



…平成12年度助成研究より…

運転者アシストシステム用 無走査型超音波センサの開発

東北大学大学院 工学研究科 機械電子工学専攻
教授 博士(工学)

江村 超

1. はじめに

著者の子供時代は、現在のように勉強優先の時代と違って、のびのびと自由に過ごすことができた。そのため、幼少の頃は模型のゴム動力式飛行機や電気機関車等の製作に熱中する日々を送った。ある時(多分、小学校2~3年生の頃)、父がラジオの修理をしているのを見て、模型少年が、突然、ラジオ少年に変身した。当時は、並三、並四、五球スーパーなどの愛称で親しまれた管球式ラジオの全盛時代だったが、回路が簡単なため、小学生の私にも作動原理が理解でき、好奇心も手伝って、ラジオいじりに夢中になった。

ラジオの製作ができるということで、近所から電気製品の修理を頼まれることが多く、テスターを頼りに故障部位を探すうちに、論理的な思考能力とエンジニアとしての勘のようなものが独りでに育った。修理の依頼を受けたものの中には、電蓄(電気蓄音機の略称)もあり、アンプにフィードバック回路を有しているものが多く、必要に迫られ独学でフィードバック回路の勉強をした。

フィードバック回路の勉強には、三角関数や対数の知識が必要不可欠で、小学校を卒業する頃には、計算尺を片手にフィードバックアンプの簡単な設計ができるようになっていた。これが幸いして、数学が得意科目の一つとなり、以後、数学に苦勞することはなかった。また、電気製品の故障部位を探す過程で育った論理的な

思考能力のおかげで、物理にも苦勞することはなかった。さらに、電蓄の修理を通して、いつの間にか音の世界にのめり込み、現在も研究上や日常生活(オーディオが趣味)において、音と切り離せない日々を送っている。

大学は音響関係の勉強をしたくて東北大学工学部に入学したが、入学した1960年頃にロシア(旧ソビエト連邦)が宇宙ロケットを打ち上げたため、気が変わって、学部4年生から博士課程を修了するまでの6年間を推進エンジン関係の研究に打ち込んだ。

博士課程を修了した後、2年ほど他大学の熱機関関係の研究室にいたが、母校の機構学担当の教授から声がかかり、1971年に東北大学に戻った。研究は何をしてもよいとのことで、以前から興味を持っていた2脚ロボットの研究に着手した。当時の2脚ロボットは何れも重心を低くすることにより安定性を確保していたため、足が極端に重くなっており、慣性が大きくて脚を速く動かすことが出来ず、歩行周期が30秒以上に及ぶものも見受けられた。

そこで、脚を可能な限り軽くし歩行速度を速くすることにした。しかし、脚を軽くすると、必然的にロボットの重心が高くなって転倒しやすくなるため、安定な歩行を行わせるのに四苦八苦したが、子供の頃に勉強したフィードバック回路の知識とラジオいじりの経験が幸いして、制御回路の試作が短時間で行えたため、研究が急ピッチで進んだ。この重心の高い2脚ロボットを安定に歩かせることが出来たのは1973年の

ことであり、これが、最近マスコミ等で頻繁に取り上げられている動歩行型2脚ロボットの世界初の成功となったのである。

歩行ロボット関係研究の国際交流のため、1989年に約半年間ほどアメリカのコロンバスにあるオハイオ州立大学に滞在したが、このときコロンバスに近いピッツバーグにあるカーネギメロン大学を訪問する機会を得た。カーネギメロン大学では、脚の長さが6mもある巨大な6脚ロボットが動いており研究のスケールの大きさに驚いたが、最も驚いたのは、学内道路で走行実験を行っている最中のNavlabと名付けられた自動操縦自動車であった。このNavlabは、スキャンレーザレンジファインダと呼ばれるセンサを用いて、レーザ光線を照射し、照射した光線が障害物で反射されてセンサに戻ってくるまでの僅かな時間間隔から障害物までの距離や障害物の方向を判定するとともに、人間の目の役割をするCCDカメラから得られた画像情報を解析して自律走行する高度に知能化された自動操縦自動車であった。

