

超音波ビームを用いた 3 次元物体の入力

島田 恭宏・秋山 俊一・池田 浩之・塩野 充

岡山理科大学工学部情報工学科

(1994年9月30日 受理)

1. まえがき

近年、コンピュータ・グラフィクスや画像処理の研究が進むにつれ、研究対象が2次元から3次元へと移行している。これに伴い、3次元物体の形状入力の必要性が高まってきた。一般に、3次元物体の形状を測定するには距離情報が用いられ、三角測量やレーザ光などの伝播時間によって測定が行なわれる。ことにレーザ光を用いれば、解像度が高く測定範囲が広いことから、現在使用されている測定装置には、主にレーザ光の伝播時間によって距離を測定する方法が採用されている。しかし、これらは大がかりな装置であり、価格も高価で誰もが購入し、簡単に使用できるというものではない。また、人体の測定の必要性も最近では高まってきており、レーザ光を用いた場合、少なからず人体への影響が心配される。

一方、非接触で距離を測定する方法に、超音波を用いた方法がある。超音波は、

- 測定物体の材質を選ばない
- 安価に測定装置を構成できる
- 人体に無害

などのメリットを持つが、

- 測定できる距離が短い
- 解像度が低い

などの理由から、障害物センサなどにしか用いられていなかった。しかし、レーザ光を用いた装置に対し、超音波が有するメリットは大きく、これにより3次元物体の形状を測定できれば、安価で安全性も高く、簡単に使用できる装置が構成できる。これまでも超音波を用いた装置も考えられているが、水平な床面に置かれた単純な物体の表面の形状の測定¹⁾や、マニピュレータの制御における簡単な対象物体の形状認識^{2,3)}に留まっており、完全な3次元物体の表面形状の獲得までは行なわれていない。

そこで本研究では、超音波を用いた3次元物体の形状入力に関する実験を行なった。しかし前述のように、超音波は測定できる距離が短い、解像度が低いなどの問題がある。本研究では、前者に対しては、比較的小さな物体を対象とし、後者に対しては、データの補正手法を提案し、得られた形状データからコンピュータ・グラフィクスにより3次元形状

を描画させ、どの程度の再現性があるかを検討した。

2. 超音波の解像度

超音波を3次元物体の形状入力に使用する場合、最も問題となるのが解像度の低さである。レーザ光はビームの収束性に優れており、数ミリ単位の検出領域での測定が可能である。しかし、超音波の場合、音源から発せられた音波は広がる傾向にあり、測定物体に届いた時点では、検出領域は数センチ程度になってしまう。本研究では、キーエンス社製のUD-300（アンプユニット）、UD-310（センサユニット）を超音波装置として使用した。この装置の仕様を表1に示す。この製品は、非接触型の距離測定装置として販売されているものであり、これらの組合せのみで距離測定が可能となっている。他の製品と比較しても、センサ部の性能は比較的良いものであった。そこで本研究では、まず、この超音波センサがどの程度の解像度を有するものか測定を行なった。その結果を図1に示す。横軸はセンサユニットの先端からの距離を示しており、縦軸は検出領域幅を示している。図からもわかるように、センサユニットの先端からの距離により、その幅は変動しており、また、検出領域幅も広く解像度が低いことがわかる。そこで、超音波ビームを絞り込むために、センサユニットに円筒状のフードを装着し同様の測定を行なってみた。測定結果を図2に示す。また同図には比較のためフードを装着していない場合の結果も同様にプロットしている。フードの有無に関わらず、最小の検出領域幅は改善されないが、距離測定による検出領域幅の広がりや抑えられており、フードの有効性が示されている。当然、フード長が増すことにより距離測定は短くなってしまいが、ある程度の解像度を保つために、フードの装着は必要である。使用する超音波装置の仕様として、測定範囲が6 cm～30 cmに制限されるため、本研究では、18 cm長のフードを装着し、実験を行なうこととした。これにより、最大半径が12 cm以下の物体しか測定できないことになるが、今回の実験で用いる測定対象では問題が無いと判断した。

