

5. 広大領域内の安全確認を目的とした レーザー式安全装置の開発と評価*

梅崎重夫**

5. The Development and Evaluation of the Laser System Safety Equipment for the Purpose of the Safe Confirmation in Large Scale Working Areas*

by Shigeo UMEZAKI**

Abstract: This report proposes a laser sensor using new pattern matching methods to confirm safety and normality. The searching area of this sensor was divided into three portions, that is a safe confirmation area, a normal confirmation area and an unidentified area.

The safe confirmation area was installed for the purpose of monitoring the absence of human in the moving area of the machine. The normality confirmation area was installed for the purpose of monitoring the malfunction of laser scanning. The unidentified area was installed for the purpose of changing the direction of laser scanning. The pattern matching was executed by getting laser beams from recurrent reflectors having special patterns (white and black stripes) located in each area.

By the development of this system, following results were obtained in this study:

- (1) The recurrent type laser sensor could detect the human body (for example, human fingers with at least 20 mm width) located over 30 meters apart from the detector, because the recurrent reflectors had a high reflectivity for the laser beam. On the other hand, the direct detection type laser sensor could not detect the human body only about 5 meters apart from the detector, because the human body had a low reflectivity for the laser beam.
- (2) The redundancy and incompatible detection was required for the signal processing circuit, and the triple redundancy and diversity with the self checking mechanism were desirable. On the other hand, the scanning unit could be the single channel, because the machine stopped immediately according to the logical formula (1) described in this report when any elements of the scanning unit broke down.
- (3) The machine also stopped immediately when the position moving of recurrent reflectors or the change of light environment (solar light condition, etc.) occurred in the optical system.

Keywords; Safety control, Laser sensor, Fail-safe, Self checking, Safe confirmation, Human detection system

* 本研究の一部は、日本機械学会第9回インテリジェント・システム・シンポジウム（平成11年11月27日）で発表した。

** 機械システム安全研究グループ Mechanical and System Safety Research Group

1. はじめに

大規模な生産システムでは、起動時の安全確認は作業者が広大な作業領域内を直接目で見て行う方法が一般的である。しかし、人の視認能力には生理的限界があるために、作業者による広大領域内の安全確認は相当な困難を伴う。そこで、本研究では、作業者に代わって広大領域内の安全確認を自動的に行う安全装置の開発を試みた。

上記の目的に使われる装置として、まず第一に考えられるのが光線式的安全装置である。しかし、大規模生産システムの内部領域は相当広大であるために、到達距離が高々数 m である通常の光線式安全装置では、この要求に対応できない。そこで、本研究では、通常の光と比較して遠方に到達し易いレーザー光を用いた安全装置を開発し、その有効性について検討した。

2. 拡散反射形と回帰反射形

レーザー光を利用した安全装置には、Fig. 1(a) に示す拡散反射形と呼ばれるものがある。これは、投光器から発光されたレーザー光をスキャンニング装置を使って検知領域内に順次拡散していき、このときに検知領域内からレーザー反射光が返ってこないことをもって人体や物体が存在していないと判断し、安全を確認する装置である。

この装置では、反射率の低い人体や物体から直接レーザー反射光を受け取るために、受光器に到達する反射光のエネルギーはきわめて微弱となり、通常は投・受光器の設置場所から 5~10m 程度離れた範囲位までしか検知領域を設定できないという問題があった。また、エネルギーが微弱であるために、ちょっとした光ノイズや電磁ノイズによっても、誤って運転許可信号を出力してしまうという問題があった。さらに、投光器の故障によってレーザー光の発光が停止したときは、人体や

物体を検知できなくなるという問題があった (Table 1 参照)。

これに対し、本研究では、レーザー光の反射方式を後述する回帰反射形とすることによって、上記諸問題の解決を試みた。ここで、回帰反射形的安全確認装置とは Fig. 1(b) に示すように検知領域内に反射率の高い回帰反射体を設けた反射板を設置して、この反射板から反射光が返ってきていることが常時確認できるとき、人体や物体が存在していないと判断し、検知領域内の安全を確認する装置である。これによって、検知領域を 30m 近くまで延長できる。

