

MEMS 技術を応用した新規センサと 高機能センシングシステムの開発

Development of Advanced Sensors by MEMS Technology and New Sensing Systems

井上 幸二* 田中 恒久* 村上 修一*
Koji Inoue Tsunehisa Tanaka Shuichi Murakami

宇野 真由美*
Mayumi Uno

(2006年6月2日 受理)

キーワード: MEMS 技術, マイクロデバイス, 赤外線センサ, 誘電ポロメータ, 超音波センサ, 圧電体,
自律移動ロボット, 障害物認識

1. はじめに

近年, 半導体微細加工技術から発展した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) 技術に大きな関心が集まっている。それは, MEMS 技術により作製されるセンサなどのデバイスが低コスト, 小型, 高機能, 低消費電力などの特徴を持つからである。現在では, MEMS 技術は電気・電子・機械分野などにとどまらず, ナノテクノロジーやバイオテクノロジーとも結合し, 化学・医学分野などの種々の領域においても活発に研究されている^{1,2)}。当研究所においても, この MEMS 技術が今後の産業界における基盤技術の一つになるととらえ, 平成 13 年度よりマイクロデバイス開発支援センターを研究所内に設置し, 微細加工関連の装置の貸与や依頼加工, 受託研究などを通して, 企業における MEMS 技術によるデバイス開発を支援している。また, 種々の研究プロジェクトに参加し, 超音波マイクロアレイセンサや赤外線センサなどの開発を行っている。

本報告ではまず, MEMS 技術をデバイス開発に応用する利点と, デバイス開発時に求められる技術について述べる。次に本研究所で行ってきた超音波マイクロ

アレイセンサと誘電ポロメータ型赤外線センサの開発の事例について述べる。さらに, 超音波マイクロアレイセンサの自律移動ロボットへの応用について述べる。これらの開発事例を通して MEMS 技術の一端に触れていただき, 今後この分野に展開していくための参考としていただきたい。

2. MEMS 技術の利点と必要な技術

(1) MEMS 技術の利点

(A) 低コスト化

MEMS 技術をデバイス作製に応用する利点は, 低コスト化と様々な高機能化の 2 点をあげることができる。シリコン基板上などに同時に多数のチップを作製可能であるので, 従来技術で作製されたものに比べて単価が大きく下がる可能性がある。さらに, MEMS のプロセスと集積回路作製プロセスを組み合わせることができれば, MEMS デバイスと同一チップ上にアンプなどの信号処理回路を作製することができ, トータルのコストをさらに下げることができる。しかしながら, 成熟していない MEMS プロセスを使用した場合には歩留まりが低くなったり, また特殊なパッケージ(真空封入)などを必要とする場合などはかえってコスト高になる場合もあるので, 導入にあたっては注意が必要である。

* 情報電子部 電子・光材料系

(B) 小型化による高機能化

MEMS 技術を用いるもう一つの利点は、小さな構造体を作ることによる高機能化及び高感度化である。まず、デバイスの小型化そのものが高機能化といえる場合が多い。従来技術のセンサなどに比べて小さく軽くなるため、わずかな実装面積でデバイスを装着できる。そのため、これまで無かったデバイスの使い方が可能となる。加速度センサを内蔵した家庭用ゲーム機のコントローラや腕時計型の血圧計などはその一例である。次に、小さな3次元構造体であることを利用して高機能化と高感度化が可能になることがあげられる。例えば MEMS 技術により、数十 μm から数百 μm の大きさで厚み 1 μm 程度の薄い膜を、その周辺部や梁のようなもので支える構造を作ることができる。このような空中に浮いたような構造では、熱的な絶縁性が高く、かつ熱容量も非常に小さい。従って、わずかな熱量により容易に膜部のみの温度が上昇する。この性質を用いて、膜上に微細なヒータを形成すれば、極めてわずかな電力で高温に発熱させることができる。図1は当研究所で試作したマイクロヒータの電子顕微鏡写真である。これは 10 mW で 300 $^{\circ}\text{C}$ 以上の高温になる低消費電力ヒータになっており、ガスセンサやガスの流量センサ用のマイクロヒータとして利用されている。

