

距離－電圧変換方式による安全エリアセンサに関する研究

Study on Safety Area Sensor with Distance-voltage Transfer Method

坂野 直仁[†]、津田 紀生^{††}、山田 諄^{††}
Naohito BANNO, Norio TSUDA, Jun YAMADA

Abstract : Recently, many robots are used in the factory. So it is necessary that they are equipped with the safety sensor to avoid a collision between the man and the robots. The laser distance meter is generally expensive because it needs the high frequency-driven counter. A new type of area sensor with Distance-voltage transfer method by semiconductor laser, which does not need such a counter, has been studied. In this method, the time difference in proportion to the distance is observed by the averaged voltages which are obtained as the logical product between the transmitted and the received signals. The reflectivity of the obstacle depends on the surface. This sensor is designed to avoid the influence of the obstacle reflectivity. This sensor is able to detect a distance up to 3m within 10cm error. Also, it is possible to detect some obstacles around the sensor by scanning the laser. This study will realized the safety system that can observe the varying danger area synchronizing to the robot's motion.

1. はじめに

日本の産業用ロボットの普及状況は、産業用ロボット業界において 1980 年をロボットの普及元年と称したように、大企業ばかりでなく、中小企業も盛んにロボットを使い始め、その使用台数は増加の一途をたどっている¹⁾。その結果、産業用ロボットを使って作業をする人々と、ロボットとの接触による事故が起こる可能性があり、安全対策が必要である。

現在、安全対策を実現する手段の基本はガードであるとされている。これは、柵や囲いの中にロボットを閉じこめるというものである。最近では安全ドアスイッチや、光カーテンと呼ばれる光線式安全装

置が使用されている²⁾。しかし、これらは、ロボットの作業領域全体を監視するため、使い勝手の上から見ると決して最良な方法とは考えられない。

このような安全装置のうち、レーザ式エリアセンサは監視範囲を任意・多重に設定することが可能で、危険領域を最小限にとどめることができる可能性がある。そこで本研究では、エリアセンサとコンピュータを用いることにより、ロボットの動きに合わせて監視領域を変化させ、効率的な接触事故の回避が行える安全エリアシステムの実現を目的としている。

光を用いてエリアセンサを実現させる場合、一般的な距離計のように距離に対する時間差をカウンタで計測する方法では、高周波で駆動するカウンタが必要とされ、一般に高価なセンサになる。

安全エリアセンサは安価・小型に実現できなければならない。また、数十cm～数m程度の範囲を、誤差 10 cm程度で知ることができればよい。本研究では、試作するセンサの実用化への目標として、3m

[†] 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)
^{††} 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

程度までの距離を 10 cm 程度の誤差で知ることとした。これを実現するために、高周波カウンタが不要な距離-電圧変換方式を新たに提案し、小型の半導体レーザを用いて簡便なエリアセンサを試作した。その特性を調べた結果、本研究における目標を達成できることがわかったのでここに報告する。

2. 距離-電圧変換方式による距離測定の原理

2.1 光を用いた一般的な距離測定の原理

レーザは直進性がよいことから、距離計として、特に長距離の測定に用いられることが多い。一般的な、光を用いたこれらの距離計は、カウンタを用いて時間差・位相差を計測するものであり、主に 10m ~ 数 km の範囲を計測するのに使われる。

しかし、安全エリアセンサとしては、ロボットの作業範囲中の障害物を検出するため、数十 cm ~ 数 m の距離範囲を検出できなければならない。ここにクロック周波数 10MHz のカウンタを用いた距離計の場合、距離にして十数 m の誤差が生じることになる。これを改善するには数 100MHz 以上のクロックを持つような、より高周波のカウンタを用いなければならない。高度な技術を必要とし、個々の部品にもより高価なものを使わなければ実現が困難である。ロボット一台に取り付けるセンサとしては安価に実現できる方が望ましく、また、容易に実現できる回路は一般に小型化も容易である。

