

JAERI-M
92-112

超音波応用による位置同定方法の基礎実験

1992年8月

藤井 義雄・猪俣 新次・鈴木 勝男
鈴土 知明・篠原 慶邦

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 燐原原子力資料サービス

超音波応用による位置同定方法の基礎実験

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

藤井 義雄・猪俣 新次⁺・鈴木 勝男

鈴土 知明・篠原 慶邦

(1992年7月3日受理)

本報告は、ビデオカメラが機能できないような原子力施設内の極めて強い放射線環境や、濃い煙のような不透明媒質が充満した室内で作業を行う移動ロボットの位置決めのための、超音波を応用した位置同定方法に関する基礎実験結果について述べている。また、使用した超音波センサの基本的特性、センサ信号処理に使用したシステムの概要、構造化したプログラムの並列処理の方法等についても述べている。本実験の結果、超音波センサの使い方や信号処理の方法によっては十分に高精度な位置同定が可能であることや、高精度で安定度の優れた測定系を構成するためには、それなりの対策が必要であることなどが明らかとなった。今回用いたプロセス並列処理の方法は構造化された複数のプロセス間の同期をとつて通信を行う有効な方法であり、他のセンサ信号処理システムを構築する際にも大いに活用できる。

Basic Experiment on an Ultrasonic Method of Localization

Yoshio FUJII, Shinji INOMATA⁺, Katsuo SUZUKI
Tomoaki SUZUDO and Yoshikuni SHINOHARA

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 3, 1992)

This report describes the results of the basic experiment on ultrasonic method of localization of mobile robots working in very strong radiation environments in nuclear facilities or in a room filled with opaque medium such as dense smoke where video cameras cannot function. The basic characteristics of the ultrasonic sensors used, the outline of the system for sensor signal processing and the parallel processing method for structured programs are also described. The results of the experiment show that it is possible to identify the location with sufficient accuracy by proper use of the ultrasonic sensors and of signal processing method. It is also shown that countermeasures must be taken to organize a precise and stable measurement system. The parallel processing method applied in this experiment is effective one which uses synchronization for communication among multiple structured processes and can also be applied to other sensor signal processing systems.

Keywords: Ultrasound, Ultrasonic Sensor, Ceramic Resonator,
Ultrasonic Transmitter, Ultrasonic Receiver, Directivity,
Shared Memory, Semaphore

+ Department of Engineering Services

目 次

1. はじめに	1
2. 位置同定実験の概要	1
2.1 超音波センサ	1
2.2 超音波応用による位置同定方法の原理	2
3. 位置同定用の実験回路	14
3.1 超音波送波回路	14
3.2 超音波受波回路	15
3.3 超音波伝搬時間計測回路	15
3.4 A/D 変換装置	15
3.5 演算処理装置	16
4. 実験方法	26
4.1 超音波センサの特性測定	26
4.2 位置同定実験	26
5. 位置同定プログラム	31
5.1 位置同定直列処理プログラム	31
5.2 位置同定並列処理プログラム	34
6. データプロット・プログラム	45
7. 実験結果及び考察	47
7.1 超音波センサの特性測定	47
7.2 位置同定実験	49
7.3 位置同定プログラムの処理時間	50
8. おわりに	64
参考文献	64

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Localization Experiment	1
2.1 Ultrasonic Sensors	1
2.2 Principle of Ultrasonic Method of Localization	2
3. Scheme of Localization Experiment	14
3.1 Circuit for Ultrasonic Transmitter	14
3.2 Circuit for Ultrasonic Receiver	15
3.3 Circuit for Ultrasonic Time-of-flight Measurement	15
3.4 A/D Converter	15
3.5 Processor	16
4. Method of Experiment	26
4.1 Measurement of Ultrasonic Sensor Characteristics	26
4.2 Localization Experiment	26
5. Computer Program for Localization	31
5.1 Serial Processing Program for Localization	31
5.2 Parallel Processing Program for Localization	34
6. Program for Data Plotting	45
7. Experimental Results and Discussions	47
7.1 Measurement of Ultrasonic Sensor Characteristics	47
7.2 Localization Experiment	49
7.3 Processing Time of Localization Program	50
8. Concluding Remarks	64
References	64

1. はじめに

原子力施設内の高放射線環境下での各種の作業を人間に代って自律的に遂行する知能ロボットの開発は、将来の原子力開発利用における作業員の放射線被曝防止の観点から極めて重要な課題である。ロボット技術は一般産業における定型的反復的作業用に盛んに開発が進められ、種々の分野で応用されているが、通常環境用のロボット技術を原子力施設内の高レベル放射線や高温等の極限環境下における不定型非反復的作業にそのまま適用しようとしても不可能なことが多い。したがって、高レベル放射線に耐え、あらかじめ確定できない状況にも臨機応変に対応して種々の作業ができる原子力独自の知能ロボット技術の研究開発が必要である。そこで、原子炉制御研究室では原子力施設の特殊な条件に適用可能な遠隔ロボット技術開発を進めており、その一環として、ビデオカメラが機能することができないような極限環境において使用することを目的とした知覚・認識技術の研究を進めている。

本報告は、超音波応用による移動ロボットの位置同定方法に関して行った基礎的な実験の結果についてまとめたものである。本報告では、超音波センサの基本的特性、位置同定方法、製作した位置同定プログラム及びその実験結果について述べると共に、センサ信号処理に使用したサブシステムの概要、プログラムの処理時間の短縮化を図るために行った並列処理の方法（セマフォ機能）等についても述べる。

2. 位置同定実験の概要

2.1 超音波センサ

超音波技術便覧等によると、超音波技術とは“人が聞くことを目的としない音波の応用に関する技術”と定義されている。夜の空を飛び回るコウモリや海中に棲息するイルカが超音波を発して障害物の位置や周囲の環境を確認をしたり、餌の存在を検知しているということが一般に良く知られているが、第2次世界大戦前は殆ど超音波の特性については知られていなかった。戦時に軍事的な面での利用が一部の専門家によって行われていた程度であった。戦後、いろいろな圧電材料が開発され超音波の発生と検出が容易になってきたため、超音波の応用範囲が次第に拡大されてきた。さらに最近のエレクトロニクスの急速な発展に伴って超音波技術も飛躍的な発展を遂げ、現在は医療診断、工業計測・診断、漁業海洋開発、画像形成等々、その応用面は多岐にわたっている。超音波は真空中を除く、固体、液体、気体等あらゆる媒質中を伝搬するが、その伝搬速度は媒質の種類によって大きな差があり、媒質の粘性や密度、温度等の物理的な条件によつても影響を受ける。超音波の伝搬速度は空气中で約340m/sec、水中で約1,440m/sec、金属（鋼材）中で約5,000m/secである。また、超音波がいろいろな媒質中を伝搬する際、そのレベルは減衰するが、その減衰率は媒質の種類によって異なる。超音波は固体や液体中では良く伝搬し、減衰率は小さいが、気体中では減衰率が大きい。また、超音波の減衰率は周波数によっても変化し、気体や液体中では周波数の2乗に比例して減衰することが知られている。

1. はじめに

原子力施設内の高放射線環境下での各種の作業を人間に代って自律的に遂行する知能ロボットの開発は、将来の原子力開発利用における作業員の放射線被曝防止の観点から極めて重要な課題である。ロボット技術は一般産業における定型的反復的作業用に盛んに開発が進められ、種々の分野で応用されているが、通常環境用のロボット技術を原子力施設内の高レベル放射線や高温等の極限環境下における不定型非反復的作業にそのまま適用しようとしても不可能なことが多い。したがって、高レベル放射線に耐え、あらかじめ確定できない状況にも臨機応変に対応して種々の作業ができる原子力独自の知能ロボット技術の研究開発が必要である。そこで、原子炉制御研究室では原子力施設の特殊な条件に適用可能な遠隔ロボット技術開発を進めており、その一環として、ビデオカメラが機能することができないような極限環境において使用することを目的とした知覚・認識技術の研究を進めている。

本報告は、超音波応用による移動ロボットの位置同定方法に関して行った基礎的な実験の結果についてまとめたものである。本報告では、超音波センサの基本的特性、位置同定方法、製作した位置同定プログラム及びその実験結果について述べると共に、センサ信号処理に使用したサブシステムの概要、プログラムの処理時間の短縮化を図るために行った並列処理の方法（セマフォ機能）等についても述べる。

2. 位置同定実験の概要

2.1 超音波センサ

超音波技術便覧等によると、超音波技術とは“人が聞くことを目的としない音波の応用に関する技術”と定義されている。夜の空を飛び回るコウモリや海中に棲息するイルカが超音波を発して障害物の位置や周囲の環境を確認をしたり、餌の存在を検知しているということが一般に良く知られているが、第2次世界大戦前は殆ど超音波の特性については知られていなかった。戦時に軍事的な面での利用が一部の専門家によって行われていた程度であった。戦後、いろいろな圧電材料が開発され超音波の発生と検出が容易になってきたため、超音波の応用範囲が次第に拡大されてきた。さらに最近のエレクトロニクスの急速な発展に伴って超音波技術も飛躍的な発展を遂げ、現在は医療診断、工業計測・診断、漁業海洋開発、画像形成等々、その応用面は多岐にわたっている。超音波は真空中を除く、固体、液体、気体等あらゆる媒質中を伝搬するが、その伝搬速度は媒質の種類によって大きな差があり、媒質の粘性や密度、温度等の物理的な条件によつても影響を受ける。超音波の伝搬速度は空气中で約340m/sec、水中で約1,440m/sec、金属（鋼材）中で約5,000m/secである。また、超音波がいろいろな媒質中を伝搬する際、そのレベルは減衰するが、その減衰率は媒質の種類によって異なる。超音波は固体や液体中では良く伝搬し、減衰率は小さいが、気体中では減衰率が大きい。また、超音波の減衰率は周波数によつても変化し、気体や液体中では周波数の2乗に比例して減衰することが知られている。

現在、空気中で使用される超音波センサは、20kHz～50kHz附近の周波数帯域のものが一般的であるが、医療診断等の分野で使用される超音波センサは数100kHz附近の周波数帯域であり、超音波顕微鏡に至っては数100MHzから数GHz程度の周波数を使用しているものもある。最近では空中超音波センサである送波器、受波器とも色々な特性を持った大小さまざまな物が市販されるようになっている。

本実験において使用した空中超音波センサは小型汎用で、容易に入手可能なものである。この超音波センサはセラミック共振子(バイモルフ形振動子)を用いた圧電効果方式のセンサである。図2.1⁴⁾にバイモルフ形振動子の振動の概念図を示す。このセンサは、2枚のセラミックの薄板であるジルコン・チタン酸鉛(PZT)振動板を2枚結晶軸を逆に貼り合わせた構造をしており、この2枚の板に交流電圧を印加すると、それぞれの板が圧電効果により交互に伸縮曲げ動作を繰返し振動する原理を応用したものである。図2.2⁵⁾に使用した超音波センサの構造例を示す。このセンサの中心周波数は40kHzである。送波器および受波器の周波数特性の一例を図2.3⁷⁾に示す。写真2.1に使用した超音波センサ(単体)の外観を示す。図2.4⁷⁾にその外形寸法を、図2.5⁷⁾にセンサ単体の指向特性を参考として示す。

本実験の目的に合う送波器は、その送波器を中心として2次元の全方向に一様な超音波を発信させる必要があるが、完全な点状送波器を製作することは困難であるため、ある程度2次元の全方向に超音波を発信させることができるように、6個の送波器を正六角形状に配置し、各センサを同じ信号で同時に駆動するようにした。その六角柱状に配置した送波器の外観を写真2.2に示す。

2.2 超音波応用による位置同定方法の原理

2.2.1 超音波による距離測定

超音波の空中伝搬速度は空気の温度(気温)即ち空気密度によって変化するが、超音波の伝搬経路内の気温が一定しており、かつ気流の乱れ等が無い場合、超音波は等速度で空気中を伝搬する。超音波の空中伝搬速度Cと気温Tの関係は次式で表わされる。

$$C = 331.5 + 0.607T \quad (\text{m/sec}) \quad (1)$$

但し C : 超音波の空中伝搬速度 (m/sec)

T : 気温 (°C)

したがって、超音波送波器から超音波パルスを断続的に送波し、それを離れた位置にある受波器で受波し、“送波”時点から“受波”時点までの所要時間tを計測することにより、(2)式から送波器と受波器間の距離Lを求めることができる。

$$L = C \cdot t \quad (\text{m}) \quad (2)$$

但し L : 送波器・受波器間距離 (m)
 C : 超音波の空中伝搬速度 (m/sec)
 t : 伝搬時間 (sec)

2.2.2 超音波送波器の位置同定

超音波送波器と無線送信機を移動物体に取り付けて、その送波器から超音波及び基準となる電波のパルス信号を断続的に送波し、それを離れた位置にある3個の受波器で受波する。超音波の“送波”時点から“受波”時点までの時間をそれぞれ計測することにより、各受波器から移動物体までの距離を求め、この3つの値から移動物体の位置を算出することができる。図2.6に移動物体の位置の同定方法の概念図を示す。

同図において、Sは超音波を発しながらX-Y座標系内を2次元に移動する物体（超音波送波器）を表し、 $R_1 \sim R_3$ はSと同じX-Y座標系の同一平面内に配置された超音波受波器の位置を示している。3個の固定受波器は予め与えられた既知の位置に配置されているものとし、それらの位置においてSから送波される超音波の伝搬時間（到達時間）を測定して、Sの位置を計算により求める。3個の固定受波器によって測定した超音波の伝搬時間を、それぞれ t_1 、 t_2 、 t_3 とすると、超音波送波器と各固定受波器間の距離 L_1 、 L_2 、 L_3 は(2)式に基づいて求められる。

3個の受波器 R_1 、 R_2 、 R_3 はあらかじめ決められた既知の位置 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 、 (X_3, Y_3) に配置されているため、各固定受波器間の距離 $L_1 \sim L_3$ が求まれば超音波送波器Sの位置は幾何学的な方法によって求めることができる。即ち $L_1 \sim L_3$ が測定誤差ゼロで同定されたならば、 L_1 、 L_2 、 L_3 を半径とする3個の円または円弧を同一平面上に描くと、3個の円が一点で交わる。その点が超音波送波器Sの位置となる。しかし、通常、超音波伝搬時間 $t_1 \sim t_3$ に比例するアナログ信号 $V_{R1} \sim V_{R3}$ （距離信号）および気温 V_t の値には僅かではあるが、測定系のゲイン設定誤差やゼロ点のドリフト、雑音、気流の乱れ等による誤差を生じる可能性がある。そのため3個の円は必ずしも一点で交わらず、いろいろな位置の組合せになることが考えられる。超音波送波器と各固定受波器間の距離 L_1 、 L_2 、 L_3 に測定誤差を生じた場合の代表的な状態を図2.7に示す。

このように測定値のばらつきによって3個の円の交差状態が変化するため、交点の有無の判定や交点位置の計算をすべての交差状態について個別にプログラミングしたのでは、プログラムが繁雑になる。そこで、プログラミングにおいてはこの多様な交差状態を厳密に区別するために、送受波器間の距離 L_1 、 L_2 、 L_3 を半径とする各円が他の2つの円と交わるか否かを次の(3)～(5)式によって判定する。

$$|L_1 - L_2| \leq \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \leq L_1 + L_2 \quad \text{----- (3)}$$

但し L_1 : 送波器Sと固定受波器 R_1 間の距離

L_2 : 送波器Sと固定受波器 R_2 間の距離

X_1, Y_1 : 固定受波器 R_1 の位置座標

X_2, Y_2 : 固定受波器 R_2 の位置座標

$$|L_2 - L_3| \leq \sqrt{(X_2 - X_3)^2 + (Y_2 - Y_3)^2} \leq L_2 + L_3 \quad (4)$$

但し L_2 : 送波器 S と固定受波器 R_2 間の距離

L_3 : 送波器 S と固定受波器 R_3 間の距離

X_2, Y_2 : 固定受波器 R_2 の位置座標

X_3, Y_3 : 固定受波器 R_3 の位置座標

$$|L_3 - L_1| \leq \sqrt{(X_3 - X_1)^2 + (Y_3 - Y_1)^2} \leq L_3 + L_1 \quad (5)$$

但し L_3 : 送波器 S と固定受波器 R_3 間の距離

L_1 : 送波器 S と固定受波器 R_1 間の距離

X_3, Y_3 : 固定受波器 R_3 の位置座標

X_1, Y_1 : 固定受波器 R_1 の位置座標

(3)～(5)式をすべて満足した場合は各円が他の 2 つの円と互に交差することを示し、この場合のみ(6)式以降の計算を進める。式の内 1 つでも条件を満足しないものがあった場合、即ち他の 2 つの円と交わらない円が存在する場合は、そのデータによる送波器の位置同定計算を中断し、次の新しいデータを読み込んで再度判定を繰返す。(3)～(5)式をすべて満足する場合は、(6)～(14)式のマトリックス定数を計算する。

$$\alpha_{12} = X_2 - X_1 \quad (6)$$

$$\beta_{12} = Y_2 - Y_1 \quad (7)$$

$$\gamma_{12} = \frac{1}{2} \left\{ (L_1^2 - L_2^2) + (X_2^2 - X_1^2) + (Y_2^2 - Y_1^2) \right\} \quad (8)$$

但し L_1 : 送波器 S と固定受波器 R_1 間の距離

L_2 : 送波器 S と固定受波器 R_2 間の距離

X_1, Y_1 : 固定受波器 R_1 の位置座標

X_2, Y_2 : 固定受波器 R_2 の位置座標

$$\alpha_{23} = X_3 - X_2 \quad (9)$$

$$\beta_{23} = Y_3 - Y_2 \quad (10)$$

$$\gamma_{23} = \frac{1}{2} \left\{ (L_2^2 - L_3^2) + (X_3^2 - X_2^2) + (Y_3^2 - Y_2^2) \right\} \quad (11)$$

但し L_2 : 送波器 S と固定受波器 R_2 間の距離

L_3 : 送波器 S と固定受波器 R_3 間の距離

X_2, Y_2 : 固定受波器 R_2 の位置座標

X_3, Y_3 : 固定受波器 R_3 の位置座標

$$\alpha_{31} = X_1 - X_3 \quad \dots \quad (12)$$

$$\beta_{31} = Y_1 - Y_3 \quad \dots \quad (13)$$

$$\gamma_{31} = \frac{1}{2} \left\{ (L_3^2 - L_1^2) + (X_1^2 - X_3^2) + (Y_1^2 - Y_3^2) \right\} \quad \dots \quad (14)$$

但し L_1 : 送波器 S と固定受波器 R_1 間の距離

L_3 : 送波器 S と固定受波器 R_3 間の距離

X_1, Y_1 : 固定受波器 R_1 の位置座標

X_3, Y_3 : 固定受波器 R_3 の位置座標

次に、図 2.8 に示すように、半径 L_1 と L_2 の円弧の交点を P_1 とすると、 P_1 の座標 (X_{12}, Y_{12}) は(15)式のマトリックスを展開した(16)及び(17)式によって求められる。同様に、半径 L_2 と L_3 の円の交点を P_2 、半径 L_3 と L_1 の円の交点を P_3 とすると、 P_2 の座標 (X_{23}, Y_{23}) 及び P_3 の座標 (X_{31}, Y_{31}) はそれぞれ(19)と(20)式及び(22)と(23)式によって求められる。

$$\begin{bmatrix} X_{12} \\ Y_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{12} & \beta_{12} \\ \alpha_{23} & \beta_{23} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (15)$$

但し X_{12}, Y_{12} : 半径 L_1 と L_2 の円の交点 P_1 の位置座標

$$X_{12} = \frac{\beta_{23} \cdot \gamma_{12} - \beta_{12} \cdot \gamma_{23}}{\alpha_{12} \cdot \beta_{23} - \beta_{12} \cdot \alpha_{23}} \quad \dots \quad (16)$$

$$Y_{12} = \frac{\alpha_{12} \cdot \gamma_{23} - \alpha_{23} \cdot \gamma_{12}}{\alpha_{12} \cdot \beta_{23} - \beta_{12} \cdot \alpha_{23}} \quad \dots \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} X_{23} \\ Y_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{23} & \beta_{23} \\ \alpha_{31} & \beta_{31} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (18)$$

但し X_{23}, Y_{23} : 半径 L_2 と L_3 の円の交点 P_2 の位置座標

$$X_{23} = \frac{\beta_{31} \cdot \gamma_{23} - \beta_{23} \cdot \gamma_{31}}{\alpha_{23} \cdot \beta_{31} - \beta_{23} \cdot \alpha_{31}} \quad \dots \quad (19)$$

$$Y_{23} = \frac{\alpha_{23} \cdot \gamma_{31} - \alpha_{31} \cdot \gamma_{23}}{\alpha_{23} \cdot \beta_{31} - \beta_{23} \cdot \alpha_{31}} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} X_{31} \\ Y_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{31} & \beta_{31} \\ \alpha_{12} & \beta_{12} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (21)$$

但し X_{31}, Y_{31} : 半径 L_s と L_1 の円の交点 P_s の位置座標

$$X_{31} = \frac{\beta_{12} \cdot \gamma_{31} - \beta_{31} \cdot \gamma_{12}}{\alpha_{31} \cdot \beta_{12} - \beta_{31} \cdot \alpha_{12}} \quad (22)$$

$$Y_{31} = \frac{\alpha_{31} \cdot \gamma_{12} - \alpha_{12} \cdot \gamma_{31}}{\alpha_{31} \cdot \beta_{12} - \beta_{31} \cdot \alpha_{12}} \quad (23)$$

次に 3 つの交点 P_1, P_2, P_3 を結んで造られる三角形の重心 $G(X, Y)$ を(24)式および(25)式から求める。この三角形の重心 G が最終的に求める超音波送波器の位置である。

$$X = \frac{1}{3} (X_{12} + X_{23} + X_{31}) \quad (24)$$

$$Y = \frac{1}{3} (Y_{12} + Y_{23} + Y_{31}) \quad (25)$$

2.2.3 計測信号のスケーリング

3 個の固定受波器によって超音波の伝搬時間を測定する回路の詳細については次の第 3 章で述べるが、ここでは超音波を受波した後の計測信号のスケーリングについて述べる。

超音波伝搬時間計測回路には“送波” 時点から“受波” 時点までの伝搬時間を計測するために 12 ビットのバイナリーカウンタを使用しているが、このバイナリーカウンタで計測できる最大距離 L_{max} は次式で表わされる。

$$L_{max} = 2^N \times 1/F \times C \quad (m) \quad (26)$$

但し N : バイナリ・カウンタのビット数 (12 ビット、 $\therefore 2^{12} = 4,096$)

F : ゲートパルス周波数 (400kHz)

C : 超音波の空中伝搬速度 (m/sec)

ここで(26)式中の超音波の空中伝播速度 C は気温によって変化するため、超音波の空中伝播速

度と気温Tの関係式(1)を(26)式に代入すると(27)式になる。

$$L_{\max} = 3.39456 + 0.00621568T \quad (\text{m}) \quad \dots \quad (27)$$

但し T : 気温 (°C)

気温Tの測定には3線式の測温抵抗体(Pt100Ω)とPt/E変換器を使用し0~50°Cの変化に対し0~+10Vのアナログ信号を取り出している。したがってPt/E変換器の出力電圧V_tと気温Tの関係式は(28)式で表わされる。

$$T = 5 \times V_t \quad (\text{°C}) \quad \dots \quad (28)$$

但し V_t : Pt/E変換器の出力電圧 (V)

(28)式を温度補正を行うために(27)式に代入すると、温度補正後の最大測定距離L_{max}は次式で表わされる。

$$L_{\max} = 3.39456 + 0.0310784V_t \quad (\text{m}) \quad \dots \quad (29)$$

超音波伝搬時間計測回路のD/A変換器は最大距離L_{max}を計測した時+10Vのアナログ出力電圧が得られるように調整されている。したがって任意の送受波器間距離Lを測定した場合のD/A変換器の出力電圧とその距離との関係は次式で表される。

$$L = L_{\max} \times V_R / V_{R\max} \quad (\text{m}) \quad \dots \quad (30)$$

但し V_R : D/A変換器の出力電圧 (V)

V_{Rmax} : D/A変換器のフルスケール出力電圧 (+10V)

ここで(29)式を(30)式に代入すると(31)式になり、D/A変換器の出力電圧V_RとPt/E変換器の出力電圧V_tとから気温の補正を行った後の送受波器間の距離Lを求めることができる。

$$L = (0.339456 + 0.00310784V_t) V_R \quad (\text{m}) \quad \dots \quad (31)$$

但し V_t : Pt/E変換器の出力電圧 (V)

V_R : D/A変換器の出力電圧 (V)

2.2.4 計測信号のゲイン補正

超音波伝搬時間計測回路のD/A変換器の出力信号(送受波器間距離信号)のゲインおよびゼロ

点の僅かなオフセットを調整するため、(32)式に基づいてプログラムの中で各固定受波器の距離出力信号に対するゲインおよびゼロ点の補正計算を行っている。

$$V_R = V \times G + Z \quad (V) \quad \text{----- (32)}$$

但し V_R : 補正後の送受波器間距離信号(V)

V : 補正前の送受波器間距離信号(V)

G : ゲイン補正係数 (0~+2.000)

Z : ゼロ点補正係数 (0~±2.000)

ここで(32)式を(31)式に代入すると、ゲインとゼロ点の補正を行ったD/A変換器の出力電圧 V_R とPt/E変換器の出力電圧 V_t から気温の補正を行った後の送受波器間の距離 L は最終的に(33)式によって求められる。

$$L = (0.339456 + 0.00310784V_t) \times (V \times G + Z) \quad (\text{m}) \quad \text{----- (33)}$$

但し V_t : Pt/E変換器の出力電圧 (V)

V : 補正前の送受波器間距離信号(V)

G : ゲイン補正係数 (0~+2.000)

Z : ゼロ点補正係数 (0~±2.000)

(33)式によって補正を行った後の各超音波伝搬時間計測回路出力信号 $L_1 \sim L_9$ を送受波器間距離データとして(2)式以降の超音波送波器位置同定演算で使用する。