このような空中に保持された構造では、また、わずかな力により変形させることが可能となる。この点を活かすことにより高感度な力のセンサが作製可能であり、マイクロジャイロや加速度センサ、圧力センサなどが実用化されている。また、後述の超音波センサもこの利点を生かしたものである。

(2) 高機能デバイス開発に必要な技術

MEMS 技術は主として次のような技術から成り立っている^{3,4)}。

①微細加工技術

数ミクロン程度のパターンを作る技術

②薄膜形成技術

真空蒸着法やスパッタリング法、CVD 法など

③エッチング技術

部分的に薄膜や基板を除去して所望の構造を作る

④基板と他の基板を接合する技術

これらの技術はいずれも MEMS 技術には欠かせないものであり、所望のデバイスを作製するにはこれらの技術に習熟することが必要である。

上記の標準的な MEMS 技術以外にも、高機能デバイスの開発には多くの技術が求められる。特にセンサデバイスの場合には、力や振動、熱などの物理量を電気的な信号に変換するしくみが必要なので、例えば歪み

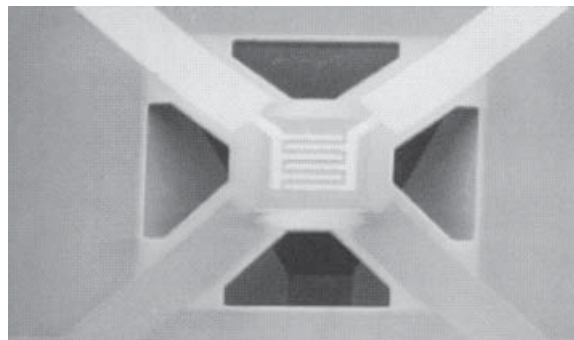


図1 マイクロブリッジを用いたヒータ

が加えられると電圧を発生する圧電体や、温度により物性が変化する感温性物質など、目的に応じた様々な機能性の物質が必要となる。従って、これらの物質を開発したり、薄膜化したりする技術も必要となる。

さらに、多くの高機能デバイスでは、単に電圧計などで電圧を計ればすむという単純なものではない。例えば、アレイ化された多数のデバイスを動作させるための複雑な駆動を必要としたり、微小な信号に対して複雑で高速な信号処理を行う場合がある。そのため、高精度・高速なアナログやデジタル回路の知識や、ハード・ソフトを含むシステム構築技術を求められる場合もある。

このように、MEMS 技術を用いて新規・高機能デバイスを開発するためには、MEMS 技術のみにとどまらず、機能性薄膜材料の開発技術や、素子駆動を含めた信号処理システム構築の技術などが要求されることが多い。

3. 誘電ポロメータ型赤外線センサ

(1) 誘電ポロメータ型赤外線センサの概要

赤外線センサは、廊下などでの人体検知や耳式体温計、人体などの物体の熱分布計測など、様々な分野で広く用いられている。赤外線を検出する原理は、赤外線の熱をセンサ部の温度上昇として捉える熱型と、赤外光による光電子効果を用いる量子型に分けられる⁵⁾。一般的に量子型は冷却すれば高感度であるが、室温では熱雑音が大きく、また感度に波長依存性を持つなど、使用にあたっては不便な点がある。そのため産業用には、熱型で非冷却の赤外線センサとそのアレイを用いた赤外線撮像用センサが広く求められている。

温度の変化を物性の変化として取り出し、それを電気信号に変換する場合、最もよく用いられるのは抵抗変化である。しかしながら、抵抗値の測定においては必ず電力を消費する。そこで当研究所では、温度の変化により誘電率が変化する誘電ポロメータ型の赤外線

センサに注目して開発を行ってきている^{6,7)}。これは、強誘電体のうち (Ba,Sr)TiO₃ (BST) や Ba(Ti,Sn)O₃ (BTS) などの膜において、その誘電率が温度に対して変化する現象を用いるものであり、高感度・非冷却・低消費電力などの特徴を持っている。図2に当研究所で作製したBST膜の比誘電率の温度変化を示す。この膜の場合、誘電率の温度変化率(TCD)は約-0.4%/Kである。