近い距離を測定する方法には三角測量法がある³⁾。これは、レーザ光を照射し、散乱光をレンズで集光することによって光が結像される位置を、位置検出器を用い、三角形の相似を利用することによって距離を求めるものである。この方式による検出範囲は原理的にはどのような距離でも測定が可能とされるが、実際には数mm ~ 数十cm程度であり、ロボットに取り付けるエリアセンサとしては不向きであると言える。

従って距離数十cm ~ 数 m 範囲の距離を知るようなエリアセンサには、今までにない、簡単な装置で実現できる新しい原理を考える必要がある。

2.2 距離-電圧変換方式による測定原理

ここで提案する距離-電圧変換方式は、カウンタを用いた距離測定の原理とは別の、より簡単な装置で実現できる測定原理である。この測定原理は時間差をカウンタで計測するのではなく、時間差によ

て得られる面積の大きさを知ることによって距離を得るものであり、高周波のカウンタを必要としない。

図 1 に距離-電圧変換方式による距離測定の原理図を示す。レーザに変調をかけて照射した光(送信信号)とその戻り光(受信信号)の間には距離に応じた時間遅れが生じるが、図 1 に示すように、送信信号と受信信号との論理積による波形(図中の演算処理 V_1 に相当する)は、時間遅れ、即ち距離によって演算処理した波形の面積が変化する。遠い距離になればなるほど、共通する面積が少なくなるので、この演算処理した波形に対して平均を取れば、測定距離に応じた直流の電圧が得られることになる。これを、測定距離をアナログ的に直接電圧として得ていることから、距離-電圧変換方式と呼ぶことにする。

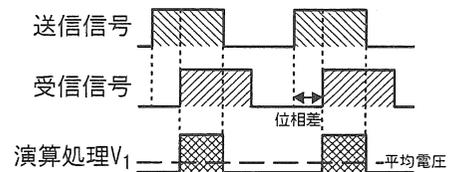


図 1 距離-電圧変換方式による測定原理

2.3 受信信号の幅が変化した場合の処理

距離-電圧変換方式において、重要なのは共通面積の大きさである。しかし、障害物の色や種類、形状によってその反射率が異なるため、得られる反射光量に差があり、反射光量の大きなものは受信信号を増幅させた結果、信号の幅が広がり、逆に反射光量が不足していると、信号の幅が狭くなる。

図 2 は、信号の幅が変化したときの出力電圧の影響とその処理方法について示した図である。この図において、受信信号が破線のように変化した場合、演算処理 V_1 において、破線部分まで面積が減少する。従って、このまま面積の比較だけで距離を得ようとすると、同じ距離でも材質や向きによって出力電圧が変化してしまい、誤差となることが考えられる。そこで、送信信号に対する反転信号を作り、この反転信号と受信信号について論理積を得ると、図 2 の演算処理 V_2 ように、送信信号との論理積では得られなかった部分が得られる。受信信号の波形の変化が左右対称であると仮定すると、拡がりを持った面積は演算処理 V_1 と V_2 の両方に等しく含まれていることになる。 V_1 と V_2 の平均をそれぞれ取り、そ

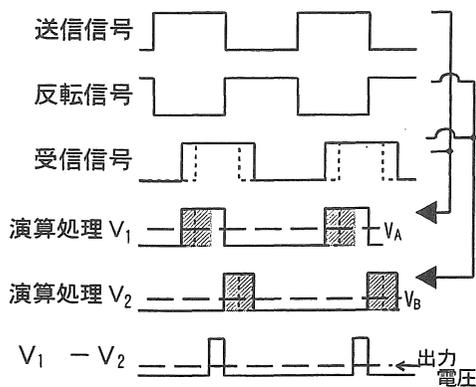


図 2 信号幅が変化したときの演算処理

の差を取ることによって図中の斜線部、即ち信号幅の変化部分は互いに打ち消し合い、必要な位相差の成分のみが含まれることになる。

3. エリアセンサの構成

3.1 光学系

本研究では、まず一次元の距離センサを試作し、距離-電圧変換方式による距離測定が有効であることを確認した。次にこの結果を踏まえて二次元のエリアセンサを試作し、この特性について調べた。試作したエリアセンサの構成図を図3に示す。このセンサは投光部と受光部、スキャニング装置と測定回路に分けられる。エリアセンサとして動作するにはレーザー光をスキャニングすることによって、センサ周辺の障害物を検出できなければならない。そこでこのセンサには光学系として、投光の光軸と受光の光軸が一致する単眼式を用いた。

