

3. 安全制御のための基本要素

桑川壯一*, 杉本 旭*, 深谷 潔*
梅崎重夫*, 池田博康*, 清水尚憲*

3. Elementary Units for Safety Control on Fail-Safe Technology

by Soichi KUMEKAWA*, Noboru SUGIMOTO*, Kiyoshi FUKAYA*
Shigeo UMEZAKI*, Hiroyasu IKEDA* and Shoken SIMIZU*

Abstract: The safety control system has an interlocking structure, and its elements, i.e. AND gates and safety sensors, must have fail-safe characteristics. Therefore, in order to construct a safety control system such fail-safe devices are necessary. In this research, fail-safe devices were developed.

These devices are divided into two groups. One is a group of elementary parts, such as Integrated Circuits, which are used to construct fail-safe devices. The other is a group of safety sensors, such as human detectors, which are commonly used in the safety system.

These devices are summarized in the tables.

1) The ultrasonic sensor of pulse radar type have fail-safe features by self-checking. In every pulse emission, it examines itself. The construction of such sensor system and characteristics of sensor are described.

2) The conditions needed to photoelectric sensors for safety are clarified. These are noise compatibility and multi-beam function. The logical structure of fail-safe photoelectric sensor is clarified, and the circuit diagram and failure analysis of fail-safe photoelectric sensor are indicated.

3) A safety mat of vibration type was developed in order to overcome the defects of safety mats of mechanical contact type and PCR type. The conditions for fail-safe mat and the principle of mechanical vibration are clarified. The characteristics of the mat are indicated.

4) Fail-safe AND gate is one of the most basic elements of fail-safe signal processing. The fail-safe characteristic is obtained by oscillation and excess over power source level. Its circuit diagram is indicated and failure analysis is conducted.

5) Fail-safe window comparator (WC) is also one of the most basic elements of fail-safe signal processing. That distinguishes the signal between the upper and lower limits in a fail-safe manner. This is used for signal processing of sensors and makes a fail-safe sensor system. A circuit diagram with power supply and an input/output circuit is indicated and its failure analysis is conducted.

6) Fail-safe ON/OFF delay elements, which are the applications of fail-safe AND gate IC, have the delay function and the fail-safe feature. In ON delay the prolong of delay time is a safe side change and in OFF delay the shortening of delay time is a safe side change.

7) The intelligent relay is a relay system with fail-safe characteristic, i.e. a relay without

deposition. The conventional non-deposition relay has a short life because its contact is weak for the sake of non-deposition. This is the improvement upon non-deposition relay. With the help of semiconductor switch, such as thyristor, it can have long life. Usually thyristor cuts off the circuit and in case of thyristor failure, the non-deposition relay will cut off the circuit.

8) The hold monitor is a device which monitors the hold condition of machinery. When it finds unexpected start of motion, it cuts off the electrical power supply. To say it more precisely, it allows power supply to the machine only in static condition and cuts off power in case of start of machine motion. The system configuration, the structure of mechanical window switch, i.e. mechanical hold monitor sensor, and the characteristics of sensor are described.

Key Words: Safety, Safety System, Safety Control, Interlocking, Fail-Safe, Safety Sensor

3.1 インタロックを構成するための基本要素

安全作業システムでは、人間の側に誤りが生じた場合にも、これに起因して人間が災害に至ることのない特性が要求される。この特性を実現するための手段がインタロックである。

インタロックは人間側の誤りだけでなく、インタロック（またはその構成要素）自身に誤り（故障など）が生じた場合にも、誤って機械側の運転出力を生じない特性が要求される。しかし、既存の電氣的・機械的要素（IC、制御回路、メカ・ブレーキ等）を利用してインタロックを構成した場合は、これ自体が故障すると誤った運転出力が生じるおそれがある。

そこで、前章で述べたフェールセーフ技術を利用し

て、インタロック（またはその構成要素）自身に故障や劣化、外乱、内部雑音、電源異常等の誤りが生じた場合には、誤って機械側の運転出力を生じない要素（デバイス）を各種開発した。これらのうち、安全作業システムを構成する際の最も基本となる要素を「安全制御用基本デバイス」と呼ぶ。

Table 3.1-1 ~ 3.1-4 は本研究で開発した安全制御用基本デバイスである。本章では、これらの要素のうち代表的な例について解説する。他については巻末に記載した文献を参照されたい。

3.2 超音波パルスレーダ型センサ^{1,2,3)}

3.2.1 はじめに

産業現場における製品等の搬送作業に、無人搬送車

Table 3.1-1 Elementary units for safety control on fail-safe technology (Basic element)
安全制御用基本デバイス（基本的要素）

