

SA6A形超音波アナログ距離センサの開発

飯塚 一行^{*1)} 檀上 和正^{*2)}

1. はじめに

超音波距離センサは、振動子の性能が大幅に向上したことや、比較的簡単な処理回路で距離計測が可能なことにより、FA分野においても応用され始めている。

従来は、光電スイッチ・近接スイッチの補完的な応用が主体であったが、最近では超音波の特性を生かした応用展開も行われている。

今回、本センサを開発する上で、補完的な応用とともに独自の展開も行えるよう考慮して取り組んだ。

2. 製品開発のポイント

市場に出回っている超音波距離センサは、光電・近接スイッチに比べて大きい取り付け上不利であること、応用展開する為の機能が少ないこと、さらに、超音波自体の問題点に対して対策が不十分であることなど使用しにくい点がある。

そこで表1に示す技術課題を挙げて製品開発のポイントとした。

3. 測定原理と仕様

図1に測定処理回路のブロック図を、表2及び表3に製品仕様を示す。以下、図1に従って本センサの動作原理を説明する。

振動子から発射された超音波は、空气中を伝播し検出物体があれば反射されて再び振動子に戻ってくる。この往復時間は伝播速度を $V (=331+0.6\theta)$ ： θ は温度)とすると $t=2L/V$ で表され検出物体までの距離を測定することができる。

振動子は送受兼用タイプである為、送信・受信動作を時分割的に切換えて使用している。 $(T_1$ が送信期間で T_2 が受信期間)

これらの動作は1チップCPUによりコントロールされ

ている。

1チップCPUにはそのほか測定データの平均処理、各種モード切換、伝播速度の温度補償などを行なわせている。

4. 技術課題考察

4.1 小型化

4.1.1 小型振動子

振動子評価項目の主なものとしては、感度、残響、指向、温度の各特性があるがこれらを全て満足させる事は、実際上無理であるので用途に応じた特性値に調整する必要がある。

今回は、振動子の小型化を行いつつ、近距離から遠距離まで(10~100cm)検知が可能なように感度、残響特性の向上を中心に検討した。

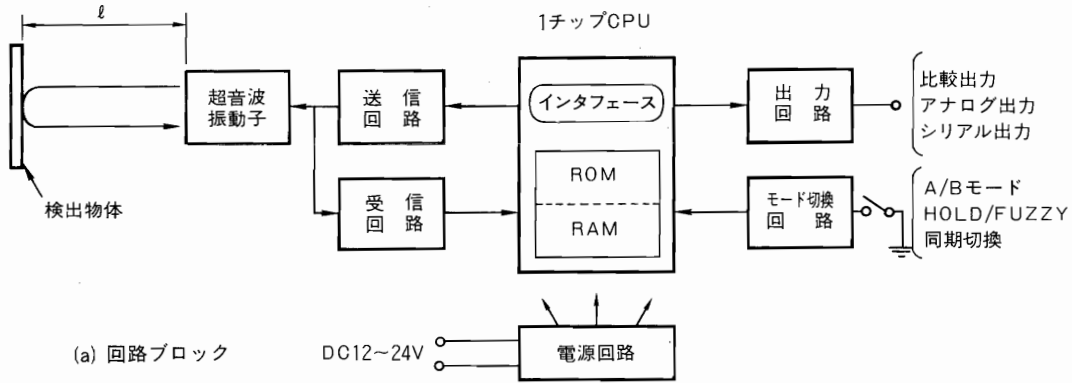
表4に示すように振動子形状としては $\phi 18$ に選定して、

表1. 技術課題

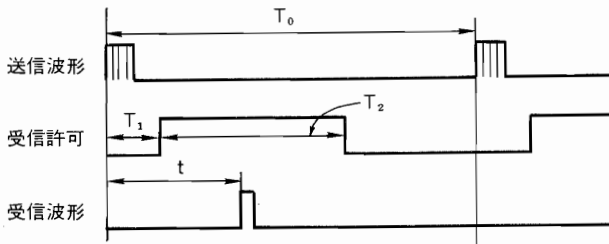
項目	具体的課題点
1. 小型化	1) 振動子の開発 市販されている振動子では形状寸法が大きくなるので新たに小型の振動子を開発する必要がある。 2) 処理方式の選定 基板実装スペースの縮小、多機能化を実現する為に1チップCPUを用いた処理方式とする。そのためのソフト開発が必要。
2. 応用展開	1) 多機能搭載 比較出力・アナログ出力及びシリアル出力、同期制御など。 2) 使いやすさ 不感帯の軽減、液面ゆらぎ対策としてのホールド機能など。
3. 問題点対策	1) 音響ノイズ対策 周囲から発生する超音波(金属の衝突音など)に対しては誤動作しないように対策。 2) ゆらぎ対策 空気が温風などによってゆらいだ場合にも誤動作しないように対策。

* 1) 研究開発部

* 2) 研究開発部



(a) 回路ブロック



(b) タイミング波形

図1. 処理回路ブロック図

表2. 製品仕様—その1—

●一般仕様

電源電圧	DC12~24V(許容リップル率10%以下)
消費電流	100mA以下
耐電圧	充電部—非充電部間 1000V 1分間
絶縁抵抗	100MΩ以上(DC500Vメガにて)充電部—非充電部間
使用周囲温度	-10~+60°C(氷結なきこと)
使用周囲湿度	35~70%RH(結露なきこと)
保存温度	-30~+70°C
耐振動	耐久:10~55Hz、複振幅:1.5mm X・Y・Z各方向2時間(非通電時)
耐衝撃	耐久:500m/s ² (約50G)、X・Y・Z各方向3回
耐ノイズ	電源ライン:500V、パルス幅:1μsec・50/60Hz(ノイズシミュレータによる)
ケース材質	本体:亜鉛ダイカスト 表示カバー:ポリアリレート
保護構造	IP65(IEC Pub529)
接続方式	コード引出し式 M4ねじ
ケーブル	0.2mm ² 6芯内1芯シールド線、キャプタイアケーブル2m
重量(約)	260g
外形寸法	81H×21W×50Dmm

