

# 超音波センサのロボット計測への応用\*

青柳誠司\*\*

Application of Ultrasonic Sensors to Robot Measurement / Seiji AOYAGI

Key words: robot, ultrasonic transmitter, ultrasonic receiver, 3-D measurement, electric spark, directivity, micro sensor

## 1. はじめに

超音波センサは視覚センサ等の他のセンサに比較して処理時間が短く、小形・軽量であり、安価で手軽に扱えるという理由から、従来そのロボットへの応用が数多く試みられてきた。それらは(1)比較的近い壁面の距離と傾きを計測するもの<sup>1)</sup>、(2)対象物や障害物の位置と形状の認識、すなわち外界環境認識を行うもの<sup>2)~5)</sup>、(3)外界に基準座標系をおき、そこでのロボットの絶対的な位置・姿勢を計測するもの<sup>6)~8)</sup>に分類される。図1にこれらの分類を模式的に示す。(1),(2)の研究ではロボットに発信器と受波器(または送受兼用のセンサ)が取り付けられ、外界からの反射波の伝播時間、振幅、位相等の情報をもとに外界環境を認識する。(2)はさらに、無指向性の超音波を用いて音響映像を得るタイプ(図1のBタイプ)と、指向の鋭いビーム状の超音波を用い、それを走査したり、複数のセンサを用いたりするタイプ(同Cタイプ)に分類される。一方(3)の研究ではロボットに発信器を取り付け、外界の既知の位置に受波器を設置しておき、発信器、受波器間の超音波の伝播時間の情報をもとに三角測量の原理によりロボット自体の位置・姿勢を外部から計測する。

本稿では上記の分類の(3)に属する研究(図1のDタイプ)として、筆者が研究・開発した超音波センサを用いたロボットの3次元位置・姿勢計測システムを紹介する。また超音波センサを小形化する意義を上記で分類した研究

のタイプとの関連を踏まえて検討し、超音波センサの小形・マイクロ化に関する最近の研究についても紹介したい。

## 2. 超音波センサを用いたロボットの位置・姿勢計測システム

### 2.1 開発経緯

ロボットの運動性能を正確に評価することを目的として、図2に示すような超音波パルスの伝播時間計測を応用してロボットの位置・姿勢を計測するシステムを開発した<sup>7)</sup>。本システムの位置計測精度は0.2mm程度であり、ロボットの位置繰返し精度の評価の用途には精度不足であるが、絶対位置決め精度、絶対経路精度等の評価の用途には対応できる。また本システムは超音波素子が安価、小形であるため他方式に比べて安価に構成でき、携帯性に優れており、メーカ、ユーザが独自に所有できる簡易なロボットの運動性能評価システムの候補として有望である。

### 2.2 3次元位置・姿勢計測原理

図2に示すように4個の受波器を配置し発信器T(X, Y, Z)と受波器 $R_i(x_i, y_i, z_i)$ 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。

$$(X-x_i)^2+(Y-y_i)^2+(Z-z_i)^2=(Ct_i)^2 \quad (i=1\sim 4) \quad (1)$$

これは変数がX, Y, Z, Cである四元連立二次方程式なので解析的に解くことができる。姿勢に関しては、図2に示すように相対位置関係が既知である3個の発信器を用いれば、それらの座標を計測することにより求めることができる。

### 2.3 超音波発信器および受波器

ロボットは様々な位置・姿勢をとるので、超音波発信器



\* 原稿受付 平成7年11月21日  
\*\* 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)  
1988年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了, 1988年金沢大学工学部機械システム工学科助手, 1995年同助教授。工学博士。ロボット用アクチュエータ, センサ, 特に超音波モータ, 超音波センサ, ジャイロの研究・開発に従事