3. レーザー式安全装置のユニタ性

回帰反射形的安全装置は、投光器による光出力の発生から制御回路による運転許可信号出力の発生までの一連の過程において、故障時に誤って安全情報¹⁾を生成することのないユニタ²⁾な性質を持たなければならない。

いま、このことを一般的に示すために、回帰反射形的安全装置を Fig. 2 のブロック図で表し、各構成要素を K_J ($J=1,2,3,4,5$) とする。ただし、 K_1 は投光器、 K_2 はスキャンニング機構、 K_3 は回帰反射板、 K_4 は受光器、 K_5 は信号処理回路である。

ここで、作業者は Fig. 2 に示す検知領域に進入するものとし、作業者が検知領域内に存在していないときを $\bar{H} = 1$ 、存在しているときを $\bar{H} = 0$ で表す。また、各構成要素が正常であるときを $K_J = 1$ 、正常でないときを $K_J = 0$ で表し、各構成要素が正常でなくなったときの出力を K'_J で表し、出力ありを 1、なしを 0 とする。さらに、光環境が正常であるときを $L = 1$ 、正常でないときを $L = 0$ で表し、正常でなくなったときの反射光を L' で表し、反射光ありを 1、なしを 0 とすると、安全装置が出力する運転許可信号は次式で表すことができる。

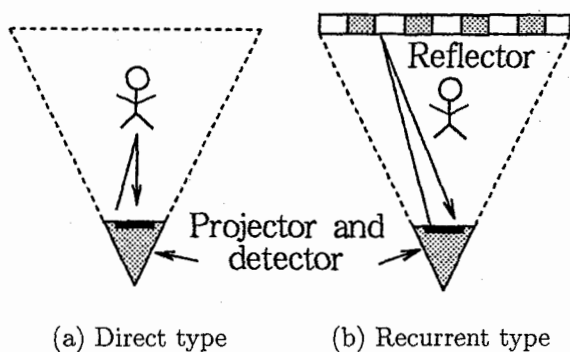


Fig. 1 Direct detection type and recurrent detection type.
拡散反射形と回帰反射形

Table 1 Comparison of failure effect between direct detection type and recurrent detection type.
拡散反射形と回帰反射形の故障による影響の比較

	When the human exists in the scanning area	When the projector becomes failure	When the human is absent in the scanning area
Laser sensor of direct detection type	Machine stop	Machine move	
Laser sensor of recurrent detection type	Machine stop		Machine move