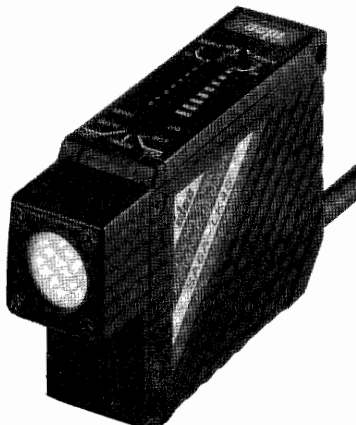


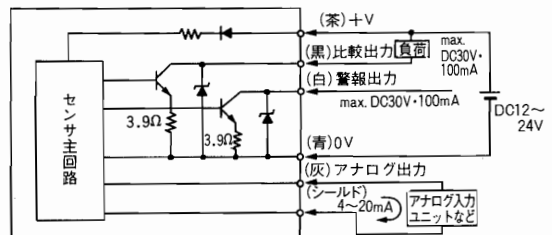
表3. 製品仕様—その2—

●性能仕様

項目	形番	SA6A-LK4S	SA6A-LL4S
出力形態	アナログ出力	4~20mA(直線性:±2mm、分解能:2mm)	
	比較出力	NPNオープンコレクタ (100mA DC30V max.)	PNPオープンコレクタ (100mA DC30V max.)
	警報出力	NPNオープンコレクタ (100mA DC30V max.)	PNPオープンコレクタ (100mA DC30V max.)
同期制御	内部同期	同期線どうしを接続(2台まで接続可能) ただし、応答時間は各モードとも2倍	
	外部同期	外部から同期線にタイミング信号を供給(台数制限なし)ただし、ton=t off=20[30]msec以上	
動作表示	アナログ出力表示	赤色LED8点ドット表示のレベルメータ	
	比較出力表示	出力ON時点灯(赤色LED)	
	電源表示	電源ON時点灯(赤色LED)	
	警報出力表示	温風等の環境変化検知時に点灯(赤色LED)	
安定表示	安定入音時点灯(緑色LED)		
応答時間		アナログ出力70msec 比較出力24[36]msec	
応答周波数	ノーマルモード	アナログ出力8Hz	比較出力15[10]Hz
	ファジィモード	アナログ出力3Hz	比較出力3Hz
	ホールドモード	アナログ出力3Hz	比較出力3Hz
標準検出物体		アルミ平板40×40mm	
検出距離		200~1000mm[100~1000mm]±20mm	
比較出力設定		FAR・NEAR設定1回転ボリューム(上限・下限範囲独立設定)	
発振周波数		200kHz	
指向性		±7°(半減値:-6dB)	
温度特性		±0.06%/°C(±12μA/°C)	

※〔 〕内はBモード時の値

1. SA6A-LK4S形



2. SA6A-LL4S形

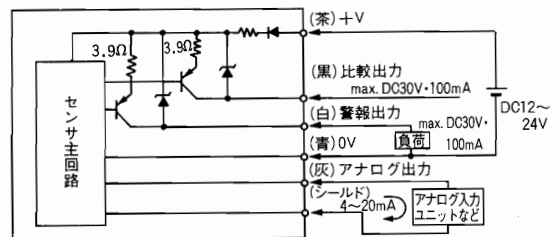
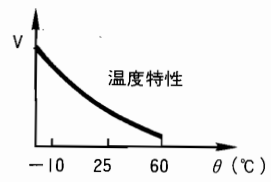
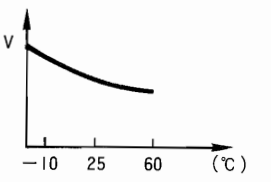
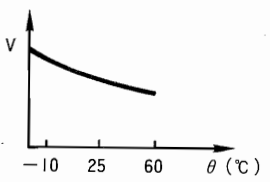