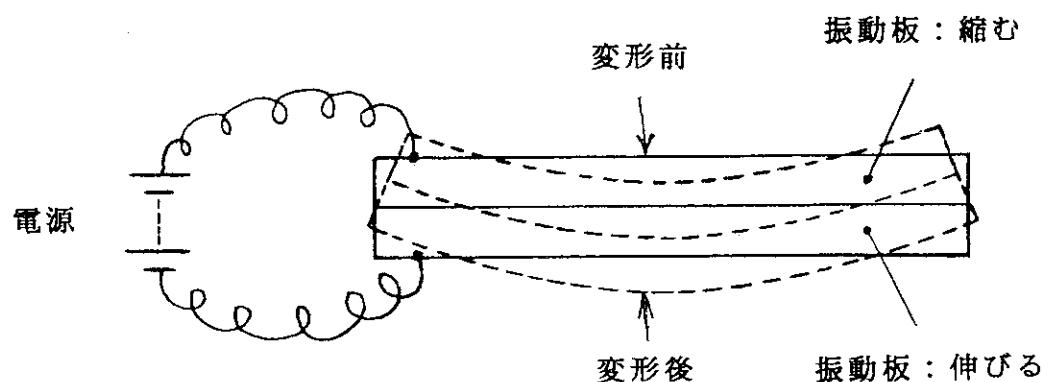


図 2.1 バイモルフ形超音波振動子の振動概念図

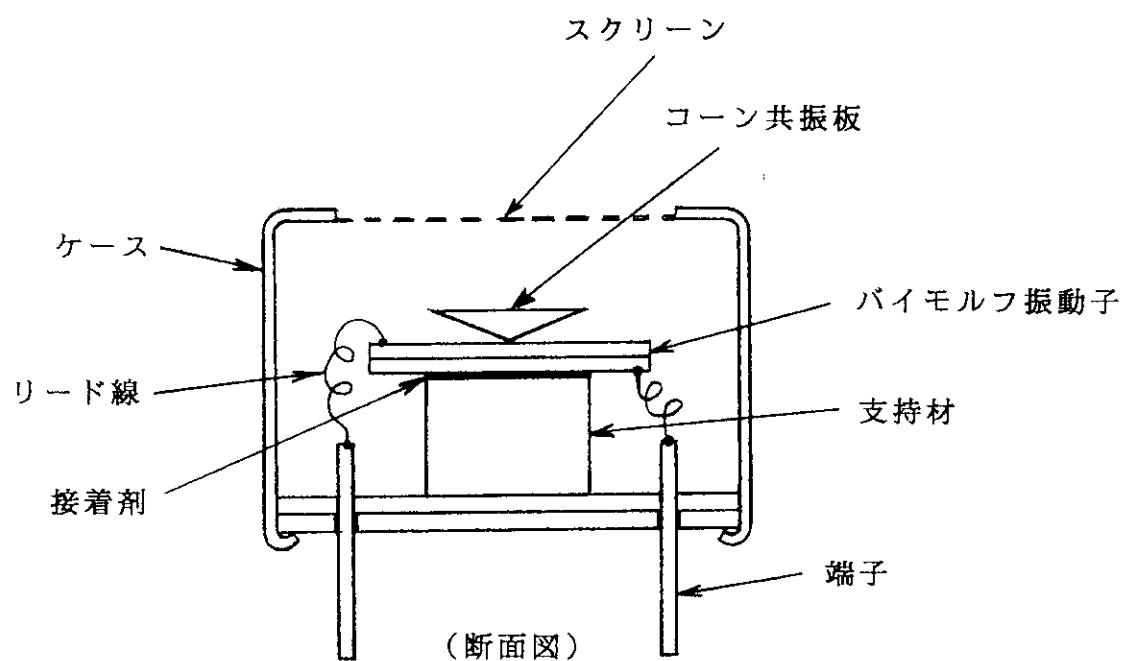
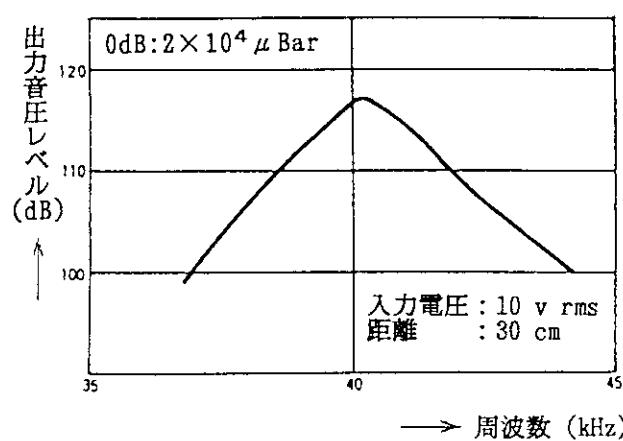
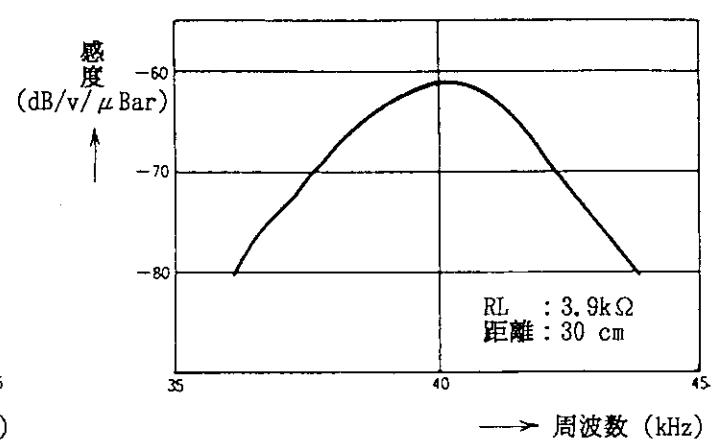


図 2.2 超音波センサの構造例



(a) 送波器



(b) 受波器

図 2.3 超音波センサの周波数特性 (一例)

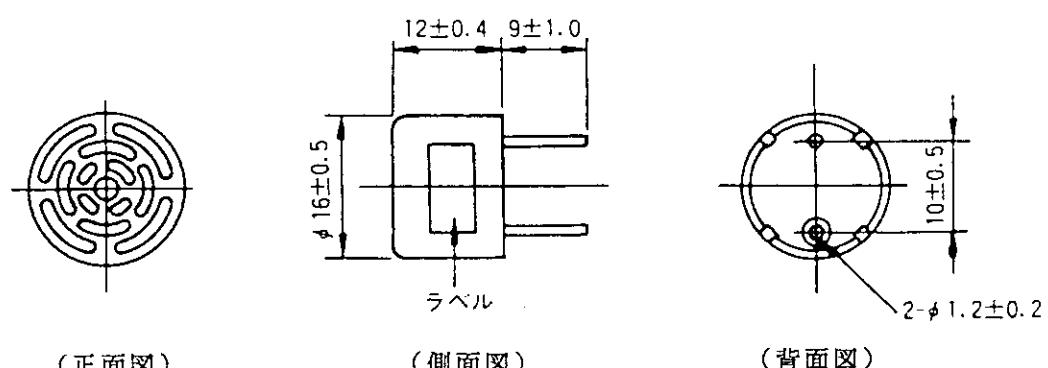


図 2.4 使用した超音波センサの外形寸法

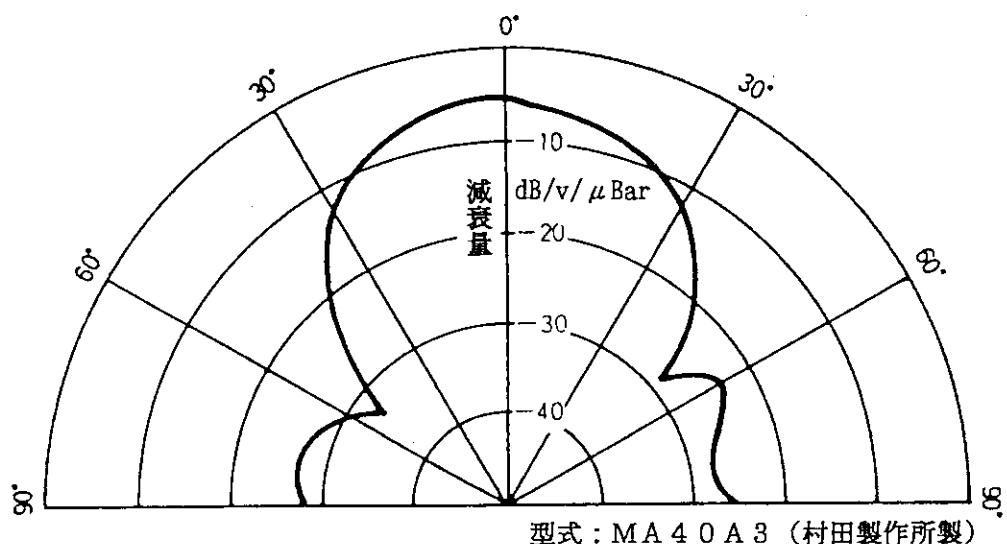


図 2.5 超音波センサの指向特性

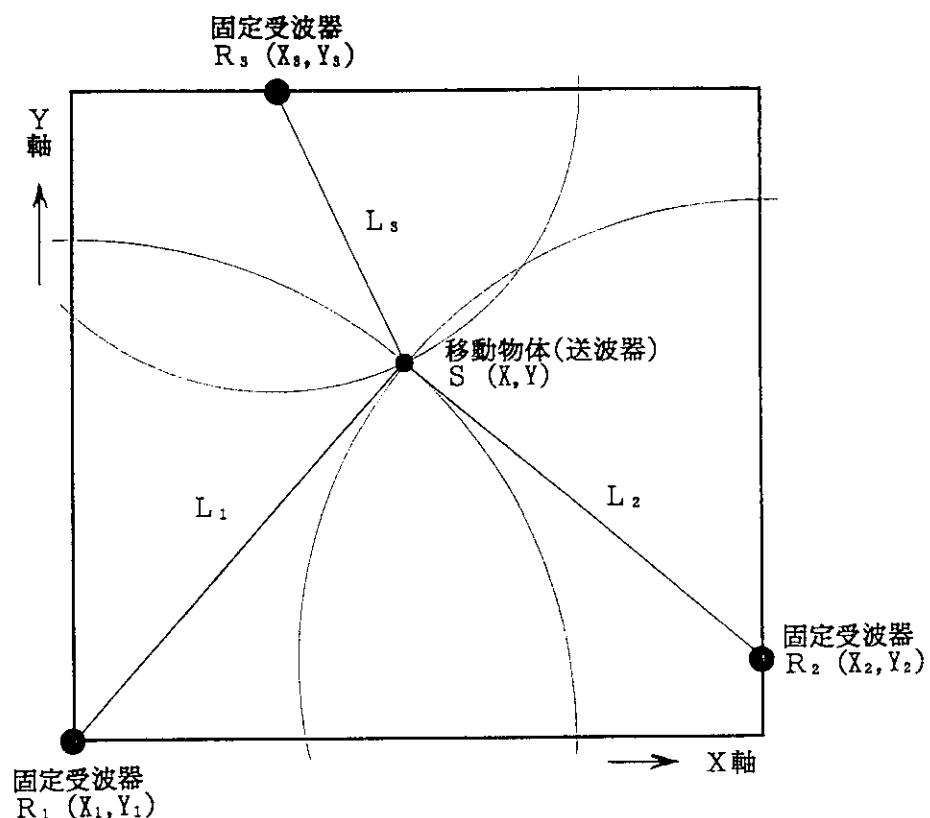


図 2.6 移動物体位置検出方法の概念図

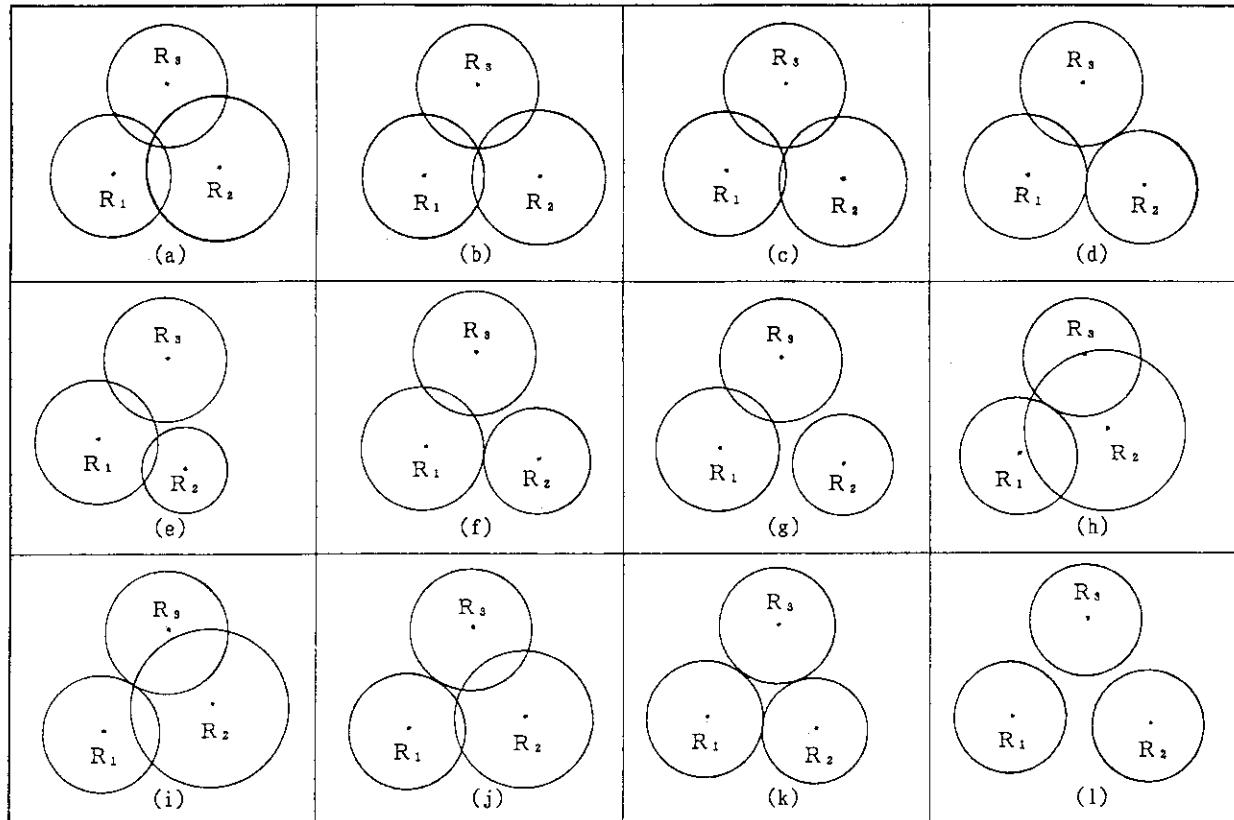


図 2.7 送受波器間距離に測定誤差を生じた場合の状態

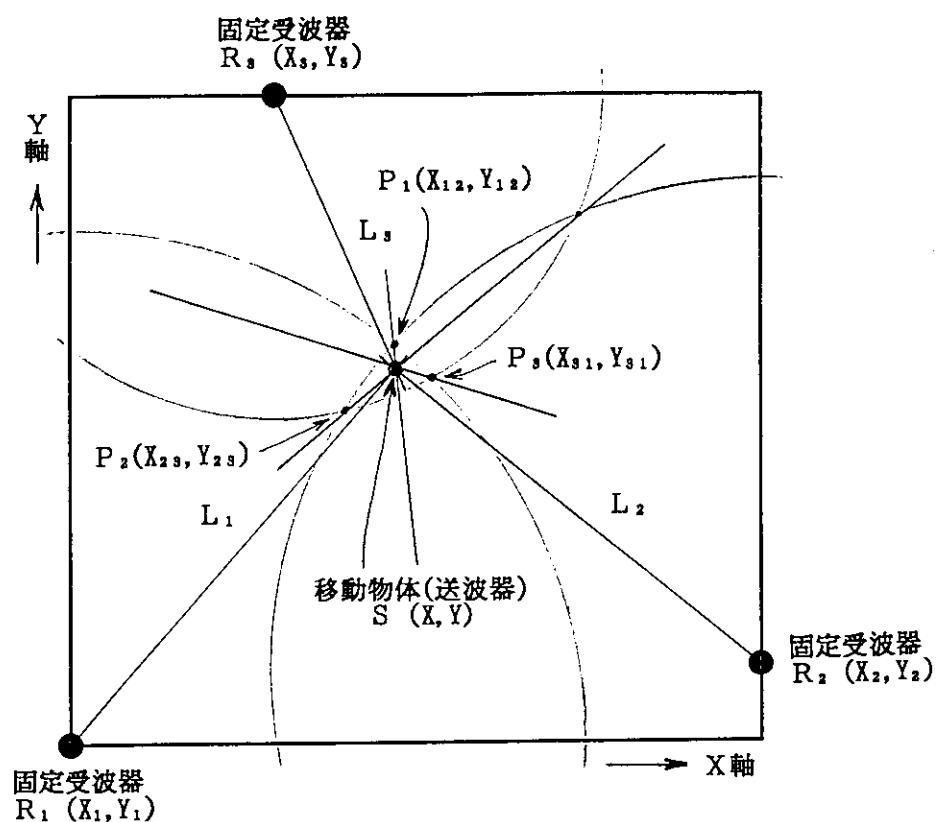


図 2.8 移動物体位置検出方法の原理図

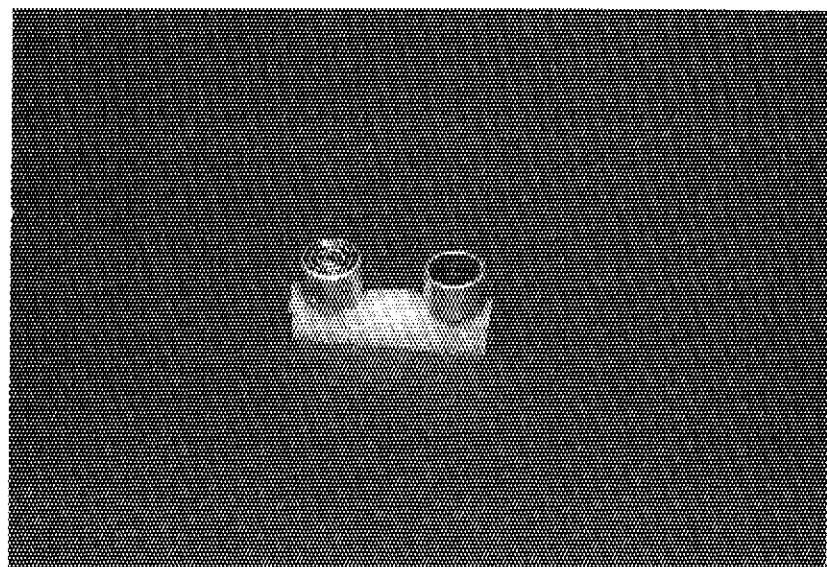


写真 2.1 超音波センサの外観（左：送波器，右：受波器）

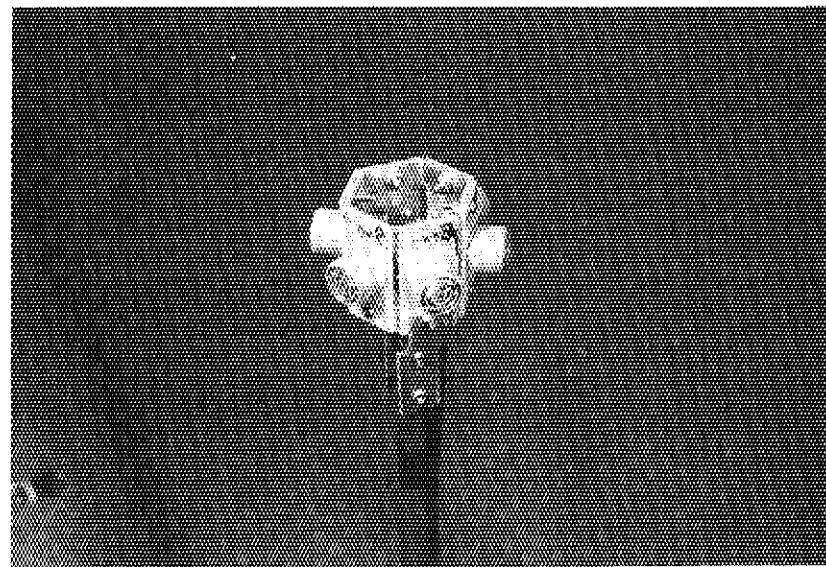


写真 2.2 6 角柱状送波器の外観

3. 位置同定用の実験回路

今回構築した超音波位置同定実験回路のブロックダイアグラムを図3.1に示す。超音波位置同定実験回路は超音波送波回路、超音波受波回路及び超音波伝搬時間計測回路、A/D変換装置、演算処理装置及びCRT等から構成される。超音波送波回路から発信された超音波は3箇所に設置された超音波受波器で検出し、受波回路を経て超音波伝搬時間計測回路へ送られ、そこで送波から受波に至るまでの超音波伝搬時間が計測される。計測された伝搬時間に比例するアナログ信号（送受波器間距離信号）が超音波伝搬時間計測回路から出力され、DASBOXのA/D変換装置に入力される。A/D変換装置には温度補正を行うための気温信号が同時に入力される。A/D変換された各信号は、演算処理装置Sun3/260に送られ、演算処理装置でそのデータを基に位置同定演算を実行する。位置同定計算によって求められた送波器の位置はCRT上に実時間でグラフプロットされる。写真3.1に送受波器を含めた送波回路の外観を示す。写真内のプリント基板が送波回路である。写真3.2に超音波受波回路及び超音波伝搬時間計測回路の外観を示す。同写真においてシャーシ内の右側の基板が超音波受波回路であり、中央の基板が超音波伝搬時間計測回路である。次に各回路の概要について述べる。

3.1 超音波送波回路

図3.2に超音波送波回路図を示す。超音波を発振させる回路は2回路有り、用途に応じてジャンパーピンを差替えることによって何れか一方の回路を選択できる。1つは矩形波を連続的に発振させるCR発振回路、もう1つは断続的にパルスを発振させる回路である。発振周波数は共に40kHzに設定してある。連続発振回路はC-MOS形ICとCRを組合せたマルチバイブレータであり、トリマー抵抗器VR₃を調整することにより発振周波数を変えることができる。断続的に超音波を発振させる回路は、既製品で便利な超音波センサモジュールが入手できたので、その回路の一部を利用した。超音波センサモジュールのブロックダイアグラムを図3.3に示す。このセンサモジュールはソリッドステートな横29×縦30×高12mmの小形のブロックであり、プリント基板に直接取り付けが可能である。このブロック内に超音波の送波回路と受波回路が内蔵されており、超音波センサと発振周波数や超音波の断続周期調整用の可変抵抗器を外付けすればそのまま反射形の超音波距離計が構成できる。本実験回路にはこのセンサモジュールの送波回路のみ使用し、受波回路は使用していない。40kHzの超音波を送波する時間幅は450μsecでその間に18個の超音波パルスを送波する。この18個の超音波パルスを50msec周期毎に断続的に送波を繰返すようにしている。位置同定実験に使用した超音波の送波器は、6個の送波器を6角柱状に配置したものであるが、これらの送波器を同時にドライブするためセンサモジュールで発振したパルスをC-MOS形ICのドライバアンプを介して6系統に分割し、各送波器に与えている。送波器をドライブする超音波パルスの振幅は約10Vである。超音波センサモジュールから、超音波伝搬時間を計測するための同期信号として、送波トリガパルスを取り出し超音波伝搬時間計測回路へ送っている。

3.2 超音波受波回路

超音波受波回路の回路図を図3.4に示す。超音波センサで受波された超音波信号は初段のオペアンプで約1,000倍に増幅された後、検波され、さらに約2,000倍増幅され、次の超音波伝搬時間計測回路へ送られる。超音波伝搬時間計測回路へ送られた受波信号は整形され伝搬時間計測用カウンタの入力ゲートを閉じる“CLOSE”信号となる。入力ゲートは受波信号の立ち上がりエッジのタイミングで閉している。

3.3 超音波伝搬時間計測回路

超音波伝搬時間計測回路の回路図を図3.5に示す。超音波伝搬時間計測回路の距離測定の基準となる基準パルス発振器には2MHzのX-TALオシレータを用いた単安定型マルチバイブレータとクロックパルス発生用ICを用いた2つの回路が有る。通常はX-TALオシレータを用いた単安定型マルチバイブレータを使用しているが、任意の周波数でパルスを発生させたい場合にはジャンパピンを差し替えて、クロックパルス発生用IC側を選択し、トリマ抵抗の調整によって任意の周波数でパルスを発生させることができる。2MHzの単安定型マルチバイブレータの発振周波数を1/5デバイダで400kHzに落とし、そのパルスをカウンタ入力ゲートを通してカウンタに与えている。カウンタ入力ゲートは超音波の送波トリガパルスによってゲートを“OPEN”にし、超音波受波回路から送られた受波信号の立上がりのエッジによってゲートを“CLOSE”にしている。したがつて超音波を送波した時点からその超音波が受波器に到達するまでの間、400kHzのパルスがカウンタに入力され、計測される。カウンタは4ビットのバイナリーカウンタICを3個カスケードに接続し、12ビットのバイナリーカウンタとして用いている。そのカウンタの出力をフリップフロップのバッファとインバータを介してD/A変換器に入力している。バイナリーカウンタの12ビットデータをフリップフロップ型のバッファにSTROBEするタイミングパルスは、カウンタ入力ゲート信号の“CLOSE”エッジから約270μsec幅のパルスを作り出し、これを与えている。バイナリーカウンタは受波信号の立ち下がりのエッジから更に1msec遅れたタイミングでリセットされる。2個のモノステーブルマルチによって受波信号の立ち下がりのエッジから1msec遅れたタイミングで200μsec幅のパルスを発生し、そのパルスがバイナリーカウンタのリセット信号入力端子に送られてバイナリーカウンタをリセットしている。D/A変換器は12ビットのユニポーラ型であり、0～+10Vのアナログ電圧が出力される。D/A変換器の出力電圧のゲインおよびゼロ点はトリマ抵抗によって微調整が可能である。D/A変換器の出力信号、即ち超音波送波器と受波器間の距離に比例したアナログ信号は、バッファアンプおよびケーブルラインドライブ用の直流アンプを介してDASBOXのマルチプレクサに送られる。