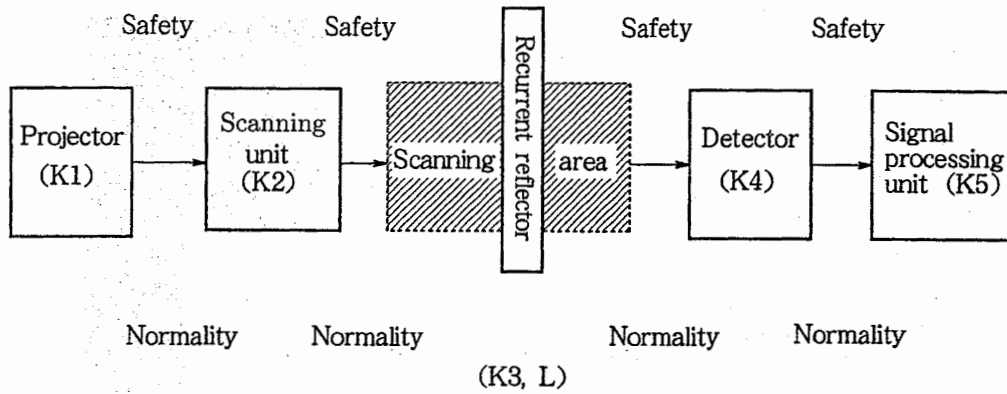


Fig. 2 The block diagram of laser system safety equipment.
レーザー式安全装置のブロック図

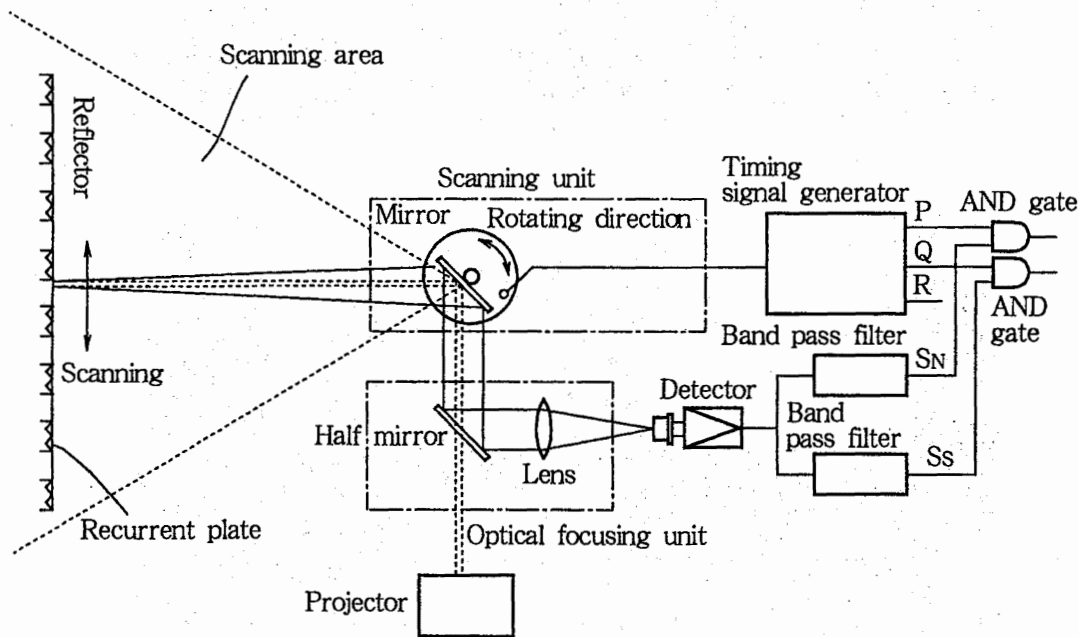


Fig. 3 The basic configuration of laser system safety equipment.
レーザー式安全装置の基本構成図

$$W = ((((((K_1 \vee \overline{K_1} \cdot K_1') \cdot \overline{K_2} \vee K_2 \cdot K_2') \cdot \overline{H} \cdot K_3 \cdot L \vee \overline{K_3} \cdot K_3' \vee \overline{L} \cdot L') \cdot K_4 \vee \overline{K_4} \cdot K_4') \cdot K_5 \vee \overline{K_5} \cdot K_5')))) \quad (1)$$

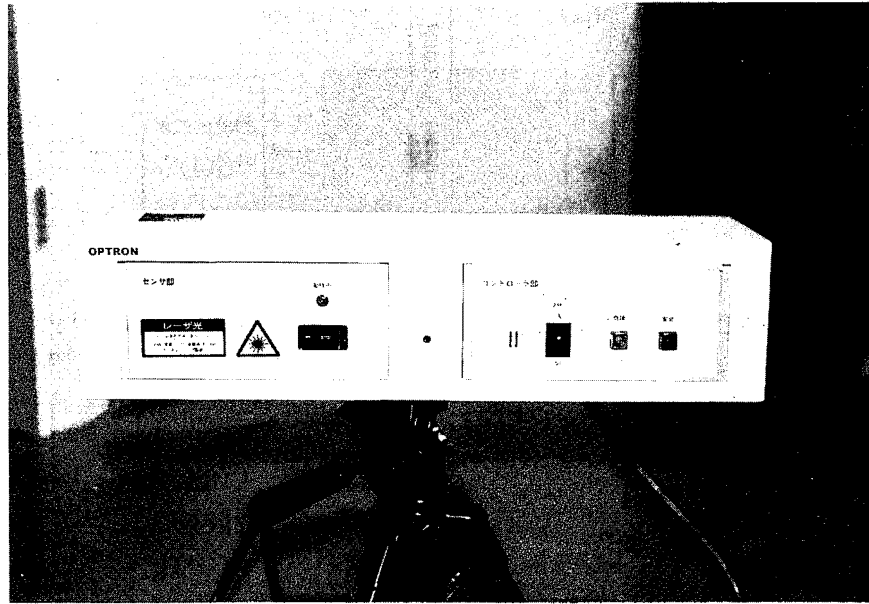
ただし、 $W = 1$ は機械の運転許可、 $W = 0$ は運転停止を意味する。