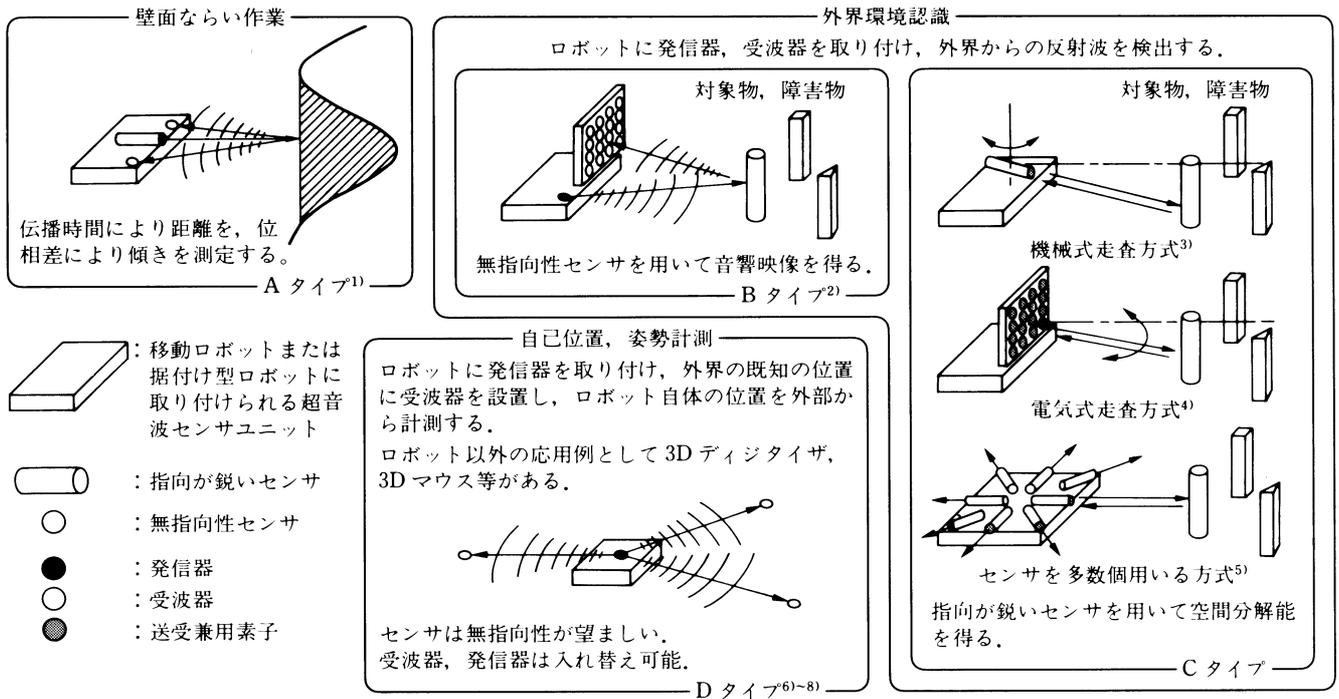


図1 超音波センサを用いたロボット用計測システムの分類

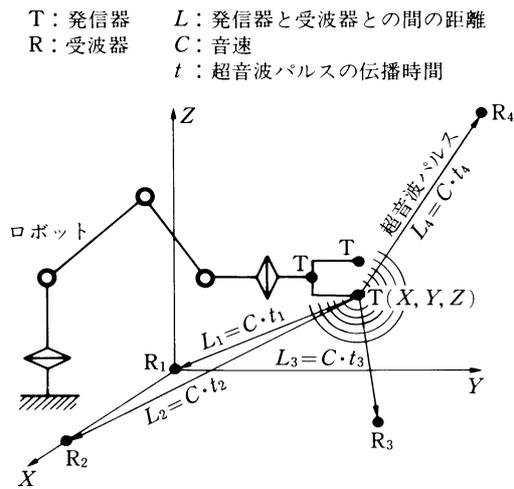


図2 超音波を用いた3次元位置・姿勢計測原理

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。超音波発信器として従来より圧電バイモルフ型、コンデンサ型のもが用いられているが、いずれも有限の大きさを持つため、その半減角（音圧が発信の正面方向に対して半分になる角度）は前者が30°程度、後者が6°程度であり無指向性近似は不可能である。

そこで図3に示すような電気火花放電を利用した発信器を開発した。2本の電極針が微小な空隙（ギャップ）を隔てて対向しており、電極間に衝撃的な高電圧を印加して電気火花を生じさせると、それに伴い超音波パルスが発生する。図4に超音波パルスの受信波形を示す。本発信器は機械振動系を用いていないため波形は超音波パルスが到達した瞬間をとらえるのに十分な鋭い立ち上がりを持ち、残留振動も少ない。またその音圧はロボットの位置・姿勢計測へ