3.4 A/D変換装置

A/D変換装置は次に述べる演算処理装置の周辺装置であり、DASBOXと呼ばれている筐体内に収納されている。DASBOXにはA/D変換装置の他にD/A変換装置、ディジタルI/O装置が収納されている。

るが、本実験用のシステムではマルチプレクサとA/D変換装置のみを使用している。表3.1にA/D変換装置の主要性能を示す。A/D変換装置前段部のマルチプレクサの入力チャンネル数は16Chあるが、本実験では、この内No.1～4Chを使用した。No.1～3Chが送受波器間距離に比例したアナログ信号入力用、No.4Chが温度信号入力用である。A/D変換装置の入力電圧レンジは±5V (GAIN-1) と±10V (GAIN-2) の2つのレンジが有り、この何れかを押釦で切替えることができる。本実験では±10V (GAIN-2) のレンジを使用した。各チャンネルの入力信号はサンプルホールド機能により同時サンプリングが可能である。

3.5 演算処理装置

演算処理装置は32ビットの高速演算処理機能を備えたSun3/260型ワークステーションであり、現在使用しているOSはUNIX Ver 4.03である。浮動小数点演算の処理速度を上げるために、サイクルタイム20MHzのFPUコプロセッサを使用している。CRT装置は19インチの高解像度カラーディスプレイで1,152×900画素のグラフィック機能を備えたものである。CRTのマルチウインドウに演算結果を実時間でカラーグラフィックス表示させることができる。本実験におけるカラーグラフィックスの実行にはSunView環境下でSunCoreカラーグラフィックスライブラリを使用した。SunCoreは2次元及び3次元の座標変換、拡大、縮小、回転等のカラーグラフィックス機能を備えたものであるが、本実験では2次元の機能のみを使用した。Sun3/260システムの主メモリ容量は16Mバイト、ハードディスク容量は560Mバイトであり、大容量のデータファイルを必要に応じて作成することができる。本実験用プログラムはC言語を用いて作成した。

表 3.1 A/D 変換装置の主要性能

項目	仕様
入力チャンネル数	16 Ch
A/D 変換時間	1.95 μsec/Ch
A/D 変換分解能	12 ビット
データ型式	2'Sコンプリメント
最高サンプリング周波数	512 kHz (1 Chの時)
サンプリング方式	全チャンネル同時サンプル
データバッファメモリ容量	4 Mワード
最大サンプリング数	16 Mサンプル/フレーム
最大フレーム数	65 Kフレーム, 無制限
入力信号レンジ	±5 V, ±10 V
信号型式	シングルエンド
入力端子	BNCコネクタ
入力インピーダンス	1 MΩ以上
トリガレベル	TTL
較正用基準電圧	0 V, ±5 V
CPU I/F 方式	DMA (VME-DMAC)

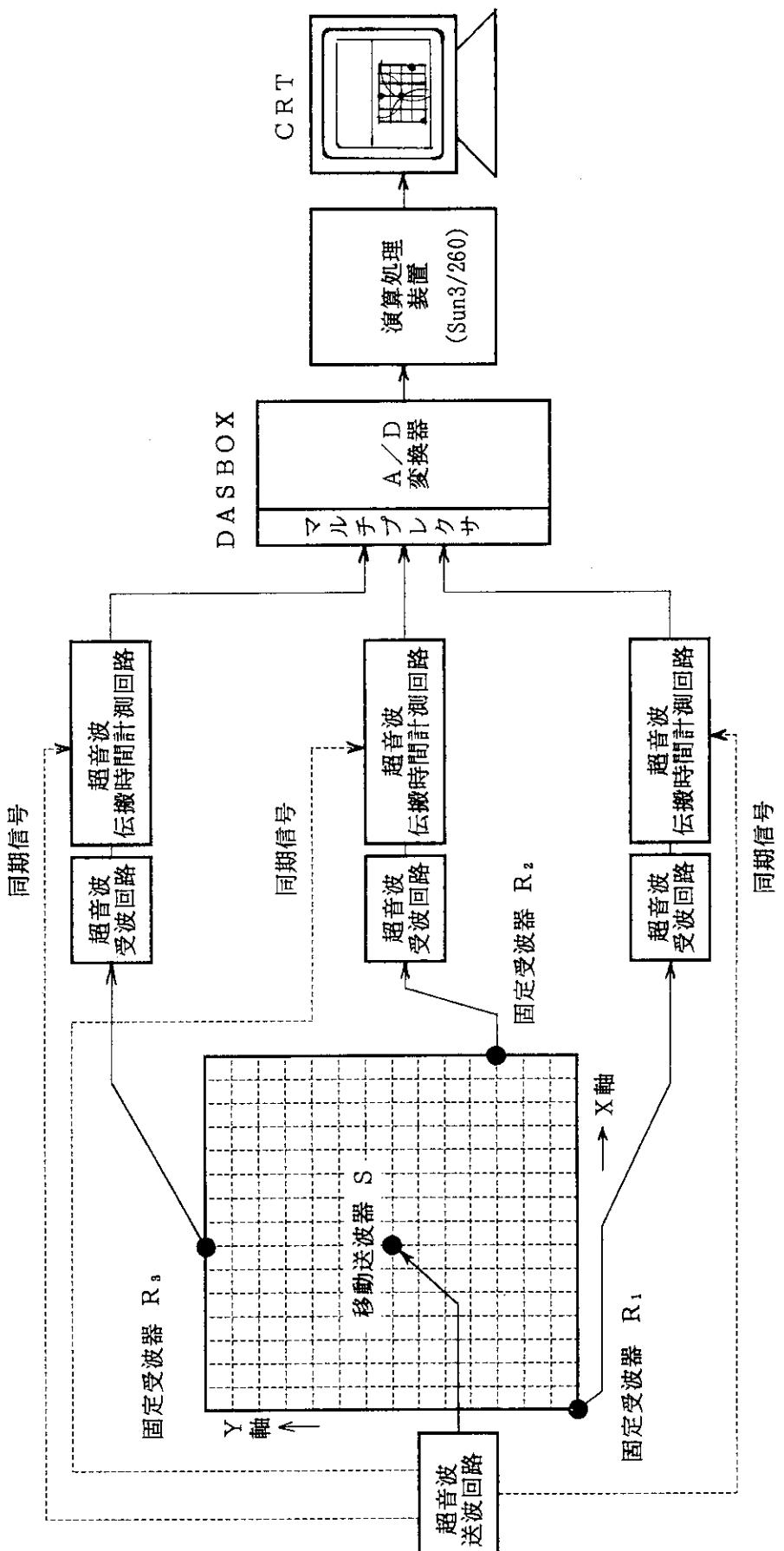


図 3.1 超音波位置検出実験回路のプロックダイアグラム

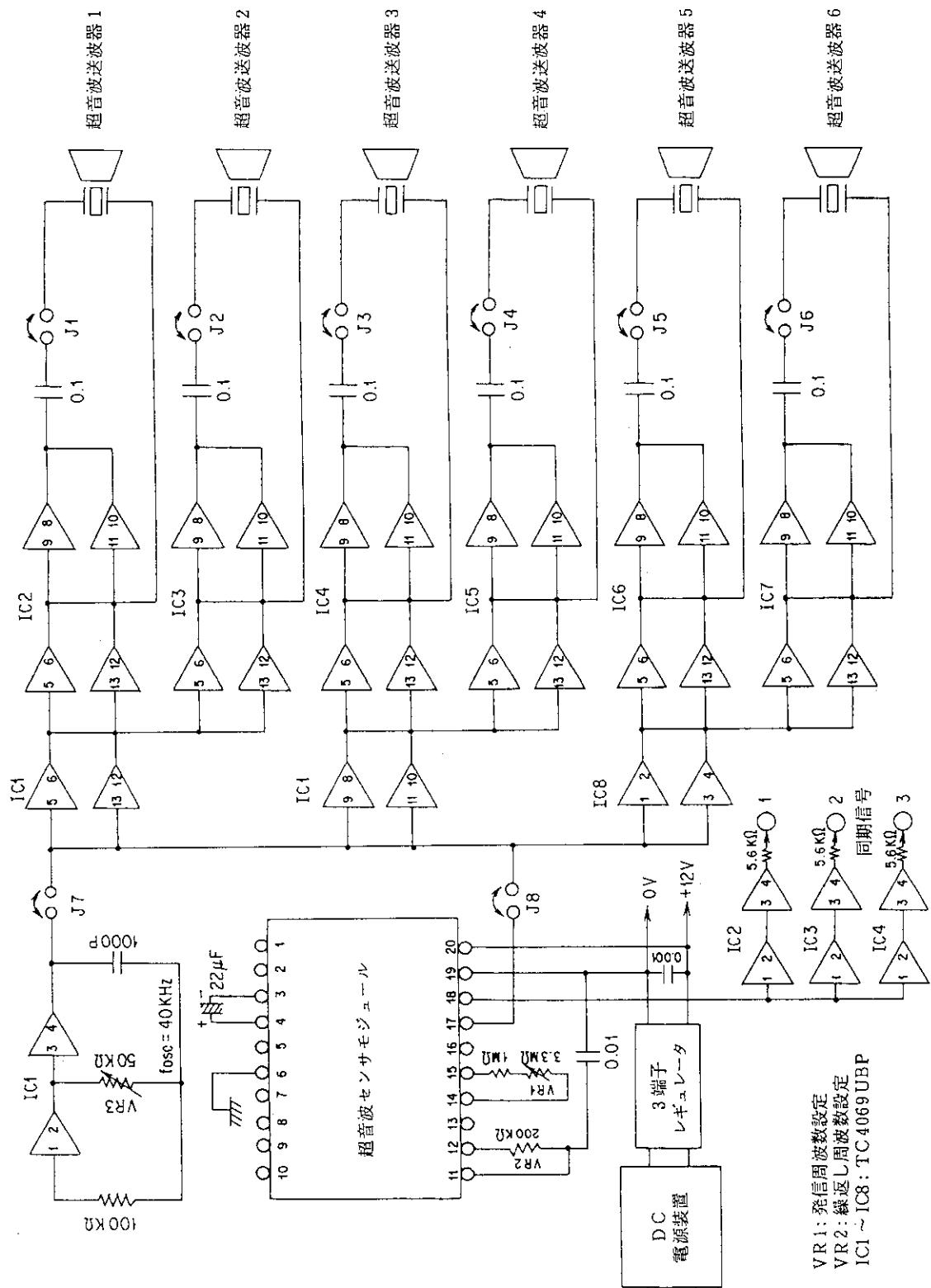


图 3.2 超音波送波回路

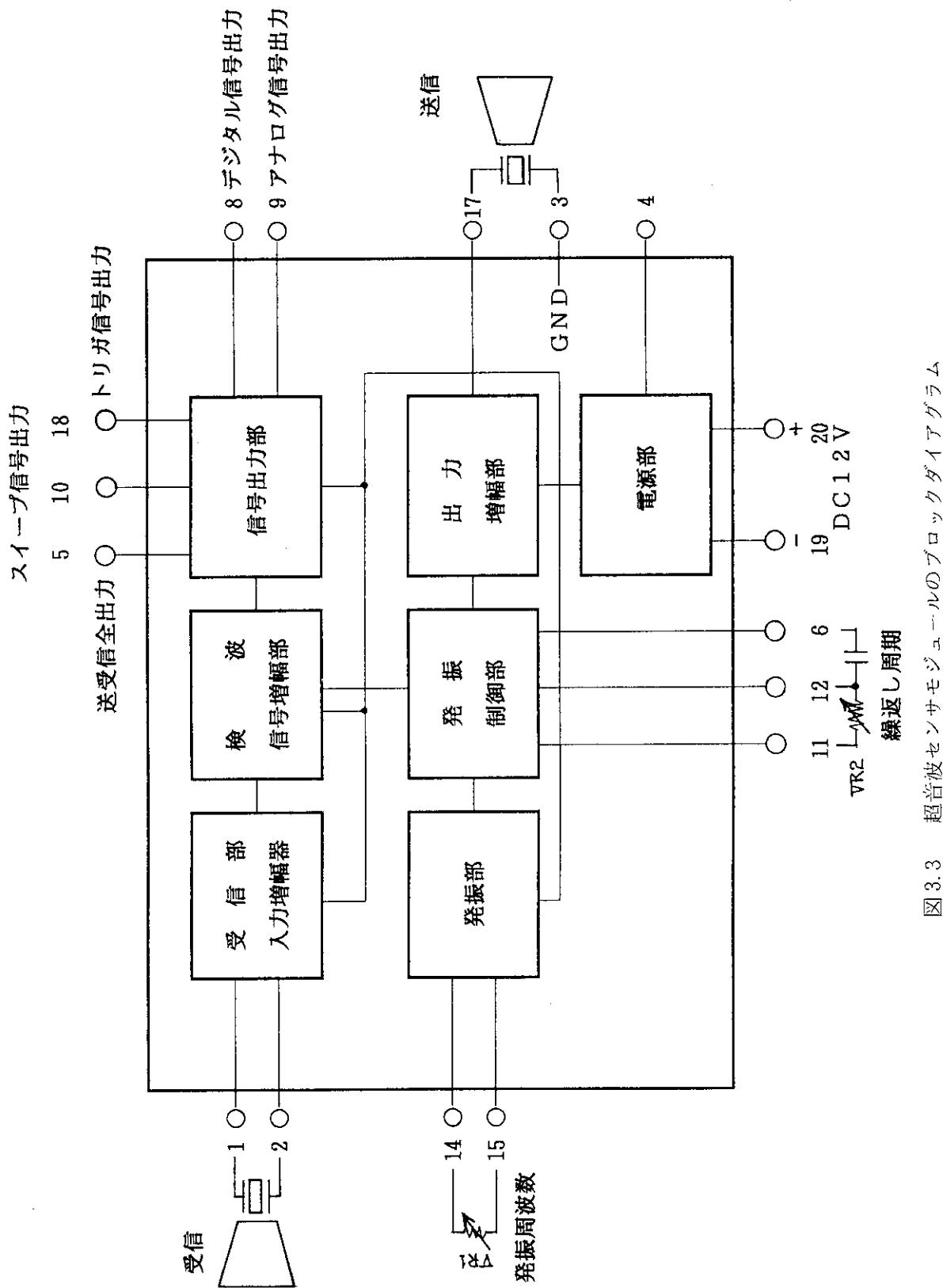


図 3.3 超音波センサモジュールのプロトタイプアダラム

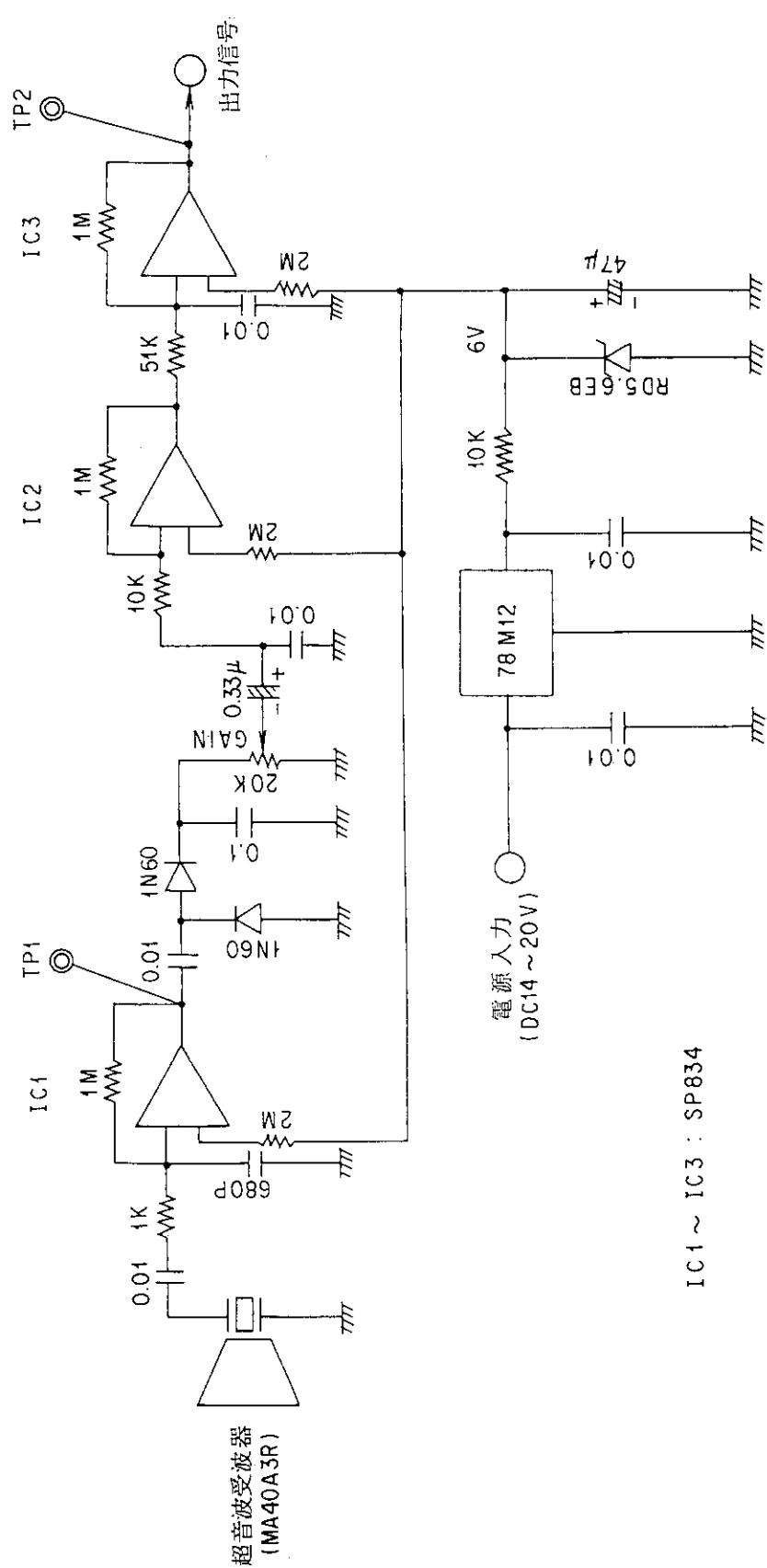


图 3.4 超音波受波回路

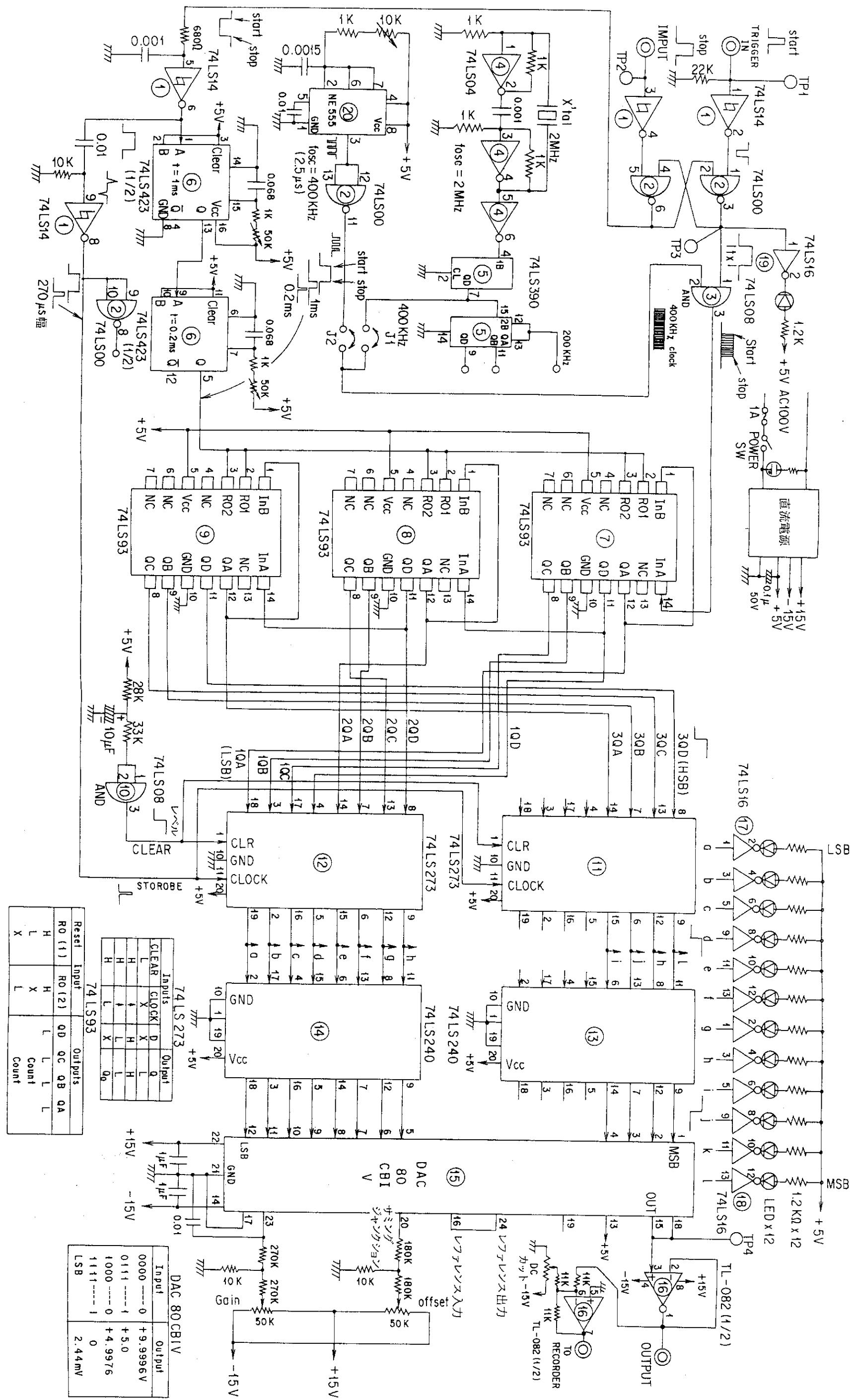


図3.5 超音波伝搬時間計測回路

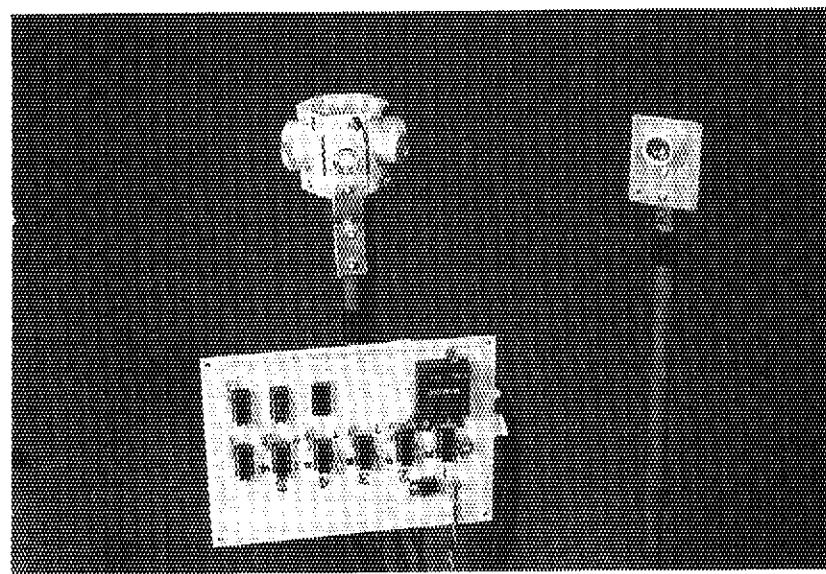


写真 3.1 超音波送波回路の外観
(左下：送波回路基板, 左上：送波器, 右：受波器)

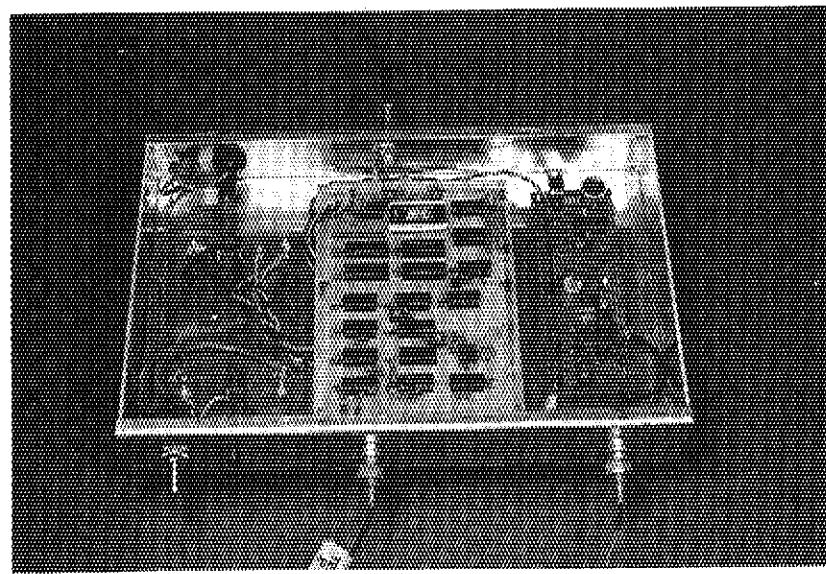


写真 3.2 受波回路及び伝搬時間計測回路の外観

4. 実験方法

4.1 超音波センサの特性測定

4.1.1 超音波受信波形の観測

超音波送波回路の中で発振させた40kHzの断続パルスを超音波送波器に加えて超音波を発生させ、その超音波を対向した位置に設置した受波器で受信した場合の信号波形をシンクロスコープを用いて観測する。