国際会議の発表等からこのNavlabの存在は知っていたが、実際に自動操縦で走っているのを見たのは初めてであり、草分け的なスケールの大きな先端的研究を行っている研究者等の開拓者精神に深く共鳴した。

当研究室の1989年当時の2脚ロボットは、世界でも最も進んだもので、文部省から支給される僅かな研究費では、それ以上の高性能なロボットの試作が行えず、また、企業も実用化が10

年先になるような開発研究には投資しないため、研究の進展に伸び悩んでいた。

参考のため申し上げると、当研究室がこの30年間に2脚ロボットの試作に使用できた予算の累積額は高々2千万円程度に過ぎない。最近、自動車メーカーが2脚ロボットを開発したことでマスコミ等を賑わしているH社と比較すると、2脚ロボットの研究を始めてからこの15年間に試作に用いた予算は約100億円とのことなので、当研究室の年間予算はH社の約1/1,000となる。それ故、このような比較にならない極めて少ない年間予算で如何にハイレベルの開発を行っていたかがご理解いただけると思う。

このような時にNavlabを目の当たりにしたのだが、手作りであれば、著者の研究室の研究予算でも十分に試作可能であると判断し、帰国後、直ちに自動操縦自動車の試作を行った。最初は、廊下を自律走行する小型の実験車から始め、何台もの試作を経て、現在は、車長5,250mmのワンボックスカーに、センサ類やコンピュータ、エンジン発電機等の必要機材を搭載した手作りの自動操縦自動車を試作し、実験に用いている。

今回、研究費の助成をいただいたのは、この自動操縦自動車の試作を繰り返す中で考案した運転者アシストシステム用超音波センサの開発に関するもので、子供の頃に明け暮れたラジオの製作と修理の経験やオーディオ機器を製作する際に独力で勉強した音響工学関係の知識、推進エンジンの研究中に身につけた計測機器の試作技術、ロボットの制御に必要な電子回路の知

識等を総合した結果として生まれた新しいアイデアが幾つか応用されている。

まえがきが大変長くなってしまったが、以下、表題の「運転者アシストシステム用無走査超音波センサの開発」について述べる。

2. 運転者アシストシステムの必要性

日本では、交通事故が年々増加し、交通事故によって身体的な傷害を被る不幸なケースが多発している。交通事故の原因は、運転者の不注意や未熟、危険予知能力の欠如等が大半であり、運転者に警告を発したり、より積極的には強制的に安全速度まで減速させてしまうような事故回避法が考えられる。

現在、自動操縦自動車の研究を通して世界で開発されている衝突回避の手法を応用すれば、交通事故の件数を激減できるのは明白であるが、一般の車両に応用するには、システムが大がかりで、またコスト的にも問題がある。そこで、小型安価なアシストシステムの開発を行った。

運転者アシストシステムで最も重要なのは、障害物等がどこに分布しているかを瞬時に知る環境認識センサの開発である。環境認識センサの代表的なものは、先に述べたスキャンニングレーザレンジファインダと CCD カメラであり、最近では 75GHz 帯のいわゆるミリ波を使った電波レーダも開発されている。このうち、スキャンニングレーザレンジファインダは、100m 以上の遠距離にある障害物を瞬時に検出できる利点は

あるが、大変高価なため、小型安価なものを当研究室で独自に開発し、自動操縦に用いている。

CCD カメラは、カメラ自体は安価だが、カメラから得られた画像情報を解析し、障害物までの距離と障害物のある方向、障害物の大きさ等を計算するコンピュータに高速処理の可能なものが必要で、信頼性の高い障害物情報を得るには、大きさや価格の面で、実用化はもう少し先になる。レーザ光線やカメラを用いる方法は、濃霧や豪雨の時に機能なくなってしまうために、ミリ波レーダが開発されているが、未だ開発段階にあり、極めて高価である上に、現時点では、入手すらできない。