(2) センサの構造と作製プロセス

図3に作製した赤外線センサ1素子分の断面図を示す。シリコン基板を素子の周辺からエッチングして除去し、SiO₂/SiN/SiO₂膜の3層構造の厚み約700nmの薄い膜(メンブレンと呼ばれる)を四方から支える形で熱絶縁構造にしてある。SiNもSiO₂も、金属やシリコンに比べて熱伝導率が1桁から2桁小さいので、熱絶縁性が高くなる。また、SiO₂膜は成膜時の熱的なストレスのため、膜中に伸びようとする応力を持ち、逆にSiN膜は膜中に縮もうとする応力を持っている。そのため、単独の膜では膜の下部のシリコン基板を除去した場合、大きくたわんだり容易に破れたりするが、3層構造とすることで2種類の応力をバランスさせ、膜のたわみや破れを防いでいる。

メンブレン上にBST膜を形成しそのコンデンサ容量を計るため、BST膜の上部と下部に電極としてPt/Tiの積層膜を用いる。一般的に良好な特性を持つBST膜などの強誘電体膜を形成するためには、Pt膜上に成膜することが必要であるが、PtはSiO₂膜に対する付着強度が極めて小さい。そこでPt成膜前に、SiO₂膜に対する付着強度が大きいTiを薄く(約20nm)成膜し、SiO₂膜とPtの付着強度を上げている。BST膜は、MOD(Metal Organic Decomposition)法で製膜した。これは、BSTを有機溶剤に分散したものを塗布し、600℃から700℃で焼結することによりBST膜を成膜するものである。上部電極も同じくPt/Tiを成膜し、さらにその上に絶縁膜・保護膜としてSiO₂膜を成膜している。素子をSiO₂膜で保護することにより、メンブレン部を空中に浮かすためのシリコン基板のエッチング時のダメージから、BST膜を保護している。最後に赤外線吸収膜としてAu-black膜(金黒膜)を素子上部に成膜している。

上記のように、このセンサは全部で10層の膜から構成されている。従って薄膜作製は10回必要である。また各膜を所望の形状にパターンニングするため、微細加工が5回必要であるが、各膜のパターンニング法はそれぞれ異なっている。SiO₂膜やSiN膜のエッチングには、CF₄などのガスのプラズマによるドライエッチング、電極膜はリフトオフ法、BST膜のエッチングには弗酸と硝酸の混合液によるウェットエッチング、シリ

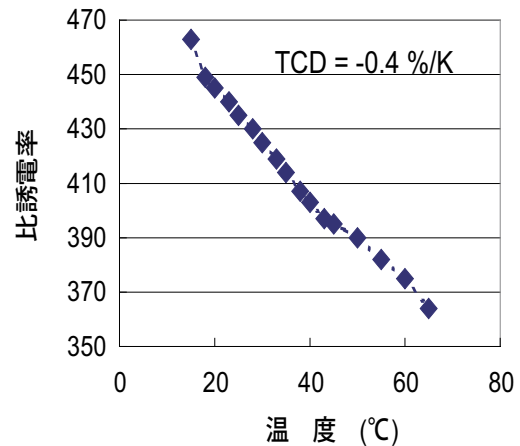


図2 BST膜の比誘電率の温度依存性

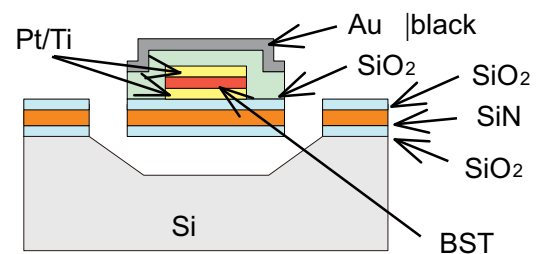


図3 試作赤外線センサの断面図

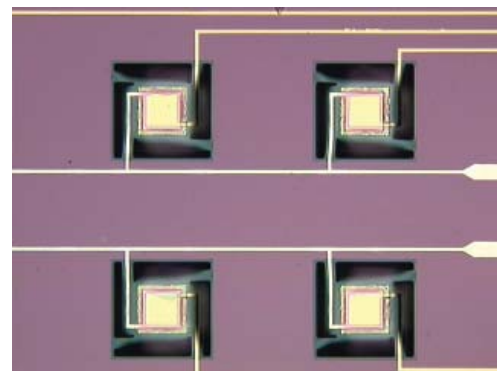


図4 試作した赤外線センサアレイ

コン基板のエッチングには強アルカリであるTMAH(水酸化テトラメチルアンモニウム)水溶液を用いている。このように多くのプロセスを経るため、デバイスの設計開始から完成まで、約2ヶ月の期間が必要になる。デバイスを作製するためだけでなく、所望のデバイスを設計するためにも、これらのすべてのプロセスに習熟していることが必要である。