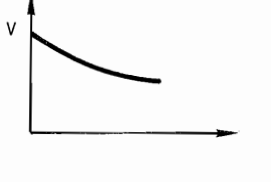

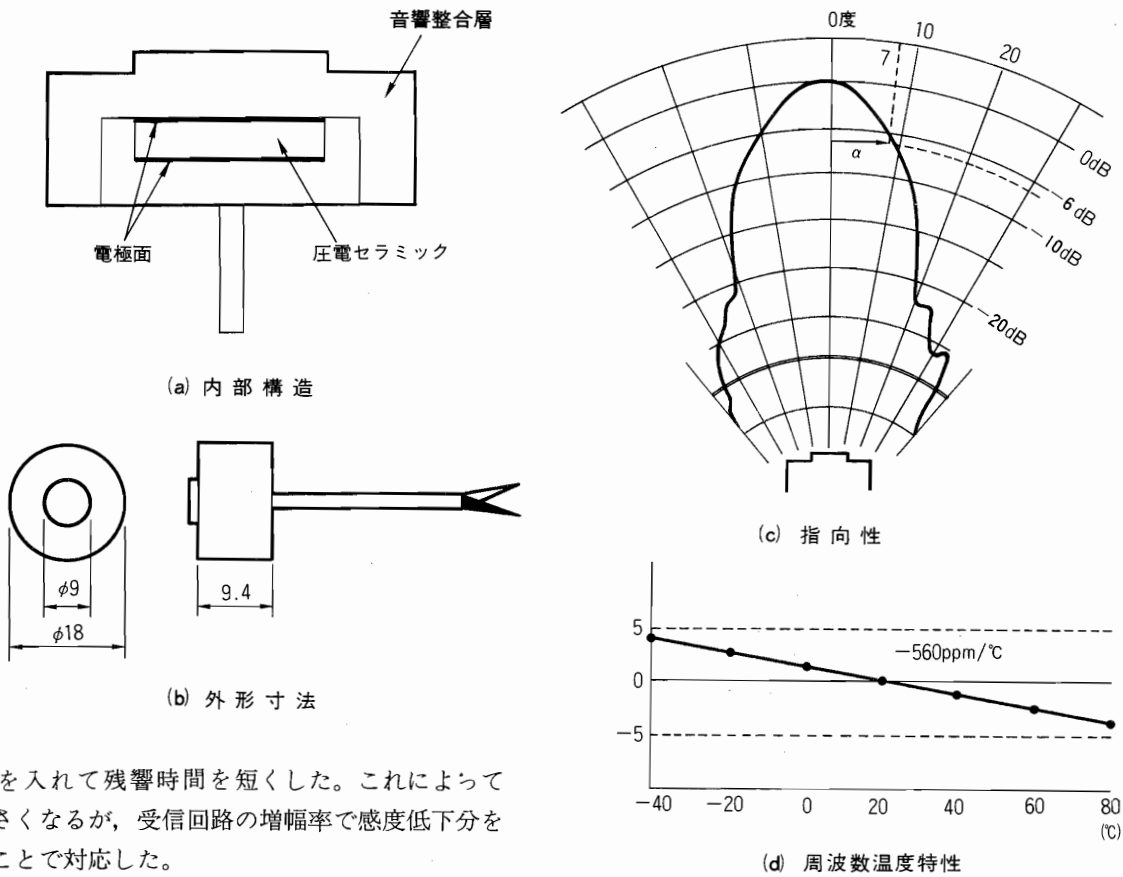


表4. 振動子性能比較

	φ15、φ17 振動子	φ18 振動子	φ20 振動子
i) ダンパ材無し V: 感度 t: 残響 α: 指向角	$V_{15} = 1.6V$ $t_{15} = 0.8msec$ $\alpha_{15} = 4\sim5度$ 	$V_{18} = 2.2V$ $t_{18} = 0.8msec$ $\alpha_{18} = 7\sim8度$ 	$V_{20} = 2.3V$ $t_{20} = 1.0msec$ $\alpha_{20} = 7\sim8度$ 
ii) ダンパ材有り		$V_{18} = 1.5V$ $t_{18} = 0.5msec$ $\alpha_{18} = 7\sim8度$ 	

※ φ15、17振動子は高温での感度低下が大きいこと、φ20振動子は形状が大きく本体ケースに入らないのでそれ以後の検討は行わず、φ18振動子のみに選定。



ダンパ材を入れて残響時間を短くした。これによって感度は小さくなるが、受信回路の増幅率で感度低下分を吸収することで対応した。

図2に振動子の内部構造及び外観を示す。

図2. 振動子

4.1.2 1チップCPUを用いた処理方式

表5に示す性能及び機能をハード的に構成したとすれば、部品実装面積が大きくなり、小型化ができない。

表5. 超音波要求事項

要求事項	性能面……	音速の温度変化補償(±600ppm/℃以内) ヒステリシス(応差)距離(10mm) 耐ノイズ対策(電氣的)(平均化)
	機能面……	音響ノイズ対策(Aモード) ゆらぎ対策(ファジイモード) 液面検知(ホールドモード) アプリケーション対応(ソフト)

そこで、ソフト的にハードの一部分を負担することで解決した。

図3に音速補償、図4に平均化の例を示す。

4.2 応用展開

4.2.1 入出力機能

入出力機能についてまとめると表6のようになる。

表6. 入出力機能

入出力機能	入力機能……	同期モード(スレーブ)
	出力機能……	比較出力(トランジスタ出力) 警報出力(//) アナログ出力(4-20mA) 同期モード(マスタ) 表示出力(距離モニタ、安定判定)
拡張機能……	シリアル出力(オプション) 自己診断出力(オプション)	

1) アナログ出力

図5(a)で、負荷抵抗 R_L に流れる電流 I を求めると

$$I = \frac{r_3 (r_1 + r_4) - r_1 \Delta 1}{r_1 r_s (r_1 + r_4 - \Delta 2) + R_L \Delta} \cdot v$$

ただし、 $r_3 = r_4 + r_s + \Delta 1$

$$r_1 = r_2 + \Delta 2$$

$$\Delta = r_3 \Delta 2 - r_1 \Delta 1$$

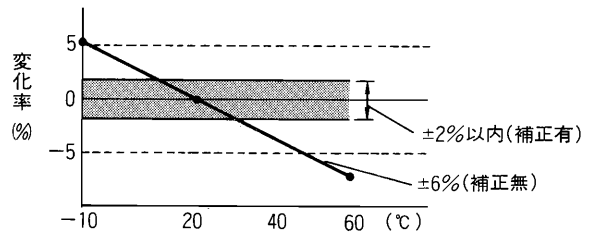
ここで $\Delta 1 = \Delta 2 = 0$ であれば

$$I = \frac{r_3}{r_1 r_s} \cdot v \quad \text{と簡単になり、}$$

R_L には無関係となる。

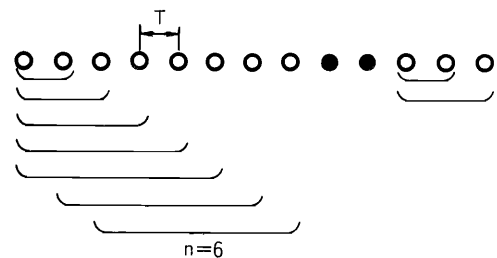
しかし、現実には $\Delta 1, \Delta 2$ の影響により、負荷変動が±1%程度存在する。

また、図5(b)に示すように、出力電流 I_0 は完全な直流ではなく、 ΔI の脈動分を持つ。この ΔI は分解能に比べて大きく、測定器の読取速度が測定周期 T に比べて速い場合、値がばらついて見えるので、平均化が必要である。あるいは、外部の負荷抵抗 R_L に並列にコンデンサ C_L を接続し ΔI を小さくして測定する。この関係を表7に示す。



超音波を放射し、物体に当たって戻ってくるまでの時間がある温度 θ で t 、 $\theta=20^\circ\text{C}$ で t_{20} とする。この時 $t_{20} = \{1+k(\theta-20)\} \cdot t$ の関係があり t を t_{20} に換算できる。定数 $k=1.8 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ でありROMに格納されている。温度 θ をCPUのA/Dコンバータにて取り込み補正を行っている。(±2%まで改善)