以上のことから、当研究室で使用実績の多い超音波を応用した環境認識センサを開発することにした。超音波は、波長が長いので、濃霧や豪雨のときにも使用可能である特徴を有している。

3. 超音波を応用した環境認識センサ

超音波を用いた障害物センサは、古くから用いられているが、どのメーカーの製品も、検出距離が遠くても 2~3 m 程度と短い上に、空気中における音の伝搬速度が約 340m/s と遅く、走査法を用いたのでは、障害物の検出時間が長くなって実用にならない。なぜなら、高速走行時においては、スキャンニングしている間に車両が障害物に衝突してしまうことが起きるからである。

そこで、検出距離の拡大と検出時間の短縮を重要課題として、開発に取り組んだ。

4. 検出距離の拡大

検出距離を長くするには、障害物で反射される超音波の音圧を高め、マイクロホンに誘起される受信波の信号レベルを高める必要がある。ところが、普通に用いられている圧電素子型のトランスミッターでは音響パワーが小さ過ぎて実用にならないため、オーディオ用のツイータを用いて送信音圧を高めるとともに、放物面鏡で反射させ超音波をビーム状に収束するようにした。同様に、收音マイクと同じ原理で、放物面鏡で收音することにより、マイクロホンに誘起される信号のレベルを上げ、S/Nの向上を図った。

5. パーストノイズの低減

超音波センサでは、パースト幅が1~5 ms、送信周期が50~500ms程度のパースト波を送信するのが普通である。このように、送信周期に比べてパースト幅が1/10以下と短いため、ツイータのボイスコイルに定格入力10倍程度の大電流を流してもコイルが焼損することはない。ただし、余り入力パワーを上げると、出力音圧が飽和してしまい、大きな入力を与えることが無意味となるので、ツイータへの入力パワーとツイータからの出力音圧の関係を調べ、飽和す

る手前で使用する必要がある。

実測の結果、用いたツイータの飽和入力は、18kHzにおいて、約300Wであることが分かったため、余裕をみて最大入力を250Wに定めた。ところが、ツイータへの入力パワーを250Wに高めたところ、18kHzという可聴域外の周波数を使用しているにもかかわらず、パースト時に聞くに耐えない不快な大きな騒音（以下、パーストノイズという）を発生するようになってしまった。そこで、騒音低減の研究に取り組むことにした。

最初に、何故パーストノイズが発生するのかを考えたところ、子供の頃に熱中したラジオいじりの知識から、パースト波を生成する過程は、一種のAM変調を行う過程と同じであり、変調波が矩形波のため、矩形波にバンド幅の広い周波数成分が含まれており、このバンド幅の広い周波数成分が側帯波を生じ可聴域騒音を発生させる原因となっていることに気付いた。

図1は、このことを説明したものであり、キャリアすなわち送信すべき超音波の周波数を f_c とし、AM変調に用いる矩形波に含まれる周波数成分の上限周波数を f_b とすると、パースト波、すなわち送信波に含まれる周波数成分は、 $f_c - f_b$ から $f_c + f_b$ の広い範囲に分布する。それ故、いま $f_b =$

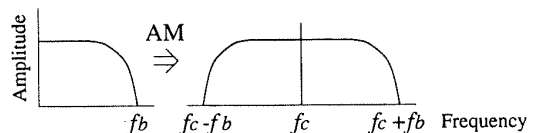


図1 可聴域騒音の発生メカニズム

5 kHz と仮定すると、キャリアの周波数 $f_c=18$ kHz の時は、ツイータから放射される音波の周波数は13kHz~23kHzの広い範囲に分布し、13kHz付近の音波が可聴域に入り込むことから、騒音源になってしまう訳である。