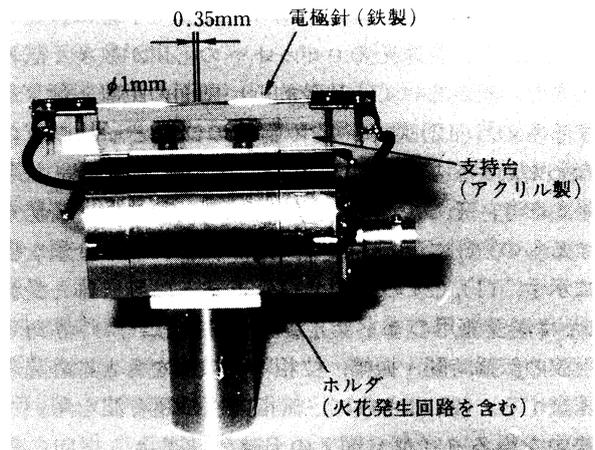


図3 発信器の構造

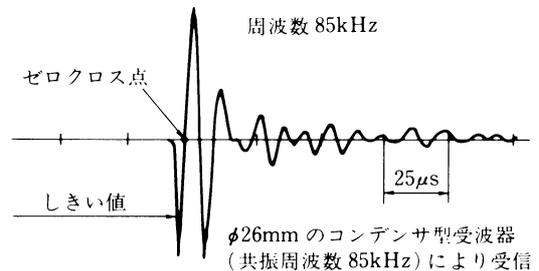


図4 電気火花による超音波の受信波形

の応用に必要な2~3m程度の距離測定に十分である。図5に本発信器の指向性を実験的に確認した結果を示す。これより本発信器はギャップの正面軸に対する角度θが±80°の範囲において音圧、距離測定精度の両面において無指向性近似できることがわかる。

以上のような特性を生かして、無指向性の発信器が必要とされる図1のB, Dタイプのシステムへの本発信器の今

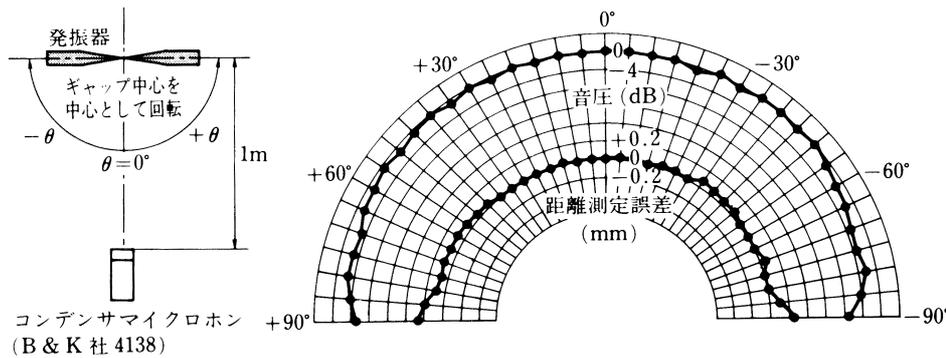


図5 火花放電を用いた発信器の指向特性

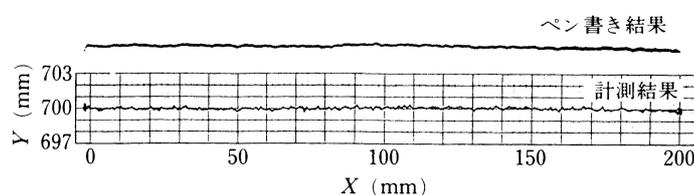
ギャップの正面で1m離れた場所での音圧は10 Paであり、これを基準値として0 dBとした。ギャップ中心を中心として発信器を±90°の範囲で5°おきに回転させ、約1m離れた場所での音圧、および距離をB & K社製4138型マイクロホンで測定した。すべてのデータは200回の測定における平均値である。

後の応用が期待される。また本発信器のギャップ長は0.35 mmと微小であり、シリコンプロセス等を用いたセンサのマイクロ化とは少々意見合いが異なるが、実用的な音圧が得られる空中用超音波発信器の究極の小形化であると言える。

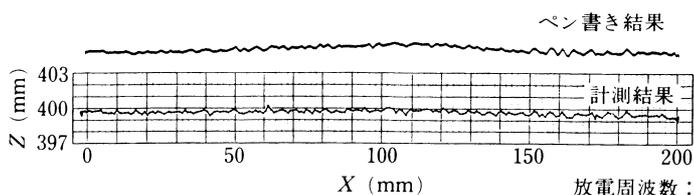
本来なら受波器も無指向性点近似できるものが望ましいが、このような受波器で市販されているものは次章で述べるように数少なく高価である。そこで本システムでは受波器として直径26 mmの通常の送受兼用コンデンサマイクロホンを用いた。受波器の指向性が半減角6°と鋭いため、受波器をサーボモータにより水平、鉛直方向に回転可能にし、発信器に対し受波面が常に正面を向くようにしている。

2.4 ロボットアーム先端位置の計測例

6自由度多関節型ロボット(PUMA 560)に直線軌道を描かせ、その動的位置を本システムで計測した例を図6に示す。またペン書きにより得られた軌跡も図中にあわせて示す。これより(1)ペン書き結果と計測結果は高い精度で



(a) Y座標変化図



(b) Z座標変化図

図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50 mm/s)