No.	名称	デバイスの概要
1	フェールセーフ ウィンドウ・コンパレータ (3.6 節参照)	入力電圧が、ある定められた範囲（ウィンドウ）内にあるときに限り、ON 信号を出力する回路。回路を構成するどの要素が故障、劣化しても、誤って ON 信号を出力しない。
2	フェールセーフ AND ゲート (3.5 節参照)	二つ以上の入力電圧全部が予め定められた範囲内にあるときに限り、ON 信号を出力する回路。回路を構成するどの要素が故障、劣化しても、誤って ON 信号を出力しない。
3	フェールセーフ フォト・インタラプタ	フォト・インタラプタによる光結合を利用して、[2]の AND ゲートの耐ノイズ性を向上させたもの。
4	フェールセーフ ON デイレー (3.7 節参照)	立ち上がり（ON 信号）を一定時間だけ遅らせて出力する回路。故障や劣化により遅延時間が短くなってはならない。
5	フェールセーフ OFF デイレー (3.7 節参照)	立ち上がり（OFF 信号）を一定時間だけ遅らせる回路。故障や劣化により遅延時間が長くなってはならない。

Table 3.1-2 Elementary units for safety control on fail-safe technology (Safety sensor)
安全制御用基本デバイス（安全確認手段または安全センサ）

No.	名称	機能	特徴
1	透過型光線式 安全装置 (3.3 節参照)	対向している投光, 受光器間に常時光を通し, その光線を人間が遮光していないときに限り安全信号を出力するセンサ。	従来の光線式安全装置の次の点を改良した。 (1) 信号処理回路をフェールセーフ化した。 (2) 外乱光の影響を受けないよう光を変調させて発光し, 受光器側ではきわめて Q の高いメカニカル・フィルタで検定する方式とした。 (3) 異なる組の投・受光器間で相互干渉が起らないようにした。 (4) 電源による雑音の影響を最小とした。
2	シールドビーム ¹⁶⁾ センサ	人間がチューブに触れていない間は, 安全信号を出力するセンサ。	[1]の装置の投・受光器間をゴムチューブで継いだもの。 (1) 投・受光素子のレンズ汚れなし。 (2) 光軸合わせが容易。 (3) 視認できるため, 不用意な接触を防げる。
3	フェールセーフ マットスイッチ (3.4 節参照)	人間がマットに乗っていない間は, 安全信号を出力するセンサ。	人間がマットに乗っていない間は振動系を振動させ, 人間がマットに乗ったときは振動が停止する構造の振動検知型安全マット。 (1) 人間がマットに乗る…振動停止 (2) 人間がマットに乗っていない…振動継続 (3) マットへの外乱ノイズの侵入…少なくとも, 人間がマットに乗ったときは振動停止 (4) マット本体の故障, 劣化…振動停止 (5) 接触不良, 断線, 短絡…安全信号停止
4	フェールセーフ 超音波センサ (3.2 節参照)	超音波が人間や障害物によって反射されていない間は, 安全信号を出力するセンサ。	発音器の近くに取り付けた反射板からの反射波を受信し, センサが正常であることを確認。これにより, 従来のセンサをフェールセーフなものに改良できる。

Table 3.1-3 Elementary units for safety control on fail-safe technology (Gate)
安全制御用基本デバイス（論理積判断要素またはゲート）

No.	名称	機能	特徴
1	非溶着リレー (3.9 節参照)	突入電流等の大電流が生じて, 接点溶着を生じない電磁リレー。	銀/炭素接点の使用により, 非溶着性を保証している。
2	フェールセーフ AND ゲート (3.5 節参照)	Table 3.1-1 に同じ。	Table 3.1-1 に同じ。

が利用されている。この搬送車は, 工場内の作業者の通行と交差する場合が多く, 安全に運行するうえで障害物検知が不可欠となる。本報告で扱う超音波パルスレーダは, この障害物検知用センサである。

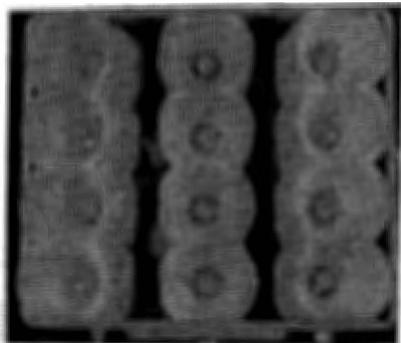
安全を確認するためのセンサは, センサが故障した時に危険を示す信号（危険信号）を出力する特性, すなわちフェールセーフな特性が求められる。しかし, レーダ型のセンサでは, センサ自身の故障により, 誤って安全を示す信号（安全信号）が生成される。従って, レーダ型センサで故障時必ず危険を示す信