バーストノイズの発生メカニズムは、直ぐに分かったが、問題は、このバーストノイズをどのようにして低減するかである。最初に考えたのは、バースト波をハイパスフィルタに通し、不要な可聴域成分を除去した後、ツイータを駆動する方法である。しかし、この方法は、極めて遮断特性の急峻なハイカットフィルタを必要とするため、回路の製作コストが高くなってし

まう。そこで、図2のように、ローパスフィルタを用いて矩形波に含まれる周波数成分の上限周波数 f_b を低くし、 f_c-f_b が可聴域に入り込まないようにする方法を考え、図3に示す計算機シミュレーションを行った。

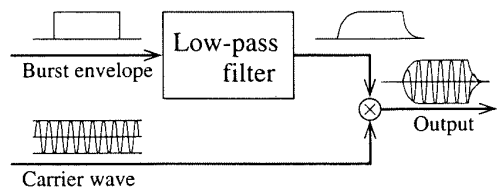
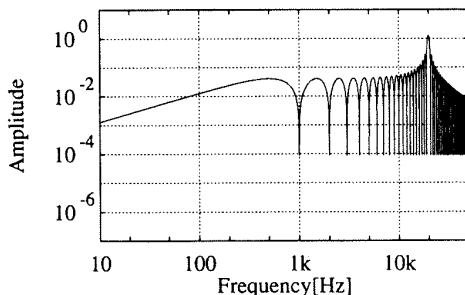
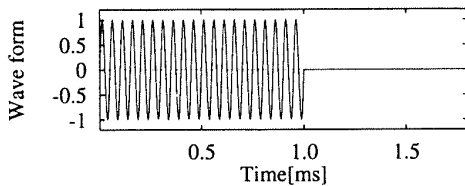
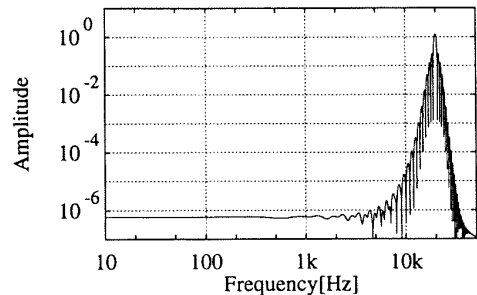
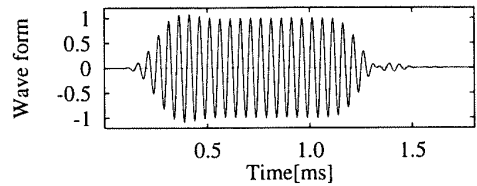


図2 無騒音バースト波発信器のブロックダイヤグラム



(a)矩形波による変調



(b)ローパスフィルタを併用した変調

図3 バースト波のエンベロープ波形とスペクトラムの関係

図3においては、上段に変調後のパースト波の波形、下段にパースト波に含まれる周波数成分の大きさを示しているが、図(a)は、矩形波でAM変調をかけた場合であり、可聴域にも大きな周波数成分が入り込んでいるのが分かる。図(b)は、矩形波を遮断周波数が1 kHzの8次のローパスフィルタを通して得た信号でAM変調をかけた場合で、可聴域成分を十分に小さくできることが分かる。実際に図(b)の方法を用いてツイータから放射されるパーストノイズを調べたところ、ツイータへの入力が250Wの大パワーにおいても、可聴域の騒音がほとんど発生しないことが分かった。

6. 障害物検出時間の短縮

パーストノイズを実用上十分小さくできたので、次に障害物の検出時間の短縮に取り組んだ。既に述べたように、音の空気中の伝搬速度は約340m/s程度と光に比べて極めて遅いので、スキャンングレーザレンジファインダで用いられているような走査法は用いることができない。何故なら、仮に34m先の障害物を検出しようとする、1点につき0.2sかかり、車速100km/hr(≒27.8m/s)のときは、0.2sの間に車は約5.56mも進むので、走査法により障害物の方向を検出していたのでは、走査を行っている間に車が障害物に衝突してしまうことがあるからである。このように、走査法を用いることができないため、動物の立体音認識のメカニズムにヒント