4.1.2 距離精度測定試験

超音波の送波器と受波器を図4.1に示すように銅パイプのスタンドに取り付けて床面上1mの位置に直線上に向い合せて配置した。この状態で送波器から40kHzの超音波を連続的に送波し、受波器でその超音波を受けて超音波伝搬時間計測回路で超音波の伝搬時間を計測する。その伝搬時間に応じたアナログ信号出力をデジタルボルトメータで読み取り、その電圧値と温度計から読み取った気温から温度補正を行って距離を求める。この測定を送波器と受波器間の距離を変えて行い、その場合の距離測定精度を調べる。この測定を3個の受波器について行う。

4.1.3 送波指向特性測定

前述の距離精度測定試験と同様の方法で送波器の円周方向の送・受波特性を測定する。図4.2に示すように、送・受波器を配置し、送波器の位置を中心とする円周に沿って受波器を移動させた場合の距離測定精度がどのように変化するかを調べる。この測定を3個の受波器について、送波器と受波器間の距離を変えて行う。

4.1.4 6角柱状に配置した送波器の送波指向特性測定

6角柱状に6個の送波器を配置した送波器の指向特性を把握するため、4.1.3と同様の方法で送波器の全周方向について送波指向特性測定を行う。この測定を送波器と受波器間の距離を変えて行う。

4.2 位置同定実験

4.2.1 送波器位置同定精度の測定

超音波を利用した位置同定実験の機器配置図を図4.3に示す。超音波を発する送波器Sおよび超音波検出用の固定受波器R₁～R₃は常にX-Y座標系の同一平面内にあるものとする。固定受波器R₁～R₃の位置はX-Y座標系の同一平面内であれば任意の既知位置に設定できる。この測定には実時間で固定送波器位置の同定を行うプログラム（echo2）を使用して、X-Y座標内を200mm間隔毎に測定する。この実験を実施する場合の環境条件は次の通りである。

① 位置同定精度の位置によるバラツキの傾向と位置同定可能範囲を見極めるため、3個の固定

受波器をバランスの良い正三角形状に配置する。② X-Y座標の最大寸法はX軸およびY軸とも3,000mmとする。③ 固定受波器R₁の位置をX-Y平面座標の原点と定義する。

4.2.2 移動送波器の位置同定実験

図4.3に示す位置同定実験の機器配置図において、超音波を発しながら移動する送波器Sの位置を実時間で同定し、その移動軌跡をCRT上にグラフィック表示する。この実験には実時間で移動送波器位置の同定を行うプログラム（echo2およびecho3）を使用する。送波器を移動させた場合の位置同定状況を目視し、超音波を利用した位置同定方法について総合的に評価を行う。

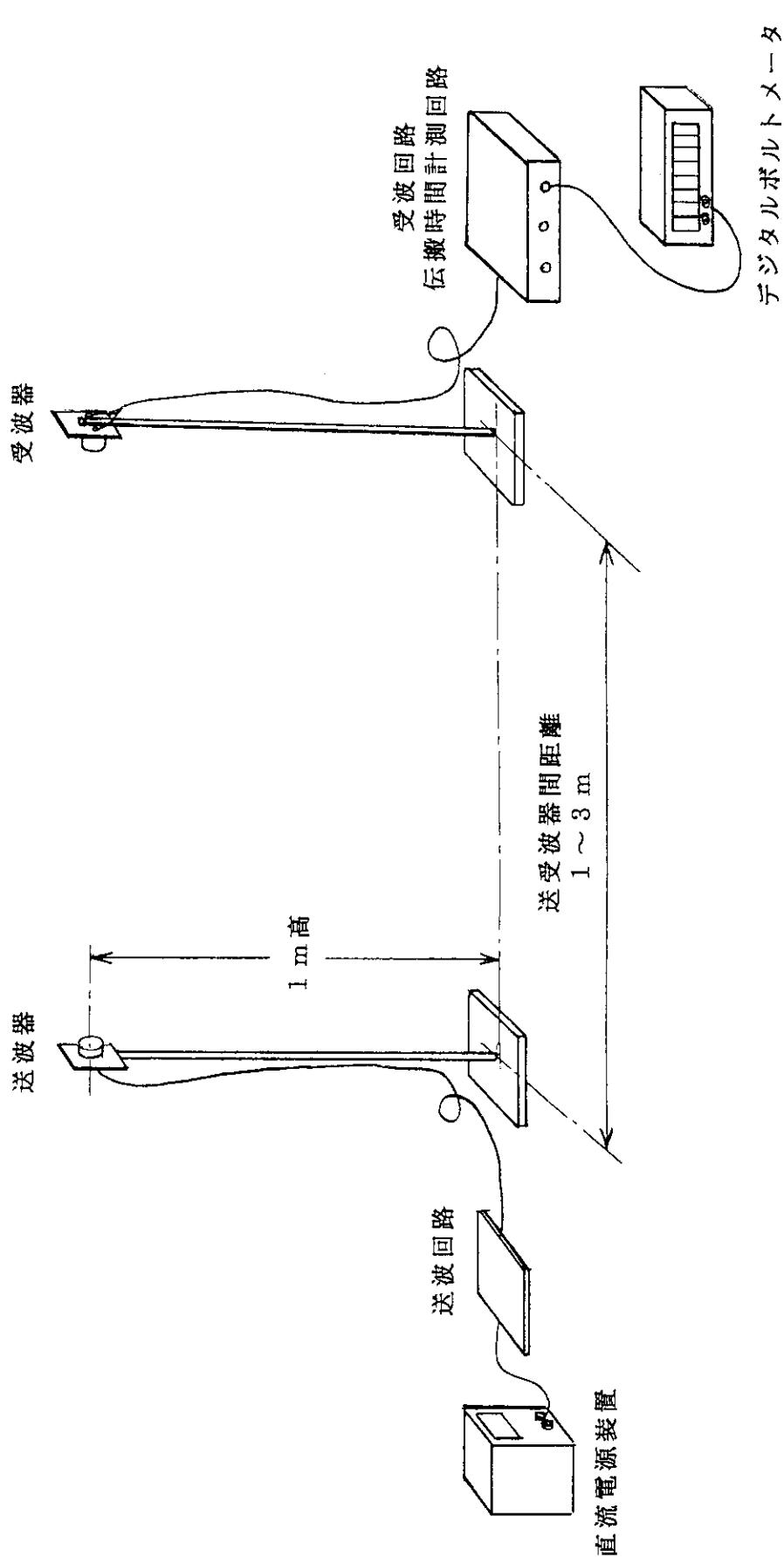


図 4.1 距離精度測定試験の機器配置図

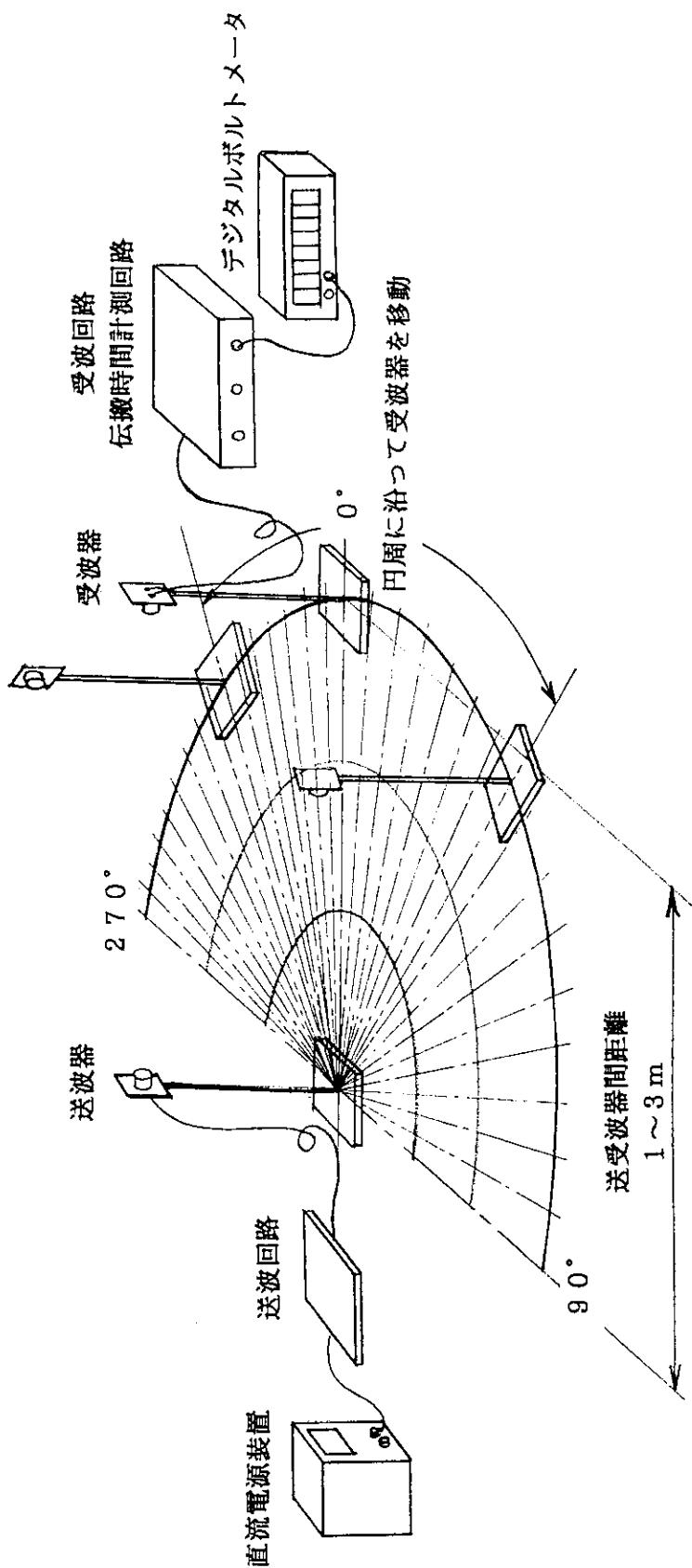


図 4.2 送波指向特性測定実験の機器配置

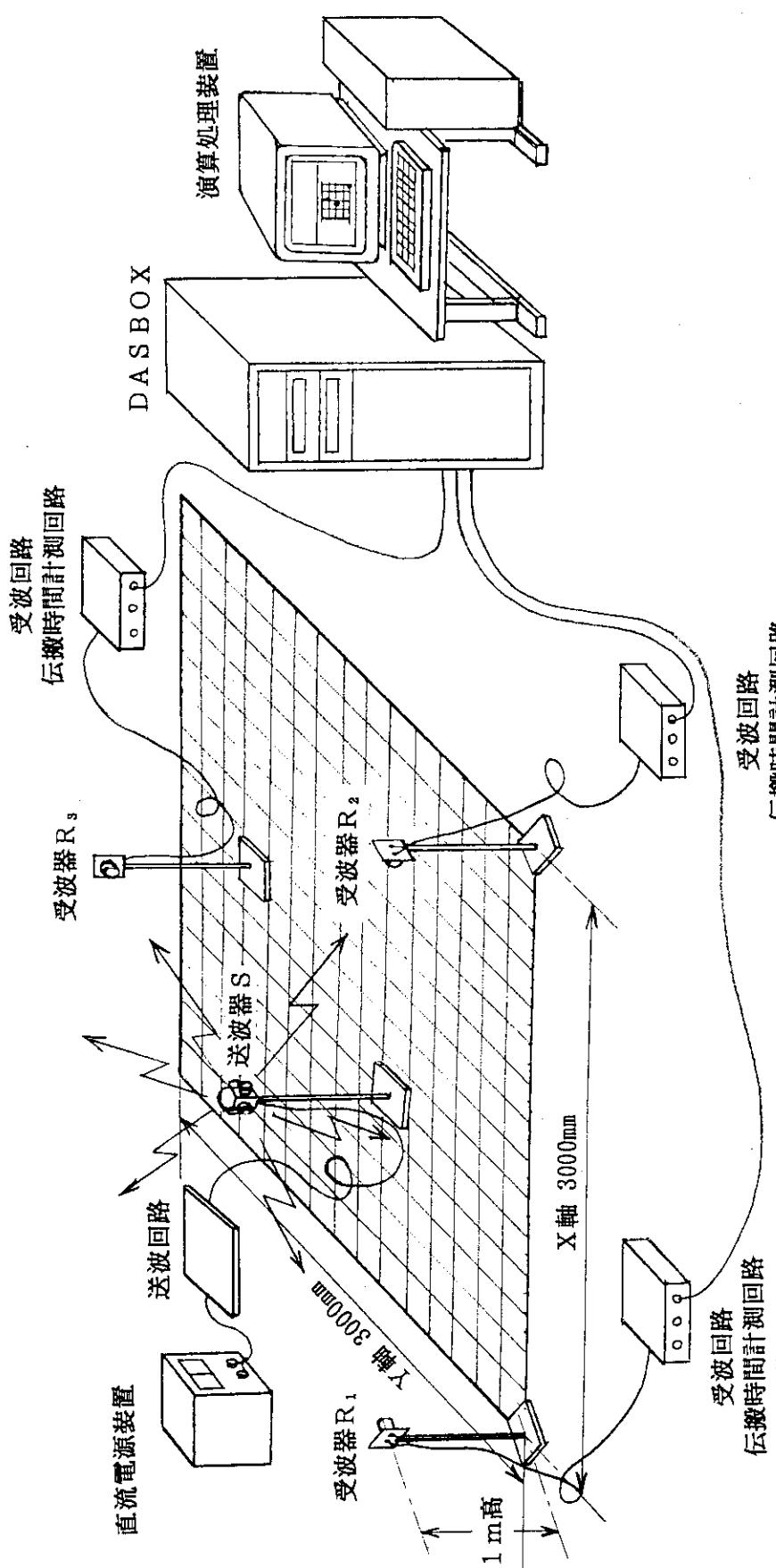


図 4.3 超音波を利用した位置検出実験の機器配置図

5. 位置同定プログラム

超音波を発しながら移動する物体の位置を実時間で同定するプログラムを2つ作成した。1つは位置同定の処理を時間的に直列に実施するプログラム（echo2）であり、もう1つは処理時間を可能な限り短縮し、繰返し速度を高めたプログラム（echo3）である。echo3はアナログ信号の入力処理、位置同定演算、同定位置のグラフィック表示等の処理を構造化し、夫々のプロセスを並列に実行させるプロセスの並列処理技法を採用している。並列処理を行う場合、各プロセス間でデータの受渡しや同期をとる必要があるため、プログラムの構造はecho2に比べると多少複雑になっている。プログラムの開発はSun3ワークステーションのUNIX環境下で行い、各プログラムはC言語を用いて作成した。各プログラムはSunViewのグラフィックス・ウインドウをオープンし、その中で実行するようになっている。次に各プログラムの内容について述べるが、echo3についてはecho2と異なっている並列処理の部分について重点的に説明する。それ以外の部分はecho2と全く同様の処理を行っている。

5.1 位置同定直列処理プログラム（echo2）

このプログラムは移動する超音波送波器の位置を同定するために、超音波伝搬時間計測回路や温度検出器からの信号をサンプリングして、スケーリング、温度補正、位置同定演算、演算結果のグラフィック表示等の一連の処理をシーケンシャルに実施するものである。図5.1に超音波送波器の位置同定処理をシングルタスクで実施する場合の処理手順の概略図を示した。プログラムの構造はメインプログラムができる限り簡素化して、処理の流れが容易に理解できるようにし、各種の処理機能毎にサブルーチン化を行っている。図5.2にecho2プログラムのフローチャートを示す。同定した超音波送波器の位置をグラフィック表示するにはグラフィックス・サブルーチンの中で参照するためのカラーテーブルが用いられている。このカラーテーブルは、後述するecho3プログラムやdataplotプログラムにおいても使用される。

5.1.1 入力パラメータ

echo2プログラムを実行する場合に必要な各種のパラメータやコマンドはその都度CRT上にメニュー形式またはメッセージ形式で表示されるので、キイボードからそれらに対する値やコマンドを入力してやれば良い。キイボードから入力するパラメータの項目、その設定値の範囲及びコマンドを表5.1に示す。

同表において、X及びY座標軸の最大寸法は実験スペースの条件から両軸とも3,000mmとした。距離信号に対するゲイン及びゼロ点の微小調整をソフトウェア上でも行えるようにするために、3個の固定受波器の超音波伝搬時間計測回路のD/A変換器出力信号に対するゲインおよびゼロ点補正係数を入力パラメータとしている。サンプリング数とは送受波器間距離信号および周囲温度信号をサンプリングして読み込みA/D変換し、温度補正計算、位置同定計算および計算結果のグラフィック表示までの一連の処理を行う繰返し回数を表し、その数値が設定した最大サンプリング数

Mに達したならば、本プログラムの実行を終了させる。最大サンプリング数はハードディスクの容量やデータ収録時間を考慮して10,000まで設定可能とした。データファイル名は測定した3個の送受波器間距離データや計算により求めた送波器位置同定結果を格納するファイル名であり、必要に応じてキイボードから入力する。入力できるファイル名の文字数は10文字以内の英数字であり、デフォルトのデータファイル名は"xydata"である。入力パラメータとして任意のデータファイル名を入力した後でも、データをそのファイルに格納する段階で実際にデータを格納するか否かを選択することができる。データファイルに格納したデータは本プログラムとは別に作成したデータプロットプログラムdataplotによって再度グラフィック表示することができる。3つの距離サークルを描くか否かの指定は固定受波器が設置されているX-Y座標位置を中心に測定した送受波器間距離信号に比例した半径の円を描くか否かの選択を行うものである。送波器の位置があまり移動しない場合は距離サークルを描いた方が送波器位置の同定状態を視覚的に確認しやすいが、送波器が移動している場合は、距離サークルを描かず移動軌跡のプロットのみを表示した方が送波器位置の動きが分かりやすい。距離サークルを描いた場合はサークルのグラフィック表示に要する時間だけ位置同定の繰返し速度が遅くなる。

5.1.2 入力信号のサンプリング

固定受波器距離信号等のサンプリング及びA/D変換には先に述べたDASBOX内のアナログ入力インターフェースを用いた。DASBOXの入出力を制御するために本プログラムにはC言語で書かれたDASBOX用の関数群であるドライバー・サブルーチン(d.c)を組込んで使用している。各チャンネルの入力信号は各チャンネル毎に設けられたサンプルホールド機能により同時サンプリングを実施後、高速スキャンでA/D変換が行われる。したがってチャンネル間の位相差の無いデータ収録が可能である。A/D変換のスタートはget_ad_dataサブルーチンの中でad_goファンクションを用いて行っている。A/D変換されたデータは一旦DASBOX内の4Mバイトの容量をもつバッファメモリに蓄えられる。DASBOXとSun3はVMEバスによって接続されており、サンプリングしたデータは各サイクル毎にバッファメモリからSun3のメインメモリにDMA転送される。本システムでは特にサンプリング周期の同期はとらずに実行可能な最高速度で一連の処理を繰返すようにしている。今回の実験を実施するためにDASBOXへ入力したアナログ信号の一覧表を表5.2に示す。

5.1.3 位置同定演算

DASBOXからSun3のメインメモリにDMA転送された固定受波器の距離データは、get_ad_dataサブルーチンの中で第2章で述べた温度補正、スケーリング、ゲイン及びゼロ点補正が行われる((3)式)。補正後の3個の送受波器間距離データは位置同定演算サブルーチン(calcu_mat)に渡され、その中で送波器の位置が算出される((3)~(25)式)。その送波器の同定位置データはグラフプロットするために次のグラフィック・サブルーチン(plot)に渡される。もしも位置同定演算サブルーチンの中で解が求められないという条件判定が出た場合、即ち第2章の(3)~(5)式の何れかが条件を満さなかった場合には、“2つの距離サークル間には交点が無い”旨のメッセージをCRT上に出力すると共に、位置同定演算サブルーチンを中断し次のサイクルに進む。

5.1.4 位置同定結果のグラフィック表示

本プログラムのグラフィック表示はSunCoreのグラフィックス機能を利用している。本プログラムのグラフィックス部のサブルーチン構成は、

- ①グラフィックス機能の初期化 (init_graphics)
- ②固定画面の表示 (draw_frame)
- ③位置同定結果の実時間表示 (plot)
- ④グラフィックス機能の終了等 (term_graphics)

に大別される。

グラフィックス機能の初期化サブルーチンの中では2次元グラフィックス・モードの指定やグラフィック・ビュー・サーフェースの指定、グラフィック・ウインドのスケーリング、使用するカラー・テーブルの定義等を行っている。固定画面表示サブルーチンでは位置同定実験環境条件であるX-Y座標、固定受波器R₁～R₃の位置を表示する。X-Y座標は200mm間隔で格子状に表示し、その中に固定受波器の位置を●印で表示する。●印はSunCoreの polygonファンクションを用いて20点近似の円の内側を塗りつぶす方法で表示している。位置同定結果の実時間表示サブルーチンでは、位置同定演算サブルーチンにより求めた送波器の位置データ(X, Y)をもとに、CRT画面上にその位置を実時間でグラフィック表示する(dot)。移動する送波器の位置はサンプリング周期毎に時々刻々、現在位置を黒点で表示し、1個前の時点の表示を黒から赤点に変えて表示する。したがって移動した位置の軌跡は赤の破線として表示される。送波器の位置の表示には6点近似の円の内側を塗りつぶす方法で表している。入力パラメータで距離サークルを描くように指定してある場合は、それぞれの距離データに基づいて固定受波器の位置を中心に送受波器間距離サークルを描く(circle)。距離サークルは polylineファンクションを用いて40点近似の円を描く方法で表示している。グラフィックス機能の終了サブルーチンはビュー・サーフェースの指定解除、SunCoreの終了処理等を行っている。

5.1.5 プログラムの実行手順

Sun3システムのSunViewの使用法についてはマニュアルを参照することとし、ここではSunViewのグラフィックス・ウインドウが既にオープンされている状態から、echo2プログラムの実行手順を説明する。SunViewのグラフィックス・ウインドウは上下2つのウインドウから構成されており、上側がttyウインドウ、下側がグラフや図形を表示するグラフィックス・ウインドウになっている。先ず上側のttyウインドウの中で“echo2”をキインして実行開始させると、実行に必要なパラメータの入力を求めるメニューがttyウインドウに表示される。図5.3にecho2を実行した際に表示されるメニュー及びキイ入力記録の一例を示す。同図に示したようにメニューには各項目毎にデフォルトの値が同時に表示される。もしもそのデフォルト値で問題なければ、その都度“RETURN”キイを押す。もしもここで変更したい項目が有ればその項目毎に新しい値を設定すれば良い。図5.3においてアンダーラインを引いた部分がキイボードから入力した文字の例を示している。プログラム実行に必要なパラメータの入力が終ると次に、固定受波器の設置されているX-Y座標位置を中心に測定した送受波器間距離信号に比例した半径の円を描くか否かの条件を入力するメッセージが表示される。必要に応じ“y”又は“n”をキインする。

グラフィックス・ウインドウには超音波実験のX-Y座標と固定受波器の位置が表示され、サンプリングを開始するか否かのメッセージが表れる。“y”をキイインすると超音波伝搬時間計測回路から出力された送受波器間距離信号や温度計測信号のサンプリングが開始され、超音波送波器位置同定の一連の処理が実行される。グラフィックス・ウインドウには実時間で送波器位置がグラフィック表示され、送波器の位置が移動した場合には、その移動軌跡がグラフィックス・ウインドウ上に残る。もしも固定受波器の設置されているX-Y座標位置を中心に送受波器間距離信号に比例した半径の円を描くように指定している場合には、各固定受波器の位置を中心に、距離信号に比例した半径をもつ40点近似の円を描く。もしも超音波伝搬時間計測回路から出力された距離信号に、何らかの原因で大きな誤差が生じ、位置同定計算の解が求められなかった場合、即ち距離信号に比例する半径の3つの円を描いても、3つの円が交差しない場合には、その旨のメッセージをttyウインドウ上に出力し、直ちに次サイクルのデータの読み込みを行う。100回毎にttyウインドウ上にサイクルのカウント番号が表示される。入力した最大サンプリング数に達し、サンプリングが終了すると、サンプリングして取込んだ送受波器間距離信号に温度補正やスケーリングを施したデータとマトリックス演算によって求めた送波器位置データの全てをプリントアウトするか否かのメッセージが表示される。もしも“y”をキイインしてプリントアウトを指定した場合には、これまでバッファメモリに蓄えたすべてのデータがCRT上に表示される。データ量が多い場合にはかなり時間がかかるので、少量のデータについてテストする時にプリントアウト機能は用いた方が良い。次にバッファメモリに蓄えたすべてのデータをハードディスクのデータファイルに格納するか否かのメッセージが表示される。“y”をキイインすると初期のパラメータを入力した際に設定したデータファイル名が表示される。もしもこの時点でデータファイル名を変更したい場合には、新たなデータファイル名をキイインすることができる。変更の必要が無い場合には“RETURN”キーを押すことにより、バッファメモリに蓄えられたすべてのデータがデータファイルに格納される。これで一連の位置同定処理をすべて終了し、次のRUNを実行するか否かのメッセージが表示される。再度、最初から測定を繰返したい場合は“y”を、終了したい場合には“n”をキイインする。“y”をキイインした場合、再びパラメータの入力を求めるメニューがttyウインドウに表示され、それ以降は既に述べた手順の繰返しとなる。“n”をキイインした場合には、これまでに表示したグラフィック画面が総て消去されプログラムは終了する。この状態から再度プログラムを実行開始させたい場合には、ttyウインドウに“echo2”をキイインすれば良い。

5.2 位置同定並列処理プログラム (echo3, sampling3, plot3)

このプログラムはecho2と全く同じ処理機能を備え、移動する超音波送波器の位置を同定するプログラムであるが、echo3は処理時間を可能な限り短縮し、繰返しの速度を高めるため、信号のサンプリング、位置同定演算、演算結果のグラフィック表示等の一連の処理をパラレルに実施するものである。図5.4に超音波送波器の位置同定処理をマルチタスクで実施する場合の概念図を示した。プログラムの並列処理を実現するために、UNIXのセマフォ機能と、共有メモリ機能を用いている。セマフォというのは複数のプロセス間で同期をとりながらプログラムを実行する