号を生成するには, 特別な処理（振幅軸上のフェールセーフな信号処理）を必要とする。

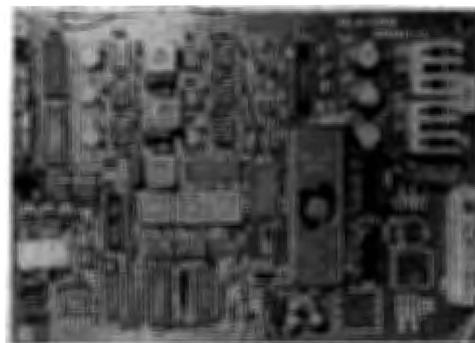
一方, パルスレーダ型センサは, 送受波器の前方の所定範囲を監視する機能を有するが, この監視距離は送信パルスが反射して戻ってくるまでの所要時間を計測することによって定まる。この時間計測に誤りが生じて, 監視される距離が短くなる場合, 危険側の誤りを意味する。よって安全であるためには, 時間軸上で誤り方を制限する処理（時間軸上のフェールセーフな信号処理）を必要とする。

Table 3.1-4 Elementary units for safety control on fail-safe technology (Hold monitor)
安全制御用基本デバイス (ホールド停止監視装置)

No.	名称	機能等	特徴等
1	ホールド停止監視装置 (機械式) (3.9 節参照)	ホールド状態のとき、故障やノイズの影響でアクチュエータが不意作動した場合は、直ちに電源を遮断して、アクチュエータを完全停止させる装置。 機械式のもの。	①通常作業時は、電磁コイルへの通電によって、駆動軸（アクチュエータ側）と従動軸（センサ側）を離しておく。 ②人間が機械の可動空間内に立ち入るときは、電磁コイルの通電を切り、駆動軸と従動軸を結合させる。 ③万一、故障やノイズによりアクチュエータが暴走したときは駆動軸が回転するから、これに従い従動軸やアームも旋回し、これがマイクロスイッチを動作させて駆動源を OFF とする。
2	ホールド停止 ¹⁷⁾ 監視装置 (電気式)	同上。 電気式のもの。	モータ電流を電源センサで監視することによってアクチュエータの暴走監視を行う。 ここで用いる電流センサは、過飽和磁性体コアにモータ電流用巻線と検出用巻線を巻いたもので、モータに電流が流れていないときに検出出力が大きく、電流が流れると出力が小さくなるから、フェールセーフなセンサが構成できる。



(a) センサ

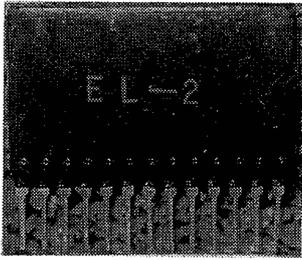


(b) 制御回路

Photo 3.1-1 Ultrasonic sensor.
超音波センサ



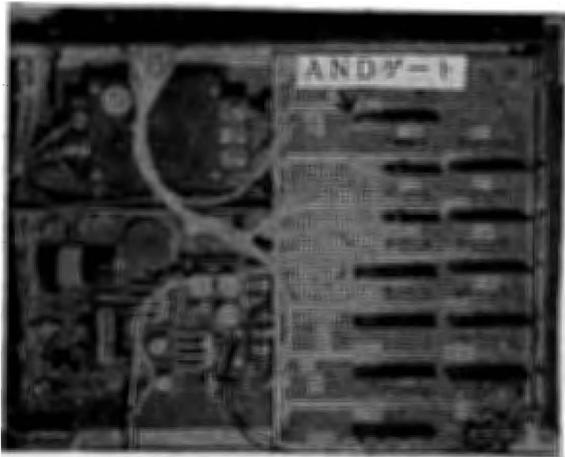
Photo 3.1-2 Shield-beam sensor.
シールドビームセンサ (産業用ロボットへの適用)