表1 使用した超音波装置の仕様

測定範囲	表示分解能	最小検出物体	発振周波数	アナログ電流出力	
				出力電流	適用負荷
60-300 mm	1 mm	10 mm	200 kHz	2-20 mA	0-350 Ω

3. 3次元物体の形状入力

3.1 距離データからの3次元物体の形状情報の獲得

図3に実験の概略を示す。他の方法と同様に、超音波を用いた距離測定も、視野内の多数の点の距離を同時に獲得することはできない。また、センサ部を移動させながらの測定はその制御が困難なことから、測定対象をターンテーブルに載せ、等速で回転させながら

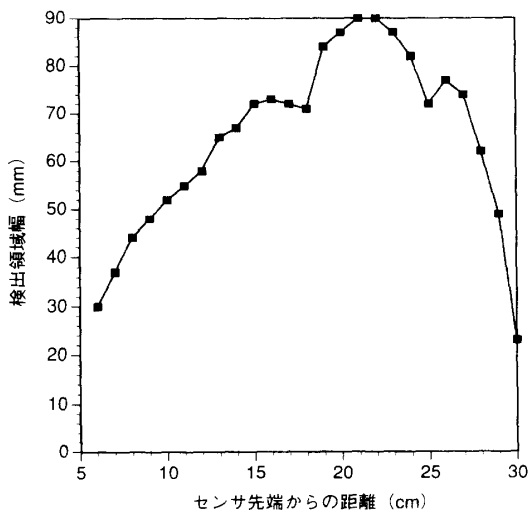


図1 超音波センサの検出領域幅

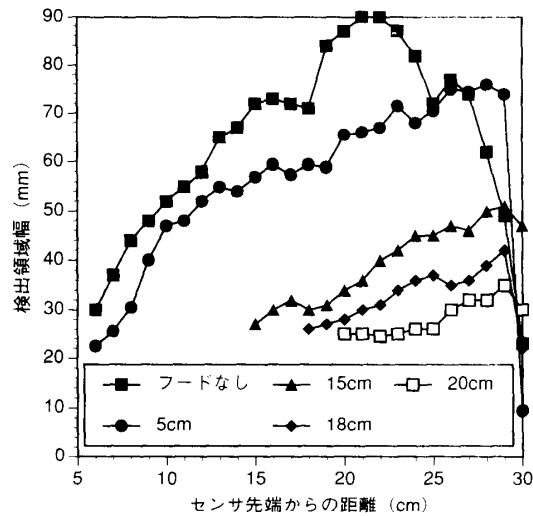


図2 超音波センサの検出領域幅(フード装着時)

1点ごとの測定を行なうこととした。まず、超音波センサの先端からターンテーブルの回転中心までの距離を計測しておく。この距離は、使用した超音波機器が最長30cmまで測定可能なことから、常に30cmとした。次に、一定のサンプリング間隔で物体表面までの距離を測定し、これを物体が1回転する間繰り返す。サンプリング間隔は、ターンテーブルの周期(1.8sec)、および、超音波の解像度から0.02[sec] (4°[deg])と決定し、90点のデータを取得する。得られた距離をターンテーブルの回転中心までの距離から減ずることによって、物体の断面像を構成することができる。測定対象は3次元物体ゆえ、超音波センサをz軸方向に移動させ同様の測定を行なうことで全形状情報を獲得することが出来る。物体の縦方向のデータ点数は、測定物体に依存し異なるが、後の処理で解像度の低さを補うためにオーバーラップさせてサンプリングすることとし、0.5cmずつ移動させることにした。この時点での形状情報は、1つの測定点における極座標系で示した断面像を測定順に保存する。

本研究で用いた超音波装置は、単なる超音波デバイスではなく、距離測定用として構成されているのであり、単独で距離測定が可能である。しかし、自動的に処理を構成するために、装置のアナログ出力をA/D変換器を通して計算機に入力し、距離を測定した。測定物体を回転させるターンテーブルにレコードプレーヤーを使用しているが、ターンテーブルの周期を検出するために自作の光センサを設置した。この光センサからの信号をA/D変換器に送り、測定開始のトリガ信号として用いた。これにより、常に同位置からの測定を開始することができる。図4に光センサの回路図を示す。回路は右側のセンサ回路と左側のトリガ回路からなる。センサ回路では、フォトダイオードを常時点灯させておき、ターンテーブルに設置した反射板によりフォトトランジスタへ瞬間的に光(赤外線)を受光させ出力を得る。計算機へのデータ転送、データ変換等の処理がターンテーブルの1回転