図4にAu-black成膜前の素子の写真を示す。4×4のアレイの一部である。素子1つのメンブレンサイズは200μm角、強誘電体の電極サイズは100μm角である。また、素子間隔は500μm、配線の幅は10μmである。

(3) 試作センサの特性

図5に、センサの赤外線応答特性の例を示す。これは赤外線源として2 cm × 3 cmの窓を持つ黒体炉を用い、約30 cm離れたところにセンサを置いた場合の出力電圧である。また、センサの出力はコンデンサの容量の変化として現れるので、このコンデンサに周波数1 kHzで振幅3 Vの正弦波を印加し、容量の変化によって現れる電圧の変化をセンサ出力としている。黒体炉の温度の上昇とともにセンサ出力は増大する。また、一般的に用いられるセンサの感度指標である比検出能 D^* は、 $7 \times 10^6 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ が得られている。商品化されている単画素のサーモパイルの比検出能の $4.7 \times 10^7 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ に比べれば低いものの、人体の温度に対応する35 °Cでも約30 μV の出力を有しており、十分人体検知が可能である。実際に焦点距離50 mm, $f/0.7$ の赤外線用ゲルマニウムレンズを用いて、4 m離れた人体の赤外線を検知できている。本素子では、誘電率の温度変化率が0.4%の膜を用いているが、今後さらに大きな温度変化率(1%以上)を持つ膜の実用化を行い、さらに高感度化につなげていく予定である。

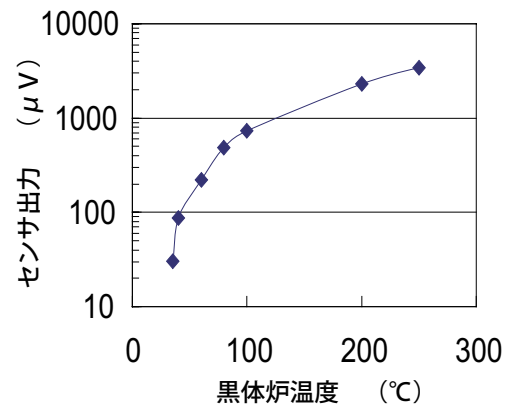


図5 赤外線センサの出力特性

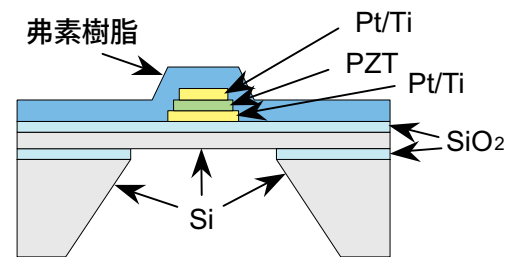


図6 超音波センサ断面図(1素子)

4. 超音波マイクロアレイセンサ

(1) 超音波センサの特徴

空気中の超音波は、人間の耳には聞こえず、安全で、かつまわりの明るさに影響されないため、様々な分野の計測・物体検知に使用されている。自動車のバックソナーやお掃除ロボットの障害物検知センサはその一例である。これらは超音波を発信し、物体からの反射波が帰ってくるまでの時間を計測することにより物体までの距離を計測するものである。しかしながら、センサの素子が1つであるため、検出可能範囲のどちらの方向に物体があるかは検出できない。また、反射物体が複数ある場合もそれを分離することができない。この問題を解決するために、当研究所ではMEMS技術を用い、シリコン基板上に複数の超音波センサを並べた超音波マイクロアレイセンサの開発を行っている。このセンサを用いることにより、後に述べるように物体までの距離と方向を同時に計測することが可能である。また複数の物体を同時に検知でき、3次元の超音波立体画像を得ることができる。本章では超音波マイクロアレイセンサの構造や作製プロセスについて述べる^{8,9)}。