(a) IC化した素子



(a) 装置の外観



(b) 応用回路

Photo 3.1-3 Fail-safe AND gate.
フェールセーフ・AND ゲート



(b) 産業用ロボットへの適用

Photo 3.1-5 Hold monitor.
ホールド停止監視装置

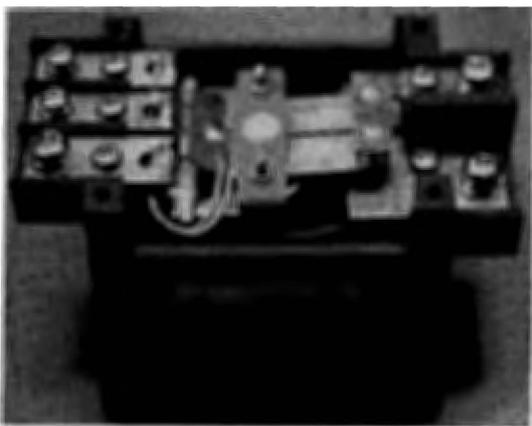


Photo 3.1-4 Non-deposition relay.
非溶着リレー

本報告では、以上の条件を満足するフェールセーフな超音波パルスレーダ型センサの構成法について述べる。まず、3.2.2 節では安全を確保するためにパルスレーダが備えるべき条件を定め、3.2.3 節では安全を確保するために必要な超音波センサの構成について述べる。3.2.4, 3.2.5 節では実際の構成と試験結果を示す。

3.2.2 安全性確保の要件

安全が確認されている時に限り、機械のエネルギー出力を許可する制御を安全制御と呼ぶ。この制御で安全

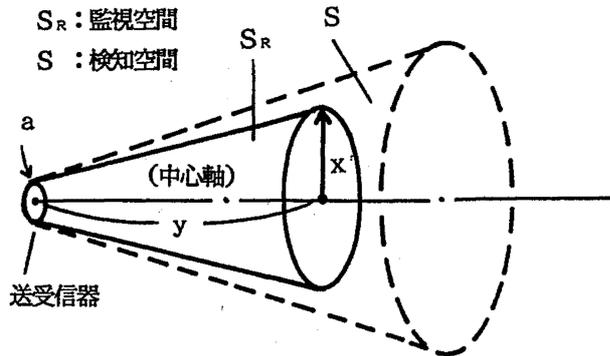


Fig. 3.2-1 Detection space and monitoring space.
検知空間と監視空間

を確認する手段としてレーダ型センサを用いる場合、検知空間 S (Fig. 3.2-1 参照) は安全を確認できる空間として定めなければならない。すなわち、空間 S は実際に必要とする空間 (監視空間) S_R より広く取られ (この余裕空間を $\Delta S = S - S_R$ とする)、空間 S に人間の侵入等によって正常でない事態が生じた時は必ずこれを通報し、例え空間 S が正常であっても、センサの故障等によってこれを保証できない時、正常でないとして異常を通報しなければならない。すなわち、空間 S における安全性確保の要件は、次のように定められる。

[条件1] 超音波ビームの位置と方向が確定しており、かつ、検知空間 S は安全を監視すべき空間 (監視空間) S_R を含んでいること。

[条件2] 空間 S は安全であること、もしくは正常であることをエネルギーを持つ信号として発生して示すこと (故障するとエネルギーがなくなると特性を利用してしかフェールセーフな特性は実現できない。このためには、危険または故障をエネルギー0に、安全をエネルギーありに対応させざるをえない)。

[条件3] 検知空間 S は、異常時、すなわちセンサが故障した時、 $S \supset S_R$ とならないこと。また、この時センサの特性として、危険を通報できること。

すなわち、センサは空間 S への人間の侵入がなく、かつ、センサが故障等を生じていない時に限り出力信号 $W_0 = 1$ (ON 信号) を生成し、それ以外の時は必ず $W_0 = 0$ (OFF 信号) を生成する構成でなければならない。しかし、通常のレーダ型センサでは、空間 S に人間が侵入した時に反射波のエネルギーが受波器に入力されて、ON 信号が生成される。また、送波器

が故障した時反射波は生成されないので、OFF 信号が出力される。これらは [条件2] を満足できない。よって、なんらかの工夫をしなければならないことになる。

3.2.3 フェールセーフな超音波センサの構成

Fig. 3.2-2 は、以上の条件を満足できる超音波センサのタイムチャートである。このセンサでは、Fig. 3.2-2 のように送受波器 (厳密には振動子) からの距離 y_1, y_2 ($y_1 < y_2$) を定め、距離 $y \leq y_1$ で定まる空間を L_1 、距離 $y_1 < y \leq y_2$ で定まる空間を L_2 、距離 $y > y_2$ で定まる空間を L_3 として全空間 L を3分割する。

ここで、空間 L_1 はセンサが正常に動作していることを確認するための空間 (作動確認空間) であり、空間 L_2 は人間や障害物を検知できる空間 (検知空間)、空間 L_3 は人間や障害物を検知できない空間 (非検知空間) である。なお、実際のセンサでは、正常動作の確認は Fig. 3.2-2 のように空間 L_1 内に送波器から発射した波を反射できる反射板を設置し、受波器がそ