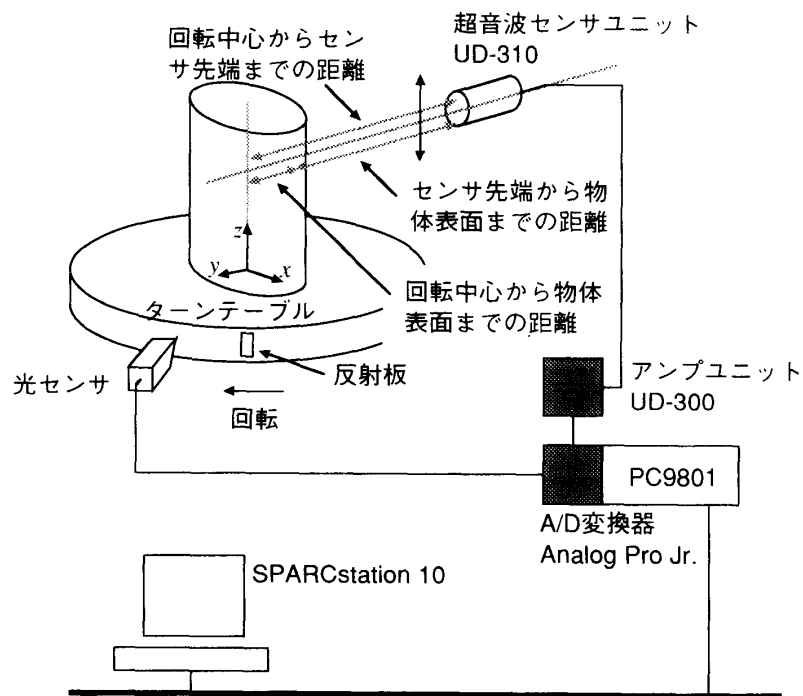


図3 実験の概略

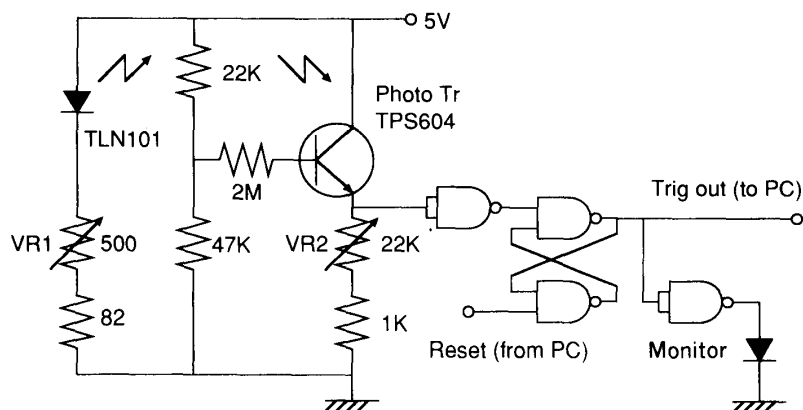


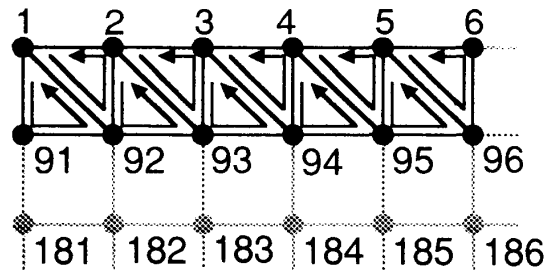
図4 光センサ

の時間よりも長くかかった場合、1回転ごとにトリガを出力していたのでは正しいサンプリング操作が不可能となる。トリガ回路は、このような問題を防ぐため、計算機から処理終了後、リセット信号が出力されない限りトリガ信号を出力しないワンショット・トリガとして機能する。