Fig. 2の装置をユニートなシステムとするには、 $\overline{H} \geq W$ なる関係を実現しなければならない。このためには、(1)式で次の条件を必要とする。

- ① $K_1' = 0$
投光器 K_1 の故障によって投光器出力が増大してはならない。
- ② $K_2' = 0$
スキャンニング装置 K_2 の故障によって検知領域の全域を走査できなくなつてはならない。

- ③ $K_3' = 0$
回帰反射板 K_3 の汚れ、脱落、位置ずれ等によって反射光が増大してはならない。
 - ④ $L' = 0$
光環境の変化（これには、外乱光の強度変化などがあげられる）によって誤って運転許可信号を出力してはならない。
 - ⑤ $K_4' = 0$ 及び $K_5' = 0$
受光器 K_4 や信号処理回路 K_5 の故障によって誤って運転許可信号を出力してはならない。
- 以上より、ユニートなシステムは次式で表現することができる。

$$W = \overline{H} \cdot L \cdot \prod_{J=1}^5 K_J \quad (2)$$



(a) 装置の外観



(b) 回帰反射板

Photo 1 The appearance of laser system safety equipment.
レーザー式安全装置の外観

(2) 式は、検知領域内に作業者が存在せず、かつ光環境が正常で、かつ装置のすべてが故障していないときに限って安全装置が運転許可信号を出力することを示している。

4. 試作した安全装置の構成

4.1 装置の基本構成

以上のうち、⑤に対しては装置の多重化や自己診断

によって故障対策を行うという方法が実施されている。一方、①～④に対しては、上記のような方法は故障対策としては有効でない。

そこで、本研究では、これらの問題に対処するために、レーザー光の走査領域を、人体や物体が検知領域内に存在していないことを確認するための「安全確認領域」、装置が安全確認領域の全域を正常に走査していることを確認するための「正常確認領域」、安全確認領域と正常確認領域のいずれにも属さない「未確認領

域」の三領域に分割することによって、安全確認領域内へ人体や物体が進入したときだけでなく、投光器出力の増大、スキャンニング装置の故障、回帰反射板の汚れ・脱落、光環境の変化等が起きたときでも確実に運転許可信号の出力が停止できる装置の開発を行った。

以後、これを回帰反射形の安全・正常確認装置と呼ぶ。

Fig. 3 は、本装置の基本構成図である。Photo 1 に、本装置の外観と回帰反射板を示す。

この装置は、レーザー光を発光する投光器と、レーザー光を鏡面に当て鏡面を設定角度だけ回転させることで所定の領域内にレーザー光を拡散させるスキャンニング装置と、回帰反射体を設けた反射板と、レーザー光をハーフミラーとレンズを用いて集光する集光装置と、集光装置が集めたレーザー光を電気信号に変換する受光器と、受光器が発生する電気信号を処理する信号処理回路を備えている。なお、集光装置としては、ハーフミラーとレンズの一方だけ、又はこれら以外の集光装置を用いることもできる。

4.2 安全確認領域と正常確認領域の設定

Fig. 4 は、本装置の安全確認領域、正常確認領域及び未確認領域と、反射板及び回帰反射体の配置図である。この装置では、レーザー光が走査する領域の両端に未確認領域を設け、その内側にレーザー光による走査が安全確認領域の全域に及んでいることを確認するための正常確認領域を左右に設けるとともに、左右の正常確認領域の間に人体や物体の全部又は一部が存在していないことを確認するための安全確認領域を設けている。ここで、未確認領域を設けるのは、レーザー光の走査が検知領域の両端に到達したときは、走査速度の減速と走査方向の反転が必要であるために、このような領域については安全及び正常確認を行えないためである。

