

## 距離—電圧変換方式安全エリアセンサによる 二次元監視に関する研究

### Study on two-dimensional watching by the safety area sensor with distance-voltage transfer method.

松岡 毅明<sup>†</sup> 津田 紀生<sup>††</sup>、山田 諄<sup>††</sup>

Takaaki MATSUOKA, Norio TSUDA, Jun YAMADA

**Abstract:** The number of the industrial robot used in Japan is increasing. In the area where the robot is operated, the contact accident between a robot and a human may happen. Therefore, the robot has to be equipped with some safety device to avoid such an accident. It is necessary that the surveillant area can be varied following the movement of the robot. Then, the safety area sensor using the distance-voltage transfer method is studied. The device consists of a semiconductor laser, a scanning mirror, a photodiode and a computer. The signal received with a photodiode is amplified and the voltage proportional to distance is obtained by the distance-voltage transfer method in the operational circuit. This voltage is monitored with micro-computer, and the robot is suspended when the obstacle enter into the dangerous area. This device is low cost and compact, and it is able to watch the obstacle in two-dimension at high speed.

#### §1 はじめに

現代では産業ロボットの使用数が増大しており<sup>1)</sup>、ロボットの安全性を高めるといことは重要な課題の一つである。中でもロボットと人間などの障害物との接触は重大な事故を引き起こす可能性をはらんでいる。この課題を解決するために、ロボットが障害物と接触する前に安全装置を働かせて、危険を判断し、動作を停止する必要がある。また空間の効率的な利用という観点から危険監視領域を可変とすることを考えていく。

安全装置としては様々な方式を用いた物が考えられるが、高周波数のカウンタを用いた距離センサでは、装置の実現が技術的に困難で、また部品が高価であり、また、主に数 mm 程度の近距離測定で用いられる三角測量法<sup>2)</sup>では、数 m の距離を測定する場合には小型化が難しいという欠点がある。そこで我々は、送信信号とある距離を経て帰ってきた受信信号の波形の論理積により生じた波形の面積を電圧として出力する距離—電圧変換方式を用いたセンサを作成した。このエリアセンサは距離を測定するための距離計ではないので距離 3m 程度までを誤差 10 cm 程度で測定できることを目標とした。そこで、この装置を用いた基礎的な特性を調べた。そして、マイコンを用いて 2 次元での監視および危険判断を行い、実用化へ向けて検討を行った。この方式を用いればロボットに取り付けられるような小型で安価な距離センサを実現できる。また、エリアセンサとコンピュータを用いてロボットの動きに合わせて監視領域を変化させ、効率的な接触事故を回避するプログラムを作成した。

#### §2 距離—電圧変換方式の測定原理

本研究に用いた距離—電圧変換方式の原理について説

明する。レーザ変調波形である送信信号と、障害物に当たって戻ってきた受信信号との間には、障害物までの距離に比例した位相差が生じる。これにより得られた送信信号と受信信号の論理積を取ることで、距離に比例したパルス幅を持つ演算波形が得られる。この信号を時間的に平均を取ることで、距離に比例したパルス幅を持つ演算波形が得られる。この方式を距離—電圧変換方式という。この原理図を図 1 に示す。この方式では、障害物の種類によって同一距離であっても受信光量が異なるため、光量が大きければパルス幅が広くなり、逆に小さければパルス幅が減少する。

このため、図に点線で示したように幅が変化すると誤差の原因となり、距離に応じた正しい電圧を得ることができない。この変化分を打ち消すため、波形の幅の変化分が左右対称であると仮定し、送信信号と受信信号の論理積を積分回路で平均し直流電圧にした電圧  $V_1$  から、送信信号を反転させた反転信号と受信信号との論理積のパルス幅によって生じた誤差が無くなり、必要な位相