一致しており、本システムは従来ロボットの軌跡の測定手段として一般的に用いられているペン書き方式の代替手段として有望である、(2)ロボットが重力の影響を受けてZ方向にびびり振動を行う様子、機構の寸法誤差に起因して軌道の中央付近でZ座標が1 mm近く目標軌道から逸脱する様子を本システムは正確に検出している等のことが判明した。

3. ロボット用超音波センサの小形・マイクロ化の展望

3.1 小形化による無指向性センサの可能性

将来的にマイクロロボットへの応用や、コウモリ等生物の超音波送受機能を模擬することを考えた場合、超音波センサをさらに小形化することは重要であると思われる。ここでは指向性の観点から超音波センサの小形化の意義を考えてみる。発信器の近似モデルとして半径aの円形ピストン音源を考え、波長をλとすると、指向の半減角θ<sub>1/2</sub>は次式で与えられる。

$$\theta_{1/2} = \sin^{-1} \frac{0.353\lambda}{a} \tag{2}$$

すなわち同じ波長λの音波を発生する音源においては半径aが小さいほど半減角は大きくなり、指向性が広がる。これは受波器にも当てはまる。図1で分類したB, Dタイプの研究では無指向性の発信器、受波器が必要とされ、発信器は前章で述べた火花放電を用いたものが将来的に援用できるとして、受波器に関しては半径の小さい無指向性受波器が望まれる。この観点から受波器の小形化は重要である。

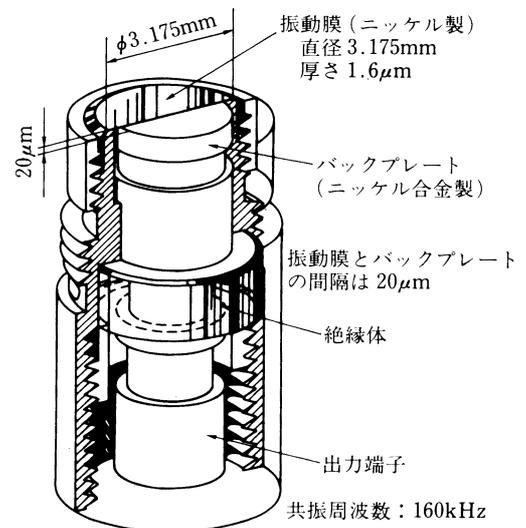


図7 無指向性近似可能な受波器(B & K社製4138)の構造<sup>9)</sup> 実際は保護グリッド(図は省略)を付けて使用する

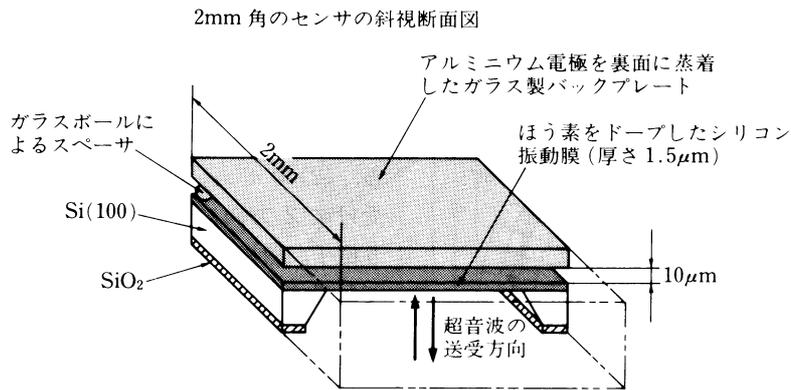


図8 シリコンプロセスによる超音波センサの一例<sup>10)</sup>

現在市販されている無指向性近似できる受波器として、B & K 社製の 4138 型コンデンサマイクロホンがあり、図 7 にその構造を示す<sup>9)</sup>。膜とバックプレートの間には 200 V のバイアス電圧が加えられており、膜の振動による容量変化により音波を検出する。周波数特性は 0~100 kHz 程度まで平坦であり、感度も 1.3 mV/Pa と実用的であるため超音波領域まで使用できる音圧校正用の標準マイクロホンとして広く使用されている。またデータシートによると 60 kHz の超音波に対してはほぼ無指向性が実現されている。しかしながら本受波器は構造が精巧・複雑なため、高価であるという欠点がある。このような状況を考慮すると、今後シリコンプロセス等により小形、無指向で低コストな超音波受波器が開発されることが望まれる。