3.2 3次元物体形状の可視化

本研究では、前述の方法により得られた3次元物体の形状を可視化するツールとして、ワークステーション上で動作する“art”というアプリケーションプログラムを使用した。“art”は3次元立体の形状をサーフェイモデルで表現し、その形状に明るさ、色を付与

するレンダリング手法としてレイトレーシング法を用いている。サーフェイスモデルでは立体を多角形群により表現するため、立体を構成する面単位に頂点の座標点列としてデータを表現しなければならない。そこでデータの変換処理を行なう。測定されたデータは、物体表面の位置を基準位置からの回転角と回転中心から物体表面までの距離で表現されている。これをまず、直交座標系に変換する。この処理に至るまでのデータは、 z 軸方向の測定順に2次元データとして確保しているだけである。よって、直交座標系に変換すると同時に、 z 軸方向の座標データを付加し、3次元の座標データとする。次にサーフェイス



頂点リスト

```

1, 91, 92
1, 92, 2
2, 92, 93
:

```

図5 モデリングのためのデータフォーマット

モデルでのモデリングを行なうためのデータの構造化を行なう。まず、測定点のデータを図5に示すように2次元配列状に配置し、各頂点にナンバリングを行ない頂点番号を付与する。次に、各頂点を反時計方向に巡回し三角形を構成する頂点のリストを作成する。この操作を全データに対して行なった後、リスト中の頂点番号に対応する座標データを与え、モデリングを実行する。レンダリングのための各情報は、本研究では付加的なものゆえ、適当と思われるパラメータを与えた。

4. 入力データの検討

4.1 入力データの真値との比較

3次元物体の形状入力実験に先立ち、入力データがどの程度、信頼出来るかを調査するために、簡単な予備実験を行なった。まず、測定物体を円筒状物体として前述の方法により物体形状を測定し、円筒の直径を求めた。真値はメジャーを用いて測定している。図6に測定結果を示す。横軸は物体測定時の回転角度を、縦軸は円筒の直径を示している。本来ならば、一直線になるはずのプロットが上下に変動しており、誤差を含んでいることがわかる。また図中、全体に真値よりも小さな値が得られているが、これは、A/D変換器への入力の設定が不完全なためである。しかし、絶対的な値は一致しないものの、その値の変化はリニアなものであり、相対的に物体の形状を表現するには影響はないと考えられる。次に、本研究で測定対象とした洗剤容器の任意の1点のデータを5回計測した結果を図7に示す。横軸は測定時の物体の回転角度を、縦軸は、ターンテーブルの回転中心から物体表面までの距離を示している。同位置を連続して測定したにも関わらず、各角度における距離は変動している。これらの結果より本研究では、物体形状を測定する際に、同位置に