また、この装置では、安全確認領域に設置した反射板と正常確認領域に設置した反射板に、所定のパターン（所定の幅、個数又は設置間隔）を持った回帰反射体を設けている。これは、レーザー光の走査時に、回帰反射体が存在している箇所と、存在していない箇所でのレーザー光の反射率を著しく違ったものとして、回帰反射体の配置に応じた特定のパターン（特定の時間幅、周波数又は時間間隔）を有する電気信号を受光器に出力させるためである。

さらに、この装置では、安全確認領域の反射板に設けた回帰反射体のパターン（幅、個数又は設置間隔）と、左右の正常確認領域の反射板に設けた回帰反射体のパターン（幅、個数又は設置間隔）を異なるものとしている。これは、各領域の走査時に受光器から発生する電気信号のパターン（時間幅、周波数又は時間間隔）を異なるものとし、これによってレーザー光が安全確認領域と正常確認領域のいずれの領域を走査しているかを区別できるようにするためである。

4.3 正常確認の方法

上記のような構成の下で正常確認領域をレーザー光で走査したときは、装置が正常であり、かつ正常確認領域に人体や物体の全部又は一部が存在していなければ、受光器には Fig. 5 の S_N のようなオン/オフ波形で所定の時間幅を有するものが、所定の周波数、所定の時間間隔で発生する。また、安全確認領域をレーザー光で走査したときは、Fig. 5 の S_S のようなオン/オフ波形で所定の時間幅を有するものが、所定の周波数、所定の時間間隔で発生する。以後、これらの波形を「正常パターン」と呼ぶ。

この正常パターンが受光器から発生しているときは、安全と正常の両方が確認できているとして、運転許可信号を出力する。

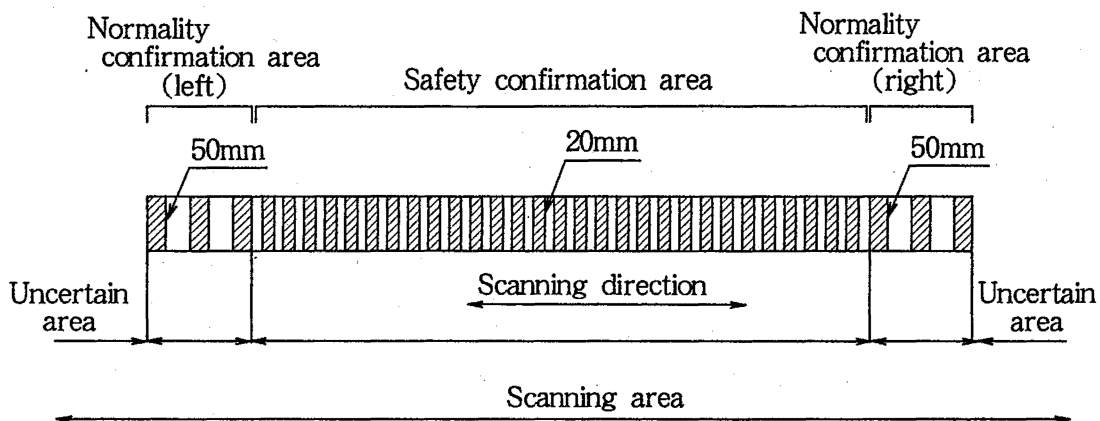


Fig. 4 The physical location of the scanning area for confirming safety and normality.
安全確認領域と正常確認領域の配置図