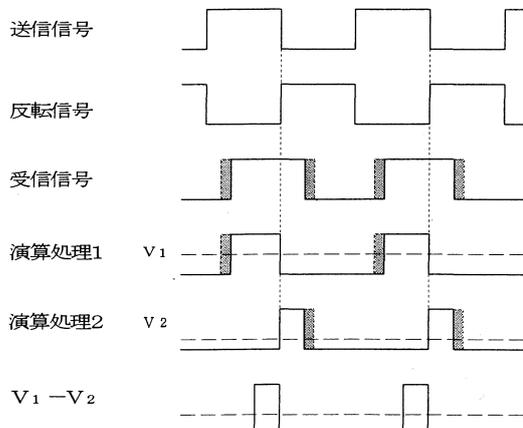


図 1 距離—電圧変換方式の原理

<sup>†</sup> 愛知工業大学大学院工学研究科  
電気電子工学専攻 (豊田市)

<sup>††</sup> 愛知工業大学電子工学科 (豊田市)

差成分 ( $V_1 - V_2$ ) のみが取り出される。この波形を平均したものをセンサ出力信号と呼ぶ。

### §3 測定装置の概要

#### §3.1 センサ部

本研究において試作したセンサシステムは図 2 に示すとおり、レーザ光を投光・受光するための光学系部分と、レーザ発振・演算処理などを行う測定回路で成り立っている。

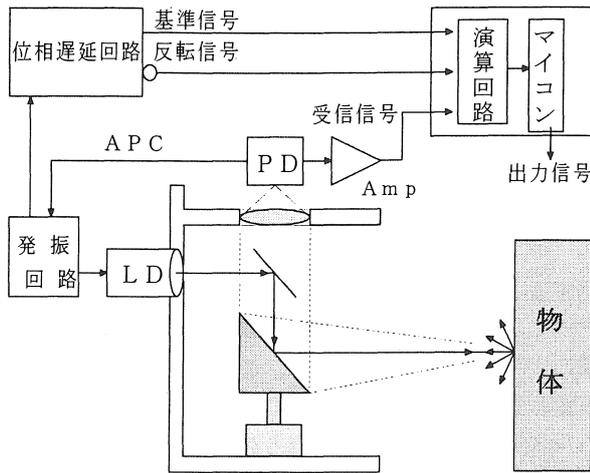


図 2 装置の構成図

センサ部にはレーザ光を投光するため半導体レーザダイオード (以下 LD と記述する) を使用した。LD は発振波長 780nm、定格出力 3mW である。このレーザに変調をかけるために、発振回路で生成した 5.5MHz の正弦波信号を用いた。レーザ光を距離 4m 付近で集光させるためのレンズは、センサの小型化を考慮して直径 10mm、焦点距離 10mm の物を使用した。また、レーザをスキャニングミラーの中心に照射するための小型ミラー、レーザをスキャニングするための回転ミラー、障害物で散乱した光を集光するためのレンズを取り付けた。スキャニングミラーの大きさは受信レンズの大きさに合わせて 50mm×50mm のものを斜め 45° に傾け、ブラシレスモータを使って回転させる。回転数は 1200rpm 程度を想定している。この回転数は、人体が高速で移動してもこの回転数であれば検出が可能であること、ミラーの回転数が上がるほど装置の振動が激しくなる事から判断した。黒紙をスキャニングミラーの背後に貼り付けることで、レーザが本体にあたって乱反射するのを防いでいる。障害物で散乱して戻ってきたレーザ光を集光するために直径 50mm、焦点距離 81.4mm のレンズを用いた。また 2次元での監視ではミラーの角度を正しく知る必要があるため、本体右側にフォトトランジスタが備え付け、同期信号を取りながら実験を行った。この実験装置で現在 270° 程度の範囲で測定可能となっているが、装置の形状の改良によりほぼ 360° の広範囲の監視を行うことが

出来る。

回路部分には、変調信号を生成させる発振回路、レーザに変調をかける駆動回路、受信光を増幅する受信回路、距離—電圧変換方式の原理に従って信号処理の演算を行う演算回路、受信光が大きくなることによる信号の飽和が原因となる誤差を防ぐためのオートマッチクパワーコントロール (APC) 回路、位相差が 90°、270° をまたぐ場合、距離に応じた電圧が出力されなくなるのを防ぐ位相遅延回路で成り立っている。