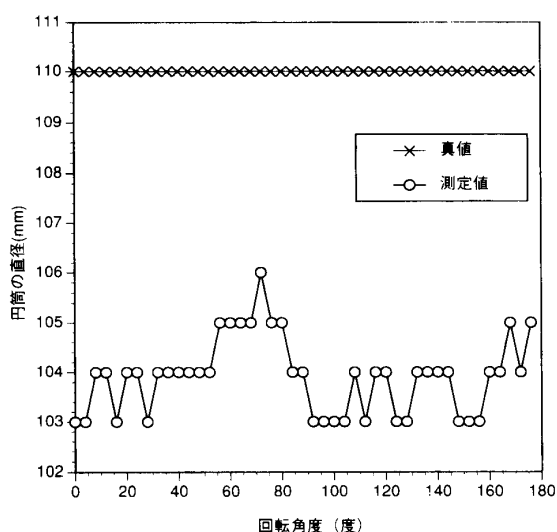


図6 円筒の測定結果

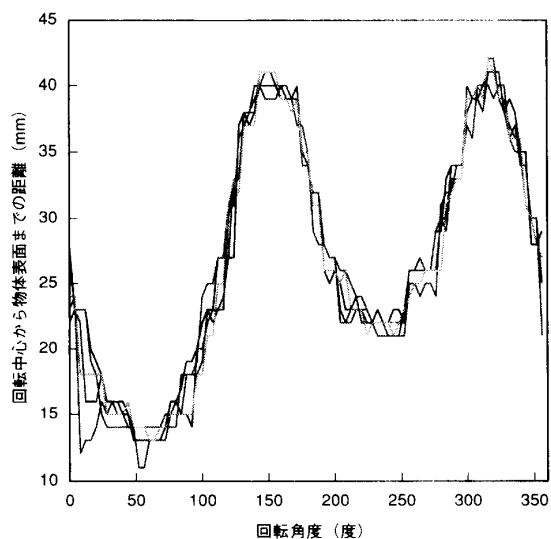


図7 洗剤容器の測定結果

対して10回の測定を行ない、各測定点の平均値を求めることで微小なデータのばらつきを吸収することにした。

4.2 入力データの補正

前節では、測定データの1次元的な補正方法について述べたが、これらのデータ点列を並べて面を構成した場合、各々のデータ列（物体の断面像）が変動を有し、測定物体に対応した形状が構成されない可能性がある。そこで、測定データ列（この段階では、極座標系のデータ）を測定順に並べ、データを2次元配列状に配置し、 3×3 のマスクを走査しフィルタリングを行なう。フィルタは、式(1)(2)で示される最小値フィルタと平均値フィルタを用いた。

$$\hat{f}(i, j) = \min_{(x, y) \in R} f(x, y) \quad (1)$$

$$\bar{f}(i, j) = \frac{1}{9} \sum_{(x, y) \in R} f(x, y) \quad (2)$$

ただし、 $f(i, j)$ は2次元配列状に配置したデータ、 R はデータ (i, j) とその近傍のデータの集合、 $\hat{f}(i, j)$ は最小値フィルタによるフィルタリング後のデータ、 $\bar{f}(i, j)$ は平均値フィルタでフィルタリング後のデータを示している。

超音波を用いた場合、ビームの照射範囲が広いことから、その測定範囲が1つの値で代表されてしまい、物体の形状を再現すると物体が有する凹凸が表現出来ない可能性がある。距離データ測定時、各データはビームの照射範囲がオーバーラップするように測定している。物体の凸部の最高の高さが照射範囲内で変わらないとするならば、オーバーラップした点では同じ距離が測定される。そこで、局所領域内で距離の最小値を検出することで、より実際の物体形状に近いデータが得られるのではないかと考え、最小値フィルタを用い

た。また、平均値フィルタは、前節での補正手法を2次元に拡張したものであり、領域内での平均値を求めることで、微小なデータの変動を吸収しようというものである。また、実験では、これらの2つの補正を組み合わせた実験も行なった。

5. 実験結果および検討

5.1 洗剤容器での実験結果

本研究ではまず、家庭用の洗剤容器の形状を入力する実験を行なった。図8に実際の容器の形状を示す。前述のように、超音波センサの角度特性により物体をそのまま測定した場合、音波が反射されず、測定不可能な点が多数存在することから、物体表面を加工し微小な凹凸をつけることで、反射波を受信可能なようにした。凹凸をつけるためには、市販のスノースプレーを使用している。図9に（面としての）補正を加えない場合の3次元物体の再構成図を示す。全体的な形状は表現されているものの、光の反射から物体表面の凹凸が激しく、本来の滑らかな物体表面が描画されない。図10に最小値フィルタによる補正の結果を示す。先の図9の結果と比較し、局所的な凹凸は抑えられているものの、同図中央に大きな凹部が描き出されており、実際の形状と異なっていることがわかる。最小値フィルタによる補正を行なうことで、実際の物体形状に近付けることが出来るのではないかと期待したが、データ中に極端に小さいデータが存在した場合、マスク内の全てがそのデータに置き換えられてしまい、実際の形状とは異なったものとなってしまった。図11に平均値補正を施した場合の再構成図を示す。滑らかな面が構成されており、全体的にも物体