図3. 音速補償

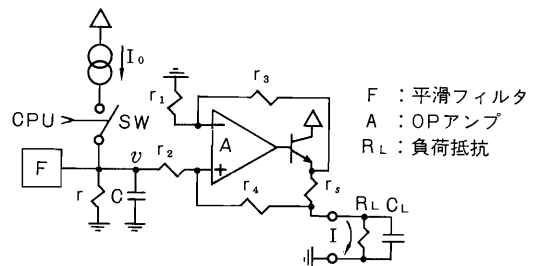


T: 測定周期
○: 有効データ
●: 無効データ

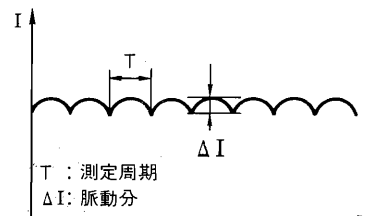
有効データを移動平均(例では $n=6$ 回)して精度を高めている。

さらに、無効データが生じその後有効データが続いた時は $n=2$ 回から移動平均が始まる。

図4. 移動平均



(a) 回路構成



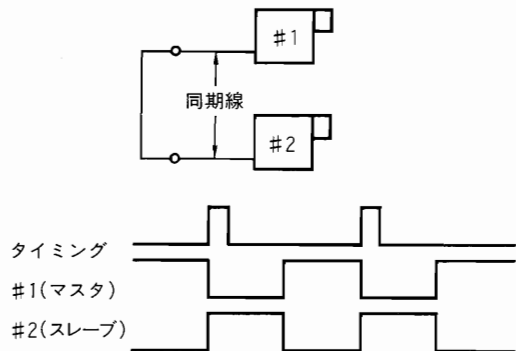
(b) 脈動

図5. アナログ出力

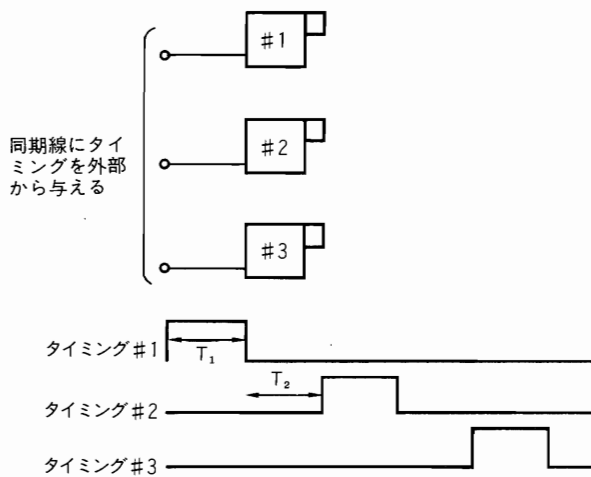
表7. 必要な C_L 値

R_L	$\Delta I = \text{分解能}$	$\Delta I = 2 \cdot \text{分解能}$
	100Ω	$C_L = 470\mu F$
250Ω	$C_L = 220\mu F$	$C_L = 100\mu F$

(C_L が大きくなるに従い応答速度は低下する)



(a) 内部同期



$T_1: 20\text{msec}$ 以上、 $T_2: 20\text{msec}$ 以上

(b) 外部同期

図6. 同期モード

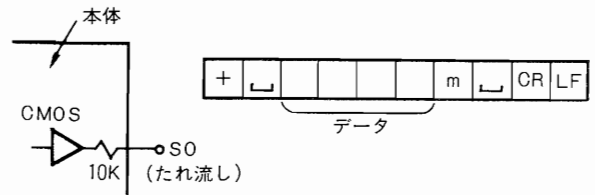
2) 同期モード

2台のセンサを密着させて使用する場合は、図6(a)のように同期線同士を接続することにより、動作を交互に行なわせ干渉を防止することができる。この時マスタ側、スレーブ側の同期線は、それぞれ出力、入力モードとなりマスタ側からタイミング信号を出力する。

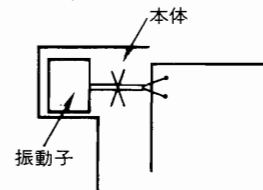
3台以上密着させて使う場合は、図6(b)に示すように外部からタイミング信号を与えて動作させる。

3) 拡張機能

オプションとして、図7に示す拡張機能について準備している。シリアル出力のデータ転送フォーマットは、図7(a)に示す通りであり、データは、アスキーコード・4800ボーレイト・8bit・ノンパリティ・1ストップbitである。

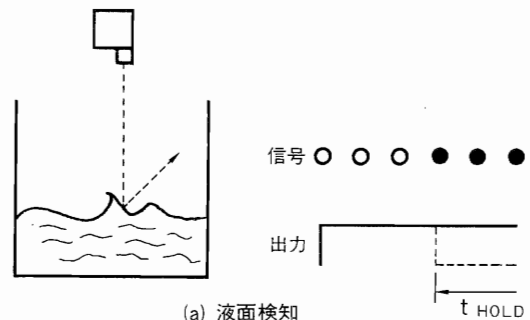


(a) シリアルデータ転送フォーマット

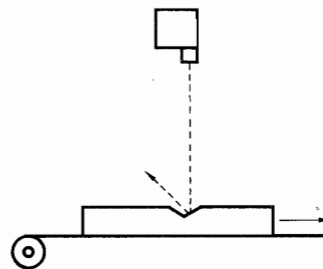


(b) 自己診断出力

図7. 拡張機能



(a) 液面検知



(b) 通過検知

図8. ホールド機能

図7(b)の自己診断出力とは、振動子の断線などが起こった場合に、警報出力として外部に知らせる機能である。

4.2.2 ホールド機能

この機能は液面検知を行なうのに有効な機能で、図8にその概要を示す。

液面検知時に、液面のゆらぎが大きい場合図8(a)のように、反射波が返ってこなくなり測定不能になる。このような状況が起きても出力をすぐOFFにするのではなく、ある一定の時間出力を保持しておく機能がホールド機能である。ホールド時間は150ms.。また、ホールド期間内に新しいデータが入力されると、ホールドを解除して新しいデータを出力する。