ための手法であり、その語源は鉄道における“遮断機”からきており、遮断機によって単線上を運行する列車の衝突防止を図る機能が似ていることによるものと思われる。

超音波送波器の位置を同定するプログラムは超音波伝搬時間計測回路や温度検出器からの信号をサンプリングするプロセス (sampling3) 、サンプリングした信号のスケーリング、温度補正、位置同定演算等を実行するプロセス (echo3) 、 演算結果のグラフィック表示を行うプロセス (plot3) の3つのプロセスから構成される。この3プロセスの実行の同期はセマフォ値と呼ばれる変数の値を監視しながら行われる。このセマフォ値のカウンタはecho3とsampling3間にならびにecho3とplot3間にそれぞれ設けられている。図5.5にセマフォ動作の概念図を示す。セマフォの基本的な動作はプロセスのロックを行うときはセマフォ値から1を差引き、アンロックを行う時はセマフォ値に1を加える。もしもセマフォ値が0であった時に-1を行った場合にはそのプロセスはブロックされる。ブロックされていた時にアンロックを行うと、ブロックされていたプロセスは実行を再開する。図5.6に3つのプロセスが並列的に実行された場合のタイムチャートを示す。

共有メモリは複数のプロセス間で共通にアクセスすることができるメモリ領域であり、このメモリ領域を介して複数のプロセス間でデータの受渡しを行うことができる。図5.7に共有メモリ機能の概念図を示した。

プロセス間でデータを転送する方法には、共有メモリの他にパイプ、メッセージ、ソケット等の機能があるが、共有メモリが最も高速で、メモリ領域サイズも任意に採れるため、ここでは共有メモリ機能を使用した。共有メモリ上のデータを変更すると、それを共有している全てのプロセスに影響を及ぼすため、プロセス間の同期等はプログラム間の約束として予め決めておかなければならぬ。

プログラムの構造はecho2プログラムと同様に、メインプログラムができる限り簡素化して、処理の流れが容易に理解できるようにし、各種の処理機能毎にサブルーチン化を行っている。しかし、セマフォのコントロールや共有メモリの割り付け等のコマンドが各プロセスに必要であるため、各プロセスのプログラムはその分複雑になっている。echo3、sampling3、plot3各プロセスのプログラムのフローチャートを図5.8、図5.9、図5.10にそれぞれ示す。このプログラムをSunViewのグラフィックス・ウインドウの中で実行開始させた後のCRT表示内容や、実行する場合に必要な各種のパラメータの入力、各種コマンドの入力手順は、殆どecho2プログラムの場合と同様である。送波器位置同定処理を繰返し、設定した最大サンプリング数に達すると、データファイルへの格納指定がされていた場合には、取得したすべてのデータをデータファイルに格納したのち、プログラムは停止する。本プログラムでは次のRUNを実行するか否かのメッセージは表示せず、最初から測定を繰返したい場合には、ttyウインドウに“echo3”をキインし、プログラムを再度起動させる。

表 5.1 入力パラメータ一覧表

No.	パラメータおよびコマンドの項目	設定範囲又はコマンド
1	X及びY座標軸の寸法 (X, Y)	1~3,000, 1~3,000mm
2	固定受波器R ₁ の位置情報 (X ₁ , Y ₁)	1~3,000, 1~3,000mm
3	固定受波器R ₂ の位置情報 (X ₂ , Y ₂)	1~3,000, 1~3,000mm
4	固定受波器R ₃ の位置情報 (X ₃ , Y ₃)	1~3,000, 1~3,000mm
5	距離信号1のゲイン補正係数 (G ₁)	0~ 2.000
6	距離信号2のゲイン補正係数 (G ₂)	0~ 2.000
7	距離信号3のゲイン補正係数 (G ₃)	0~ 2.000
8	距離信号1のゼロ点補正係数 (Z ₁)	0~±2.000
9	距離信号2のゼロ点補正係数 (Z ₂)	0~±2.000
10	距離信号3のゼロ点補正係数 (Z ₃)	0~±2.000
11	最大サンプリング数 (M)	1~ 10,000
12	データファイル名 (ディフォルト名 "xydata")	16文字以内の英数字
13	3つの距離サークルを描くか?	"y" 又は "n"
14	サンプリングを開始するか?	"y" 又は "n"
15	サンプリングしたデータをプリントするか?	"y" 又は "n"
16	サンプリングしたデータ及び演算結果をデータファイルに格納するか?	"y" 又は "n"
17	データファイルから読み出したデータをプリントするか?	"y" 又は "n"
18	次のRUNを実行するか?	"y" 又は "n"

表 5.2 D A S B O X アナログ入力信号一覧表

マルチプレクサ チャンネルNo.	入力信号名	記号	信号レベル
1	固定受波器 R ₁ 距離出力信号	V _{R1}	0～+10.0 V (0～3.5m)
2	固定受波器 R ₂ 距離出力信号	V _{R2}	0～+10.0 V (0～3.5m)
3	固定受波器 R ₃ 距離出力信号	V _{R3}	0～+10.0 V (0～3.5m)
4	周囲温度（気温）信号	V _t	0～+10.0 V (0～50°C)

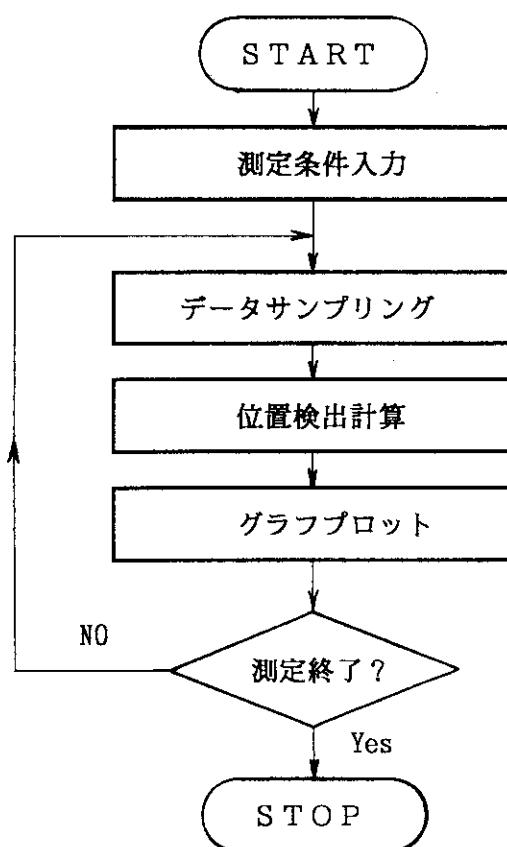


図 5.1 シングルタスクによる位置検出処理の概略図

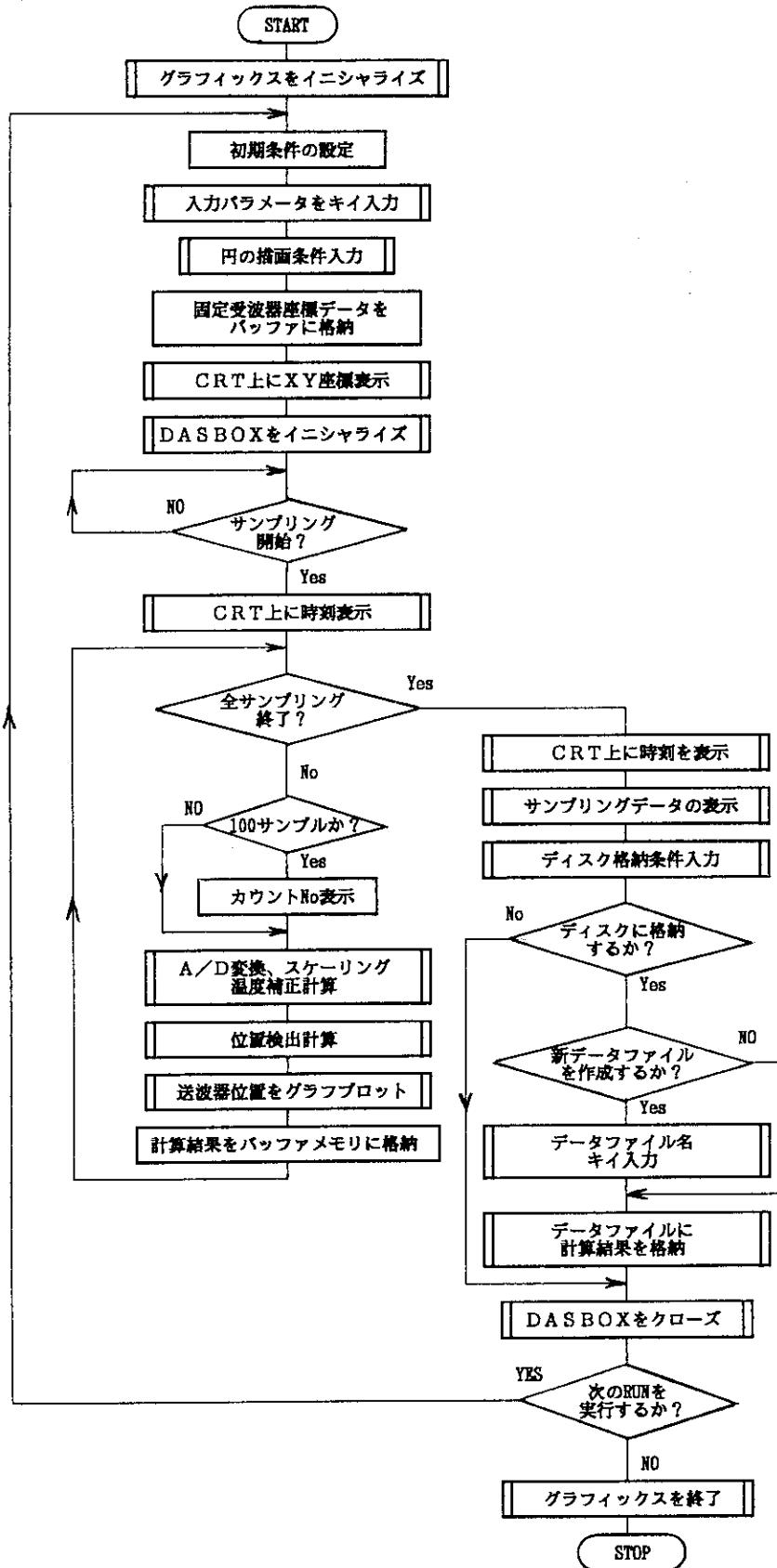


図 5.2 echo 2 プログラムのフローチャート

sun260% echo2

INPUT PARAMETER

RANGE OF X-Y AXIS(mm) (X,Y;1~3000) 3000 3000 n
 POSITION R1(mm) (X1:0~X, Y1:0~Y) 0 0 n
 POSITION R2(mm) (X2:0~X, Y2:0~Y) 3000 0 n
 POSITION R3(mm) (X3:0~X, Y3:0~Y) 1500 2598 1500 3000 n
 GAIN G1(0.0~2.000) 1.000 n
 GAIN G2(0.0~2.000) 1.000 1.05 n
 GAIN G3(0.0~2.000) 1.000 1.1 n
 ZERO Z1(-2.000~+2.000) 0.000 n
 ZERO Z2(-2.000~+2.000) 0.000 -0.1 n
 ZERO Z3(-2.000~+2.000) 0.000 +0.2 n
 MAX SAMPLING M(1~10000) 10000 200 n
 data file name(<10char) xydata5 n

***** DASBOX INPUT PARAMETERS *****

Range of X,Y Axis 3000 3000
 Position of R1 0 0
 Position of R2 3000 0
 Position of R3 1500 3000
 Gain Compensation 1.000 1.050 1.100
 Zero Adjustment 0.000 -0.100 0.200
 Maximum Sampls 200
 Data File Name xydata5

Parameter Change ? (y/n) n n
 Draw 3 Circles ? (y/n) y n
 DASBOX STATUS: GOOD CONDITION
 Sampling Start ? (y/n) y n
 Wed Nov 20 11:27:14 JST 1991
 Count = 100
 Count = 200
 Wed Nov 20 11:27:34 JST 1991
 Printout Sampling Data ?(y/n) n n

Sampling Data Store into a File ? (y/n) y n
 data file name(<10char) xydata5 n
 Store Sampling Data : 1006
 Done Store Sampling Data !