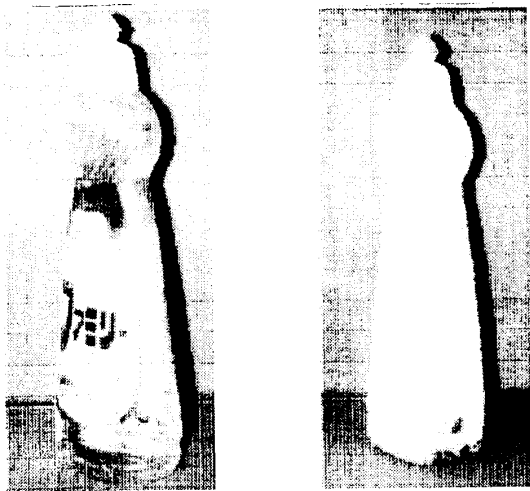


図8 入力対象物体(洗剤容器)



図9 洗剤容器の再構成図(補正無)

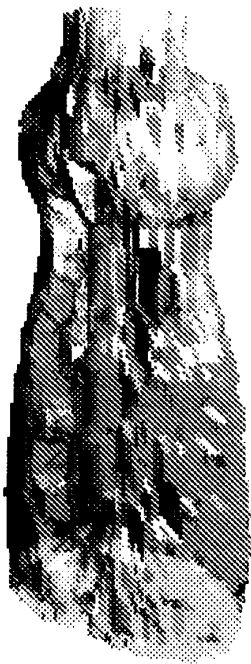


図10 洗剤容器の再構成図(最小値フィルタによる補正)



図11 洗剤容器の再構成図(平均値フィルタによる補正)

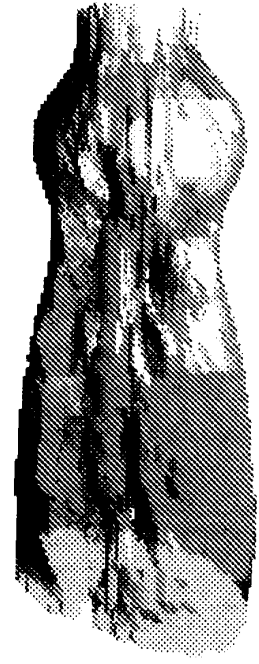


図12 洗剤容器の再構成図(2種類のフィルタによる補正)



図13 入力対象物体(頭部モデル)

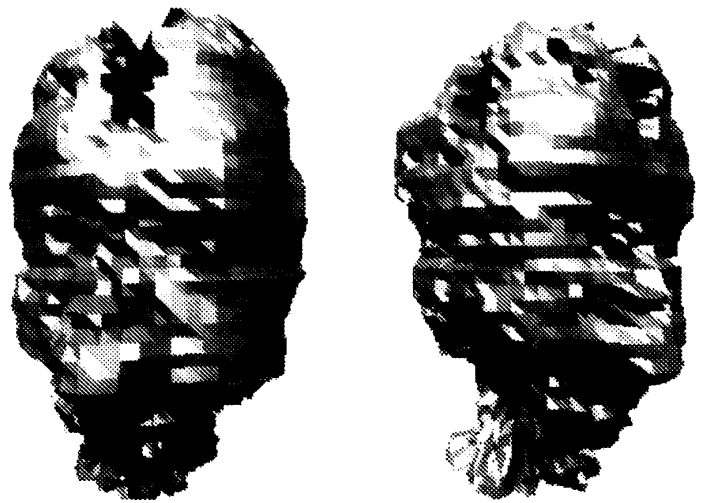


図14 頭部モデルの再構成図

形状を良く表している。最後に、2つの補正手法を行なった結果を図12に示した。両者の手法の特徴から、局所的な凹凸は抑えられており、滑らかな面が描画されたが、図中、中央の凹部はやはりでており、全体的な形状を歪ませてしまっている。筆者らの主観では、平均値による補正を行なった場合が最も良いように思われた。