#### §3.2 マイコン

本実験は、安全エリアセンサの出力を AKI-H8/3048F マイコンで処理をして危険判断をさせた。また、2 次元測定出力から距離を算出すればロボットの動きに合わせて自在に監視領域を変化させながら危険判断が可能となる。そのためのシステムの構成を図 3 に示す。センサ本体からの出力電圧はマイコンのマザーボードに組み込んだインタフェース回路を通して入力する。まず、マイコンにパソコンなどから、実験から求めた較正直線の傾きと切片を入力し、マイコンで危険判断プログラムによる処理をすることで出力電圧と同期信号から障害物の方向と距離を割り出すことができ、危険判断ができる。マイコンによる危険判断の結果を LCD 及び LED で表示しているので視覚的に判断できる。LCD には、マイコンに入力された電圧およびそれから得られた障害物の距離、及びマイコンによる危険判断結果を表示する。また、LED は、マイコンが危険と判断したときには赤の LED、安全と判断したときには青の LED を点灯させる。

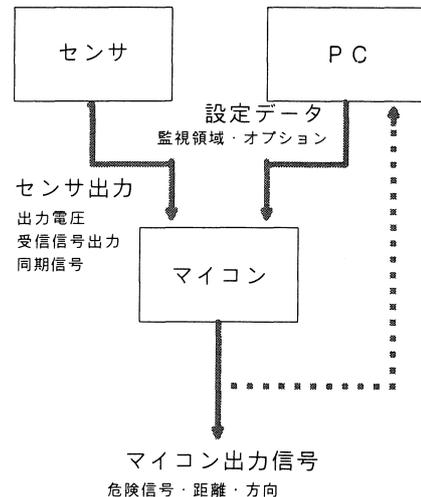


図 3 システムの構成

### §5 センサ部の特性

#### §5.1 1次元測定

まず初めに、受信に過大入力が入力するのを防ぐ APC 回路を用いないで 1 次元距離測定を行った場合の特性を図 4 に示す。スキャニングミラーを停止させた状態で障

害物を白紙とし、0.25m おきに 0.5m から 4.0m までの距離を 1 回の測定として 3 回、その平均を取った。この結果から、センサ出力電圧が距離に比例していないことが分かる。

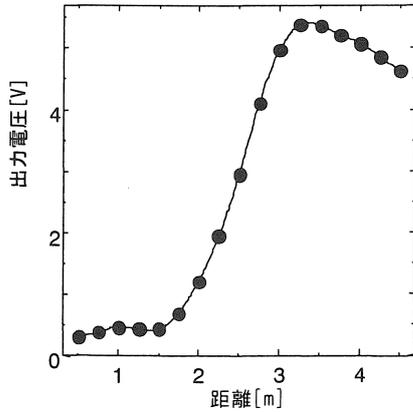


図 4 APC 回路を用いない場合の 1 次元距離測定

次に APC 回路を用いた場合の 1 次元測定の結果を図 5 に示す。APC 回路を用いた場合、距離 4.5m までほぼ距離に比例した出力電圧が得られた。測定値を直線近似したものを図 5 中に直線で示す。各測定距離における較正直線からの誤差及び繰り返し誤差について計算した結果を図 5 に示す。誤差は、図 6 から監視領域である

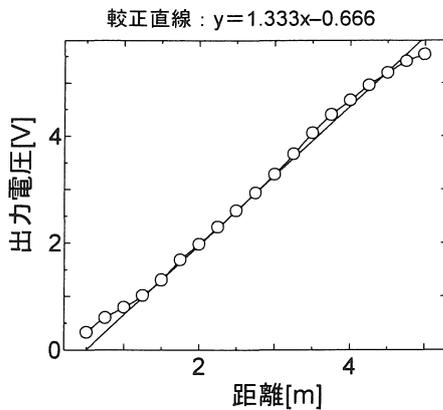


図 5 1 次元測定 (障害物: 白紙)

