

超音波センサを用いた頭部位置検出システムの研究

林 卓 郎*・松 尾 秀 明**

A study on the head position detection system by using ultrasonic sensors.

Takuro Hayashi and Hideaki Matsuo

Nearly 40 percents of accidental death inside home have been occurring in the bathroom every year. In most cases of them, the people were fainted and drown to death due to sudden illness. Alarm systems for preventing such accidents have been under consideration, though none of them has reached to feasible level. Authors are also studying the system that enables to make judgment whether a person had sunk in a bathtub or not. In that system, an ultrasonic sensor is used for measuring the distance between the ceiling of bathroom and the top of the person's head. This paper describes the concept of the alarm system, outline of the test equipment and the measurement results. Reasonable result was obtained by using this system, although it has been left as a problem that the measurement accuracy sometimes deteriorated.

1. 緒言

東京消防庁の統計¹⁾から、家庭内での不慮の死亡事故の約4割が浴室で発生しておりまた、その大半が入浴中の急病による溺死である。この統計を元に推計された全国の入浴中急死者数は年間約14000人にのぼり大きな問題となっている。また、図1のように死亡者数の内約を考慮すれば50歳を越えた辺りから急増しており高齢者ほど入浴中の急病・事故を発症しやすく、図2に示すように入浴中の心肺停止を起こした患者の家族構成を見れば大半が家族同居の状況で発生しており、むしろ一人暮らしの状況は稀である。

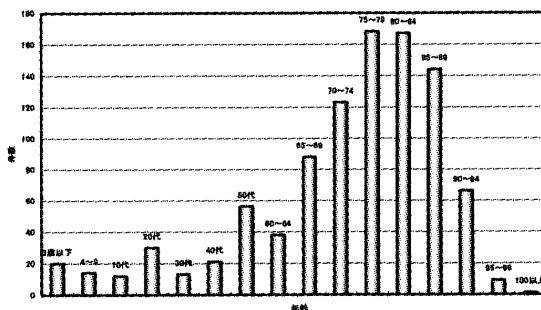


図1 入浴中の事故者発生率

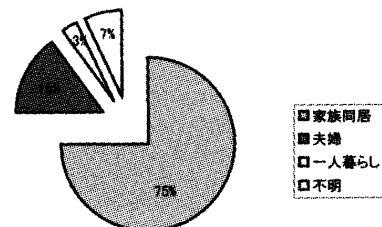


図2 入浴中における心肺停止患者の家族構成

家族が常に見張っているわけにもいかず、これらを検知する警報装置の開発はこれからの超高齢化社会に向けて解決すべき問題であるといえる。

入浴中の事故を防止するための警報装置はいくつか考えられてはいるがまだ実用化にはいたっていない。そこで安価かつ取り扱いが容易な超音波センサを用い入浴中における頭頂部の位置と水面との距離を常時計測し、入浴者になんらかの異常があり沈水した時に警告する警報システムを検討し実用化を目指す。本報告ではその基礎研究として警報システムの設計および実験装置の製作、超音波センサを用いるにあたっての問題点について報告する。

2. 浴槽警報システムの設計

センサの検知方法は、送信側と受信側を対面に設置し物体が送信波を遮ることで検知できる透過型と、送信側と受信側を同じ位置に取り付け物体との反射波を受信するまでの時間を検出する反射型の2種類が主に用いられている。透過型は物体の存在を確実に検知できる利点があるが設置の際に対面側に受信装置を設置しなければならずコストや手間がかかる。一方、反射型は設置の際に送信側と受信側を一体化して設置できるためにスペースをとらない。しかし、反射波を見るために物体の材質・表面粗さによって距離を正確に検知できない場合があり、誤作動を起こしやすい。だが浴槽に設置することを考えると省スペースなのは重要な要因であるので今回は反射型の計測システムを採用した。また、今回使用した超音波センサは送受信器が分かれている開口型を用いた。共振周波数は 40kHz で指向性は半減全角で 50° となっており計測距離は 0.1m~3m まで計測することができる。

設計した警報システムを図 3 に示す。天井に反射型の超音波センサを設け、センサ部にモータを取り付けビームを振ってやることにより浴槽をスキャンし、検出された頭部までの距離の最小値