を得て、複数のマイクロホンを用い、各マイクロホンに到達する超音波の僅かな時間差から障害物の方向を推定することにした。図4は、障害物の位置を無走査により求めるために著者が提案する楕円の交点から障害物の位置を推定する方法(以下、楕円交点法という)を示す。

いま、簡単のため、ツイータ、反射物(障害物)、およびマイクロホンが平面上にある場合を考える。図4のように、原点(0, 0)にツイータを置き、x軸上の点(-a, 0)と点(a, 0)にマイクロホンを置くと、障害物の位置(x, y)は、点(-a, 0), (0, 0)を焦点とする楕円と点(a, 0), (0, 0)を焦点とする楕円の交点として求める。なぜなら、楕円においては、二つの焦点から楕円上の一点に引いた線分の和は常に一定の長さ(ツイータから放射された超音波が障害物で反射されマイクロホンに到達するまでの飛距離に相当)になるからである。図4では、簡単のためマイクロホンが2個の場合を示したが、マイクロホンの数がさら

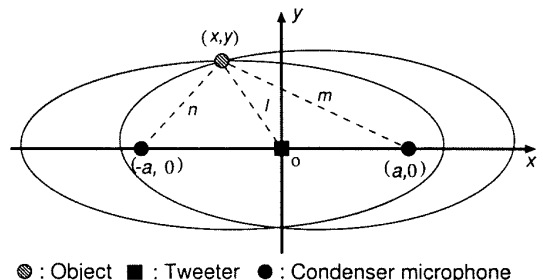


図4 楕円交点法の原理

に多くなると、交点を求めるのに必要な精円の数が増加するので、障害物の位置を推定する際の信頼性が向上する。ただし、マイクロホンの数を余り増やすと、障害物検出回路の製造コストが高くなるので、実験においてはマイクロホンの数を4個に抑えた。

7. 時変ゲインアンプ

実験の便利さのため、最初は、障害物を検出する実験を屋内で行っていた。この時は問題なかったのだが、より遠距離にある障害物を検出するために、実験場所を屋外に移したところ、遠距離にある障害物については、横風等の影響を受け、マイクロホンの出力信号が思ったよりもかなり小さくなってしまったことが分かった。距離が遠くなると、当然、マイクロホンの出力が小さくなるので、前置増幅器に振幅リミッターを入れ、入力信号の入力可能ダイナミックレンジを上げる対応策を施していたのだが、振幅リミッター程度の簡易な方法では、遠距離の障害物を検出することが困難であることが分かった。

そこで、前置増幅器のゲインが、バースト波を送信した時からの経過時間に応じて、自動的に変化するようにした。図5は、経過時間の二乗に比例してゲインが大きくなるようにした時変ゲインアンプの出力電圧（下側のグラフ）を振幅リミッター付き固定ゲインアンプの出力電圧（上側のグラフ）と比較して示したものであ

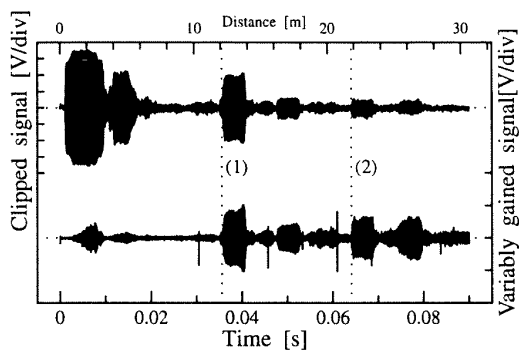


図5 可変ゲインアンプと固定ゲインアンプの出力波形の違い

る。図5から分かるように、振幅リミッター付きアンプよりも、時変ゲインアンプの方が遠距離にある障害物から反射された超音波を検出するのに適しているのは明らかである。

8. 実験結果と今後の課題

屋外実験は、中央にツイータを置き、ツイータから左右に200mmと600mm離れた位置に全部で4個のマイクロホンを置いて行った。図6は、検出された障害物の位置の一例（2ヶの障害物を配置し、5回計測した結果がプロットされている）で、図6から、車の進行方向に対して十分高い繰り返し精度で位置が検出されていることが分かる。