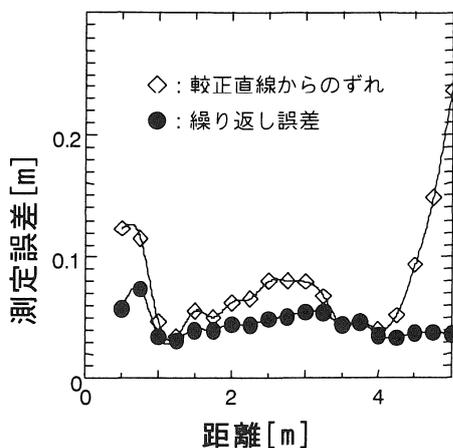


図 6 1 次元測定における平均誤差

0.5m から 4.0m までの距離での較正直線からのずれの平均値は約 6cm、繰り返し誤差は約最大 4cm になり、安全エリアセンサとしての目標を達成することができた。図 7 に、障害物として白・赤・青・緑・黒の紙について測定を行った結果を示す。図中の直線は白色の距離 0~5m での距離測定から求めた較正直線である。図より白と赤は 4.5m まで、青は 4.25m まで、黒は 4m まで距離に比例した電圧が得られた事が分かる。青や黒は若干特性が悪くなっている。距離 4m 以上で目標の精度に対して多少大きな誤差となったのは、受信信号が小さくなることによって外部から回路に混入した同相雑音が原因である増幅回路内での発振が原因である。従って、測定距離を伸ばすためには回路に対する外部からのノイズ対策の更なる改善が要である。

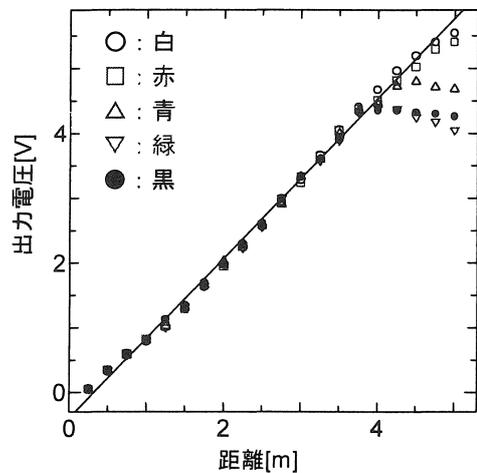


図 7 色別 1 次元測定結果

また、障害物の材質を色々な材質に変えて実験を行った。測定で使用したのは、表面に光沢のあるプラスチックと、レーザー光が乱反射しやすいクリーム色の毛羽立った布、及び表面を紙やすりで擦ったダンボール紙を用いた。この材質を用いたときの結果を図 8 に、この測定における距離ごとの誤差を図 9 に示す。