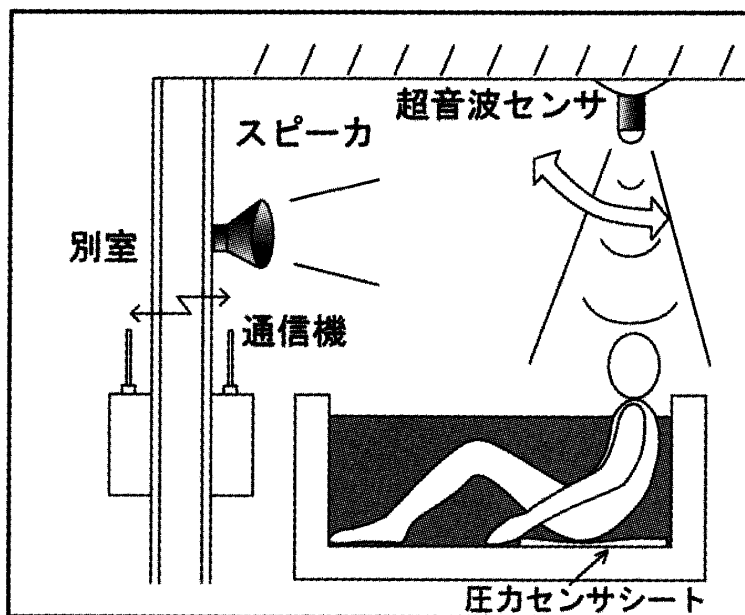


図3 浴槽警報システム

を取り、その距離と水面との距離を逐次計測する。入浴者の頭部と水面までの距離がある一定値より短くなり時間が経過すると一度スピーカを使用して警告し、それでも反応がなければ別の場所に通報する。更に入浴事故が発生したときの患者の体温が発見時に非常に高温であることが多いため水温も 36°C 前後の適温に調節する。また入浴中なのかを判断するために浴槽底部に圧力センサのシートやタッチセンサを取り付ける必要がある。



図 4 製作した実験装置

頭部の位置検出については実際にどれぐらいの判別ができるのか確認するために簡略化した実験装置を製作した。

製作した実験装置を図 4 に示す。概観はパイプのフレームを箱型に組み、フレームの天井にステッピングモータを固定し、回転軸に超音波の送受信器を床に対して平行になるように取り付けて計測対象を自由にスキャンできるようにになっている。そしてセンサおよびモータの信号線は製作したシステムにそれぞれ接続して駆動させた。超音波センサの駆動には 40kHz の信号が必要なため送信時間を任意に変えることができるようにプログラムを再書き込みできる PIC マイコン^{2) 3)}を用いて信号を ON、OFF させて 40kHz になるように調節した。

今回ステッピングモータを選定した理由としてパソコンと連動させやすく比較的精密な角度制御ができるためである。

3. 超音波計測システム

製作した超音波計測システムを図 5 に示す。まずパソコンから PIC マイコンに超音波の発信タイミングを知らせ、PIC マイコンの出力ポート 1 から 40kHz の短いバースト波を発生させる。それと同時に出力ポート 2 から発信期間を知らせる信号を発生させて、パソコンに信号を伝える。出力ポート 1 から発生したバースト波は超音波センサの送信器に伝えられ、超音波を発生させる。対象物から反射された超音波は受信器から受け取り、電気信号となってパソコンに取り込まれる。なお送信側と受信側では適切な電圧になるようにアンプを用いて調整している。パソコン側では超音波の発信時間と反射波が帰ってくるまでの時間から距離を算出するわけだが時々刻々と距離が算出できるようにグラフィカル言語 LABVIEW を用いて制御している。また超音波センサの首振り機構に用いたステッピングモータは一度距離を検出した後パソコン側からステッピングモータにパルスを送りモータを駆動し、1 ステップ角ごとに距離が算出されるように連動している。なお選定したステッピングモータは 1 ステップ角度あたり 1.8° となっている。

最終的には LABVIEW 上でスキャンした距離の分布図を見られるようにプログラミングした。LABVIEW に取り込む際のスキャンレートは mm 単位の判別ができるように 100kHz で取り込んだ。

また超音波は温度 $t(^{\circ}\text{C})$ によって音速 $c(\text{m/s})$ が変わってくるために LABVIEW 上で補正をかけられるようになっている。使用した補正式は $c = 331.4 + (0.6t)$ を用いている。