### 3.2 超音波センサのマイクロ化に関する最近の研究

超音波センサに関してもシリコンプロセスを用いて製作されたものが報告されており、それらは主にコンデンサ型<sup>10)</sup>、圧電型<sup>11)</sup>、熱膨張型<sup>12)</sup>に分類される。図 8 にコンデンサ型センサの報告例を示す。異方性エッチングにより膜厚 1.5 μm のシリコンの薄膜を作り、ガラス製のボールを介してアルミニウムが蒸着されたガラス製のバックプレートを取り付けている。2 mm 角のセンサを作製して無指向性の受波特性を実現しているが、感度が先に述べた B & K 社の 4138 に比べてかなり低い。他の圧電型、熱膨張型のセンサの報告例でも同様に発信音圧、受信感度が低く、現状では 10 mm 程度の近距離測定用途にしか用いることはできないようである。音圧、感度を高めるためには、空気の音響インピーダンス（媒質の密度と音速の積）が固体に比べて小さいので、膜の振動振幅を大きくしなければいけない。このためには強度を保ちつつ膜をできるだけ薄くする必要があり、今後の製作プロセスの発展が望まれる。

シリコンプロセスによる超音波センサは膜と外枠を同一のシリコンで作製でき膜を機械的に固定する必要がないため、構造の簡略化、低コスト化、性能の均一化が期待できる。また同一基板上に多数のセンサを作ることができるのでアレイ型センサが製作しやすい。音圧等の発信機能に関しては筆者が開発した火花放電を用いたものが優れている

ことを考慮すると、シリコンプロセスによるセンサはこのような特長を生かして図 1 で分類した B, D タイプのシステムにおける受波器の用途に最も適しており、将来的にこの用途への応用が広がることが期待される。

## 4. ま と め

超音波センサを用いたロボット用計測システムを 4 つのタイプに分類し、このうち外部からロボット自体の絶対的な位置を計測するタイプの例として、筆者が開発した電気火花放電を発信器として用いる計測システムを紹介した。また超音波センサを小形化する意義について検討し、最近のシリコンプロセスによる研究についても簡単に紹介した。マイクロマシンの研究が進み機構が小さくなるとその振動は超音波領域になることが多く、それを検出する意味からも超音波センサの今後一層の小形・マイクロ化が望まれる。

## 謝 辞

第 3 章を書くにあたり参考文献を送付して頂き、ご討論頂いたオリンパス光学工業(株)の宮島博志氏に深く謝意を表します。また超音波センサの研究に関して日ごろよりご指導を賜っております金沢大学教授・岡部佐規一先生、同教授・神谷好承先生、東京大学教授・高野政晴先生、同助教授・佐々木健先生に深く謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 例えば、中嶋新一、高橋禎一：分布型受波器をもつ姿勢計測用超音波センサ、日本ロボット学会誌、6, 1 (1988) 52.
- 2) 例えば、N. Takanashi, K. Higuchi, T. Horiguchi, H. Fukuchi and H. Tanigawa: A Robotic Ultrasonic Imaging System Using a Si Phased-array Receiver, Proc. 20th Int. Symp. Industrial Robots, (1990) 173.
- 3) 佐々木 健、小野勝久、高野政晴：ロボットのための高精度超音波センサの開発研究、精密機械、51, 6 (1985) 1238.
- 4) 例えば、S. Kuroda, A. Jitsumori and T. Inari: Ultrasonic Imaging System for Robot Using Electronic Scanning Method, Proc. 1983 Int. Conf. Advanced Robotics, (1983) 187.
- 5) Y. Kanayama, S. Yuta and Y. Kubotera: A Sonic Finding Module for Mobile Robots, Proc. 14th Int. Symp. Industrial Robots, (1984) 653.
- 6) 馬 樹元、下河辺 明：超音波による 3 次元座標測定、精密工学会誌、54, 12 (1988) 2359.
- 7) 青柳誠司、神谷好承、岡部佐規一、佐々木 健、高野政晴：超音波によるロボットの 3 次元位置・姿勢計測、精密工学会誌、61, 7 (1995) 964.
- 8) GP-8-3D Sonic Digitizer Operator's Manual, Science Accessories Corp., (1985) 1.
- 9) Condenser Microphones Data Handbook, Brüel & Kjær, Nærum, Denmark, (1982) 1.
- 10) K. Inoue, Y. Suzuki and S. Ogawa: Fabrication of Ultrasonic Sensor Using Silicon Membrane, Proc. 8th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, (1995) 616.
- 11) A. Lal and R. White: Micro-Fabricated Acoustic and Ultrasonic Source/Receiver, Proc. 7th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, (1994) 712.
- 12) M. Hornung, O. Brand and H. Baltes: Optimization of Micromachined Ultrasound Transducer by Finite Element Simulation, Proc. 8th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, (1995) 620.