(2) センサの構造と作製プロセス

図6に、超音波センサの1素子分の断面図を示す。シリコン基板の裏面からシリコンをエッチングにより

除去し、表面に薄いシリコンとSiO₂の膜(メンブレン)を残してある。この膜は超音波が照射されると、鼓膜のように容易に振動する。さらに膜の中央部に、圧電体であるPZT膜をPt/Ti電極で挟んで形成している。圧電体はひずみなどの圧力が印加されると電圧を発生する性質を持っているので、膜の振動によるひずみに対応した電圧出力を得ることができる。

実際のセンサ基板は、SOI (Silicon On Insulator)を用いている。これは、通常のシリコン基板の上に、厚み1 μm のSiO₂膜を介してシリコン膜(厚み1.5 μm)を接着したものである。SOI基板を用いるのは、裏面からのエッチング時に、間にあるSiO₂膜でエッチングがほぼ止まるため、薄いシリコン膜を容易に残すことができるためである。シリコン膜上に絶縁のためもう一度SiO₂膜を形成し、その上にPZTの電極としてPt/Ti膜を形成してある。Ptの成膜前にTiを成膜しているのは、前述の赤外線センサと同じく、SiO₂膜との密着性を高くするためである。PZT膜は、有機溶剤にPZTを分散させた溶液を塗布し、焼結して成膜している。Pt上にPZT膜を作製するのは、結晶性がよく圧電性のよい膜を得るためである。上部電極として再度Pt/Tiを成膜後、最後にフ素樹脂膜を形成する。このフ素樹脂は、素子全体を保護するとともに、超音波入射による膜の振動時に不要な振動成分を抑える役割があるので⁹⁾、後に示すようにセンサ出力信号は、ほぼ単一の周波数成分

のみとなる。

シリコンと SiO₂ 膜からなるメンブレン部の厚みは約 2 μm, PZT と Pt/Ti 電極をあわせた部分の厚みは約 1.5 μm, 弗素樹脂の厚みは約 5 μm である。このため、センサの最も厚い部分の厚みは約 8.5 μm になる。このセンサの作製プロセスでは、成膜、微細パターン形成、エッチングをいずれも 5 回ずつ行う。

図 7 にセンサ 1 素子の写真を示す。クローバーのようにたわんで見える部分が裏面からシリコンを除去した部分（メンブレン）である。メンブレン部は 1.4 mm 角である。また、中心にある正方形部が Pt/Ti 電極により上下を挟んだ PZT 膜部で、200 μm 角の大きさである。メンブレン部がクローバーのようにたわんでいるのは、電極を 1 方向に取り出しているため、膜内の応力が非対称になるためである。

(3) 試作センサの特性

図 8 に音圧 3Pa のインパルス性超音波に対するセンサの出力波形を示す。きれいな減衰波形となっており、感度は 114 μV/Pa が得られている。この感度は、3 m 先の人体による超音波の反射を計測することが可能な値である。また、共振周波数は約 58.2 kHz である。弗素樹脂を上部に形成しない場合は、図 9 に示すように出力波形がビートを起こしており、単一の振動ではなく、複数の振動周波数を含むことがわかる。

超音波 3 次元画像を得るために、図 7 のセンサを基板上に縦横に 5 × 5 個並べたものを作成した。図 10 にチップの写真を示す。チップ全体の大きさは 18 mm 角で、周囲に信号を取り出すためのパッドを配してある。センサ素子の配置のピッチは 2.8 mm である。1 チップ上に 25 個の素子があるが、弗素樹脂を上部に形成することにより、作製プロセス中の様々なダメージからセンサを保護しているため、メンブレンの破壊や電極配線の断線などが殆ど無く、歩留まりが向上する。また、共振周波数のばらつきを示す標準偏差は、弗素樹脂がある場合は 1.3 kHz であるが、弗素樹脂を用いない場合は 5.2 kHz と大きくなる。共振周波数のばらつきが大きい場合は、超音波反射物体の方向を計測する場合の誤差要因となるので、この点でも弗素樹脂の形成が欠かせない。