投光部は光源として波長 780nm、出力 3mW の半導体レーザー(LD)を用い、これに正弦波の変調をかける。このレーザー光を距離 5m 程度で集光するように

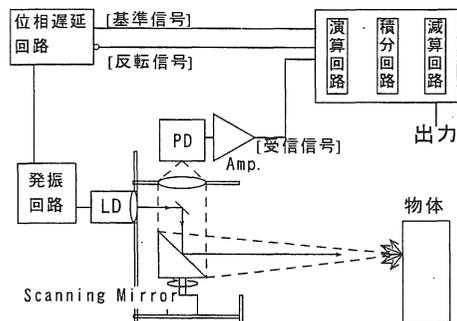


図 3 エリアセンサ構成図

大きさ 10φ、焦点距離 10mm のレンズを用いた。

一般にレーザをスキャニングするにはポリゴンミラーが用いられる。しかし、本センサでは散乱光を受光する必要があり、より多くの戻り光を得なければならない。サイズの大きいポリゴンミラーは入手が困難であるため、広い面積を持ったミラーを用いた方が実用的であると考え、ここでは 50 mm×50 mm のミラーを用いることにした。また、大きさ 12.5×17.5mm のミラーを使って、レーザ光をスキャニングミラーに入射させている。

散乱光を受光するため、受光には大きさ 50φ、焦点距離 81.4mm のレンズを用いている。受光素子にはフォトダイオード(PD)を用いた。

3.2 測定回路

一次元距離センサによる距離測定では、はじめにレーザを方形波で変調して距離測定を行うセンサを試作した。方形波変調センサでは増幅回路における S/N が悪く、拡散反射体による距離測定ができなかった。そこで周波数を選択的に増幅フィルタを適用できるよう、正弦波変調センサを試作した。この方式による拡散反射体での距離測定が行えることを確認できたので、エリアセンサでは正弦波変調方式を採用した。

本センサはレーザに変調をかける発振回路、受光した信号を増幅させる回路、測定原理に基づく処理を行う演算回路、及び位相を調整するための位相遅延回路からなる。また、近い距離において信号の飽和を防ぐために光出力自動制御回路を追加することによってよりよい精度を得ることができた。

3.2.1 発振回路

半導体レーザを変調させるのに水晶発振子を用いて発振波形を得て、LD を発振させる駆動回路には市販の駆動用 IC(IR3C07)を用いている。測定原理に従うためには LD を方形波で変調させるべきであるが、受信信号の増幅段階でフィルタを使用するために正弦波を用いて変調をかけた。変調信号の周波数は 5.5MHz とした。

3.2.2 増幅回路

戻り光はフォトダイオードで受光の後、前置増幅器及び3段の増幅回路を経て増幅される。前置増幅器には雑音指数の少ない FET を用いた。また、信号

を増幅させる段階で信号を飽和させると位相が変化し、距離測定に影響を及ぼすことが分かった。そこで、増幅回路に入力保護抵抗を用い、さらに APC(Automatic Power Control)回路を追加した。

3・2・3 演算回路

演算回路では、測定原理で述べた処理を行う。即ち、送信信号と受信信号、反転信号と受信信号との論理積をとり、それぞれ平均を取った後、減算している。本実験では距離 5m までを往復するのに位相差にして約 60° 程度しか変わらないため、平均を取る際、増幅させている。ファンクションジェネレータを用いた、演算回路の位相差に対する出力電圧特性を図 4 に示す。この図から、入力信号が理想的な場合、出力電圧は位相差に対して直線的に変化することが分かる。また、位相差 0° 及び 180° を境にして変化の割合が逆転することが分かる。従って距離測定範囲内に位相差が 0° または 180° をまたぐような場合、正しい距離が得られないことになる。この為、回路を変更したときにこの不具合を修正できるようにするため、位相遅延回路を挿入し、送信信号の位相を調整するようにした。