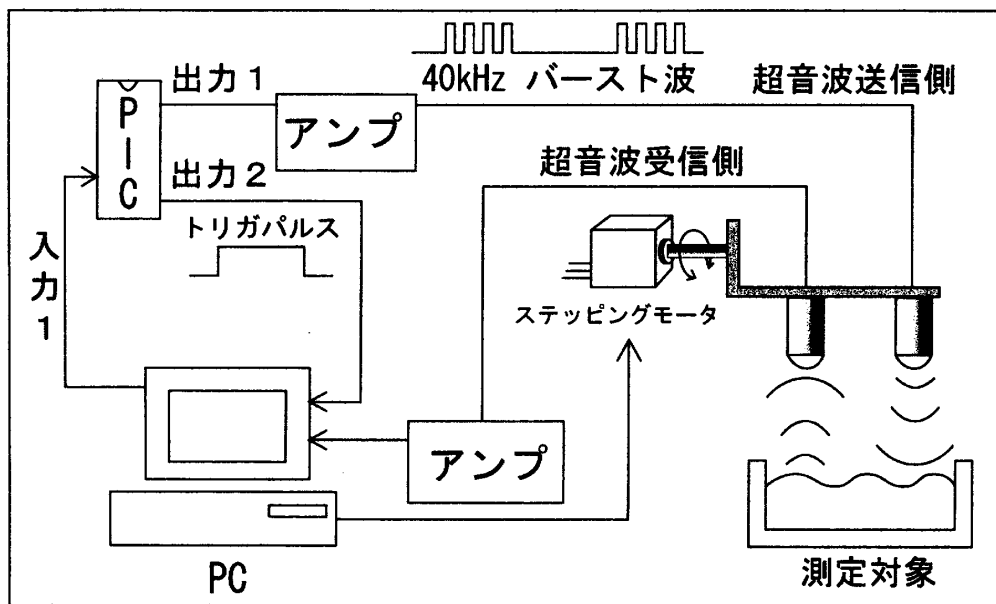


図5 製作した計測システム

4.実験装置の指向性

40kHzの超音波センサは指向性が比較的に広いので周りの対象物を検出してしまふ場合がある。しかしカタログに記載されている指向性は透過型の場合の指向性であるため、反射型の指向性は記載されていない。そこで製作した実験装置での指向性を求める実験を行った。

実験方法として天井に反射型の超音波センサを取り付けステッピングモーターで超音波センサを 1.8° 刻みに傾斜させ、その角度毎の受信波形の最大電圧を計測しそれを基にポーラ図にプロットした。求めた実験装置の指向性を図6に示す。

図は傾斜角度 0° を基準とした振幅比と傾斜角度を示している。振幅比が半分に減衰したのはカタログの場合は半減全角で 50° に対して実験装置の場合は 44° とカタログの場合と比較して指向性が鋭い結果になった。

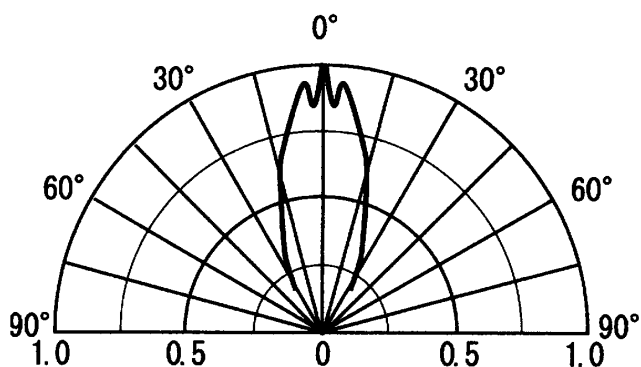


図6 反射型の場合での超音波センサの指向性

カタログの実験では受信器が固定されているのに対し反射型の実験では送受信器が一体となって傾斜させている違いが関係していることに加えてセンサの受信器と送信器が5cm程度離れているために反射波が正確に 90° で反射しているわけではないため振幅が減衰するものと思われる。この特性は頭部位置を検出するにあたり、指向性が狭いほど周りの対象物を拾いにくくなるという点において有効である。

5.超音波計測実験

初めにシステムの信頼性を確かめるために対象がベニヤ板の場合と頭部の場合の距離計測実験を行った。⁴⁾

センサの傾斜角度 0° でベニヤ板 37cm までの波形を図 7 に、傾斜角度 0° で頭部までの距離 37cm 時の波形を図 8 に示す。図 7、図 8 共に横軸が経過時間、縦軸が超音波センサの受信側の電圧を示している。図 7 では 1 つめの山が送信側から直接観測された直接波を表し、2 つめの山が対象物からの反射波を示している。更に対象物からの反射波の後に弱い周期信号が続いているのが確認できるが、これは反射してきた超音波が天井に跳ね返り更に往復してきて観測された波形だと思われる。