このような大きさと超音波センサをアレイ状に並べ、かつ感度や共振周波数を揃えたものは他に開発例がなく、このチップの開発により、次章に示す小型の自律移動ロボットの障害物認識システムの開発が可能となった。このような高機能チップの開発は、MEMS 技術の他、機能性薄膜や保護膜等の薄膜化技術などを適切に組み合わせることにより可能となっている。

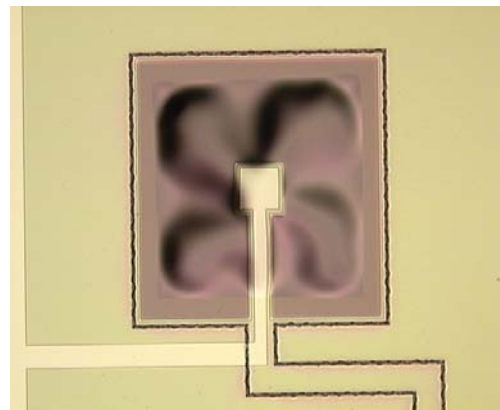


図 7 超音波センサ 1 素子の写真

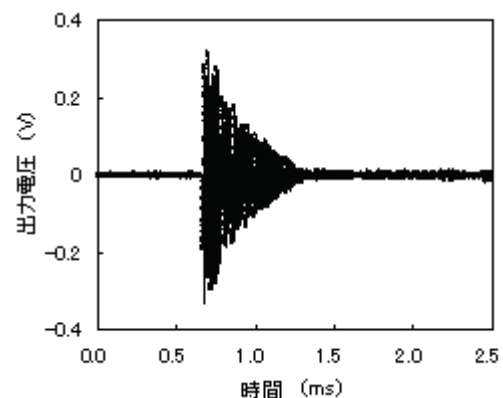


図 8 超音波センサの出力波形

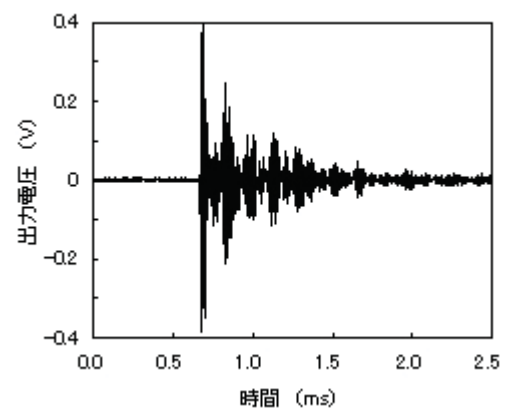


図 9 フッ素系樹脂の無いセンサの出力波形

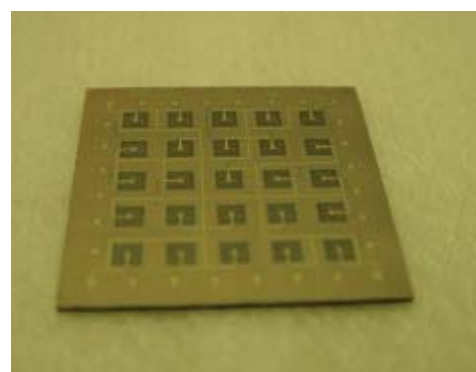


図 10 超音波マイクロアレイセンサチップ

5. 自律移動ロボットの開発

(1) 超音波による障害物認識の原理

超音波が物体により反射され、図 10 のチップに入射する場合を考える。超音波の反射体がチップの正面にある場合は、すべてのセンサに同時に反射波が到達するが、反射体が斜めの方向にある場合は、各素子に到着する時間が少しずつ異なる。そこで、この時間の差を計測することにより、反射体の方向を知ることができる。また、超音波を発信してから反射波が帰ってくるまでの時間を計測することにより、反射体までの距離を知ることができる。従って、このチップと超音波源、および時間を計測するシステムを組み合わせることにより、物体までの距離と方向を知るレーダのようなシステムを構築することができる。また、このシステムをロボットに搭載することにより、自動的に物体を避けて動く自律移動ロボットを作製することができる。