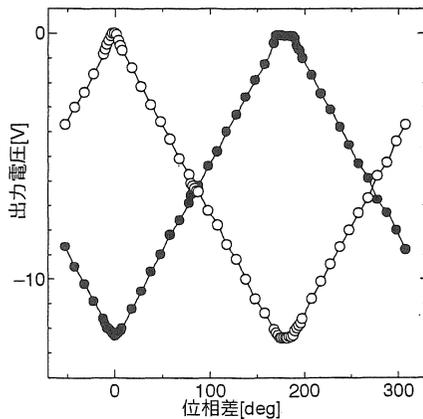


図 4 演算回路 位相差-出力電圧特性

4. 一次元距離測定の結果

このセンサの特性を知るために、ミラーの回転を止め一次元の距離測定の実験を行った。その実験結果を図 5 に示す。これは障害物として段ボール、プラスチック、布、白紙を用い、5 回測定して平均を取った結果である。図の直線は白紙を用いて 10 回の測定を行った平均値から、一次近似を行って得ら

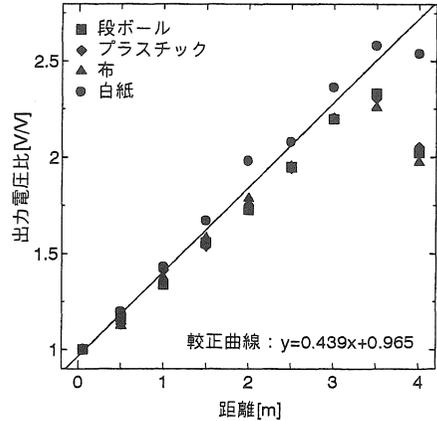


図 5 材質別距離-出力電圧比特性

れた距離-電圧比の較正曲線である。

横軸は測定距離を、縦軸には出力電圧比をとっている。本エリアセンサの出力電圧は、温度等の変化に対して利得や位相が変化しても、比をとることによってこれを打ち消すことができると考えられる。そこで、センサの出力として、測定点での出力電圧と、ミラーを回転させてセンサ本体でレーザー光が反射したときの出力電圧との比をとることにしたものである。これにより、実際に安全エリアセンサとして使用するとき LD が寿命になる・回路に不具合が発生する場合でも自己診断機能を持たせることができると言える。

図 5 から、センサの出力電圧は距離に対してほぼ比例して変化し、白い紙では 3.5m 程度までの距離測定が可能であることが分かる。遠い距離では較正曲線上に出力が得られなかったが、これは戻り光が弱く同相雑音の成分が無視できなくなったため、パルスの幅が極端に狭くなりすぎて演算に影響を及ぼしているためであると考えられる。

図 6 に白い紙での繰り返し誤差を示す。この図は減算処理による効果を比較したもので、黒丸が減算処理前、白丸が減算処理後の繰り返し誤差を表したものである。減算処理を行う前の出力はパルス幅の変化を考慮しない場合に相当し、図より減算を行うことによる効果が確認できる。

一般には障害物の色や種類によって反射率が異なり、戻り光の大きさは変わってくる。図 5 で、距離 3m 程度までは材質によらず、おおそ距離-電圧比較正曲線上に出力が得られていることから、減算による効果が確認できる。障害物の色別による距離測定の結果を図 7 に示す。この場合でも、材質別