ホールド機能の応用的な使用方法として、図8(b)で示す凹凸面での通過検知がある。搬送ライン上で木材など面のあらい物体を検知する場合に有効である。

4.3 問題点対策

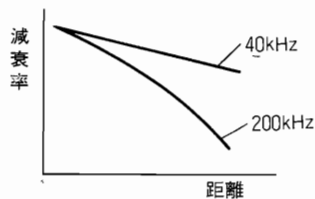
4.3.1 音響ノイズ

センサ自身から発した超音波以外の音響ノイズがセンサに入り誤動作を起こす可能性がある。これの対策法を表8に示し順に説明していく。

表8. 音響ノイズ対策法

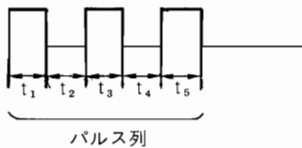
音響ノイズ対策	高周波振動子の使用……対策1 超音波パルスの符号化…対策2(Aモード) 反射時間判別……………対策3(Bモード)
---------	--

(a) 対策1 高周波振動子の使用



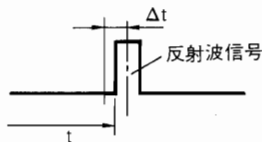
空気中を伝搬する超音波の音圧は、回折現象により球面上に拡散する拡散損失と、媒質にエネルギーを吸収される吸収損失によって距離が長くなるほど減衰するが図9(a)のように超音波の周波数が高いほどこの減衰率が大きくなる。

(b) 対策2 パルスの符号化



超音波を何回かパルスの符号化して送信する。これによって反射されてきた超音波の形が送信時と同じパルス列であるか調べることで対策できる。

(c) 対策3 反射時間判別



反射波の到達時間 t の変動幅が Δt 内であればセンサ自身から発した超音波と判断する。これは、一般にノイズの周期が不規則であることを利用。

図9. 具体的対策例

4.3.2 ゆらぎ対策

空気の熱による対流により、超音波の音場が乱れ、計測不能になるケースが多発する。これは超音波の周波数が高い程多く見られる。

本センサでは、このケースを減少させる為にファジィ

推論を用いて対策した。この背景には、ファジィ制御は i) 音場の乱れを表わす厳密なモデルが必ずしも入らない, ii) 数個の制御ルールによる並列制御が可能, iii) 制御ルールを人間の感覚に近い表現で記述できるなどの利点があることがあげられる。

まず、熱による対流によって受波信号がどのように振る舞うかを調べてみた。(図10参照)

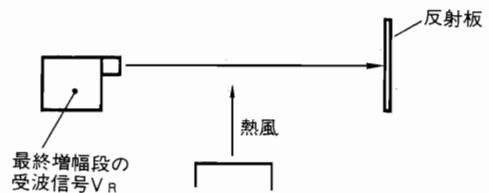
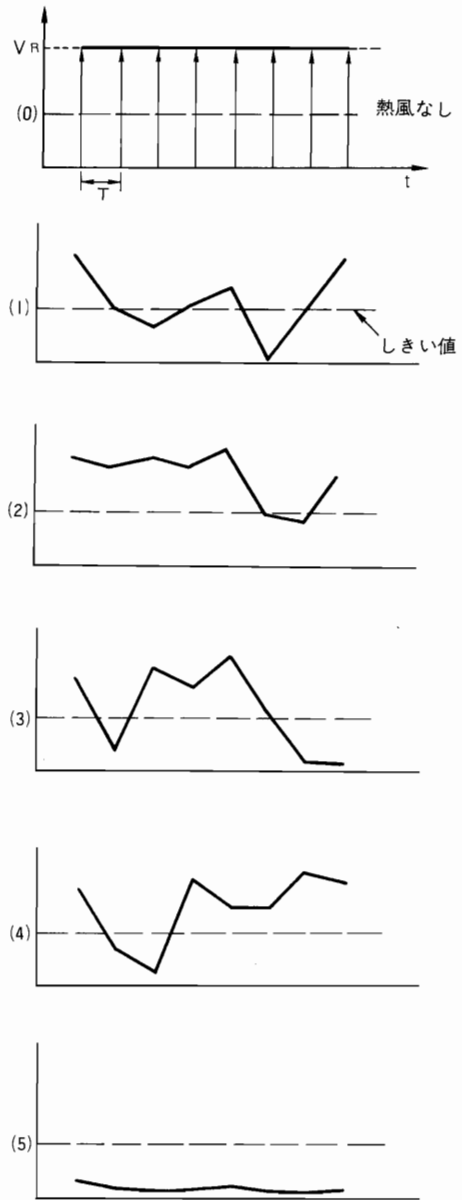


図10. 熱風による影響

図10(a)は熱風がない状態の時でありレベルはほぼ一定して安定しており、しきい値に対しても大きい。

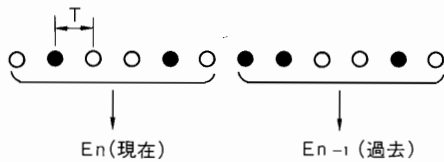
(1)~(5)は熱風を加えた時の状態を示しておりこれからもわかるようにレベルが不安定であり、しきい値よりも小さくなる場合もある。

特に(5)は熱風の加える角度、強弱の強さによってレベルがしきい値を完全に下回っている場合を示す。

(0)と(1)~(5)を比べるとその違いは次の2つに要約できる。

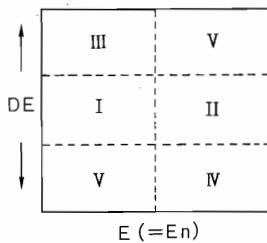
- i) レベルのしきい値以下の回数
- ii) レベル差の変動

次に図11に制御ルールを示す。



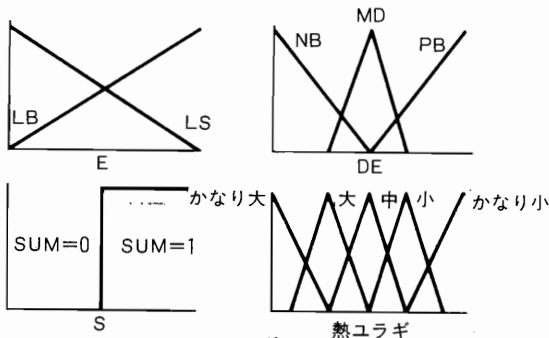
En, En-1: しきい値以下の個数(●の個数)
DE = En - En-1
S = レベル差の和(現在分のみ)