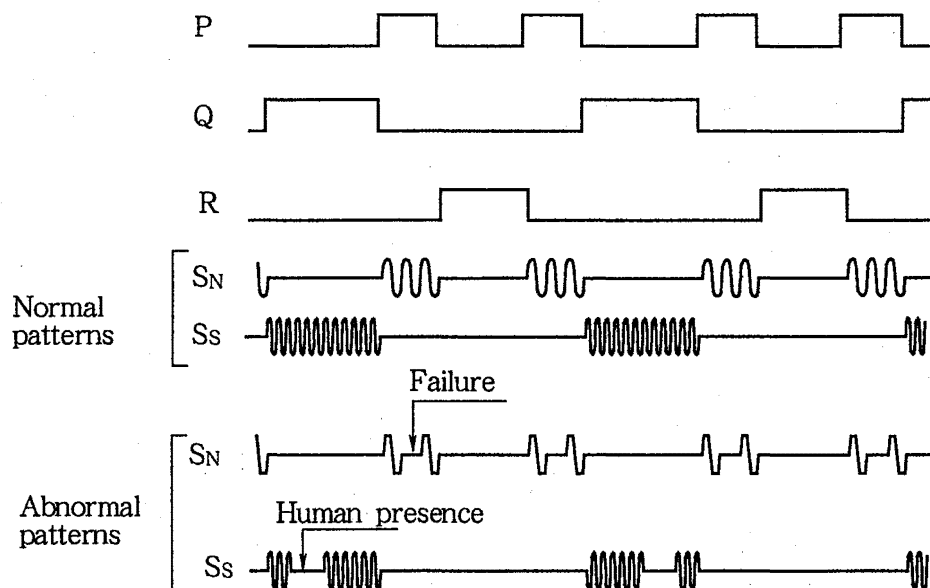


Fig. 5 The output signals from the detector when the human exists in the safety confirmation area and the laser scanning becomes multifunctions.
 人体が安全確認領域に存在するときとレーザーのスキヤニングが故障したときの出力信号

これに対し、安全確認領域または正常確認領域に人体や物体の全部又は一部が存在しているときは、出力信号 S_N と S_S は Fig. 5 のような異常パターン（直流信号）となって、正常パターンから外れる。また、故障によって投光器の発光が停止したとき、スキヤニング装置の故障によってレーザー光が安全確認領域の全域を走査できなくなったとき、光環境が変化したとき（これには、外乱光の強度変化、投光器から発光する光の強度変化、光学系の汚れによる受光感度の変化などがあげられる）、又は反射テープがずれたり汚れたりしたときも、出力信号は正常パターンから外れる。よって、このときには運転許可信号の生成を停止させる。

5. 信号処理回路のフェールセーフ化

本研究では、信号処理回路の故障対策として以下の3方式を検討した。

5.1 回路のフェールセーフ化

この方法は、信号処理回路にフェールセーフ化を施すことによって故障対策を行おうとするものである。Fig. 3 に、フェールセーフな信号処理回路のブロック図を示す。この回路は、タイミング信号発生器、帯域フィルタ、及び AND ゲートから構成されている。

図で、タイミング信号発生器は、正常確認領域、安全確認領域及び未確認領域の走査時にそれぞれオン信号となるタイミング信号 P , Q , R を発生させるための回路である。この回路では、各領域の走査時に同期したオン信号を発生させるために、Fig. 6 に示すような

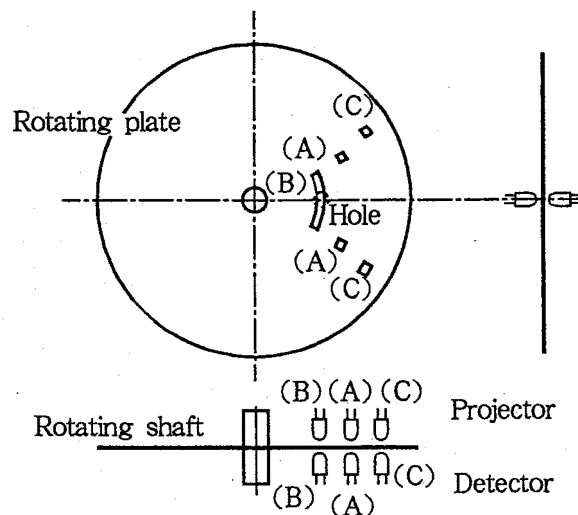


Fig. 6 The structure of timing signal generator for executing pattern matching.
 パターン・マッティングを行うためのタイミング信号発生器の構造

位置関係で面板に穴 A（正常確認領域の走査時に通光となる）、B（安全確認領域の走査時に通光となる）、C（未確認領域の走査時に通光となる）と光電センサの投・受光器 A（パルス P を生成）、B（パルス Q を生成）、C（パルス R を生成）を設けておく。