現在、一番困っている問題は、横風の影響である。横風が強いとマイクロホンに到達するま

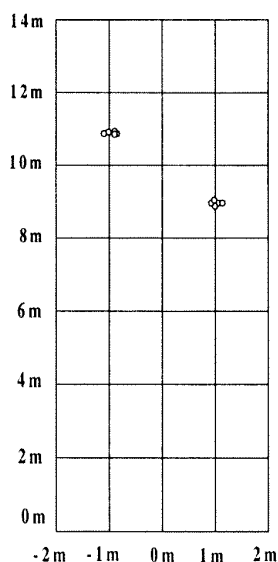


図6 無走査型超音波センサで検出されたオブジェクトの分布図

での音道が変化し、異なった音道を通った超音波どうしが干渉して、マイクロホンのダイヤフラムを振動させるに必要な音圧が小さくなってしまふことがある。ただ、これは一瞬のことなので、音圧が小さくなった時は、例えば、一つ前の計測値を用いるなどの方法で解決できる。また、強風の時は、障害物位置の計測値に誤差を生じるので、風速を測定し、誤差を補正することを考えている。

ドップラーシフトについては、現在、多数の狭帯域バンドパスフィルターを並べ、シフト値を瞬時に検出し、障害物との相対速度を推定す

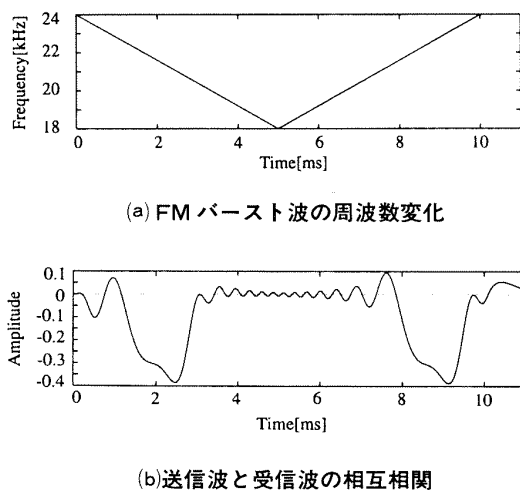


図7 FMバースト波によるドップラーシフトの検出

るようにしている。しかし、狭帯域バンドパスフィルターを多数並べると、回路の製造コストが高くなるため、FM変調をかけたバースト波(以下、FMバースト波という)をツイータから放射し、マイクロホンに誘起された信号との相関を取って、ドップラーシフトの値を知る方法を考案した。この考案は、著者が海外出張の飛行機の中で思いついたものであるが、現在、計算機を用いたシミュレーションにより、提案の有用性の確認を終えたところである。

図7は、このシミュレーションの一例で、図(a)は、FMバースト波の周波数変化を示し、図(b)は、送信波と受信波をアナログ乗算器で乗算した後、ローパスフィルタを通して相関を求めた

もので、下向きになった二つのコブの時間間隔がトッラーシフトに応じて変化する。すなわち、車と障害物の相対距離が縮まる時は、二つのコブの時間間隔が長くなり、逆に相対距離が広がる時は、時間間隔が短くなる。この、FMバースト波を用いることにより、検出回路の大幅なローコスト化を達成できるものと考えている。

9. 謝辞

本研究を実施するに当たり、東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻の熊谷正朗助手に計算機シミュレーションを、同専攻修士課程の有山隆暁君に図6のデータを得る実験をお願いした。また、本研究は、財団法人サウンド技術振興財団の助成金の助けを得て実施した。ここに記し、謝意を表す。