図 8 では同じように 1 つめの山が直接波で 2 つめの山が頭部からの反射波であると思われる。しかし、頭部を計測した場合、信号の減衰が激しく天井からさらに反射してきた往復信号は観測できなかった。

それぞれのグラフの矩形波は超音波が送信されている期間を示している。LABVIEW 上ではこのトリガー信号を参照することによって正確な送信時間を知ることができる。

LABVIEW 上で表示された距離は、しきい値を対象物から跳ね返ってきた反射波の最大電圧 70% の時の経過時間からトリガー信号の立ち上がり時間との差によって判別しているため多少の誤差を生じる。また送信側からの干渉による直接波を受信側のセンサが拾ってしまっているために判別の際にこの時間をキャンセルしなければならないというプログラムの仕様上、たとえ反射信号がなかったとしても 0cm という距離が出てくることはない。

結果としてベニヤ板の場合表示された距離は 37.8cm、頭部の場合表示された距離は 37.3cm と比較的良好な結果となった。しかし頭部を計測したグラフでは髪の毛や頭部形状が曲面であるために、受信信号の電圧が約 1/5 に減衰しており対象までの距離が伸びれば距離の判別が難しくなると思われる。

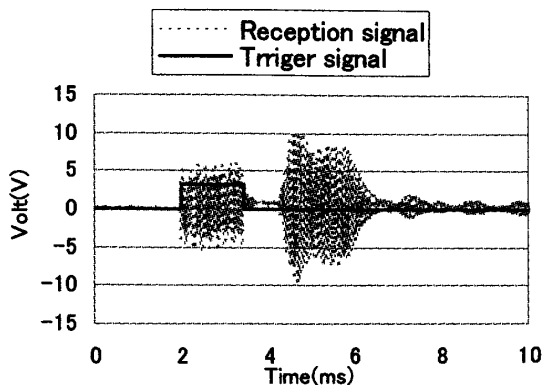


図 7 ベニヤ板の場合での計測結果

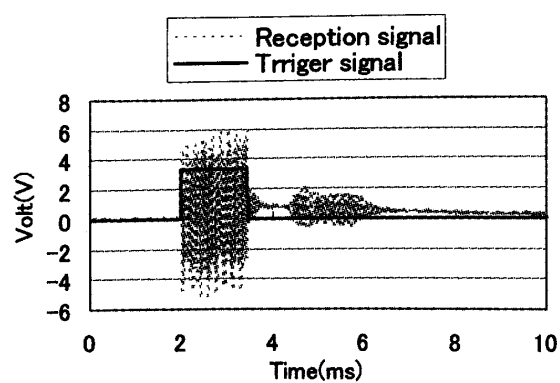


図 8 頭部の場合での計測結果

図 7、8 の結果を踏まえ距離 37cm の場合での様々な材質を用いて反射波の減衰の違いをしてみることにした。表 1 は材質の違いによる受信信号最大電圧を値が大きかった順に並べたものである。なお信号は多少のバラつきを伴うので 10 回の平均値を用いている。また 9V を越えている材質はオペアンプの増幅限界が 10V であるために 10V を越えている可能性があり参考値となる。表から材質の硬さや表面の粗さが反射信号の大きさに大きく関係していることがわかる。もっとも大きな反射が得られたのはベニヤ板やダンボールなどの平らで硬いものが良く反射している。逆に最も信号が小さかったのは厚さ 5cm の綿でノイズレベルに近い値であった。これは綿の繊維が荒く複雑に絡んでいるため綿の内部に音波が侵入し複雑に反射しているためだと思わ

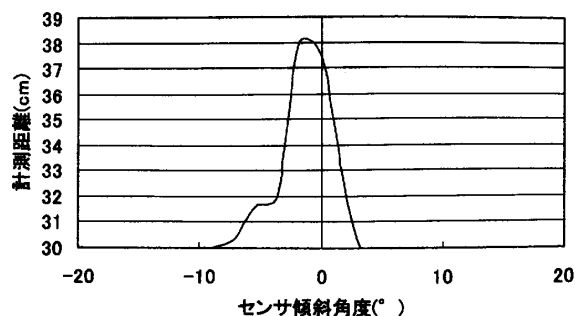
れる。また濡れたタオルと乾いたタオルでは濡れたタオルのほうが良く反射することがわかった。これはタオルの隙間に水分が入り込むことで材質の硬さや表面の粗さが変わったためだと思われる。この事実を浴槽の警報システムに置き換えて考えると入浴者の頭部が濡れているか乾いているかで判別のしやすさが変わってることがわかる。すべてを見比べるとやはり頭部は吸音材よりも信号が小さく判別が最も難しい部類に入ることがわかる。これは形状が曲面であることに加えて毛髪が綿の場合と同じような原因からくるものであることがうかがえる。