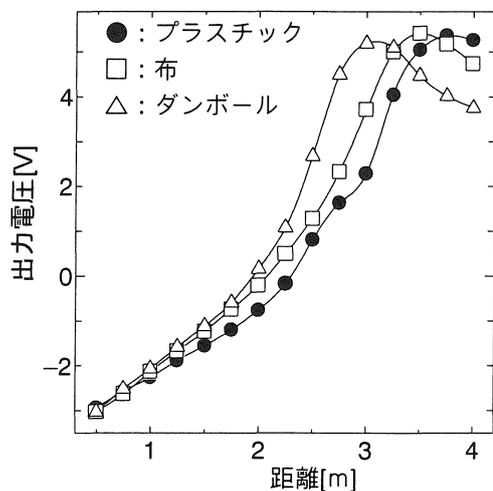


図 8 材質別 1 次元距離測定結果

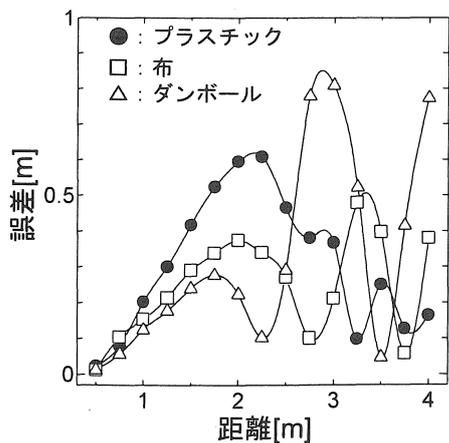


図 9 材質別 1 次元距離測定における誤差

図 9 の 1 次元での誤差の値は、図 5 より得られた較正直線からのずれを表す。この結果から、障害物からの散乱光を受信して距離測定を行う装置では、照射したレーザ光の反射率が低い材質においては遠距離の検出が困難である。また、この実験で使用したプラスチックはレーザ光の反射率が高い光沢のある材質を用いたため、レーザ光が障害物表面で鏡面反射を起こし、散乱光が集光されないため、同様に遠距離の検出が困難であった。

§ 5.2 2 次元測定

スキャニングミラーを回転させたときの出力電圧の様子を図 10 に示す。上側の波形が同期信号波形で、下側の波形がセンサ出力波形である。図中に矢印で示した同期信号に挟まれた部分が、ミラー 1 周分に相当する。そして、図 10 の波形を円形にして、実際の障害物の配置図と比較したのが図 11 である。図 11 のようにセンサ右部では同期信号を取得するためのフォトトランジスタ及びその留め金が視界を遮る障害物となっているため、この部分は不可視領域となっている。そして、図 11 より得られた結果から、障害物の配置図とセンサ出力電圧より求めたその障害物のおおよその位置を図 12 に示す。障害物 a~d の前の太い線が求められた障害物の位置である。この結果から、障害物の種類に関係なく距離に応じた電圧が出力されていることが分かる。

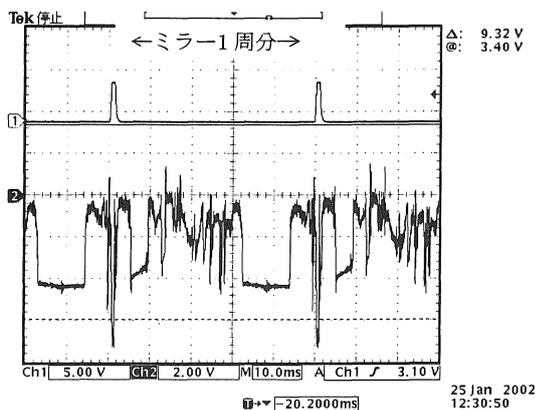


図 10 2 次元測定により得られた波形

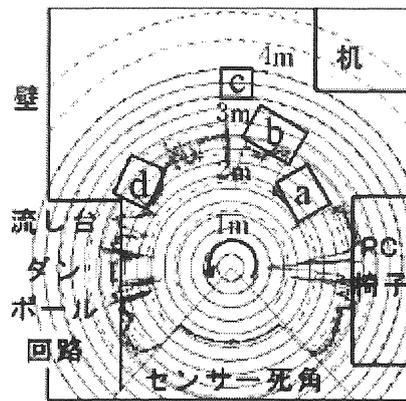


図 11 センサ出力波形と障害物配置図の重ね合わせ

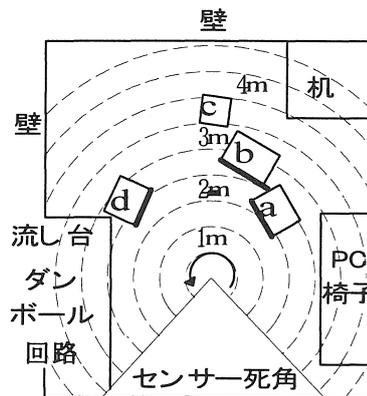


図 12 センサ出力波形と障害物配置図の重ね合わせ

しかし、障害物 C はアルミ板を使用したため、障害物表面で鏡面反射を起こし距離に応じた電圧が得られなかった。しかし、実際の距離よりも近い距離であると判断されているので、フェイル・セーフティであると言える。

次に、装置を実際に使用した場合を想定して、障害物として細い棒を持った人を用いた計測を行った。図 13 ではセンサから 1m、図 14 では 2m、図 15 では 3m の位置に立っている細い棒と 2 本の足が検出されている。足と棒を動かすとリアルタイムにオシロスコープに波形が現れた。この結果から、障害物の種類・形に関係なく検出することが可能なので、安全エリアセンサとしての十分な性能を持っていることが分かる。

