの範囲で誤差平均(10回) $\pm 0.1\text{mm}$, 誤差最大値 0.3mm 。超音波素子の半頂角 30° の円錐内に入っていなければ誤差 0.3mm 以内の距離測定誤差で計測することが不可能となる。受信器の形成する平面に垂直な方向の座標計測精度は良いが, 平行な方向の精度は円錐の交わる領域を外れる可能性もあり, $\pm 1\text{mm}$ 程度である。3個の受信器の配置間隔は300mm。

[83] 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, Vol. 53, No. 3, (1987) 72-77.

[内容] 反射波の影響を避けるため, 断続超音波に代って, 断続超音波を用い, さらに原理的な測定距離の制限をなくすため, 伝達時間方式と位相差方式を併用した。

[84] 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, Vol. 54, No. 12, (1988) 145-150.

[内容] 4個の受信器を2個ずつ150mm離れた平面上に配置し, 計算時間が短い4点法を提唱した。音速は1000mmを超音波が伝播する時間をリアルタイムモニタして求める。素子は村田製作所のMA40S/R。半頂角が 45° の円錐内で位相ずれは 10° 以内であり, この範囲では誤差 0.25mm 以下で距離測定が可能。5回(3回計測, 2回音速補正)の超音波の送波を行わなければならないので, 一座標の計測に150msかかり, 測定速度は6.5回/秒。螺旋運動(14mm/s)を追跡計測した結果, 誤差の平均値 0.9mm , 標準偏差 0.8mm であった。受信器を1000mm×1000mmの範囲に13個配置し, 最適な4個を選択しながら測定を行なうことにより, 1000mm×1000mm×600mmの空間で約2mmの測定精度を得た。

[85] Y. W. Zhang and D. Hauden: Localisation dynamique ultrasonore d'un bras de robot: facteurs d'influence, R. A. I. R. O. Autom-Product Inform Ind, Vol. 22, No. 6, (1988) 559-568.

[内容] 2つの異なる周波数の超音波を用いて, 位相差を利用して距離を求める。この距離計を3個用いて, 距離を用いた三角測量の原理により発信器の位置を求める。温度, ドップラー効果等の影響を論じている。

その他

[86] A. Weckenmann and C. Linhart: Absolutlagegeber zur Steuerung von Handhabungsmaschinen (Absolute angular sensor for controlling robots), Technisches Messen, Vol. 51, Jahrgang Heft 5, (1984) 185-170.

[内容] ロボットの回転関節にレーザジャイロを取り付け, 基準座標系に対する絶対回転角を測定し, ロボットの手先の絶対姿勢を知る手法を提唱している。

[87] 中嶋新一, ロボットによる経路ならい作業のための超音波近接センサ, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 5, (1985) 71-77.

[内容] 1個の超音波発信器と3個の超音波受信器を組み合わせた送受信器を用い, ロボットならい作業の対象面の法線方向を示す二つの姿勢角(ヨー角, ピッチ角)の計測を行なう。位相差を用いた距離計測を行っている。位相差が1波長以上ずれると測定できないので, パルス状送信波による反射時間差の測定を行ない, 位相差の範囲を調べて補正をしている。送信波と受信波の干渉を避けるため, 前の波の影響が無くなるのを待たねばならず, また, パルス波と連続波を送波しなければならないので, 2回のパルス状の発信と1回の位相差測定用の発信で, 信号処理も含め, 約10msかかる(サンプリング100Hz), $\pm 10^\circ$ 程度の範囲において 1° 以内の精度での姿勢角測定が可能である。

謝 辞

本研究を進めるに当たって終始丁寧な御教示と御討論を頂いた

東京大学教授 高野政晴

金沢大学教授 岡部佐規一

東京大学助教授 佐々木 健

の諸先生に心から御礼申し上げます

本論文の審査をして頂き、有用な御指摘・御教示を賜った

東京大学教授 大園成夫

東京大学教授 新井民夫

東京大学助教授 黒澤 実

の諸先生に深く感謝致します。

多くの御討論を頂いた

金沢大学教授 神谷好承

先生に深く感謝致します。

終始温情をもって御激励いただいた

石川工業高等専門学校校長 横山恭男 先生

東京大学工学部精密機械工学科の諸先生

金沢大学工学部機械システム工学科生産・精密コースの諸先生

に感謝いたします。

実験に際して御協力頂いた

金沢大学工学部 野村久直 氏

および修士論文のテーマとして実験装置の製作、実験に御協力頂いた

横橋克巳、 奥田清治、 後藤康博、 土居 誠

卒業論文のテーマとして実験に御協力頂いた

中村祐之、 内生蔵秀樹、 釜谷寛之、 真田二郎、

野口俊和、 真柄七十樹、 釜谷宏文

の当時の金沢大学学生の諸君に深く感謝致します。

またNC工作機械を用いた実験の際にお世話になった

金沢大学工学部 菊池遵一 氏

をはじめとする金沢大学工作センターの皆様ならびに

P a n a R o b o の借用を快諾して頂き、多くの御討論を頂いた

金沢大学助手 白瀬敬一

先生に深く感謝致します。

精密工学会、日本ロボット学会等の講演会ならびに各種委員会等におい

て有用な御指摘、御激励を頂いた

山梨大学教授 牧野 洋

中央大学教授 板生 清

電気通信大学教授 梶谷 誠

東京工業大学教授 下河辺 明

筑波大学教授 油田信一

東京農工大学助教授 遠山茂樹

新潟大学助教授 中嶋新一

機械技術研究所 前田祐司

の諸先生方に深く感謝致します。

私の大学・大学院在学中の同期であり、様々な御激励を頂いた

東京大学助教授 大隅 久

大阪大学助手 井上健司

の諸先生に深く感謝致します。

最後に本研究には、

(財)北陸産業活性化センター

新技術事業団

平成4年度科学研究費補助金

より研究費の補助が行われており、関係各位に感謝致します。