表 1 材質の違いによる反射信号の強さ

対象の材質(距離 37cm)	10 回の電圧平均(V)	対象の材質(距離 37cm)	10 回の電圧平均(V)
ベニヤ板	9.51	乾いたタオル	2.86
ダンボール	9.38	頭部(被験者 1)	2.55
ビニール袋	8.45	頭部(被験者 2)	2.26
濡れタオル	3.94	手の甲	1.99
手のひら	3.84	綿(厚さ 5cm)	1.3
吸音材	2.95		

次にステッピングモータと連動させセンサ傾斜角度 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ までの LABVIEW 上で表示された距離の分布図を図 9 に示す。対象物としては被験者を椅子に座らせ、頭部位置を計測した。なおセンサから頭頂部までの実際の距離が 37cm となっている。分布図をスキャンした時間はステッピングモータ駆動時の振動問題があるため 1 ステップごとに約 1 秒の待ち時間を与えた後、センサから超音波を発信するようになっている。

横軸がセンサ傾斜角度、縦軸が LABVIEW 上で算出された距離を表している。LABVIEW 上で計測されたセンサ位置との距離の最大値は 38cm と実際の距離 37cm と比べて 1cm の誤差と比較的近い値となった。図では計測角度 $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$ の範囲で距離が分布しているのが見て取れるがこれは距離のピークを越えたところから

図 9 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ までの頭部位置分布図

ら信号が急激に減衰しているために距離の判別精度が落ちているものと思われる。また傾斜角度 0° のとき距離がピークでないのは被験者の頭頂部がその位置になかった可能性があることと計測時間が約 30 秒かったため頭部位置が正確に静止させることが難しかったことが挙げられる。実際の警報装置に適用するならばこの 38cm が天井から頭頂部までの距離と認識することになる。

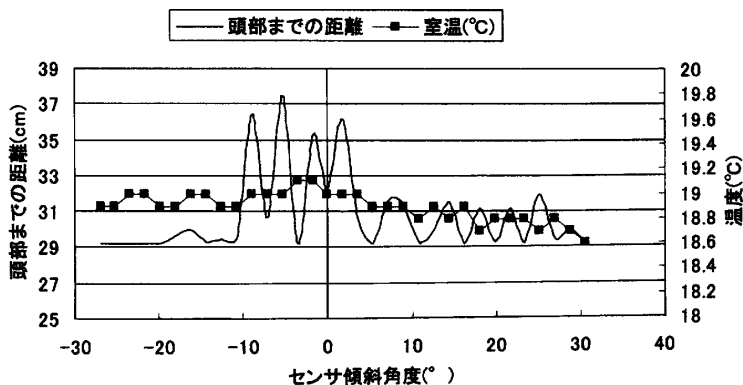
6. システムの問題点

製作したシステムは、簡単に指向性を求められることや対象物の距離を計測したり受信波形を確認できたり実験レベルとしては非常に有効なのだが、ステッピングモータで頭部位置をスキャンした際に不安定な結果を招くことが多々あった。この要因を明らかにするためいくつかの考察を行った。

1) 温度との関連性

超音波は温度によって伝播速度が異なってくるため、温度との関連性を調べてみた。図 10 は不安定な計測結果の場合での温度との関連性を表している。なお温度計は比較的応答の速い熱電対を用いている。

図では横軸が超音波のビームを振った際のセンサ傾斜角度を示し左軸が LABVIEW 上での対象までの距離、右軸が熱電対から得られた温度を示している。図 9 と比較すると $-10^{\circ} \sim 5^{\circ}$ にわたり距離が分布しているのが見て取れる。分布している範囲は指向性の広さを考慮すれば妥当であるのだがピーク付近の距離が大きくバラついている。距離の最小値が 29cm と出ているのは図 7、図 8 に見られるように直接波をキャンセルした時間分の距離が表示されているだけであって実際は距離が遠くて反射波が帰ってこなかった場合や反射波がノイズレベルに近かった状態を示している。しかし図を見る限りでは温度の変化は最大で 0.6°C しか変化しておら