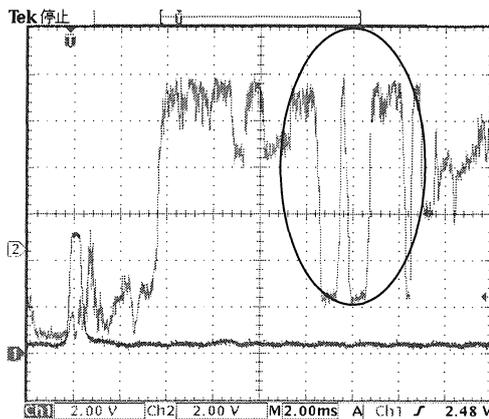


図 13 距離 1m

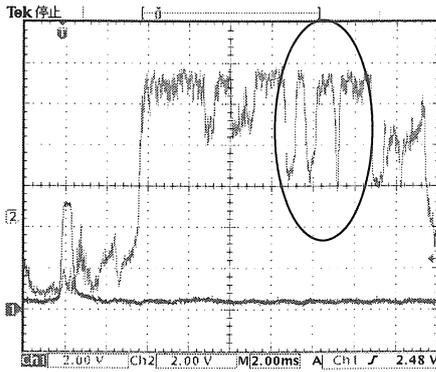


図 14 距離 2m

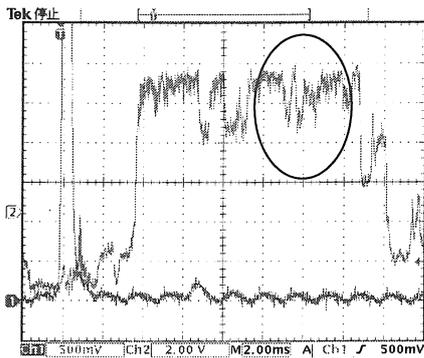


図 15 距離 3m

§ 6 マイコンを用いたシステム化

試作したセンサ本体の性能を評価したところ、安全エリアセンサとしての性能を十分満たすことが分かった。そこで、このセンサ本体をマイコンで制御・監視し、ロボットの動きにあわせて監視領域を変化させるための基本的なプログラムを作成した。このプログラムのフローチャートを図 16 に示す。このプログラムでは、まず最初に予め 1 次元測定を行った結果から得た較正直線の傾きと切片を入力する必要がある。このデータを入力後、まず同期信号 1 周分にかかる時間を計測し、スキヤニングミラーの回転数を求める。この時間の計測は、スキヤニングミラーが 1 回転する間にマイコン内でいくつカウントするかを数えることで求めている。電圧取り込み間隔はミラーが 2° 回転すること取得するのを目標としているので、電圧取り込み間隔のカウント数はミラー 1 周分のカウント数 ÷ 180 であると決定される。その後、温度変化などによる測定装置の特性の変化を最小限に抑えるために、ミラーがセンサ後方に向けた時の出力電圧である参照電圧と、ミラーが障害物の方に向けた時の出力電圧である受信電圧の比を取ること、特性の変化分を打ち消す。そのため、測定ごとに参照電圧と受信電圧の 2 つを取得する必要がある。そして、マイコンに外部装置から取得した危険領域の情報を取り込む。このデータを基にして、一定カウント毎にセンサ出力電圧を取得し、距離計算を行う。この結果から危険判断を行い障害物が危険領域内に侵入する前にロボットを停止させる命令を出力させる。今回使用したプログラムでは、危険判

断を行った結果を LCD と LED を用いて表示させている。信号を取り込む間隔は現時点では 1ms となっており、回転数が 1200rpm で 1ms ごとに取り込むと、角度 7.2° 毎に取り込むことになる。また、ロボットが動くことにより監視領域が変化するので、ミラーが 1 周することに監視領域を再設定させている。