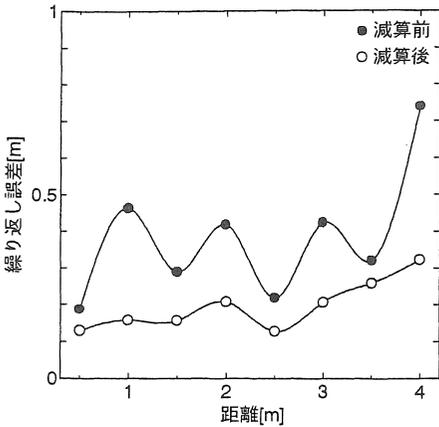


図 6 減算処理前後の誤差の比較

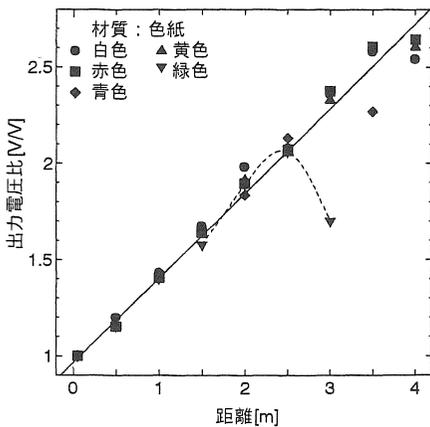


図 7 色別距離-出力電圧比特性

の実験と同様にある程度の反射率を持つものであれば一様に距離を検出することが出来た。緑色の出力の様子を点線で示しているが、光量が不足している場合、出力の値が次第に小さくなる点も同じであることがわかる。

これらの実験より、いずれの障害物においても遠い距離では出力が下がってくるが、この場合には、送信信号と受信信号との位相差が $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ であるため、距離が遠くなるに従って出力が大きくなる。ここで、受信信号の大きさが小さくなり、変換した方形波のパルス幅が極端に狭くなった時のことを考えると、論理積をとるときの共通面積も同様に少なくなり、減算処理を行っても、パルス幅の変化の影響が無視できず、より小さな出力電圧となることが考えられる。出力信号が小さくなると、距離として認識するときには、より近い距離として判断されることになる。従って、受光量の不足によって極端にパルス幅が短くなった場合でも、それは正しい

距離を示さない場合であるが、接触事故を未然に防ぐ方向にセンサが働くことになり、いわゆる Fail-Safe に対応して動作することが分かる。

この実験では、自動光出力調整回路が取り付けられておらず、近い距離において位相が変化する影響を十分取り除くことができなかった。その結果、近い距離での誤差が小さくならなかった。そこで、APC(Automatic Power Control)を付加し、10回測定を行った実験の結果を図8に示す。障害物は白紙である。この実験は誤差低減の確認を行う実験なので、外箱を閉じて測定した。また、前置増幅器のより安定した動作を得るためにこれを負帰還回路に改造した。距離-電圧比較正曲線の傾きの符号が前回と比べて異なるのは前置増幅器の変更のためである。

この繰り返し誤差を図9に示す。黒丸が改良前、白丸が改良後の結果である。この図からバラツキが前回と比べて十分抑えられていると言える。この測定において前は誤差の平均が距離 $0.5\text{m} \sim 3.5\text{m}$ で約 16cm だったが、距離 $0.5\text{m} \sim 4.5\text{m}$ で約 3.5cm という結果になった。これは本研究での目標を満たした実用的な値である。

距離-電圧比較正曲線からのズレを図10に示す。黒丸が改良前、白丸が改良後の結果である。ここでも十分な改善がされたことがわかる。この改良により、白紙と比較すると、距離 $0.5 \sim 3.5\text{m}$ に対して平均で 15.5cm のズレが 3.2cm になった。近い距離においてもズレが増えないことから、APCによる効果があることが分かる。

5. 二次元障害物検出の実験結果

スキャニングミラーを回転させると、センサ周囲の障害物を二次元的に検出できる。ミラーを回転させながら出力電圧を表示させると横軸が時間を、縦軸が電圧を表すが、横軸は走査しているレーザの方向に置き換えられる。この実験ではミラーを約 1700rpm で回転させた。また、障害物が検出されていない時の出力電圧は 0V を示した。図11が出力電圧の様子からおおよその処理を行って得た結果である。この図は、センサ中央から 30° ごとに、また、距離 1m ごとに目盛りをつけてある。太線は波形から得られたデータ、細い線の図形は障害物を表している。ミラーは図中の矢印の方向に回転しており、図中の A・B 間はセンサ本体に当たっている区間で