Repeat Next Run ? (y/n) n n
 sun260%

アンダーライン：キイインした部分
♪印 : “RETURN” キイ

図 5.3 メニュー及びキイ入力記録の一例

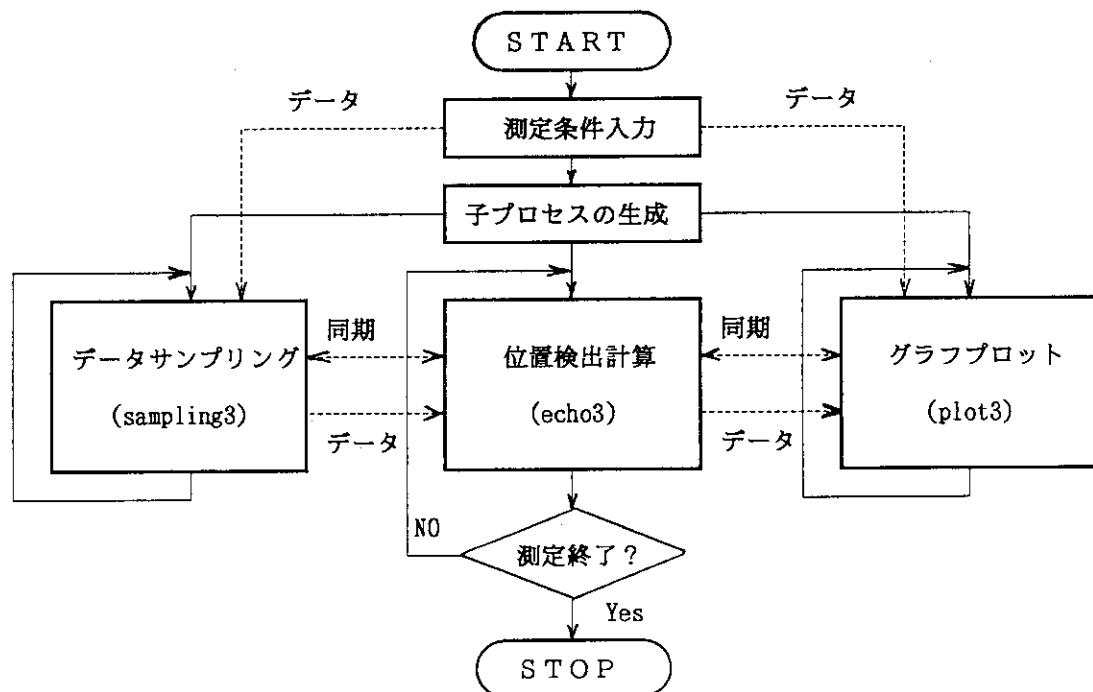


図 5.4 マルチタスクによる並列処理の概念図

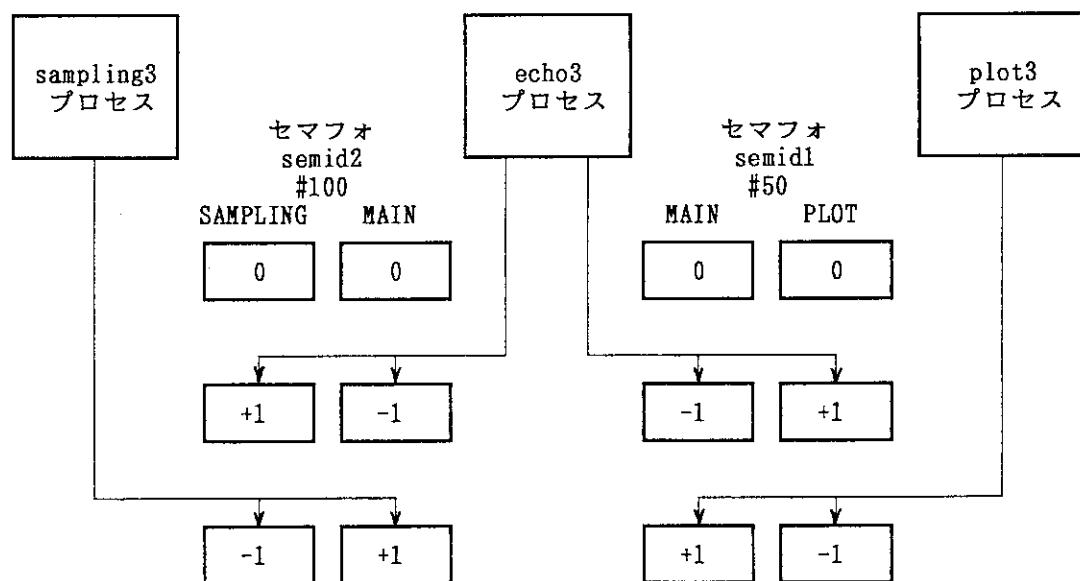


図 5.5 セマフォ動作の概念図

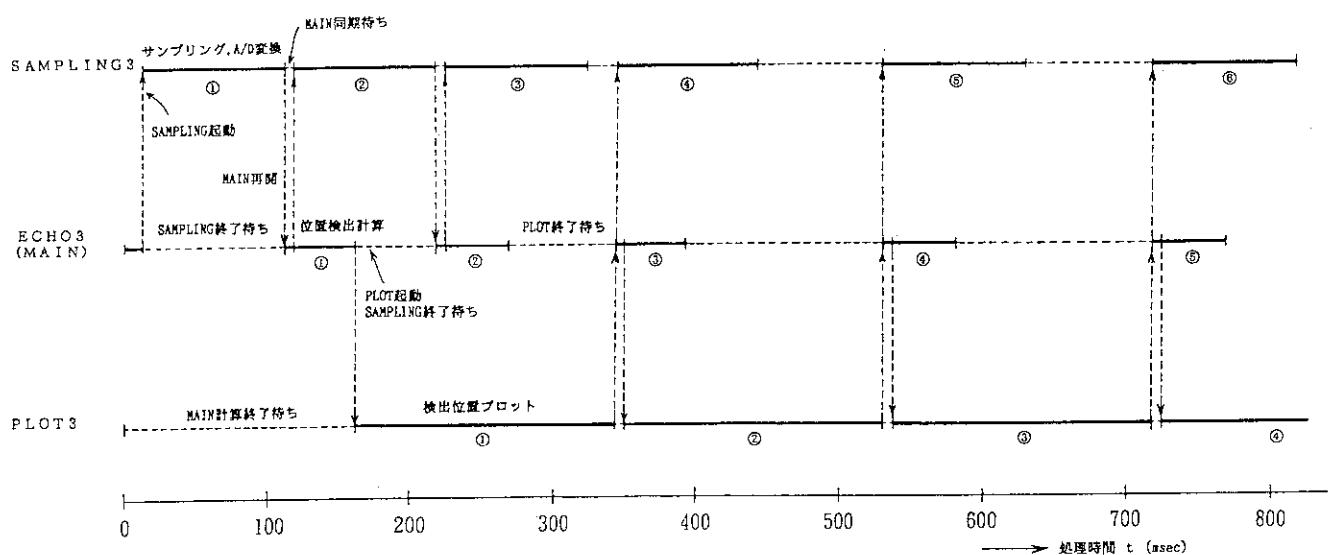


図 5.6 プロセスの並列処理タイムチャート

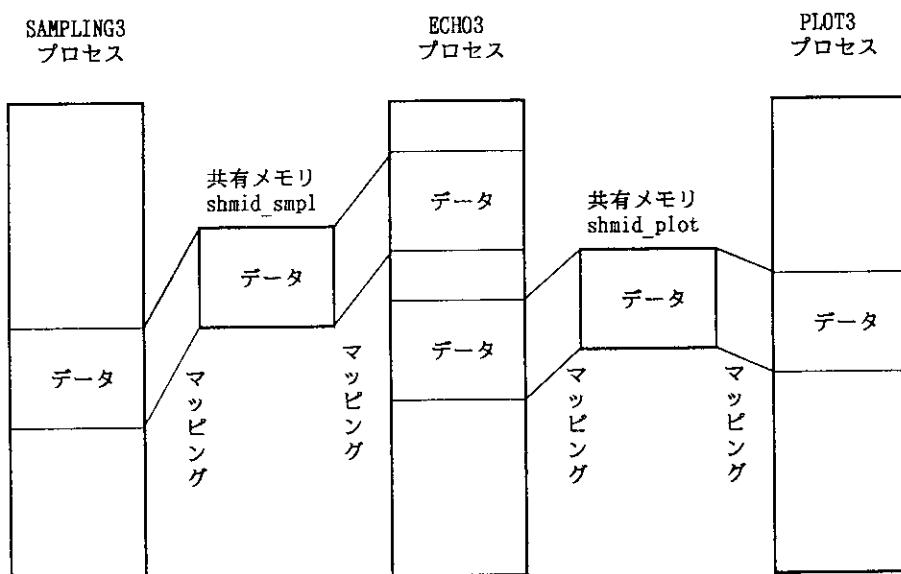


図 5.7 共有メモリ機能の概念図

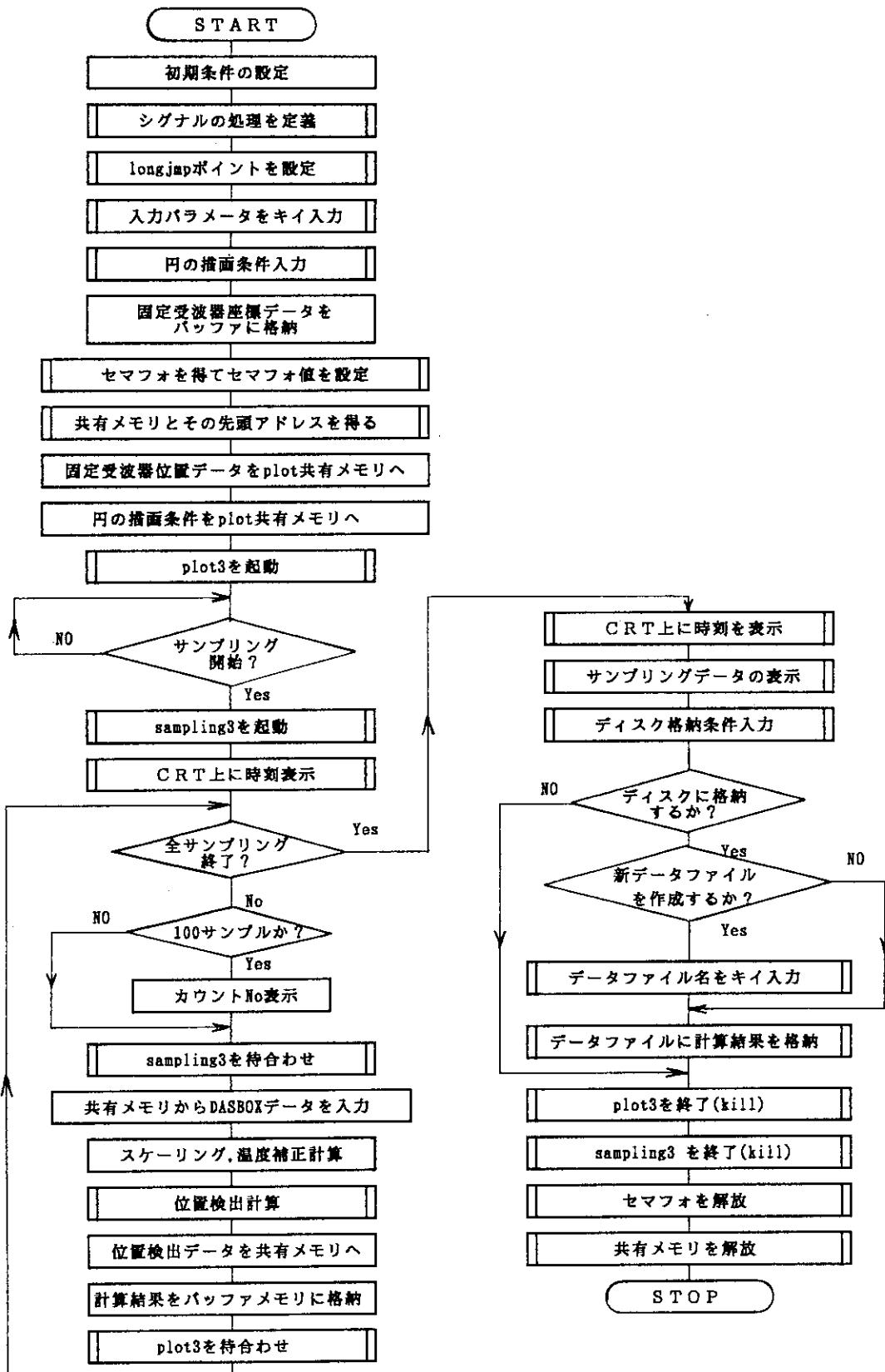


図 5.8 echo 3 プログラムのフローチャート

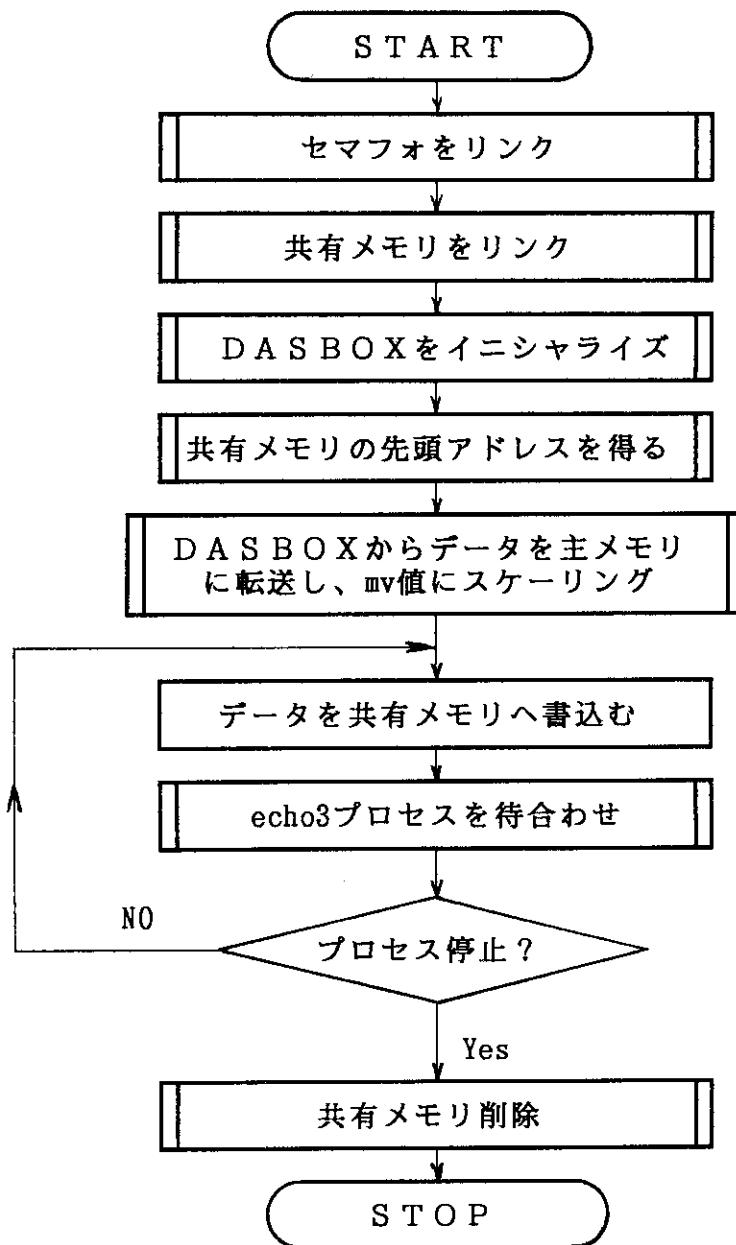


図 5.9 sampling 3 プログラムのフローチャート

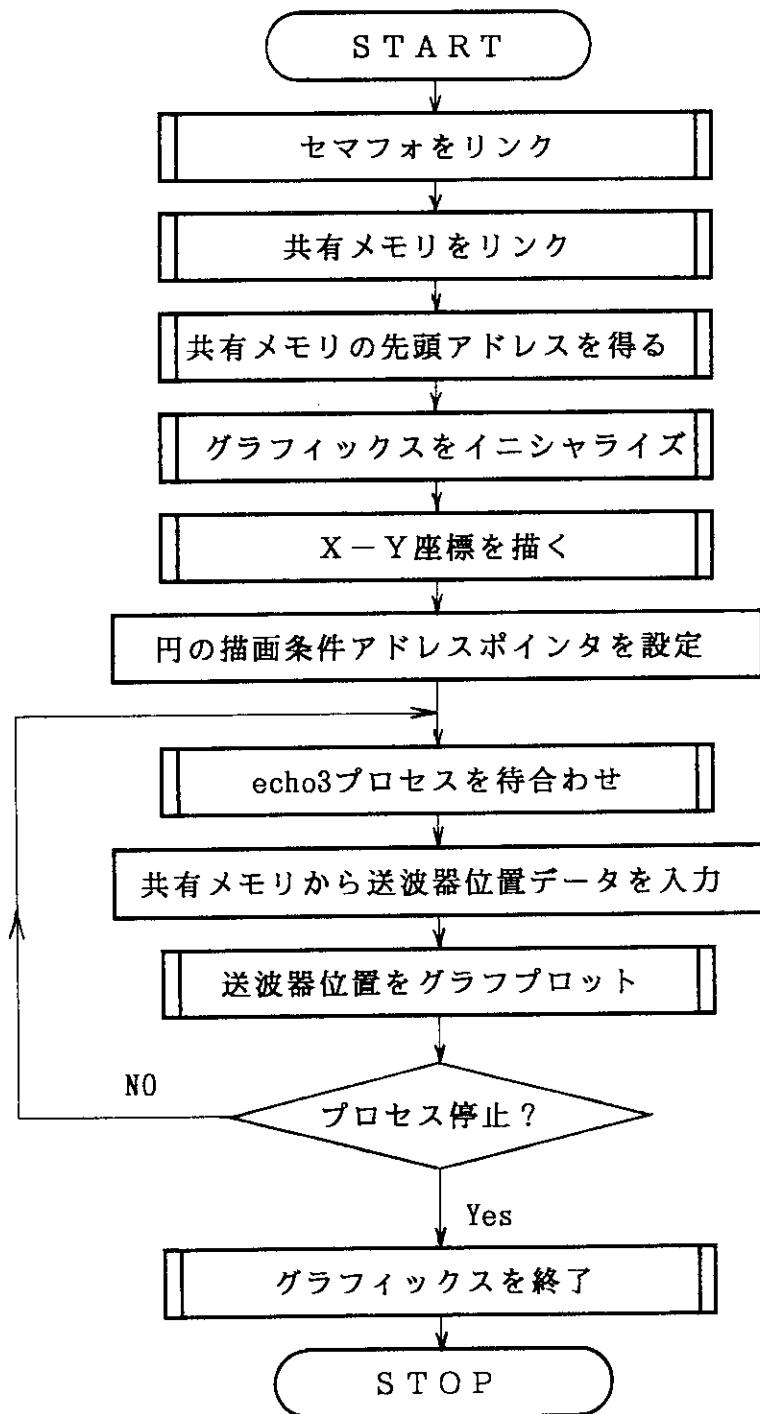


図 5.10 plot 3 プログラムのフローチャート

6. データプロット・プログラム

データプロット・プログラムは位置同定プログラムecho2又はecho3によって格納されたデータファイルの内容を、グラフィック表示させるもので、再度グラフィック表示が必要になった場合のみ使用する。echo2又はecho3によって作られた多くのデータファイルの中から任意のデータファイルを指定して、順次CRT上にグラフィック表示させることができる。グラフィック表示する内容はecho2又はecho3によって描かれた図形と全く同様である。本プログラムの実行開始方法はecho2やecho3と同様、グラフィックス・ウインドのttyウインドに“dataplot”とキインし、“RETURN”キーを押せば良い。その後のプログラム実行手順はecho2やecho3のデータプロットに関する部分と同様であり、必要な各種のパラメータやコマンドをその都度ttyウインドウ上のメッセージに従って入力する。データのグラフィック表示に際しては固定受波器の設置されているX-Y座標位置を中心に送受波器間距離信号に比例した半径の円を描くか否かの選択ができる。データプロット・プログラムはサンプリング、A/D変換等が含まれないため、echo2やecho3よりも高速に実行される。図6.1にデータプロット・プログラムのフローチャートを示す。

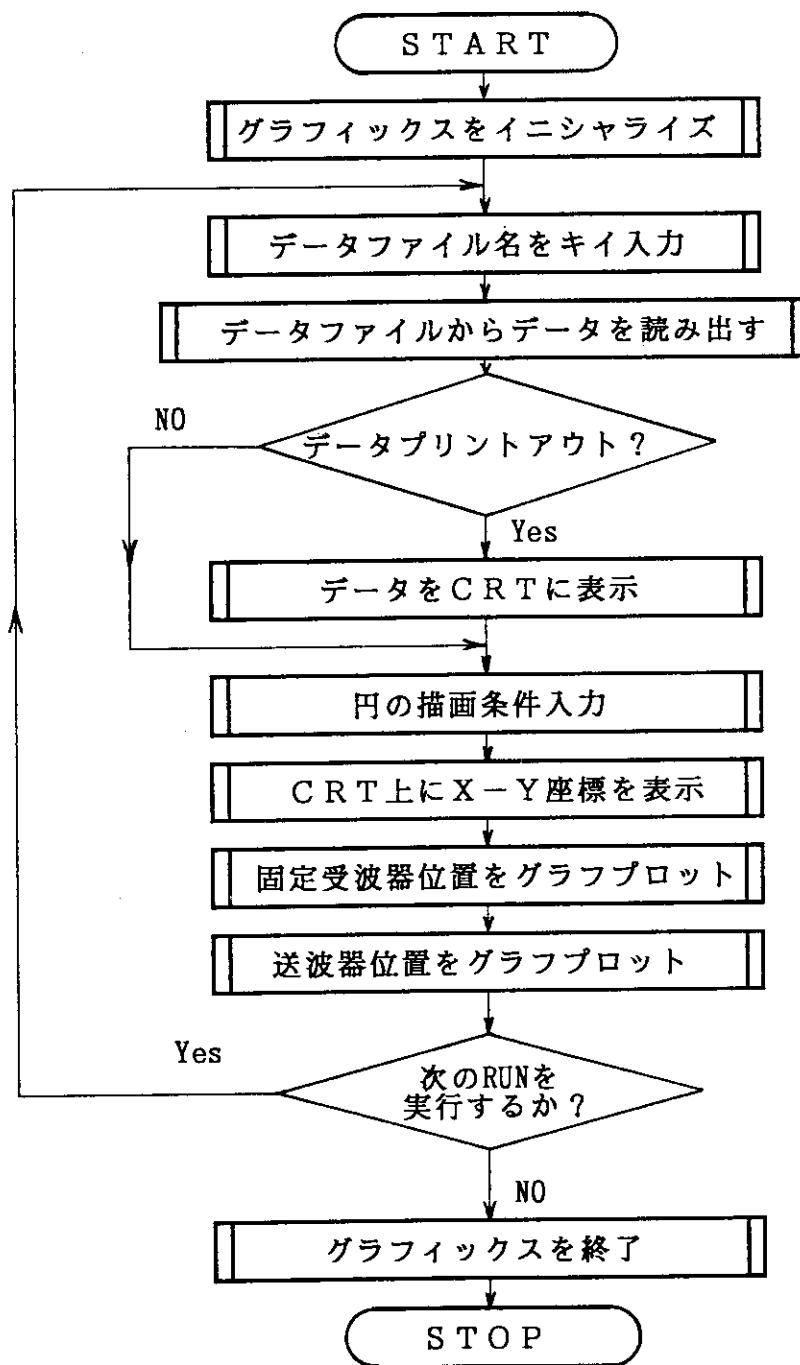


図 6.1 データプロット・プログラムのフローチャート

7. 実験結果及び考察

7.1 超音波センサの特性測定

7.1.1 超音波受信波形の観測

超音波送波回路の中で発振させた40kHzの断続パルスを超音波送波器に加えて超音波を発生させた。超音波を送波する時間幅は450 μsecでその間に18個の超音波パルスを送波するようにした。写真7.1に超音波送波器に加えた断続パルスの波形を示す。送波器によって発生された超音波を2mの位置に配置した受波器で受信した超音波信号の波形を写真7.2に示す。この波形は超音波受波回路内のオペアンプで約1,000倍に増幅した後の信号をシンクロスコープで観測したものである。この写真から分かることは、①超音波パルスを送波器に加えた場合、送波器から出力される超音波の信号レベルは1次遅れ特性に近い状態で上昇する。今回使用した超音波センサについては、送受波器間を通した超音波信号の立上がり時間は500 μsec程度であった。②送波器に加える超音波パルスを遮断させた場合、送波器の振動は直ちに停止せずある一定の時間振動が持続する。この尾引き時間は超音波センサの構造や寸法、材質、種類等によって決ると言われている。この尾引き現象によって450 μsecの間に18個の超音波パルスを送波したのに対し、その受信波は倍以上の時間幅に伸びている。今回の実験においては超音波パルスを50msec周期で送波を繰返すようにしており、この尾引き現象の影響は特に無い。しかし、今後、反射波を利用した環境認識を実施する場合に、この尾引き現象は問題になってくると思われる。今回の実験においてはむしろ超音波信号の立上がり時間が、トリガレベルとの関連で問題となった。それは受波信号の立上がり特性が悪いと、受波信号のレベルが変わった場合、トリガレベルに達するまでの時間が変り、伝搬時間計測値に誤差を生じるからである。したがって、この誤差をできるだけ小さくするためには、立上がり特性の良い送波器を使用するか、受波信号の増幅に可変ゲインのアンプを使用する等の工夫が必要である。

7.1.2 距離精度測定試験

超音波の送波器と受波器を床面上1mの位置に直線上に向い合せて配置し、送波器から40kHzの超音波を連続的に送波し、受波器でその超音波を受けて超音波伝搬時間計測回路で超音波の伝搬時間を計測する。その伝搬時間に応じたアナログ信号出力をデジタルボルトメータで読み取り、その電圧値と水銀温度計から読み取った気温から温度補正を行って距離を求めた。この測定を送波器と受波器間の距離を変えて行い、その場合の距離測定精度を調べた。この測定を3個の受波器について行った。図7.1～図7.3に受波器R₁～R₃の距離精度測定試験の結果を示す。同図において一点鎖線は理論値の直線であり、実線が測定値である。3個の受波器とも測定値は、送受波器間距離3mの範囲において理論値よりも70～100mm程度大きい値であり、その差は送受波器間距離が大きくなる程僅かではあるが拡大する傾向にある。この誤差は超音波受波回路で受信した超音波信号の電圧レベルが、ICゲートをドライブすることができるレベルに立ち上がるまでの時間遅れによるものであることが分かった。さらに送受波器間の距離が大きくなり、超音波の受信レベ

ルが低下してくると送受波器間の距離が見かけ上大きくなる傾向を示す。写真7.3に超音波送信波形と超音波受波回路で増幅した超音波の受信波形を、写真7.4にその受信波形から作り出したゲート信号の一例を示す。両写真とも送受波器間距離が1.5mの場合の信号波形である。写真7.4において、受信波形とその受信波形を整形して矩形波に直したゲート信号の間に約0.2msecの立上がりのずれがあるのが分かる。超音波伝搬距離に換算すると約70mmである。この立上がりの遅れによるずれはプログラムによって補正は可能である。図7.4に受波器R₁について送受波器間距離3mを中心に送受波器間距離を10mm間隔で変化させた場合の距離精度測定試験の結果を示す。この結果によると相対的な位置の変化については顕著に検出できることが分かった。しかし測定値には気流の乱れや温度変化、あるいは増幅回路のノイズ等によるものと思われるばらつきが見られた。送受波器間距離3mにおける測定距離のばらつきは±5mm程度であった。室温を変化した場合の超音波伝搬時間計測回路のD/A変換器出力電圧がどの程度変化するかを調べた。その結果を図7.5と図7.6に示す。いづれも室温信号と送受波器間距離3mにおける超音波伝搬時間計測回路のD/A変換器出力電圧信号をゲインを上げてペンレコーダに記録したものである。図7.5は室温を空調機によって制御した場合であり、室温が21°C付近で約0.63°Cの範囲で周期的に変化しているのに対し、計測距離は約14mmの範囲で変化している。室温約0.63°Cの変化に対する超音波伝搬速度の変化量から計測距離の変化量を理論的に求めると、送受波器間距離3mにおいてその値は約3.2mmになる。この測定値と理論値との違いは超音波受波回路のアンプゲインや伝搬時間計測回路の水晶発振周波数が温度によって変動を受けたりすることによるものと考えられる。図7.6は空調機を停止させた状態で測定したものであり、室温は殆ど変化せず、空気の流れも無い場合の記録である。同図において超音波伝搬時間計測回路のD/A変換器出力電圧は、D/A変換器の LSB付近の数ビットが変動している程度であり、比較的安定している。LSB1ビットの距離分解能は周囲温度によっても変わってくるが、20°Cにおいては約0.86mmである。この数値は超音波伝搬時間計測回路のカウンター入力基準周波数400kHzの周期である2.5μsec間に超音波が伝搬する距離に相当する。精度の良い安定した測定を行うためには、超音波受波回路のアンプや伝搬時間計測回路の水晶発振回路等の温度補償を充分に行う必要があると考えられる。

7.1.3 送波指向特性測定

前述の距離精度測定試験と同様の方法で送波器の円周方向の送・受波特性を測定した。受波器を送波器を中心とする円周方向に移動させた場合の距離測定精度がどのように変化するかを調べた。この測定を3個の受波器について送波器と受波器間の距離を変えて行った。この測定は各測定位置において距離測定ができるか否か、及びその距離測定値がどのような変化傾向を示すかを調べるもので、各位置における超音波の受信レベルそのものを測定するものではない。図7.7～図7.9に送・受波指向特性の測定結果を示す。図7.7が受波器R₁によって超音波を受けた場合の結果である。受波器の位置を送波器正面から送波器を中心とする円周の土方向に移動させるとある角度範囲を超えると距離の測定値は次第に大きくなる。これは受波器の位置を土方向に移動させて行くと、超音波の受信レベルが次第に小さくなるため、受信信号立上がり部のトリガ点が見かけ上、測定距離増大方向にずれるためである。さらに受波器の角度を変えていくと遂には受信不可能になる。送受波器間距離が3mの場合、受波器の位置を送波器正面から±30°以上移

動させると受信不可能になる。また、送受波器間距離によって受波できる角度範囲が変化する。図7.8および図7.9は受波器R₂とR₃の測定結果であるが、いづれも受波器R₁の場合と、同じ傾向を示している。

7.1.4 6角柱状に配置した送波器の送波指向特性測定

6角柱状に6個の送波器を配置した送波器の指向特性を把握するため、前述7.1.3と同様の方法で送波器の全周方向について送波指向特性測定を行った。この測定を送受波器間距離を変えて行った。図7.10～図7.12に受波器R₁～R₃によって受信した場合の結果を示す。これらの図において送波器を中心にはば円形の指向特性が得られていることが分かる。送波器を中心とした各角度に対する測定値のばらつきは、6角柱状に配置した送波器から同時に発信された超音波の位相が互に干渉し合って生じる超音波の強弱によるものと考えられる。この測定値のばらつきを小さくするためには、超音波が1点から全方向に同一の強度で発信できるように、送波器の形状をできるだけ小形の球状にする必要がある。しかし、全方位に同一の強度で発信できるような小形の送波器は現在のところ製品化されておらず、製作することも技術的に困難であると思われる。

7.2 位置同定実験

7.2.1 送波器位置同定精度の測定

超音波検出用の固定受波器R₁をX-Y平面座標の原点(0,0mm)に、固定受波器R₂を(3000,0)に、R₃を(1500,2598mm)の位置に正三角形状に設定した。超音波を発する送波器SをX-Y座標系内(3000×3000mm)に置き、固定受波器と同一平面上を200mm間隔で移動し、各点における位置同定の可否及び同定精度を測定した。この測定には実時間で固定送波器位置の同定を行うプログラム(echo2)を使用した。図7.13に測定結果を示す。同図において各点における線の長さはその点における測定値と実際の受波器位置との差を示し、その方向は誤差の方向を示している。この測定結果、3個の固定受波器で囲まれた三角形の中心付近において誤差が最も小さく(0mm)、周辺部分になる程誤差が大きくなることが分かった(最大100mm程度)。したがって本方式で送波器の位置同定を高精度で行うためには、送波器の移動範囲を考慮して、最適な位置に固定受波器を設置する必要がある。図7.14にecho2プログラムを用いて送波器の位置同定を行った場合のCRTグラフィック表示の一例を示す。これは固定受波器R₁を(0,0mm)に、R₂を(3000,0mm)、R₃を(1500,3000mm)の位置に、送波器Sを(1400,1000mm)に配置した場合の同定結果であり、固定受波器を中心に送受波器間距離に比例する半径の円弧を描いた場合の一例である。この場合の位置同定誤差はX軸方向Y軸方向ともゼロとなっている。

7.2.2 移動送波器の位置同定実験

超音波を発しながら移動する送波器の位置を実時間で同定し、その移動軌跡をCRT上にグラフィック表示する。この実験には実時間で移動送波器位置の同定を行うプログラム(echo2およびecho3)を使用した。送波器を移動させた場合の位置同定状況を目視し、超音波を利用した位置

同定方法について総合的に評価を行った。echo2プログラムを用いてX-Y座標系内において、送波器の位置を連続的に移動した場合のCRTグラフィック表示の一例を図7.15に示す。これは送波器の位置を200mm間隔のX-Y座標に沿って800×600mmの範囲内を手動により連続的に移動した場合のCRTグラフィック表示の一例である。この実験により送波器の位置を実時間でCRT上に表示できることを確認したが、その位置同定精度は固定受波器の配置方法や各固定受波器間の距離によっても変化することが分かった。したがって固定受波器の配置位置は送波器の移動形態やその移動距離等を考慮して最適な位置に設定する必要がある。echo2とecho3の両プログラムについて実験を行ったが、目視確認する範囲では演算速度以外、その動作に殆ど差は感じられなかった。

7.3 位置同定プログラムの処理時間

移動送波器の位置同定を行うプログラムecho2とecho3について処理時間の測定を行った。固定受波器は前述した移動送波器の位置同定実験と同じ位置に配置し、送波器は3個の受波器のほぼ中心位置に配置した。処理時間の測定は3個の固定受波器を中心にそれぞれ距離信号に比例した半径の円を描いた場合と、円を描かず測定結果の点のみを描いた場合について測定を行った。測定は位置同定の一連の処理を5,000回繰返し、その所要時間から1回の所要時間を算出した。これを更に3回繰返しその平均値を求めた。表7.1に移動送波器の位置同定プログラム繰返し部分の所要時間の測定結果を示す。同表において、echo2プログラムの距離サークルを描かない場合の所要時間120.3 msecは、この内約100msecがサンプリング、A/D変換及びA/D変換したデータのDASBOXからSun3主メモリへの転送等に要する時間であり、残りの約20msecが送波器位置同定計算及び計算結果のグラフィック処理に要する時間である。VMEバスを介したDASBOX関係の処理にはいずれの場合も約100msecかかっている。したがって、DASBOXを使用し、今回と同様な方式でセンサ信号を取り込み、各サンプリング・サイクル毎に演算処理を行う場合には100msec以上に繰返し速度を上げることは困難である。

echo3プログラムはアナログ信号の入力処理、位置同定演算、同定位置のグラフィック表示等の処理を構造化し、それらのプロセスをセマフォ機能を用いて並列処理を行っている。表7.1から分かるようにecho3プログラムはecho2プログラムの直列処理と比較すると、距離サークルを描いた場合において88.9 msec(約32%)処理時間が短縮されている。直列処理のプログラムをecho3プログラムのように3つのプロセスに分割並列化した場合、そのプログラムの繰返しに要する時間は巨視的にみれば、分割した内の一番処理時間の長いプロセスによって左右される。距離サークルを描いた場合はグラフィック表示部が一番処理時間の長いプロセスであり、グラフィック表示部を実行している間に、次のサンプリング及びA/D変換が平行して行われるため全体の処理時間が短縮されている。距離サークルを描かない場合はグラフィック表示部の処理時間は距離サークルを描くのに必要な時間分短縮されるが、echo3プログラム全体の所要時間はサンプリングやA/D変換及びセマフォ制御等に必要な時間以下にはならない。したがって距離サークルを描かない場合、echo2プログラムとecho3プログラムの処理時間はほぼ同じ値になっている。

今回作成した2つのプログラムともサンプリング周期は特に規定せず、一連の処理を最高の速

度で実行するようにしているが、もしサンプリング周期を入力パラメータとして指定する必要がある場合は、表7.1に示した処理時間の値を考慮してサンプリング周期を決める必要がある。

表7.1 位置検出プログラムの処理時間

プログラム名	円を描いた場合	円を描かない場合
ECHO 2	281.7 msec	120.3 msec
ECHO 3	192.8 msec	120.3 msec