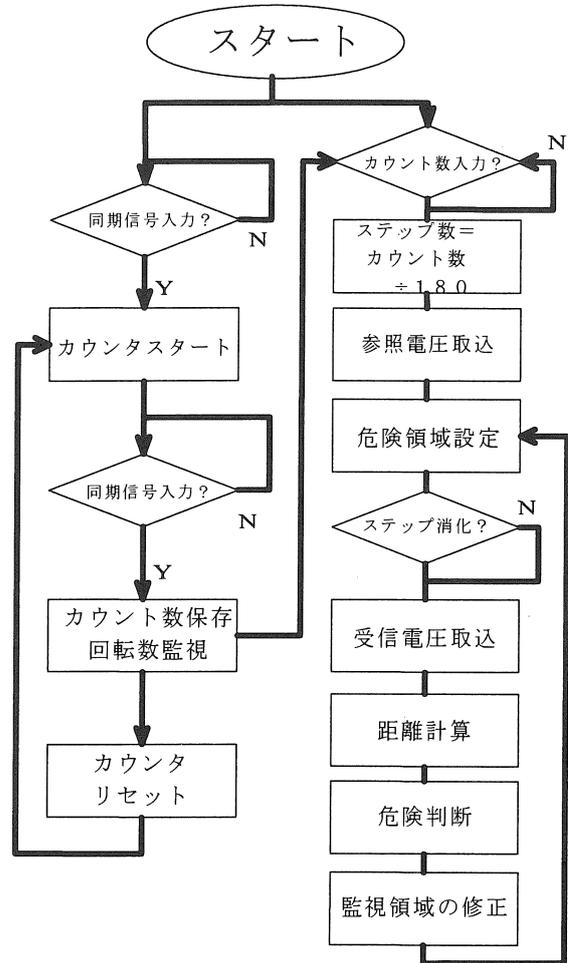


図 16 マイコンによる 2 次元監視のプログラム

マイコン出力電圧から距離を算出する場合、センサ出力電圧は -15V ~ +15V の間で変化するが、マイコンで扱うことが出来る入力電圧定格 0 ~ 5V に合わせるため、電圧変換を行うためにセンサ出力とマイコンの間にインタフェース回路を挿入して行っている。そして、マイコン内臓 AD 変換器を用いてこの電圧を変換した結果、誤差は約 0.15% であった。

このプログラムを評価するためにカウント数を一定の値に固定して 1 次元の測定を行ったところ、図 17 のような結果を得た。この結果から得た較正直線と測定値の差から得た各距離における距離誤差を図 18 に示す。図 18 から、0 ~ 4.5m の範囲でのセンサ出力電圧と実際の距離との誤差の平均は 3cm、センサ出力電圧より求めた距離とマイコンによって演算した結果得られた距離との誤差の平均は同一範囲内で 2.5cm となり、安全エリアセンサとしての特性を十分満たしていることが分かった。