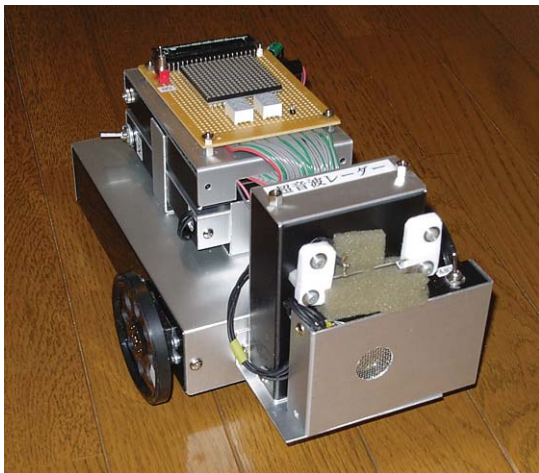


図 11 試作自律移動ロボット

反射体が遠い場合や反射率が低い場合は、反射超音波が弱いので各素子からの信号が小さく、雑音が多く含まれる。そのため、各素子に反射波が到達した時間を正しく求めることが難しい。そこで、各素子からの信号を時間をずらせて足し合わせる遅延加算と呼ばれる方法を用いて、等価的に時間差を検出する。この方法はフェイズドアレイ型のレーダの基本となっており、センサの指向性を電子的に変化させるものである¹⁰⁾。

(2) 試作ロボットの概要

図 11 に試作した自律移動ロボットの外観を示す。ロボット全体の大きさは長さ約 25 cm、幅約 15 cm、高さ約 15 cm である。ロボットの前部にセンサと音源を配置している。音源には火花放電を用いている。この火花放電は、数 mm 離して対向した針の間に 1000 V 以上の高電圧を印加し、火花を発生させるもので、火花の発生時にインパルス性で無指向の超音波が発生する。火花の発生周期は約 150 ms で、1 秒間に 7 回超音波が発生するが、ロボットの速さが秒速 20 cm 程度なので、十分な早さで障害物を検知できる。

実際の計測システムでは、遅延加算などの信号処理はすべてデジタル化して行うため、AD コンバータを用いる。センサからの信号の大きさが数十 μV ~ 数百 μV の大きさであるため、まず 5000 倍程度の増幅器を用いて振幅 1 V 程度の信号に増幅し、AD コンバータに入力している。超音波が斜め 10 度から入射した場合を考えると、隣り合う素子の距離が先述のように 2.8 mm であり、また音波の速度が 340 m/s であるので、チップ上の隣り合う素子に入射する時間の差は約 1.4 μs となる。そこで、超音波の入射角を 10 度以下の精度で捉えるため、AD コンバータによる信号のサンプリング周期を 1 μs としている。

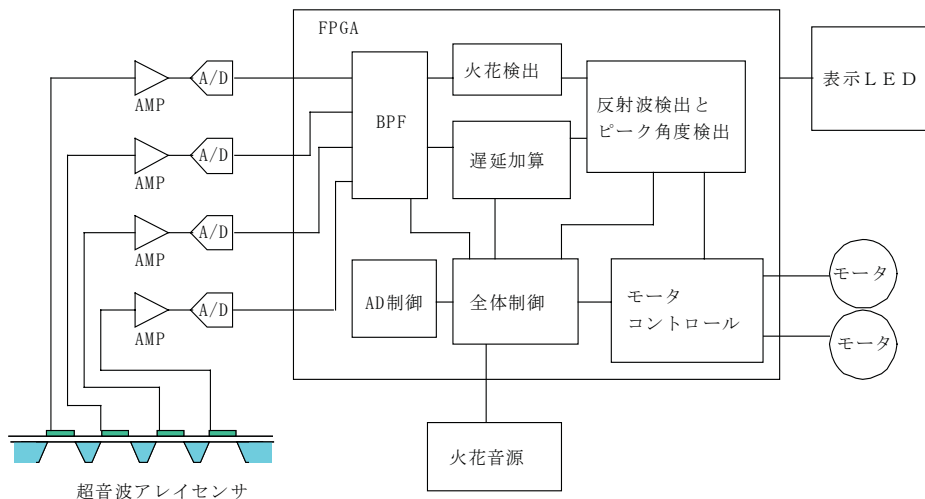


図 12 自律移動ロボットの計測システムのブロック図

遅延加算などの信号処理はFPGA (Field Programmable Gate Array) と呼ばれるデジタル信号処理用の集積回路を用いて行う。このFPGAは5万ゲート級(トランジスタ数にして20万個程度)のものを用いており、システムの中核をなしている。FPGAは、図12に示すようにADコンバータの制御、信号のノイズ低減のためのデジタルバンドパスフィルタ処理(BPF)、遅延加算処理、物体の方向と距離の検知、モータのコントロール、LEDへの状態表示などを行う¹¹⁾。