(a) 変数の説明



- I: Eが小でDEが0なら熱ユラギはかなり小さい...図10(0)
- II: Eが大でDEが0なら熱ユラギはかなり大きい...図10(5)
- III: Eが小でDEが>0なら熱ユラギは小さい...図10(4)
- IV: Eが大でDEが<0なら熱ユラギは大きい...図10(3)
- V: Eが小でDEが<0なら熱ユラギは中程度...図10(1), (2)
Eが大でDEが>0

(b) 変数位相図

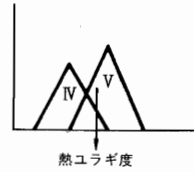


(c) メンバシップ関数

図11. 制御ルール

- I: if E=LB and DE=MD then P(熱ユラギ)=かなり小
- II: if E=LB and DE=MD then P=かなり大
- III: if E=LS and DE=PB then P=小さい
- IV: if E=LB and DE=NB then P=大きい
- V: if E=LS and DE=NB then } P=中間
if E=LB and DE=PB then }

(a) if~then形式



(b) min-max-重心法

図12. 熱ユラギ度

図11(b)で示したルールをif~then~形式で表わしそれらのルールを演算して(min-max重心法), 熱ユラギ度を推論している。この結果を用いて警報出力に反映させるようにしている。(図12参照)

ファジィ変数としてS(レベル差の和)の使い方であるが, SがSUM=1(すなわち変動が激しい)の時は, ルールI~Vの後件部(then~)のメンバーシップ関数を変化させてより実際に近くなるように修正している。

5. 特長

SA 6A型超音波アナログ距離センサの特長を列举すると以下の通りとなる。

- 1) 広範囲な検出距離
 - 2) 色・透明度・材質による影響が少なく, 物体の位置・有無検出が可能。
 - 3) 検出範囲の上限, 下限設定が独立して行えるため, 設定範囲の変更により限定範囲での検出が自在に行える。
 - 4) 比較出力とアナログ出力により, 連続量の制御や多点出力制御が可能。またアナログ量の分解能は2mm, 直線性は±2mm。
 - 5) 距離情報や上下限設定位置をモニタするレベルメータ表示機能により, 動作確認や設定が容易。
 - 6) 相互干渉防止機能により, 密着取付が可能。
 - 7) 温風対策用のファジィモード, 液面検知用のホールドモードと各種モードを配備。
 - 8) アンプ内蔵形の小形多機能タイプ。
- 代表的な機能について簡単に説明する。図13に表示パネルの図を示す。

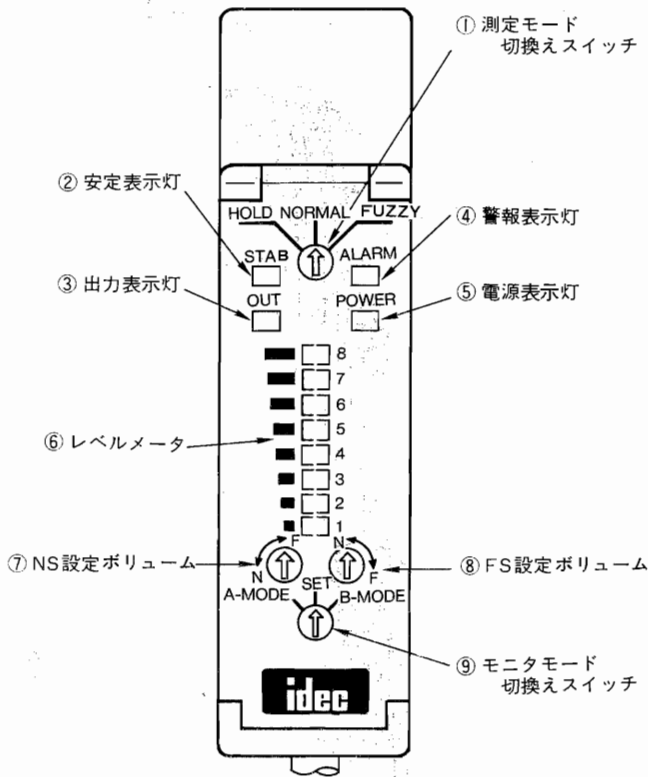


図13. 表示パネル説明図

5.1 測定モード切換スイッチ

いままで超音波センサが苦手としていた環境下での計測が可能な各種モードに容易に切換えることができる。なお応答速度はノーマルモードが最も速い。

5.2 安定表示灯

物体からの反射音が十分にある場合、及びほとんど反射音が帰ってこない場合点灯する。

5.3 出力表示灯

設定範囲内に物体がある場合点灯し、同時に比較出力を出力する。

5.4 警報表示灯

外部環境変化時（液面のゆらぎ、温風などによる空気の対流変化のある場合等）に点灯。ただし、ノーマルモード時は点灯しない。

5.5 電源表示灯

電源投入で点灯。

5.6 レベルメータ

アナログ出力に連動し、被検出物体までの距離をLED 8点のレベルメータにて点滅表示。また、検出距離設定時の上下限の設定位置を点滅表示。(測定時も設定位置を表示する。)

5.7 NS設定ボリューム・FS設定ボリューム

それぞれ、近距離側(下限位置)、遠距離側(上限位置)の検出範囲を設定する一回転ボリュームである。設定ボリュームの位置は、レベルメータで視覚的に確認できる。また、NS設定ボリュームとFS設定ボリュームの位置が逆転しても設定不可になることはなく、正しく設定でき、測定できる。