ず関連性は見られない。さらにたとえ計測中に室温が 2°C 変化しても音速の上昇率は 1% にも満たないことから考えにくい要因だといえる。温度に関連して湿度との関連性も考えられるが応答の速い湿度計がないことと実験条件も無風であったために、特に雰囲気急変したとは思えない。

図 10 頭部位置分布図と温度の関係

2) ステッピングモータの駆動時に起こるノイズ

ステッピングモータは駆動する際に電磁石を用いているために 1 ステップを刻むたびに振動が生じる。この現象によりセンサ自身が振動することとなり LABVIEW で距離を判別するにあたって誤差を生じる恐れがある。解決法としては 1 ステップを刻んだ後、少し待ち時間を与えてから超音波の距離計測を行う、センサ固定部の剛性を高めるなどの工夫が必要である。またステッピングモータの電源を投入しただけで受信信号のノイズレベルが 4 倍に増加した。しかし、ステッピングモータの電源を切り手動で 1.8° ごとに距離を計測しても同じような不安定な状態が現れたのでこの原因も考えにくい。

3) 受信信号のゆらぎ

LABVIEW 上では受信信号の反射波を判別しているわけだが、反射波の最大電圧の 70% を閾値として距離を算出している。このため同じ計測距離でも反射波の最大電圧が異なってくると信号の立ち上がり時間が異なってくるために、少なからず距離のズレが生じる。

そこでセンサ傾斜角度 0° 、ベニヤ板までの距離が 56cm 時の 10 回の受信信号の最大電圧と最大電圧までの立ち上がり時間を計測した。結果として最大電圧は 4.19V~4.58V のバラツキがあり、立ち上がり時間も 0.32ms~0.50ms の差が発生した。これが影響し LABVIEW 上での判別も 1cm ほどのズレが生じる要因となった。このことから $-30^\circ \sim 30^\circ$ の計測を行った際に毎回同じ電圧が得られずノイズレベルに近い信号は判別できる場合とできない場合があると考えられる。実際に LABVIEW 上でリアルタイムに図 7、図 8 のような受信信号波形を目視していると反射信号は確実に表示されていることから反射信号の大小によって判別ミスが発生する原因が最も大きな要因であると思われる。解決策としてはハードウェア面では高精度のオペアンプを用いることによる信号の立ち上がり時間の改善や信号線を短くしたり同軸ケーブルを多用することによるノイズ成分の除去、ソフトウェア面においてはローパスフィルタやバンドパスフィルタ⁵⁾を用い 40kHz の信号を抽出したり、信号自身を移動平均などで平滑化し距離を判別しやすくすることによる精度の向上が必要である。

7. 結言

浴槽警報システムを実現するにあたり超音波計測システムを設計し、その有効性を示すための簡単な実験装置を製作した。また超音波センサを用いた頭部位置検出実験を行い、その有効性と問題点を検討した。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 頭部距離を判別するにあたり髪の毛や形状により反射信号が大きく減衰することがわかった。
- (2) 製作した実験装置で反射型の超音波センサの指向性を求め、透過型と反射型による違いや使用条件によってカタログに書かれている指向性よりも鋭くなることがわかった。
- (3) ステッピングモータを用いて超音波センサのビームを振ってやることで LABVIEW 上に頭部距離の分布図を表示することができた。
- (4) ステッピングモータを用いて頭部位置をスキャンする際に駆動時の振動問題が距離の判別に少なからず影響を与えることがわかり振動対策や駆動後に待ち時間を与えて振動が減衰してから距離を計測するなどの対策が必要である。
- (5) 信号のゆらぎやノイズにより距離の判別にバラつきがでることから判別プログラムの精度の向上が警報システムにおいて特に重要なことがわかった。

参考文献

- 1) 窪田和弘、入浴事故の実態とその防止、財団法人東京救急協会、プレホスピタル・ケア第 14 巻第 5 号、2001
- 2) 遠藤敏夫、わかる PIC マイコン制御、誠文堂新光社、2001
- 3) 鈴木美朗志、PIC プログラミングと制御実験、東京電機大学出版局、2002
- 4) 松尾秀明、林卓郎、超音波センサを用いた頭部位置検出システムの研究、北陸信越支部第 40 期総会・講演会講演論文集、2003、219-220
- 5) 江原義郎、ユーザーズデジタル信号処理、東京電機大学出版局、1991

(平成 15 年 12 月 4 日受理)