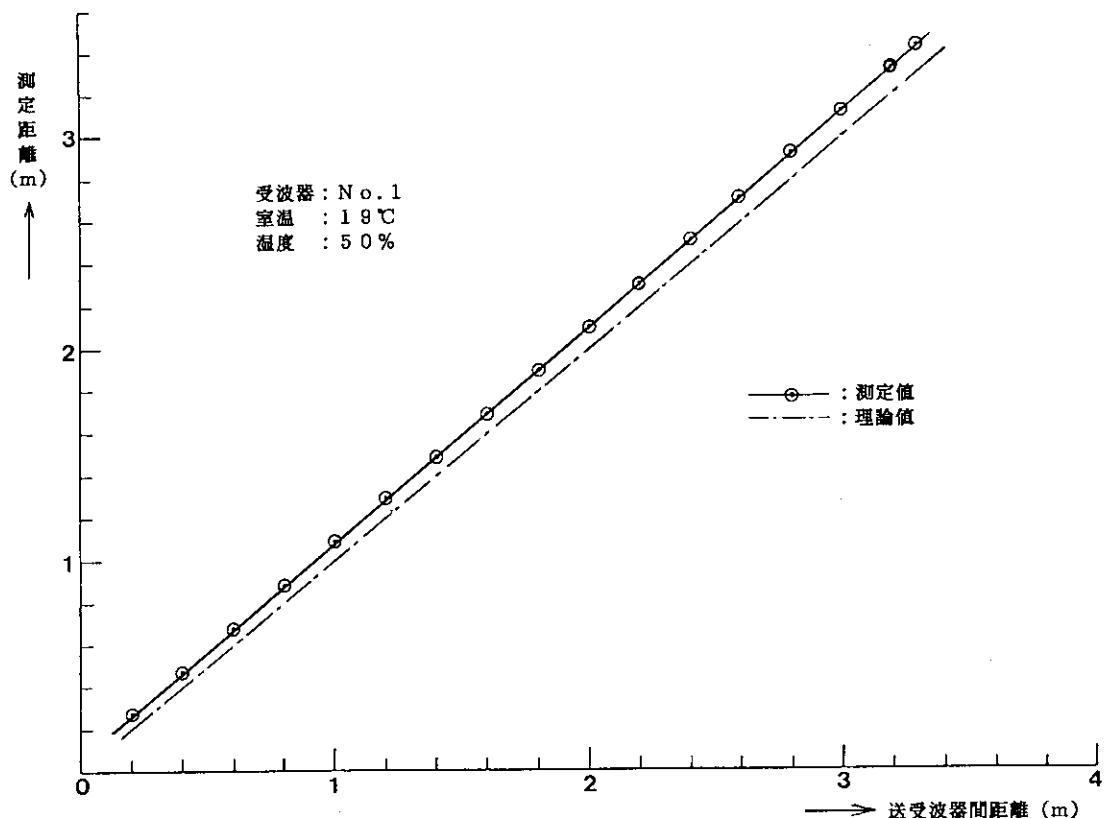


図 7.1 距離精度測定試験結果（受波器 1）

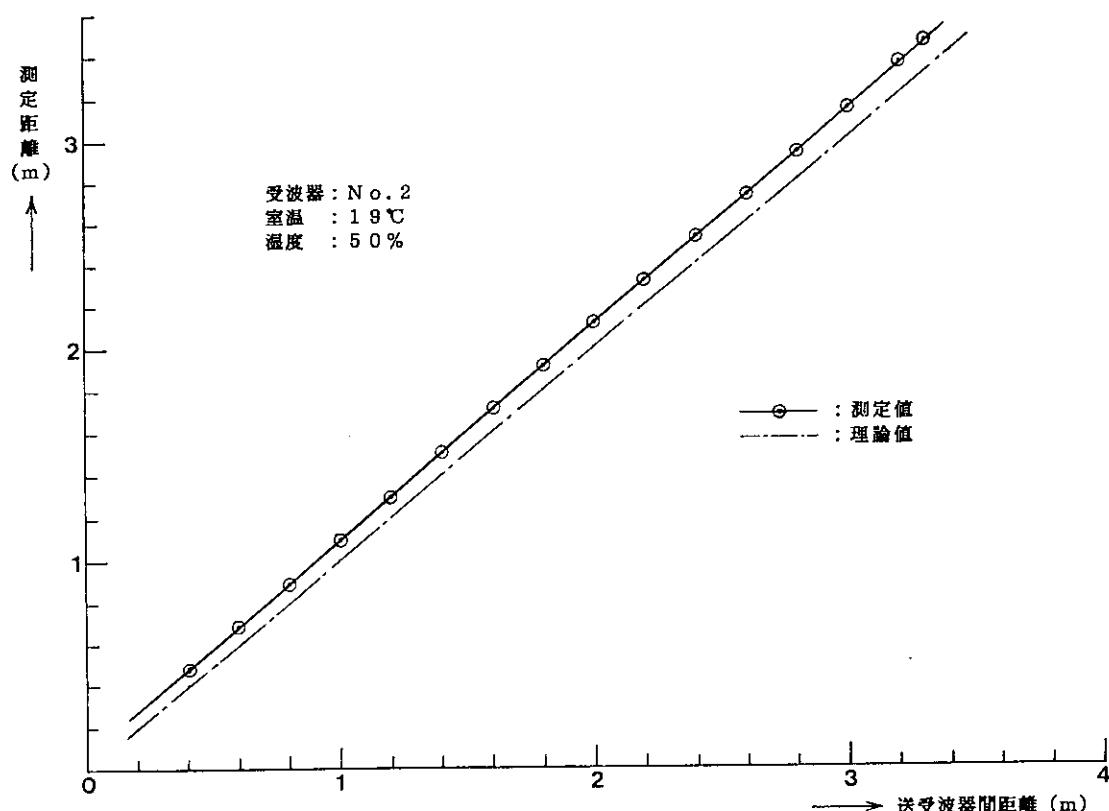


図 7.2 距離精度測定試験結果（受波器 2）

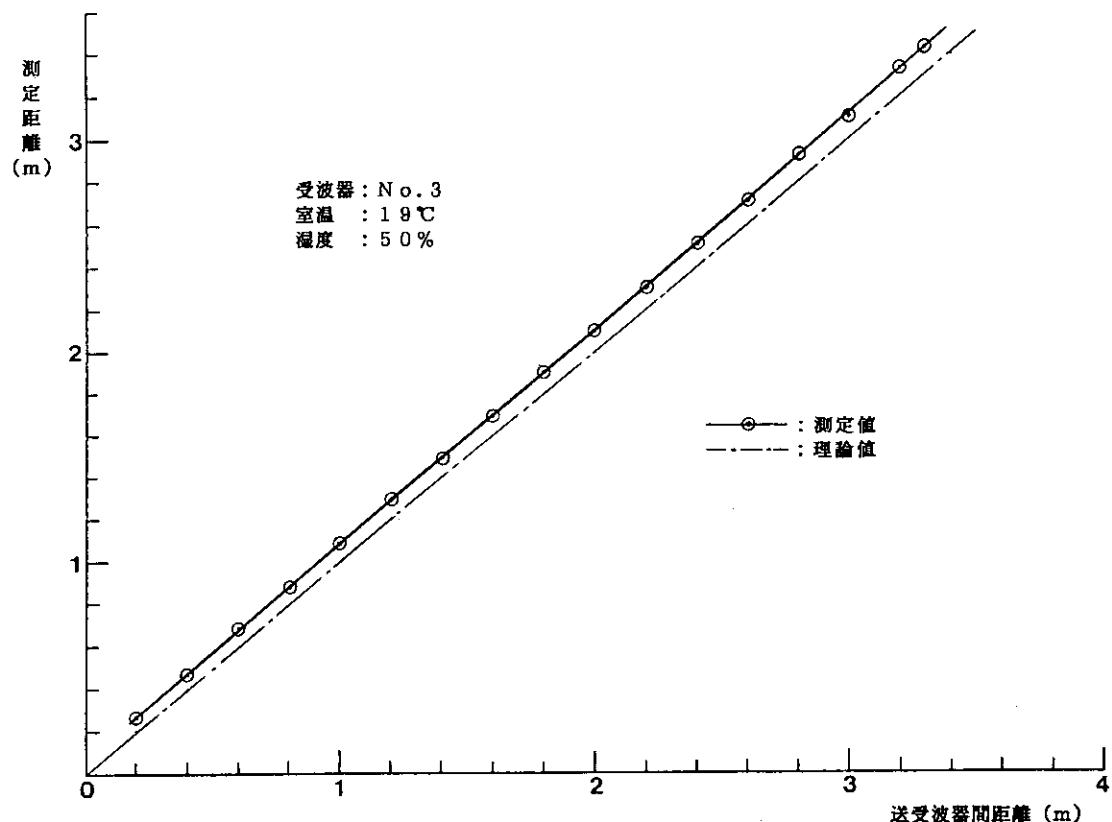


図 7.3 距離精度測定試験結果（受波器 3）

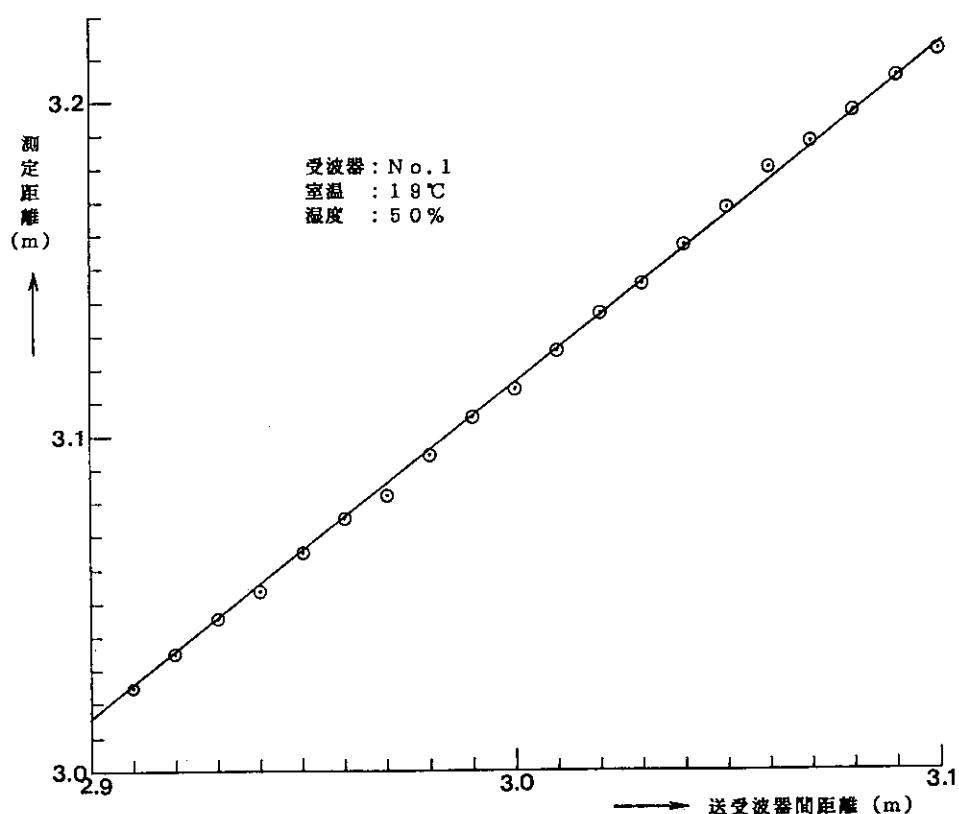


図 7.4 距離精度測定試験結果（受波器 1）

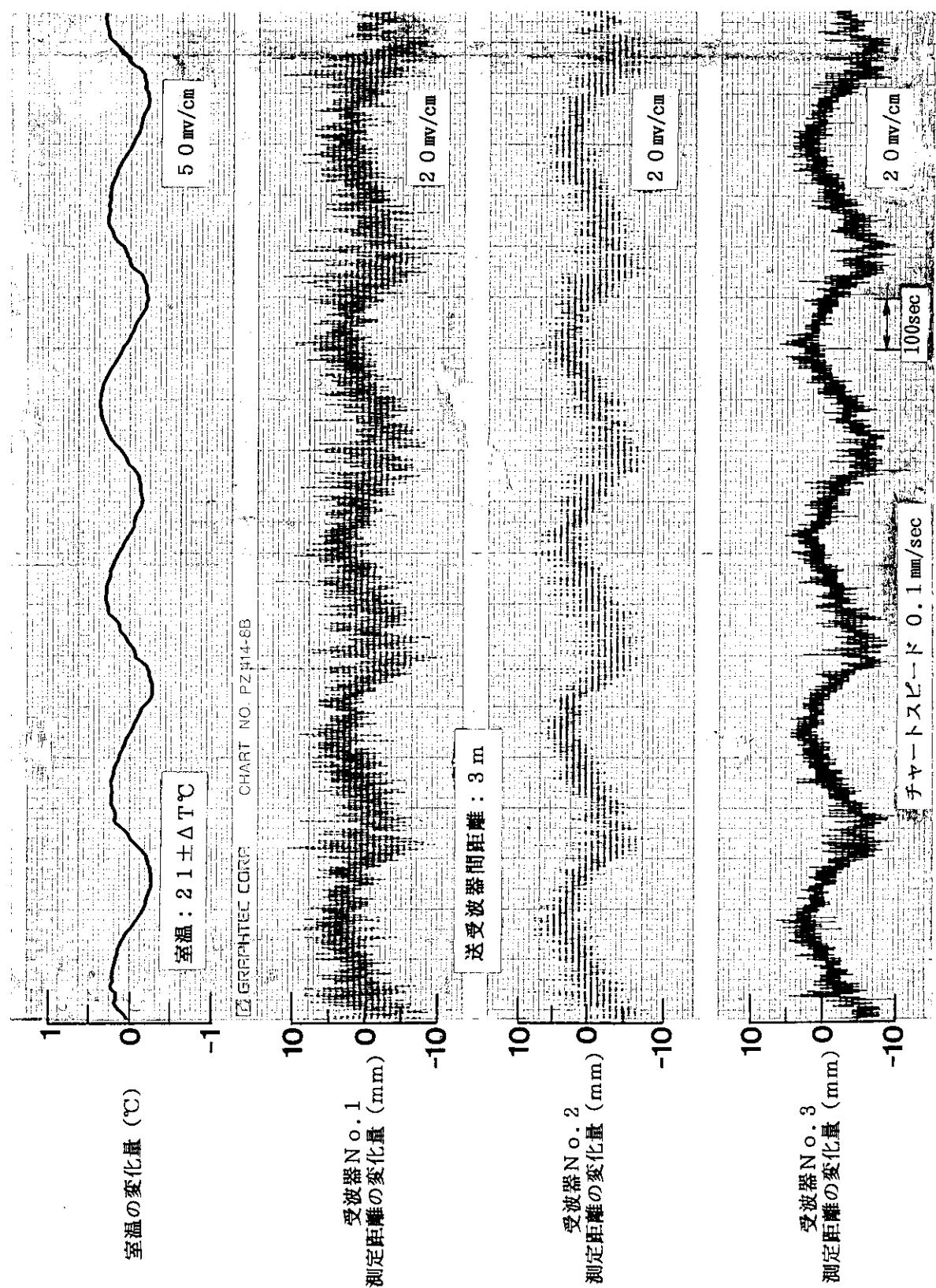


図 7.5 超音波伝搬時間計測回路のD/A変換器出力電圧
(室温を微小変化させた場合)

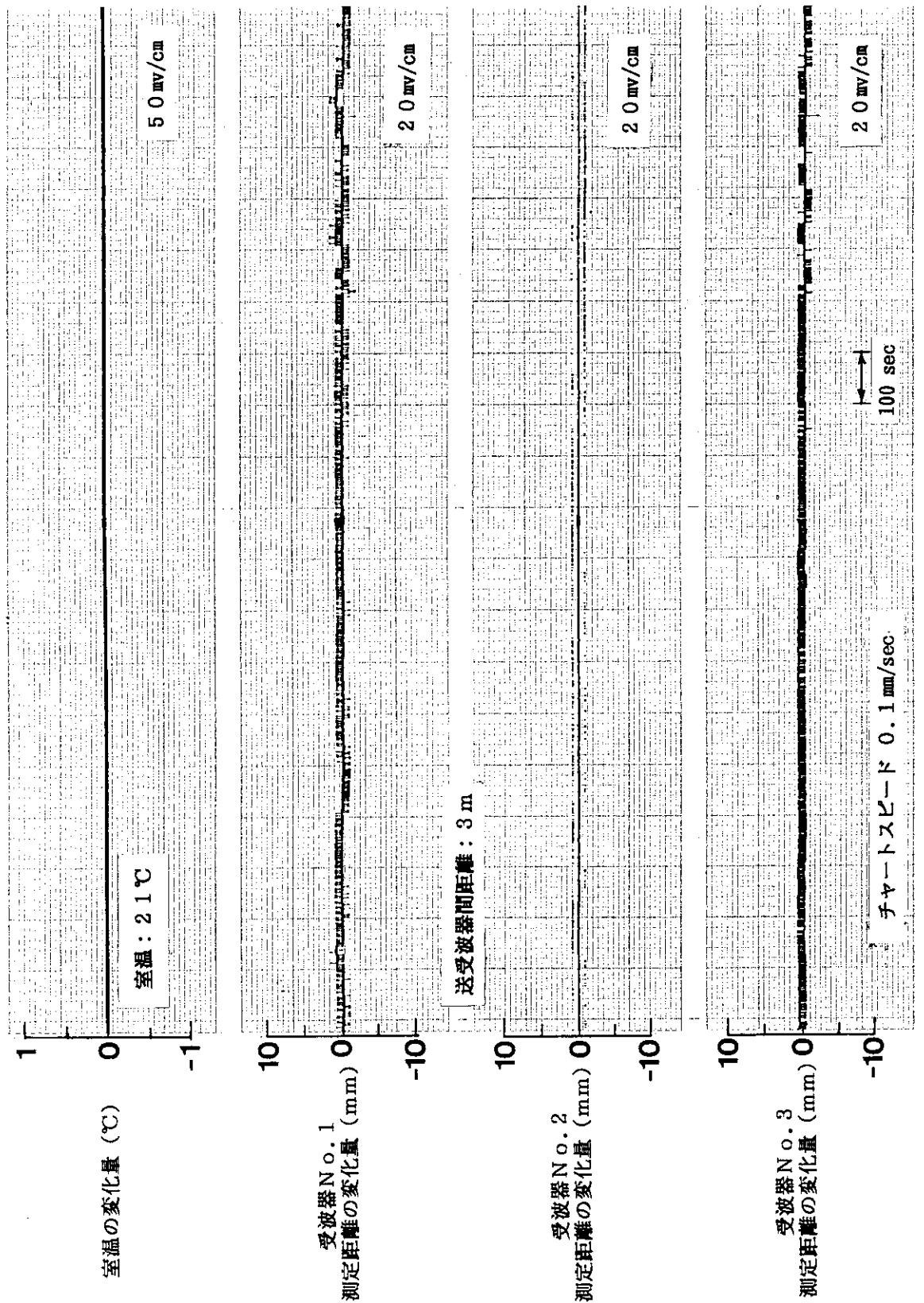


図 7.6 超音波伝搬時間計測回路のD/A変換器出力電圧
(室温を一定にした場合)