5.8 モニタモード切換スイッチ

a. SET (セットモード)

5.7のNS, FS設定ボリュームにより検出範囲の上下限を設定するモード。

b. A-MODE (Aモード測定用)

検出距離が20~100cmで、4~20mAのアナログ電流を出力する。

c. B-MODE (Bモード測定用)

検出範囲が10~100cmとモード測定時より広範囲であるが、周期的なノイズに対して、Aモードより若干弱い。

6. 応用例

具体的な使用例を図14に示す。

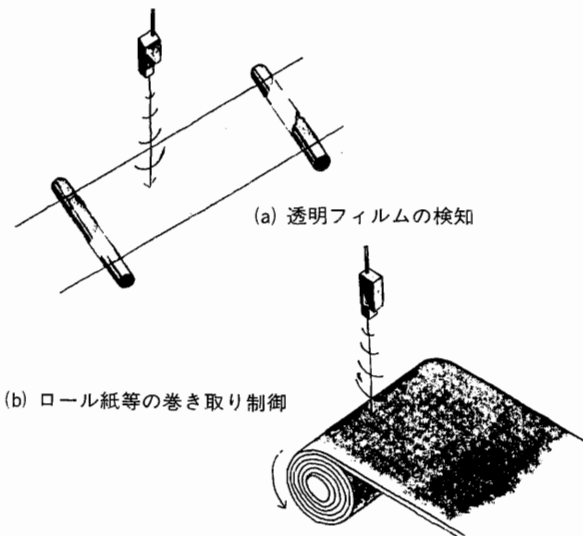


図14. 具体的使用例

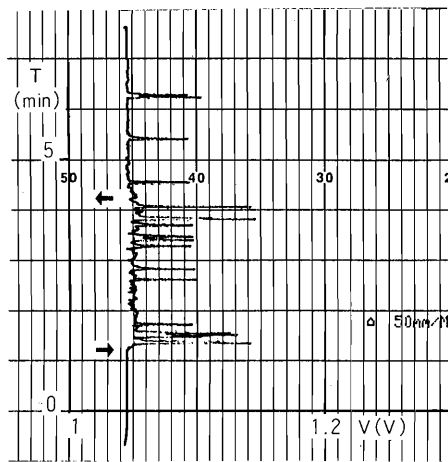
超音波センサは、光学式センサで検出しにくかった透明体・粒状物・液面等の検出にすぐれている。本製品の液面検知及び温風対策の実験例を次に示す。

図15は水を注入した水槽をかくはんしながら測定し、液面のゆらぎによる影響を調べた結果である。図15(a)は、ノーマルモード、同(b)はホールドモード時の結果である。

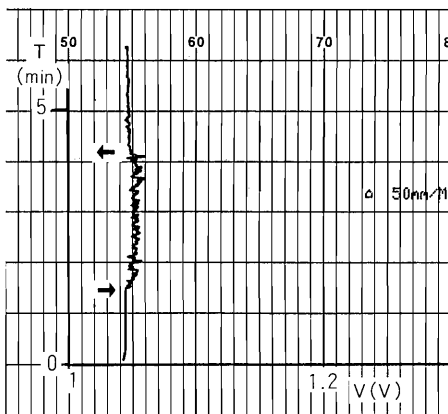
それぞれ→印のところでかくはんを開始し←印のところでかくはんをやめた。ノーマルモードの時は、最大で0.1V (5 cm相当) 変動し、かくはん終了後も誤動作を起こしている。それに対しホールドモードの時は、変動はわずか0.01V (5 mm相当) 以下になり、ホールド機能による効果が表われている。

ファジィ推論を用いた測定結果を図16に示す。

図16はドライヤを用いて温風による影響を調べた結果である。配置は図16(a)の通りとし、図の→印のところでドライヤのスイッチを入れ、アナログ出力を記録した。ノーマルモードでは図16(b)のようにスイッチを入れた直後からアナログ出力にゆらぎが出はじめ、最大約0.5V (25 cm相当) の誤差が生じた。しかし図16(c)のファジィモードではまったく影響がなく、ファジィ推論による効果ははっきり表われている。

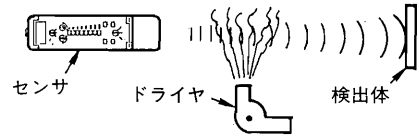


(a) ノーマルモード

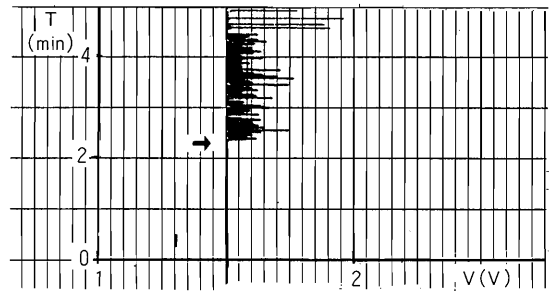


(b) ホールドモード

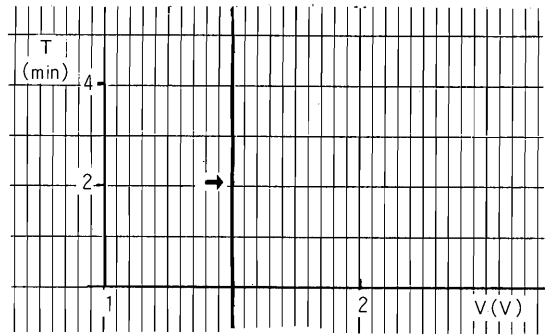
図 15. 液面測定



(a) 実験配置図(上面図)