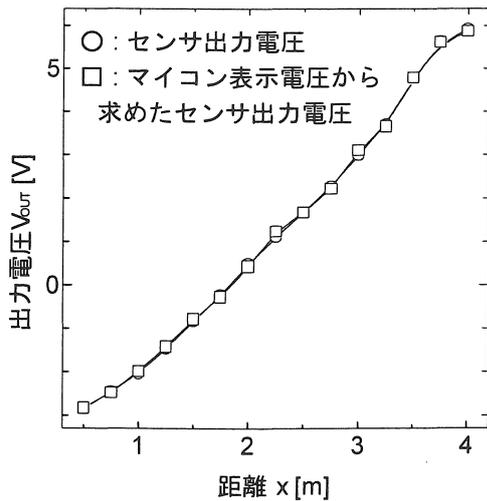
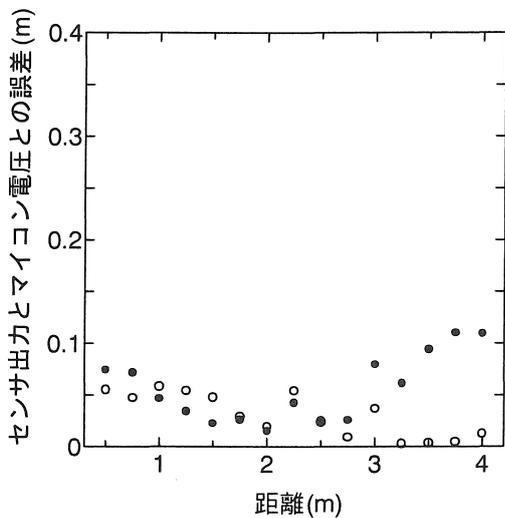
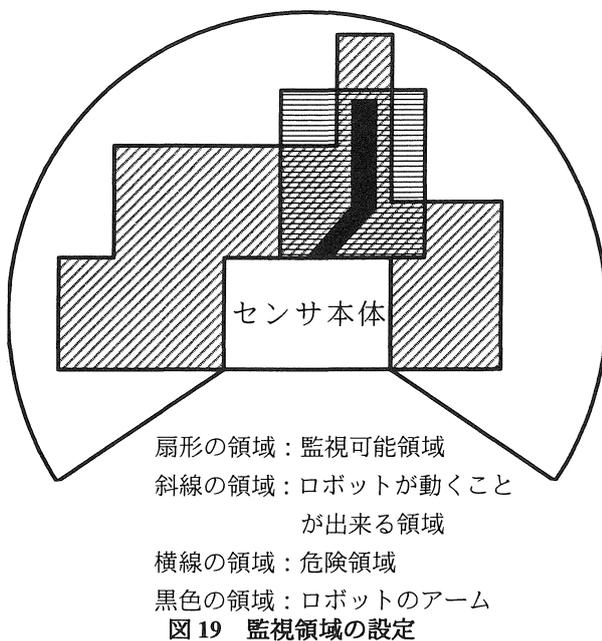


図 17 センサ出力電圧とマイコン表示電圧の比較



● : 実際の距離とセンサ出力の誤差  
○ : センサ出力とマイコン電圧との誤差  
図 18 1次元測定における距離-誤差特性



次に図 19 に示すような 2 次元における監視を行った。2 次元での動作確認と、監視角の測定のために監視領域を固定にして測定を行っている。受信信号の取込間隔は実行時間に余裕を持たせるために、1ms (7.2°) ごとに取込を行う設定をした。また、便宜上、同期信号取得の位置を 0° としている。図に示すように、横線の領域が危険領域、斜線の領域がロボットが動くことが出来る領域である。マイコンでの監視においては、斜線の領域の監視を行っているため、危険監視領域よりも広い範囲を監視し、障害物が危険領域内に侵入する前にロボットを停止させることが出来る。

§7 まとめ

本研究では、距離 0.5~4.5m の範囲を 10cm 以内の誤差で測定できる小型で安価な安全エリアセンサ装置の試作をして測定を行った。この方式を用いることにより、価格が高くなる高周波カウンタを使用したセンサ、小型化が難しい三角測量を用いたセンサでは実現が困難である安価で小型なセンサを作成することが出来た。

1 次元測定では、3m までの距離を障害物の種類に関係なく誤差 10cm 以内で測定することが目標であったが、本研究ではその目標を達成することが出来た。そして、マイコンを用いて行った危険判断でも上記の目標を達成した。この目標を達成するために、さらに精度を高め、測定可能な距離を伸ばすためには、ノイズを低減する必要がある。そのため配線の短縮及び、フィルターの適用、受光部分を機械的に微調整できるようにするなどの改良すべき点がある。これらの問題を解決するための方法の 1 つとして 1BOX 化が有効であると考えられる。

また、2 次元測定では監視可能範囲内の複数の障害物を検出し、マイコン内でその存在を把握することが出来た。今後は、プログラムを改良することにより、稼働領域内に存在する動く障害物を検出し、危険領域内に侵入する前にロボットを一時停止させることが出来ると考えられる。

参考文献

- 1) 労働省安全衛生部安全課：産業用ロボットの安全必携、p.15、中央労働災害防止協会、東京、1999
- 2) レーザハンドブック レーザ学会 オーム社  
(受理 平成 14 年 3 月 19 日)