5.2 頭部モデルによる実験結果

本研究の手法で、人間の頭部の入力が可能かどうかを調査するために、玩具のマスクで

作成した頭部モデルによる入力実験を行なった。図13にそのモデルを示す。実験は前節の場合と同様に行ない、補正手法は、平均値補正のみを用いた。その結果を図14に示す。図からもわかるように、大まかな形状の輪郭が再現できた程度である。前節で示した洗剤容器の再構成図と比較した場合、物体の大きさに比較して測定したデータ点数が少なかったために、粗い画像となっている。また、顔には目、鼻、口などの細かな形状変化があり、今回用いた超音波装置での解像度では追従出来なかったものと考えられる。

6. む す び

本稿では、超音波ビームを用いた3次元物体の形状入力に関して実験を行なった。洗剤容器と玩具のマスクを用いた頭部モデルでの入力実験を行ない、その結果、洗剤容器に対しては、良好な結果を得ることが出来た。これは、洗剤容器の形状がほぼ凸面で構成されており、低い解像度でも十分にその形状に対して追従できたためと考えられる。しかし、頭部モデルに対しては、大まかな輪郭形状が得られる程度に留まった。本実験では、超音波センサに円筒形のフードを装着し、超音波ビームを絞り込むように設定した。その結果、検出領域幅を狭めることは出来たが、絶対的な幅は数センチと広く、解像度は低い。頭部モデルの場合、例えば目の部分は額、鼻、頬などに囲まれてくぼんでおり、その範囲も狭い。超音波で走査した場合、目の部分を入力しようとしても、他の凸に検出領域が掛かり、それらの部分の距離が計測されてしまうことによって、良好な形状入力が出来なかったものと考えられる。結果的に、今回用いた装置は、複雑な形状物体の入力には適さないことがわかった。今後、超音波を用いた物体形状の入力実験を進める場合、以下の改善を施すことで、より良好な結果を得る可能性を有する。

まず、今回の実験では、絶対的な解像度が低いために、十分な形状情報が得られなかった。よって、より解像度の高い超音波センサの使用が不可欠である。これにより、凸部の形状はもとより、凹部の形状情報の獲得も可能である。また、今回使用した超音波装置から得られる情報が距離のみであり、形状の情報獲得手段として簡単な処理しか行なえなかった。本来、音波信号は、周波数、位相、振幅の3つの情報を有し、物体から反射した音波により得られるこれらの情報には、物体の形状に関する情報が含まれていると考えられる。よって、距離測定器としての超音波装置ではなく、センサデバイスとしての超音波センサを用い、信号処理を行なうことによって、正確な測定が行なわれるものと考えられる。

最後に、本研究に対し有益な御討論を頂いた本学情報工学科講師大倉充博士、本学情報工学助手島田英之博士に深謝する。

参 考 文 献

- 1) テレビジョン学会編：不可視情報の画像化，昭晃堂（1979）。
- 2) 辻村 健，藪田哲郎，森光武則：マニピュレータ用超音波距離センサを用いた3次元物体の形状認識シ

ステム, 第2回日本ロボット学会学術講演会講演論文集(昭和59).

3) 佐藤光伸, 上田光宏: 空中音波による物体識別, 日本音響学会誌, Vol. 46, No. 5 (1990).

3-D Shape Input Using Ultrasonic Distance Sensor

Yasuhiro SHIMADA, Syun-ichi AKIYAMA,
Hiroyuki IKEDA and Mitsuru SHIONO

Faculty of Engineering,

Okayama University of Science,

Ridai-cho 1-1, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1994)

The measurement technology of a three-dimensional shape has become important as the research of computer vision advances. In general, distance is used for the measurement of the shape of a three-dimensional object. The laser beam is used for such devices for the measurement of an accurate distance. However, the laser is dangerous for eyes. In this paper, we report concerning the measurement of the shape of a three-dimensional object using the ultrasonic distance sensor. The measurement device of the distance using the ultrasonic is low cost. Moreover, these devices are safe. However, the resolution of the ultrasonic is lower compared with the laser beam. To supplement a low resolution, we proposed the method of correcting the distance data. In this method, it was clarified to be able to obtain rough shape of a three-dimensional object.