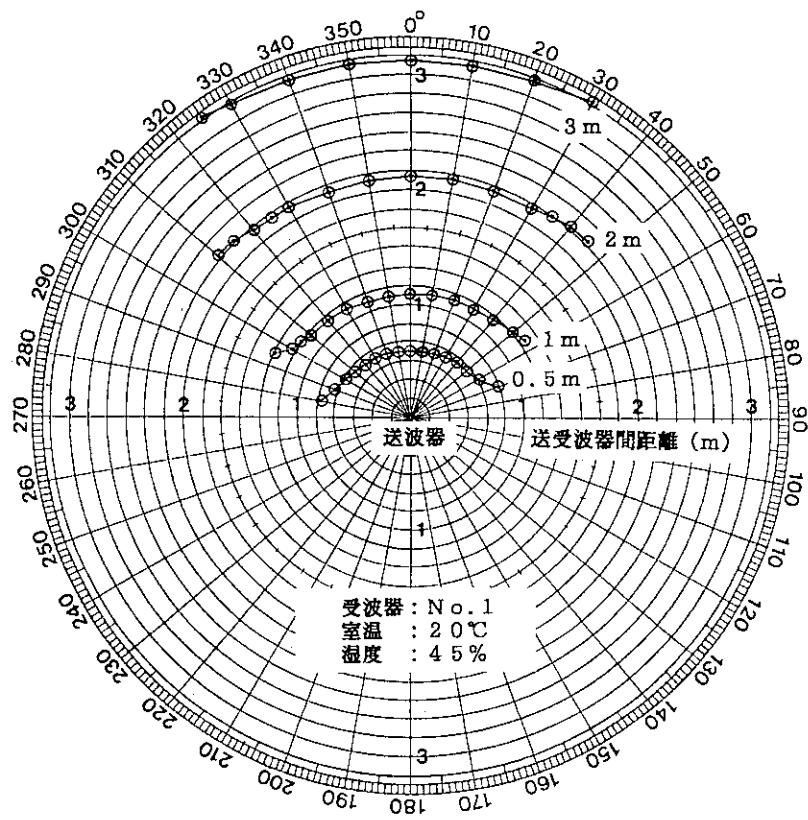


図 7.7 送・受波指向特性（受波器 1 で受信した場合）

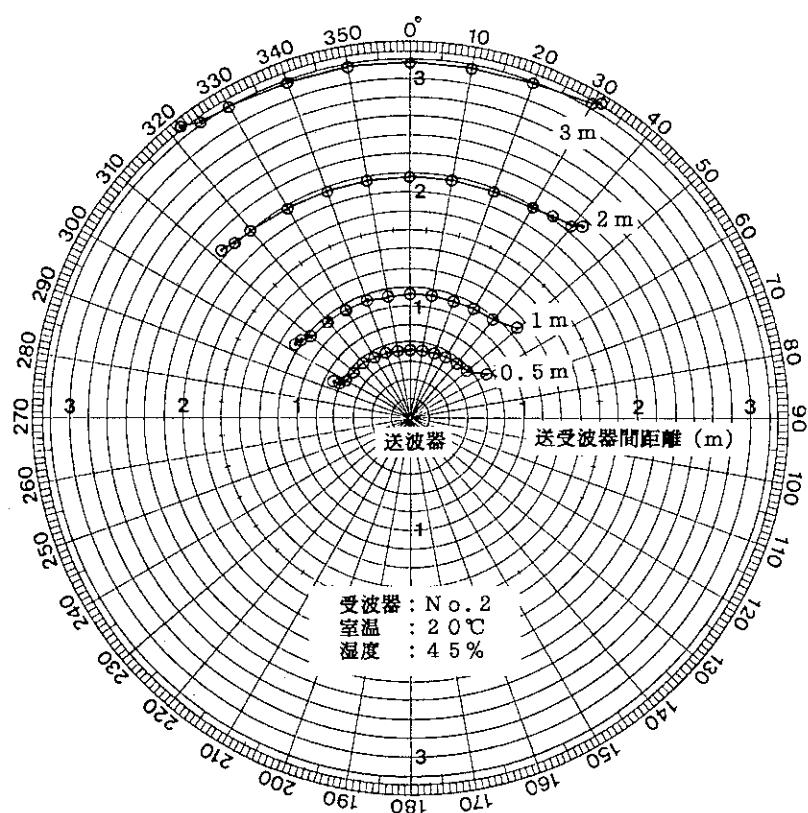


図 7.8 送・受波指向特性（受波器 2 で受信した場合）

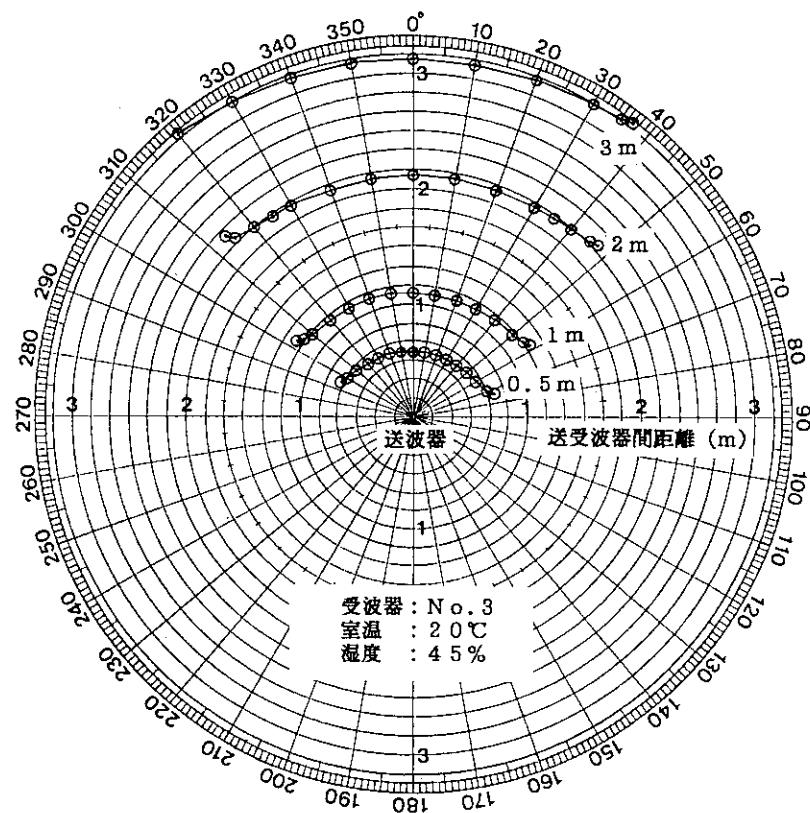


図 7.9 送・受波指向特性（受波器 3 で受信した場合）

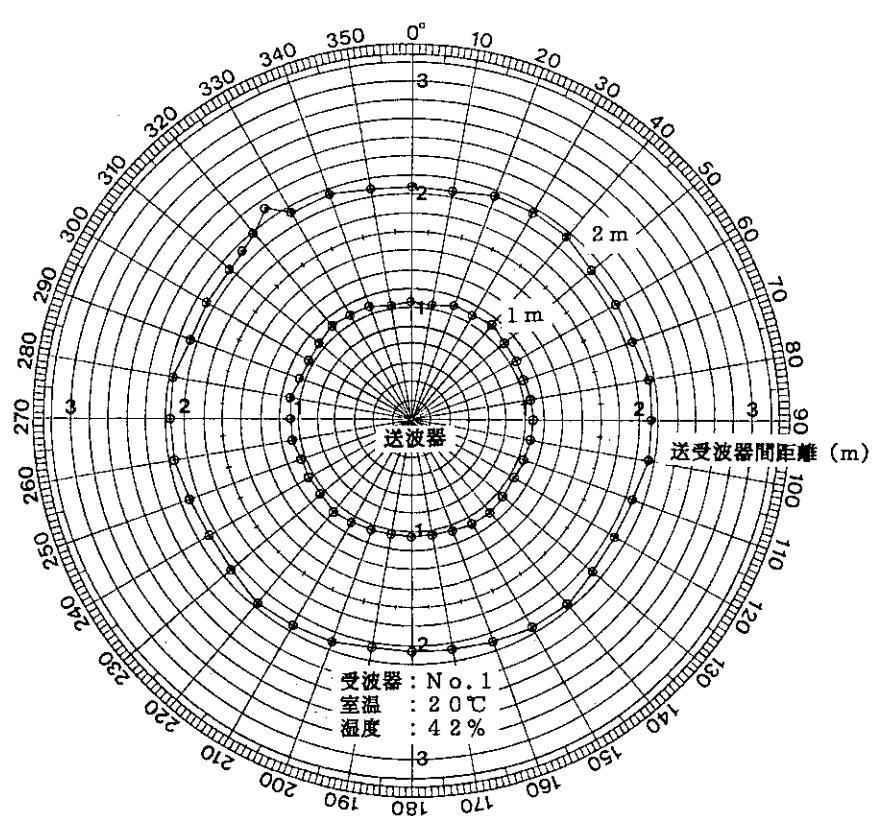


図 7.10 6 角柱状送波器による送・受指向特性（受波器 1 で受信した場合）

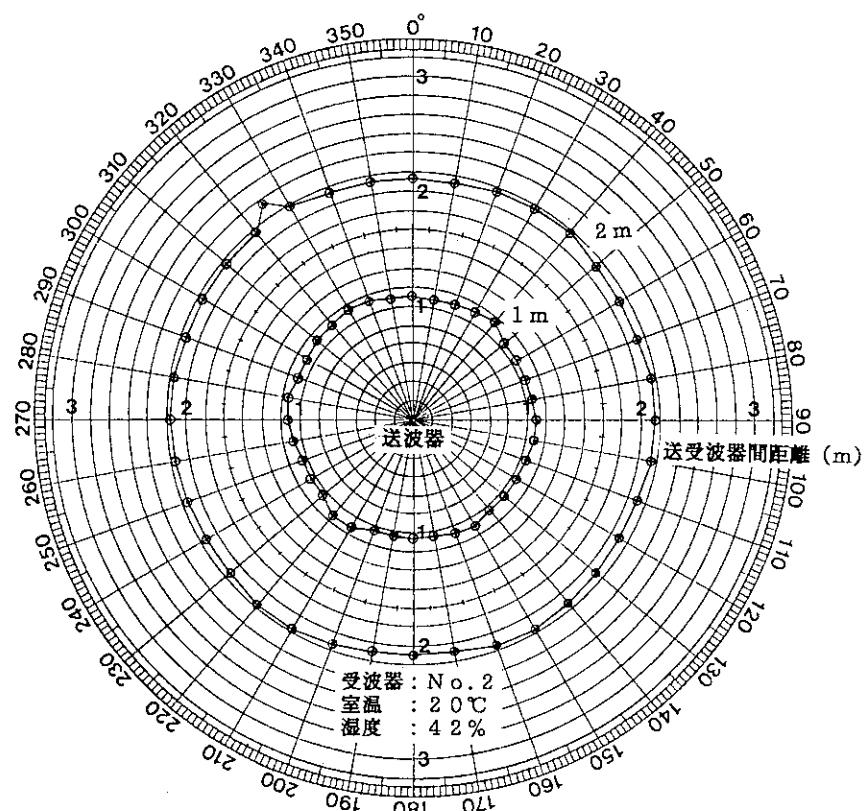


図 7.11 6 角柱状送波器による送・受指向特性（受波器 2 で受信した場合）

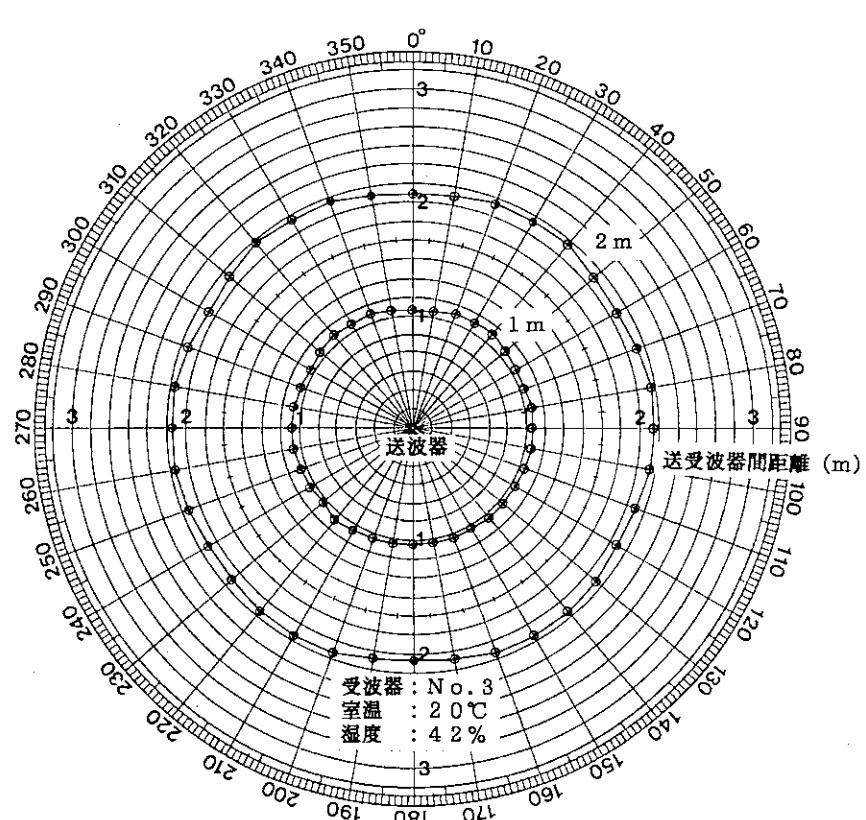


図 7.12 6 角柱状送波器による送・受指向特性（受波器 3 で受信した場合）

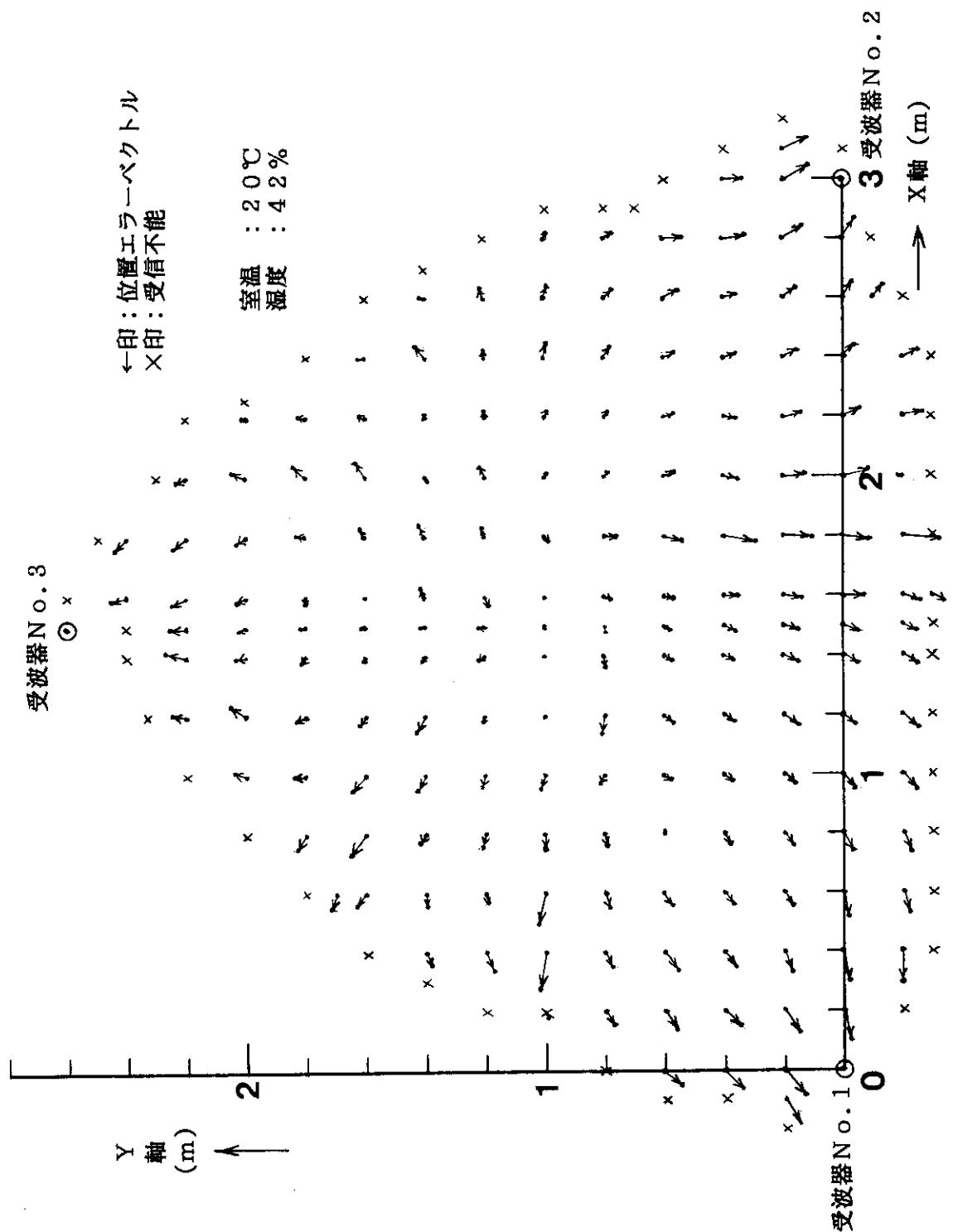


図 7.13 送波器位置検出精度試験結果

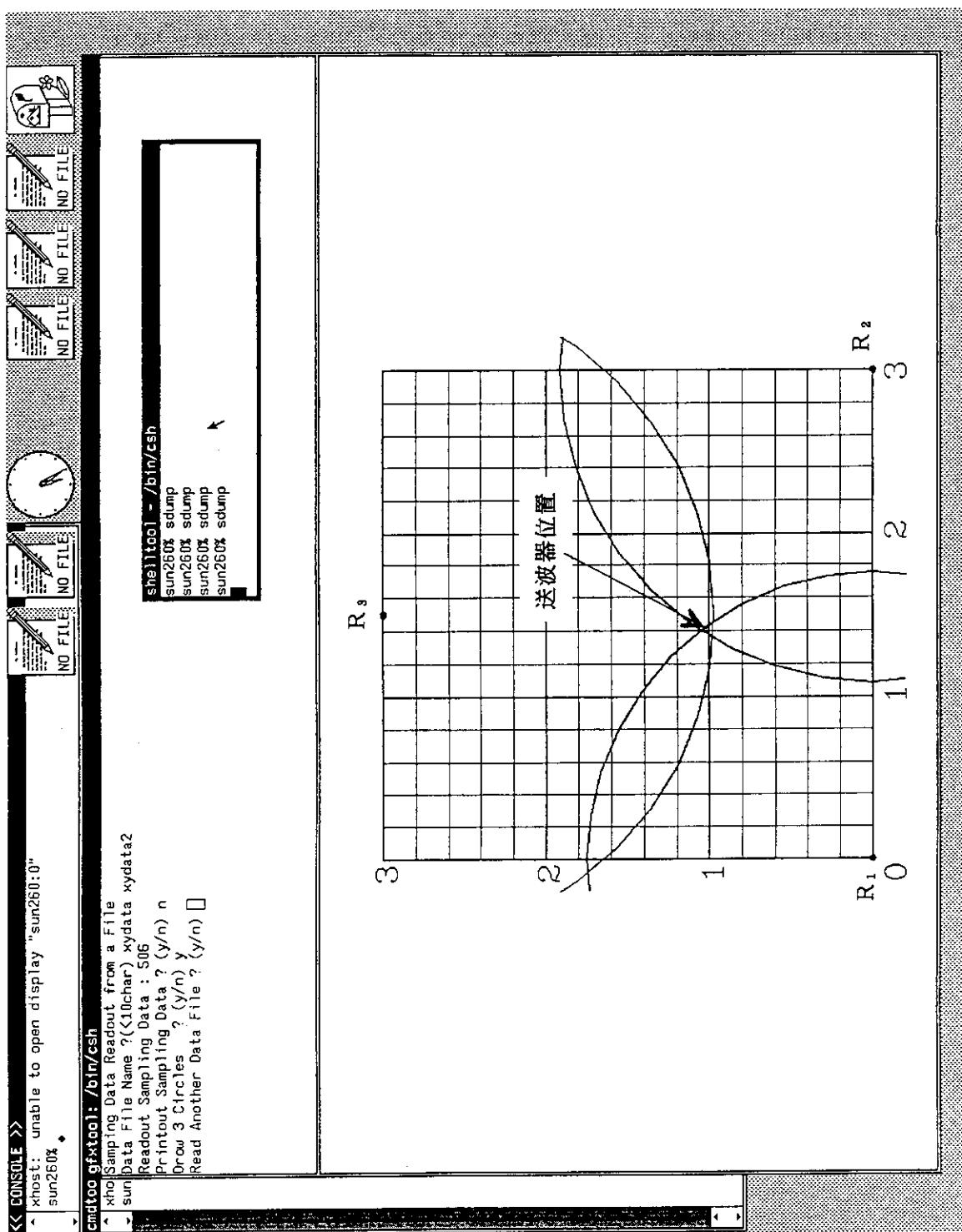


図 7.14 送波器位置検出表示の一例

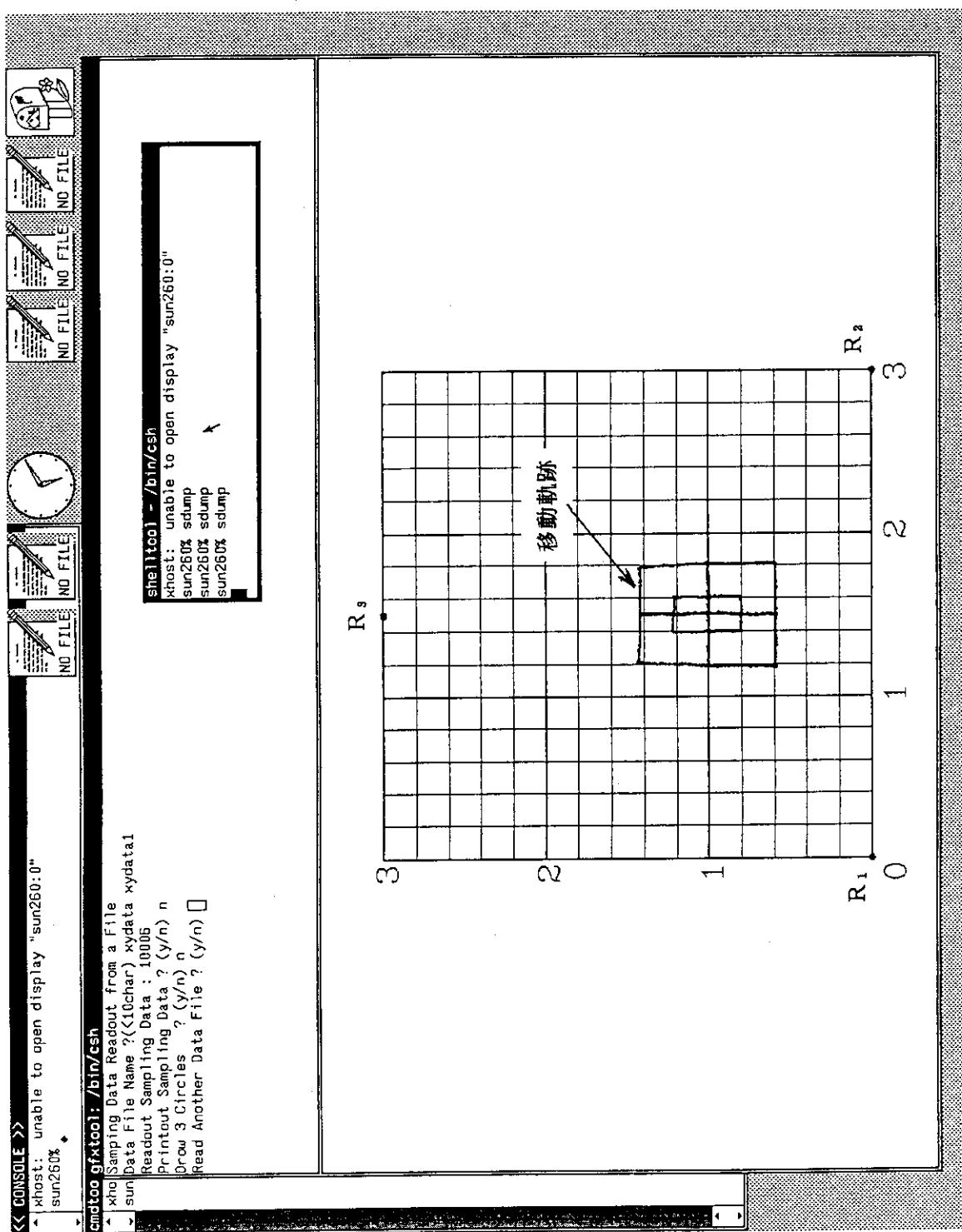


図 7.15 送波器の移動軌跡表示の一例

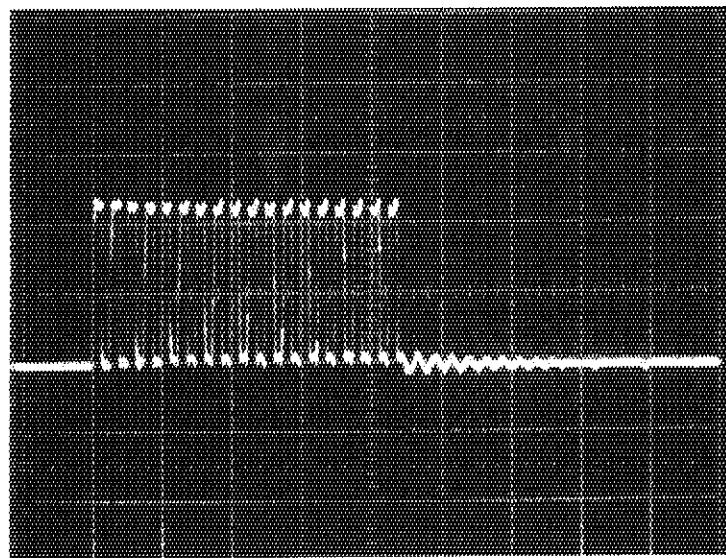


写真 7.1 超音波送波器に加えた断続パルス波形
(5 V/div, 0.1 ms/div)

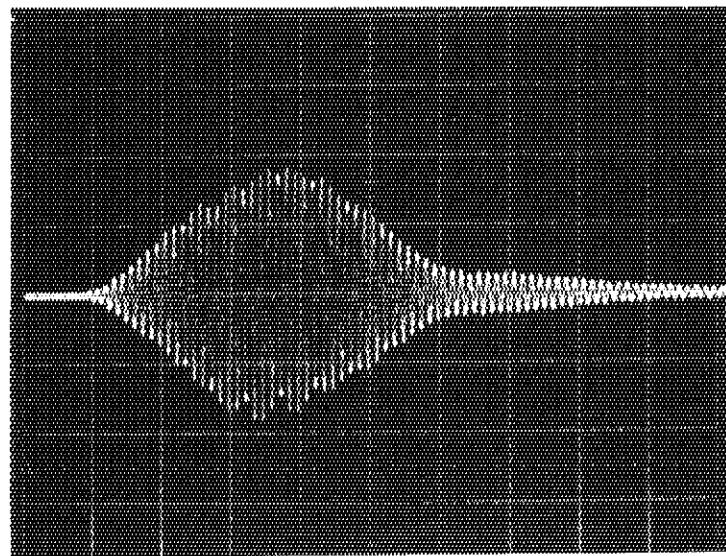


写真 7.2 超音波受信波形の一例
(5 V/div, 0.2 ms/div)

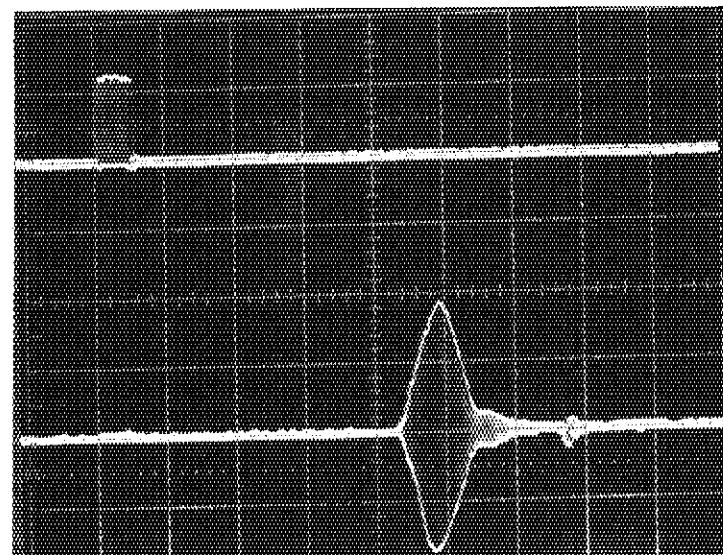


写真 7.3 超音波送信波形と受信波形
(上：送信波 10 V/div , 下：受信波 0.5 V/div , 1 ms/div
送受波器間距離： 1.5 m , 室温： 24.4°C)

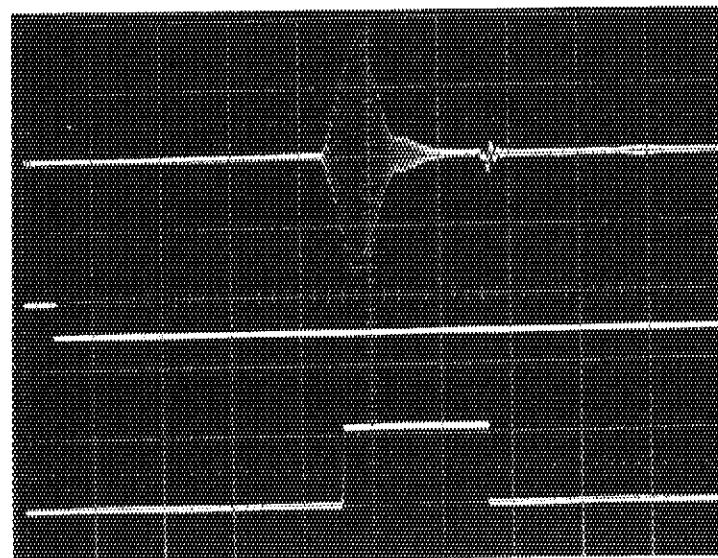


写真 7.4 超音波受信波形とゲート信号
(上：受信波 0.5 V/div
中：送信トリガパルス 1 V/div
下：ゲート信号 10 V/div , 1 ms/div
送受波器間距離： 1.5 m , 室温： 24.4°C)

8. おわりに

実験用知能ロボットを製作するための準備として、これまでに各種センサ及びセンサ信号処理システムを用いて種々の基礎的実験を行ってきた。今回報告した実験は、超音波センサを用いて行った位置同定の基礎的な実験であるが、本実験を通して超音波の性質、超音波センサの特性、超音波による位置同定の精度等について基本的なデータを取得し、評価することができた。また、超音波の発生やその受信は極めて容易に実現できたが、高精度で安定度の優れた測定系を構成することはそれなりに対策が必要であることも判明した。即ち、超音波センサはその使い方によつては高精度な測定が可能であるが、逆に下手な使い方をすればかなり精度の悪い測定結果を生む恐れもある。

ソフトウェアの面においては、本実験用に製作した位置同定プログラムの並列処理の技法は、構造化された複数のプロセス間の同期をとつて通信を行う有効な方法であり、他のセンサ信号処理システムを構築する際にも、大いに活用できるものと思われる。

今回実験した位置同定の方法は送波器から発信した超音波を受波器で直接受信する方式であるが、送波した超音波の反射波を利用して物体を認識する方法についても現在実験を進めており、今後は超音波ホログラフィー等による環境認識技術の開発を進めて行く計画である。

参考文献

- 1) 実吉純一他監修：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，(1977)
- 2) 丹羽 登：超音波計測，昭晃堂，(1989)
- 3) 根岸勝男、高木堅志郎：超音波技術，東京大学出版会，(1989)
- 4) 藤森聰雄：やさしい超音波の応用，秋葉出版，(1986)
- 5) 川端 昭：やさしい超音波工学，工業調査会，(1988)
- 6) トランジスタ技術編集部：メカトロ・センサ活用ハンドブック，CQ出版，(1989)
- 7) 増田久喜他：1987年版最新センサ規格表，P95-P105，CQ出版，(1985)
- 8) 井出正男他：省力と自動化 特集超音波センサの実務，'87/6 P25-P59，オーム社，(1987)
- 9) 村田製作所：空中超音波センサ・カタログ
- 10) 矢吹道郎他訳：SUNユーザーズガイド，マグロウヒル，(1990)
- 11) 塩谷 修：実用UNIXシステムプログラミング，日刊工業新聞社，(1990)
- 12) 石田晴久訳：Cハンドブック，共立出版，(1986)

8. おわりに

実験用知能ロボットを製作するための準備として、これまでに各種センサ及びセンサ信号処理システムを用いて種々の基礎的実験を行ってきた。今回報告した実験は、超音波センサを用いて行った位置同定の基礎的な実験であるが、本実験を通して超音波の性質、超音波センサの特性、超音波による位置同定の精度等について基本的なデータを取得し、評価することができた。また、超音波の発生やその受信は極めて容易に実現できたが、高精度で安定度の優れた測定系を構成することはそれなりに対策が必要であることも判明した。即ち、超音波センサはその使い方によつては高精度な測定が可能であるが、逆に下手な使い方をすればかなり精度の悪い測定結果を生む恐れもある。

ソフトウェアの面においては、本実験用に製作した位置同定プログラムの並列処理の技法は、構造化された複数のプロセス間の同期をとつて通信を行う有効な方法であり、他のセンサ信号処理システムを構築する際にも、大いに活用できるものと思われる。

今回実験した位置同定の方法は送波器から発信した超音波を受波器で直接受信する方式であるが、送波した超音波の反射波を利用して物体を認識する方法についても現在実験を進めており、今後は超音波ホログラフィー等による環境認識技術の開発を進めて行く計画である。

参考文献

- 1) 実吉純一他監修：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，(1977)
- 2) 丹羽 登：超音波計測，昭晃堂，(1989)
- 3) 根岸勝男、高木堅志郎：超音波技術，東京大学出版会，(1989)
- 4) 藤森聰雄：やさしい超音波の応用，秋葉出版，(1986)
- 5) 川端 昭：やさしい超音波工学，工業調査会，(1988)
- 6) トランジスタ技術編集部：メカトロ・センサ活用ハンドブック，CQ出版，(1989)
- 7) 増田久喜他：1987年版最新センサ規格表，P95-P105，CQ出版，(1985)
- 8) 井出正男他：省力と自動化 特集超音波センサの実務，'87/6 P25-P59，オーム社，(1987)
- 9) 村田製作所：空中超音波センサ・カタログ
- 10) 矢吹道郎他訳：SUNユーザーズガイド，マグロウヒル，(1990)
- 11) 塩谷 修：実用UNIXシステムプログラミング，日刊工業新聞社，(1990)
- 12) 石田晴久訳：Cハンドブック，共立出版，(1986)