以上のような構成とすれば、レーザー光が正常確認領域を走査しているときは、光電センサの投光器 A から出た光は穴 A を通って受光器 A の出力信号をオンとする。また、レーザー光が安全確認領域を走査しているときは、光電センサの投光器 B から出た光は穴 B

を通過して受光器 B の出力信号をオンとする。さらに、レーザー光が未確認領域を走査しているときは、光電センサの投光器 C から出た光は穴 C を通過して受光器 C の出力信号をオンとする。

以上より、受光器からは所定のタイミング信号が発生できる。ただし、穴 A, B, C は各領域の走査開始時だけ光が通る構成とし、このときに受光器に発生する信号をトリガ信号としてタイミング信号を発生させることもできる。

次に、帯域フィルタは、正常確認領域の走査時に発生する周波数帯域の電気信号（すなわち正常パターン）だけを通過させ、他の電気信号は通過させない構成とする。

Fig. 7 は、本装置の帯域フィルタの構成図である。このフィルタでは、コイルとコンデンサによる直列共振回路で通過させる周波数が選択され、この周波数の電気信号はトランスを介してコイルとコンデンサによる並列共振回路に伝達されて、さらに通過させる周波数が選択される。これにより、Fig. 7 の回路を用いて正常確認信号 S_N を生成することができる。ただし、Fig. 7 の回路では、コイルとコンデンサによる直列共振周波数とコイルとコンデンサによる並列共振周波数は同一の周波数でなければならない。

同様に、帯域フィルタは、安全確認領域の走査時に発生する周波数帯域の電気信号（すなわち正常パターン）だけを通過させ、他の電気信号は通過させない構成とする。このための回路は、Fig. 7 と同じである。これにより、フィルタを使って安全確認信号 S_S を生成することができる。

以上のような方式によって正常確認領域、安全確認領域及び未確認領域の走査時間に対応するタイミング信号 P, Q, R を生成できる (Fig. 6 参照)。また、正常確認信号 S_N と安全確認信号 S_S を生成できる。ここで、P, Q, R が生成しているときを各々論理値 1, 生成していないときを論理値 0 の 2 値論理変数で表し、安全確認領域内に人体や物体が存在していないときを $S_S = 1$, 存在しているときを $S_S = 0$, 装置が正常であるときを $S_N = 1$, 正常でないときを $S_N = 0$ とすると、機械の運転許可信号 W は次式となる。

$$W = P \cdot S_N \vee Q \cdot S_S \vee R \quad (3)$$

ただし、 W は機械の運転許可を意味する 2 値論理変数であり、 $W = 1$ のとき運転許可、 $W = 0$ のとき不許可を意味する。また、「 \cdot 」は論理積、「 \vee 」は論理和を意味する記号である。

Fig. 3 の回路は、故障時に誤って運転許可信号を出力してはならない。このためには、回路内の電気信号を安全をオン信号、危険と故障をオフ信号に割り当て

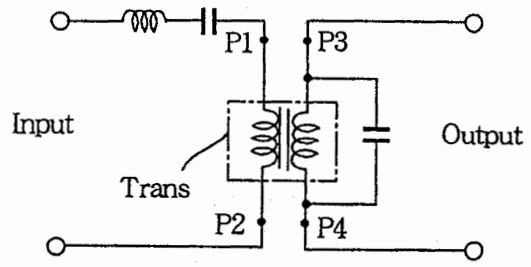


Fig. 7 The structure of band pass filter for executing pattern matching.
パターン・マッティングを行うためのバンド・パス・フィルタの構造

るとともに、受光器、AND ゲート、帯域フィルタを故障時に誤ってオン信号を出力しない構成としなければならない。

このうち、受光器と AND ゲートについては、このような性質を持つ素子が既に市販されている。また、帯域フィルタの故障モードとしては、Fig. 7 の P_1, P_2, P_3, P_4 の箇所の断線が考えられるが、これらの故障の発生時はいずれも帯域フィルタからの出力信号は発生しない側となる。よって、Fig. 3 の回路は、故障時に誤って運転許可信号を出力しない構成とすることができる。