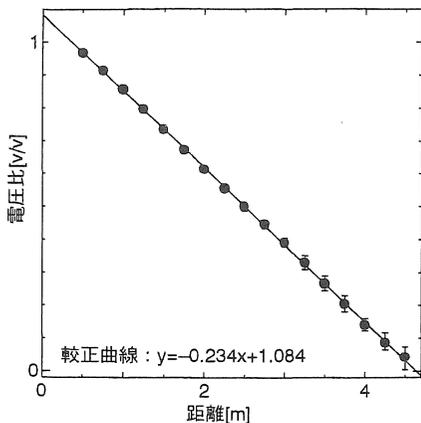


図 8 センサ改良後の距離測定

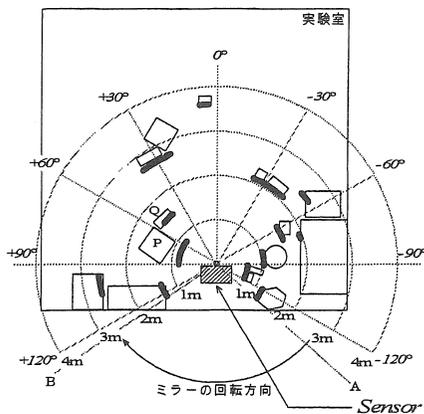


図 11 二次元障害物検出の結果

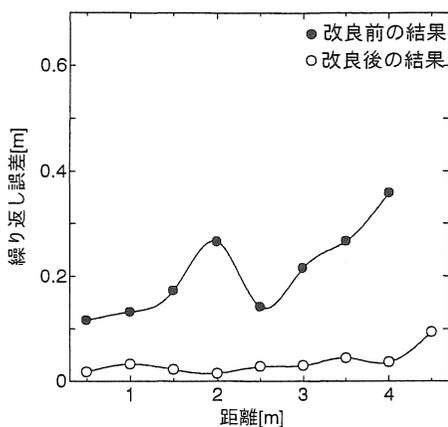


図 9 繰り返し誤差の比較

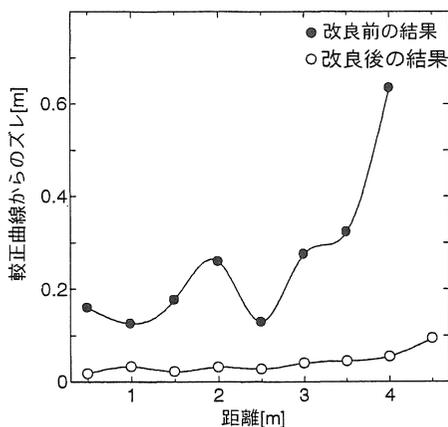


図 10 較正曲線からのズレの比較

あり、非検出領域である。ここから検出範囲がおおよそ 260° という広範囲で検出できているのが分かり、CCD カメラを用いたセンサと比べても広く検出できると言える。障害物として段ボールや紙などの材質が混じっており、色も白色の他に黄土色や灰色な

どが混じっているが図のように複数の様々な障害物を検出できているのがわかる。P と Q では、障害物の幅・距離が異なるが、図からもその違いが分かる。

6. まとめ

本研究では、距離 3m 程度までを 10 cm 以内の誤差で測定できるセンサを試作するという目標を定め、距離-電圧変換方式による距離測定を新たに提案し、具体的な距離センサを簡単な装置で試作し、実現方法について検討を行った。

本研究で試作したエリアセンサは、距離-電圧変換方式による距離測定が有効であり、減算処理による効果が十分であることを確認した。また、障害物の反射率がある程度あれば、距離数十 cm ~ 3m 程度の範囲を誤差 10 cm 程度で測定できることがわかった。さらに、ミラーを回転させ、センサ周囲の障害物を複数検出することが出来た。今後、このセンサがマイクロコンピュータを用いたシステムとして構築されることが課題である。

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) (社)実践教育訓練研究協会：安全管理技術, pp.137-141, (株)工業調査会, 東京, 1999.
- 3) レーザ計測ハンドブック編集委員会：レーザ計測ハンドブック, pp.134-135, 138, 丸善, 東京, 1993.

(受理：平成 12 年 3 月 18 日)