(b) ノーマルモード



(b) ファジィモード

図16. 温風による影響

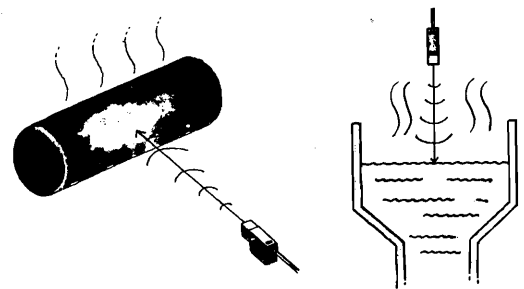


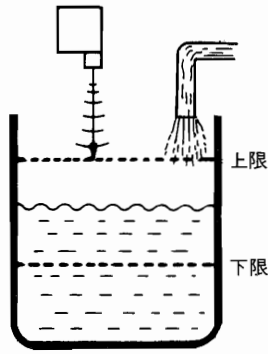
図17. 発熱物体の検知例

また本製品は図17に示すような発熱体 (液体, 固体) の検出も可能である。

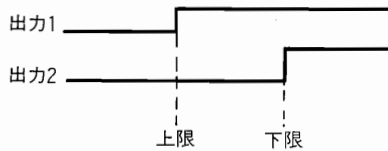
標準品では無理であっても、マイクロコンピュータのソフトを一部変更することで対応可能な例を図18に示す。

図18(a)は、アラーム出力をなくし、比較出力を上限比較出力と下限比較出力の2点にしたもので、図18(b)にそれぞれの比較出力の動作チャートを示す。

また指向性を向上させ凹凸面の検出を可能にしたり、発振周波数を変え小ピン内の液面検知を可能にすることができる。

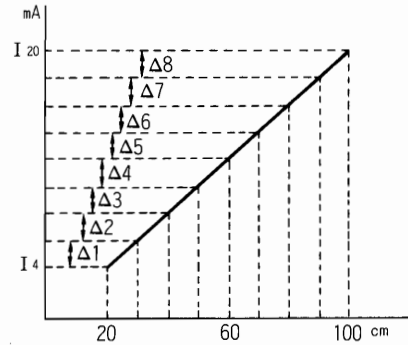


(a) 2出力タイプ使用例

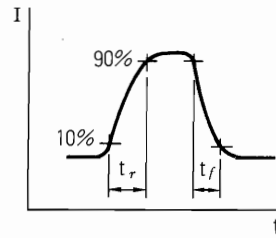


(b) 動作チャート例

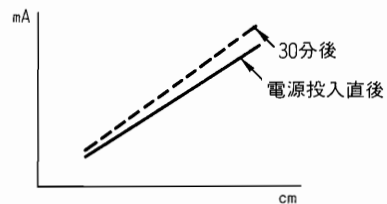
図18. 特殊品使用例



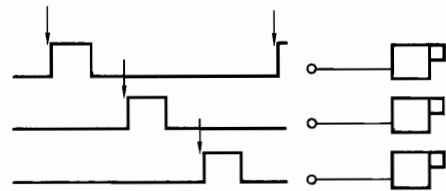
(a) 直線性



(b) 応答速度



(c) ウォーミングアップ



(d) 外部同期

図19. アナログ出力について

7. 留意点

7.1 アナログ出力について

7.1.1 直線性

図19(a)で、20cm、100cmにおけるアナログ電流値を I_4 、 I_{20} とする。そして10cmごとの電流変化分を $\Delta 1 \sim \Delta 8$ とした時、アナログ電流出力の直線性の定義を次のようにした。

$$\frac{I_{20} - I_4}{8} - \Delta i < \pm \epsilon \quad (i = 1, 2, \dots, 8)$$

ただし、 $\epsilon = 40\mu A$

7.1.2 応答速度

応答速度は、図19(b)に示す通り10%–90%で定義した。すなわち、

t_r : 物体が近距離から遠距離に変化した時の遅れ時間

t_f : 物体が遠距離から近距離に変化した時の遅れ時間

とした時、応答速度 t_s は、

$$t_s = t_r + t_f \leq 130ms \quad (8 \text{ Hz相当}) \text{ となる。}$$

7.1.3 ウォーミングアップ時間

図19(c)で示される様に、電源投入直後より約30分間は内部発熱のためアナログ電流値が安定せず、ウォーミングアップが必要である。

また、電源電圧がDC12Vから24Vに変動した時も同様。

7.1.4 外部同期時

外部同期制御を行っている時のタイミング信号の与え方は、図19(d)で示される様に、アナログ出力測定後（次のアナログ出力測定直前）に行なう。（↓印時）

7.2 スイッチング電源の使用について

スイッチング電源使用時には、AC電源を介してノイズがセンサに混入する（センサが接地している場合）。(図20参照)

センサ自身、内部でシールドして対策をしているが、ノイズの強度によっては、誤動作のおそれがあるので、FGを必ず接地する。

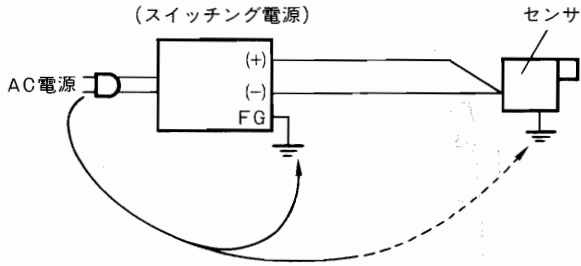
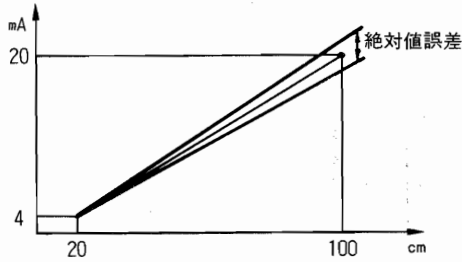


図20. シールドについて



理想的には距離20~100cmで電流出力が4~20mAであるが実際は負荷抵抗、電源電圧、調整誤差などによりはずれる。
このずれ(絶対値誤差)を小さくする必要がある。

図21. アナログ出力絶対値誤差

8. あとがき

アナログ出力の平滑フィルタ特性の改善、ファジィ推論の強化(物体の通過検知による誤警報出力)、アナログ出力絶対値誤差対策(図21参照)など課題点として残っている。さらに、標準品以外の用途に応じる為にソフトウェアの整備も必要となってくる。(例えば透過形対応、設定方法の工夫など)

今後、市場の声を聞きながらこれらの課題と取り組んでいきたい。