以上のように、本研究で提案する回帰反射形の安全・正常確認装置では、人体や物体の全部又は一部が安全確認領域に進入したときだけでなく、投光器の発光停止、受光器や信号処理回路の電気的故障、スキャンニング装置の故障、光環境の変化が起きたときでも、運転許可信号の出力を停止できる。これは、拡散反射形のレーザー装置にはない特徴である。

5.2 回路の二重化不一致検出

この方法は、信号処理回路を二重化し、二個の回路の出力が常に同じであるときに限って機械の運転許可信号を出力しようとするものである。したがって、二個の回路の出力が不一致のときは、機械の運転許可信号の出力は停止する。

なお、この回路では、出力リレーには強制ガイド式の安全リレーを用いて接点溶着に対処している。

5.3 異種冗長化された安全コントローラの適用

この方法は、第 2 編で述べた異種冗長化（異なった種類の CPU による冗長化）された安全コントローラ²⁾を使って故障対策を行おうとするものである。このコントローラでは、異種のソフトウェアとハードウェアを持つプログラマブル・コントローラ（以下「PLC」と略記する）の三重化を行い、これらの三重化されたコ

ントローラの演算結果がすべて一致する場合に、機械の運転許可信号を出力する構成としている。以上のような装置は、きわめて高い非対称誤り特性を持つから、本装置の故障対策に応用できる。

6. システムの総合評価と今後の課題

本研究では、開発した装置を安全関係の専門家によって評価した。この評価では、機械学会交通物流部門関係の研究者・技術者や、見学や打ち合わせのために当所を来訪した多数の専門家の協力を得た。

この評価結果で特に注目すべきことは、港湾荷役関係の技術者の中で、本装置を高く評価する意見があったことである。これは、港湾荷役関係では、相当広大な領域を走行するガントリークレーンやストラドルキャリアがあるが、これらを対象とした適切な安全装置が見あたらないことによるためと推察される。また、鉄道関係の研究者は、踏切事故防止や乗客の転落事故防止のための安全装置として、本装置の実用化を強く要望していた。

一方で、画像処理の専門家からは、本装置の開発に疑問を呈する声もあった。これは、「画像処理を使えば、本装置でやっている程度のことは、容易に実現できるはずだ」というある電機メーカーの技術者の意見に集約される。しかし、画像処理を使用した場合、フェールセーフな特性は実現不可能である。しかし、高い機能を実現するという点で画像処理は優れている。したがって、今後は本研究で開発したフェールセーフな装置と、高い機能を持つ画像処理装置の階層化構成によって、安全で高い機能を持つ装置の実現を図っていきたい。

7. おわりに

以上、本研究で試作したレーザー式安全装置の概要

について述べた。この装置の特徴をまとめると、次のようになる。

- 1) 人体や物体によって反射されたレーザー光を受け取る拡散反射形でなく、検知領域内に存在する回帰反射板からの反射光を常時確認する回帰反射形であるために、検知領域を30m近くまで延長することが可能となった。
- 2) 安全確認領域の両端に、レーザー光が安全確認領域の全域を走査していることを確認する正常確認領域を設け、かつ、安全確認領域と左右の正常確認領域に設けた回帰反射板が特定のパターン（幅、個数又は設定間隔）を持つために、投光器出力の増大、スキャンニング装置の故障、回帰反射板の汚れ、脱落、位置ずれ、光環境の変化等が生じた場合でも、確実に機械の運転許可信号の出力を停止できる。
- 3) 安全確認領域、正常確認領域及び未確認領域の走査時に対応するタイミングパルスを発生させて、このタイミングパルスとセンサからの出力信号に論理演算を施すことによって、フェールセーフな信号処理を実現している。

今回の試作では、3)は理論的検討を行っただけで、試作には至らなかった。今後は、3)についても試作を行い、実用的な装置を完成させていきたい。

参考文献

- 1) 労働省、工作機械等の制御機構のフェールセーフ化に関するガイドライン (1998).
- 2) 三平律雄他、PSDIに何が起きているか、プレス技術、VoL.35, No.10, (1997), pp.116-121.

(平成14年1月10日受理)