図13に本ロボットが、段ボールの壁で囲まれた障害物の置かれた中を動作している様子を示す。このような狭い中でも数分にわたって障害物と壁を避けて動き回ることが可能である。本ロボットは、1 m先の直径5 cm程度の物体を検知でき、30 cm以内の進行方向に物体があれば回避動作を行う。また、急に至近距離に物体が現れた場合などは後退したり、回避できない場合は方向転換を行ったりできる。このような小さなシステムで障害物を回避できるものはこれまでなく、非常に新規性の高いシステムが実現されている。

本システムの開発には、微小な信号を低ノイズで増幅する回路を設計・試作するアナログ回路の知識、デジタル回路で種々の演算を行う信号処理の知識やハードウェアの知識、さらにはパソコンを用いてデジタル回路をプログラミングするハードウェア設計言語の知識など、様々なシステム構築技術が要求される。今後、MEMS技術を用いて新規・高機能なデバイスを開発する際には、このような信号処理システムの技術も必ず要求されるものと考えられる。

6. おわりに

MEMS技術と機能性薄膜作製技術、及び信号処理システムを組み合わせることにより、新規高性能デバイスとその応用システムを開発できる。ここでは、当研究所でこれまで開発を行ってきた誘電ポロメータ型赤外線センサ、超音波マイクロアレイセンサ、及び自律移動ロボットについて述べた。今後、これらの技術を用いた種々の新規高機能デバイスの開発がますます盛んになっていくと考えられる、しかしながら、これらの非常に広い分野にわたる技術を企業がすべて自社内で開発し、またそのための設備や施設(クリーンルー



図13 自律移動ロボットの動作の様子

ムなど)を保有することは容易なことではない。そこで当研究所では、前述のように平成13年度よりマイクロデバイス開発支援センターを設置し、MEMS技術の他、機能性薄膜作製技術や信号処理システム構築技術を含む総合的なマイクロデバイス開発の支援を行っている。今後新たにマイクロデバイスの開発を考慮される企業の方や、現にマイクロデバイスの開発に従事しておられる方々に是非御利用いただきたいと考えている。

参考文献

- 1) 江刺正喜: マイクロマシン, (株)産業技術サービスセンター(2002) p.462
- 2) 藤田博之: マイクロ・ナノマシン技術入門, 工業調査会(2003) p.114
- 3) 前田龍太郎, 池原 毅, 小林 健, 単 学伝: MEMSのはなし, 日刊工業新聞社(2005) p.7
- 4) 江刺正喜: マイクロマシン, (株)産業技術サービスセンター(2002) p.22
- 5) 高橋 清: センサの辞典, 朝倉書店(1991) p.12
- 6) S. Murakami, k. Satoh, k. Inoue: Transaction of the Materials Research Society of Japan, **29** (2004) p.1101
- 7) S. Murakami, D. Popovici, K. Satoh, M. Matusmoto, M. Noda and M. Okuyama: Sensors and Materials, **16** (2004) p.231
- 8) 田中李 昇穆, 井上幸二, 青柳誠司, 山下 馨, 奥山雅則: 電気学会センサ・マイクロマシン準部門総合研究会フィジカルセンサ研究会予稿集, (2006) p.59
- 9) S. Lee, T. Tanaka, K. Inoue and M. Okuyama: Japanese Journal of Applied Physics, **43** (2004) L1534
- 10) 大阪府先導的研究事業 スーパーアイ. イメージセンサ研究プロジェクト 研究報告書, (財)大阪府研究開発型企業振興財団(2001) p.2
- 11) 井上幸二: 平成17年度大阪府立産業技術総合研究所研究報告会要旨集, (2005) p.25