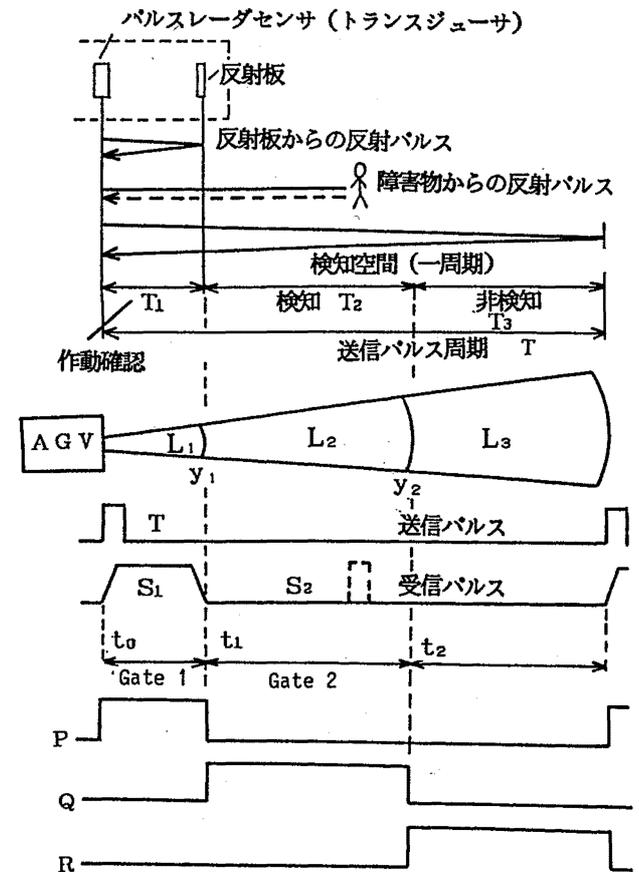


Fig. 3.2-2 Signal processing time chart of ultrasonic sensor.

超音波センサのタイムチャート

の反射波を検出できることをもって正常性の確認を行う。

以上3つの空間は、おのおのタイミングパルス P , Q , R の生成時に順次検査される (Fig. 3.2-2 参照)。いま、送信パルスを T , 空間 L_1 の検査時 (P の生成時) に反射板より反射される受信パルスを S_1 , 空間 L_2 の検査時 (Q の生成時) に検知対象より反射される受信パルスを S_2 とすれば、センサをフェールセーフな構成とするためには、 P の生成時に反射パルス S_1 が生成し、かつ、 Q の生成時に反射パルス S_2 が生成しない時に限りセンサ出力 $W_0 = 1$ が出力される構成でなければならない。これは、次式で与えられる。

$$W_0 = P \cdot S_1 \cup Q \cdot \overline{S_2} \cup R \dots \dots \dots (3.2-1)$$

ただし、 W_0 はセンサ出力を意味する論理変数であり、出力ありを1、なしを0とする。また、 P , Q , R はおのおのタイミングパルスの発生を意味する論理変数、 S_1 , S_2 はおのおの P , Q の発生時に反射パルスの発生を意味する論理変数であり、おのおの発生を1、発生なしを0とする。

3.2.4 実際の超音波センサの構成

(1) 振幅軸上のフェールセーフな信号処理

実際の超音波センサでは、空間 L_1 , L_2 , L_3 の関係は Fig. 3.2-2 のような時間 t_0 , t_1 , t_2 の関係に置き換えて処理される。すなわち、一回の送信パルス検知時間 ($t_2 - t_0$) (ただし、 $t_0 < t_1 < t_2$) のうち、($t_1 - t_0$) で反射板からの反射パルス S_1 の有無を、($t_2 - t_1$) で人間または障害物からの反射パルス S_2 の有無を検知し、 S_1 が存在し、かつ、 S_2 が存在しない時に限り出力信号 $R_0 = 1$ を生成する。

Fig. 3.2-3 は、フェールセーフな超音波センサの信号処理回路である。この回路では、 S と \overline{S} の双方の信号を必要とする (ただし、 $S_1 = S$, $\overline{S_2} = \overline{S}$ である)。この信号は、トランスジューサが双対な2重系であれば容易に得ることができる。しかし、一般にパルスレーダでは双対な2重系が構成できないので、1重系としてこれを構成しなければならない。そこで、本研究では、フェールセーフなウィンドウ・コンパレータ (3.6 節参照) を利用して、トランスジューサからえられる信号 S にフェールセーフな否定演算を施し、 \overline{S} を得ることとした。

さらに、Fig. 3.2-3 の回路では、回路を構成する要素のいずれかが故障しても、出力信号 $W_0 = 0$ とな

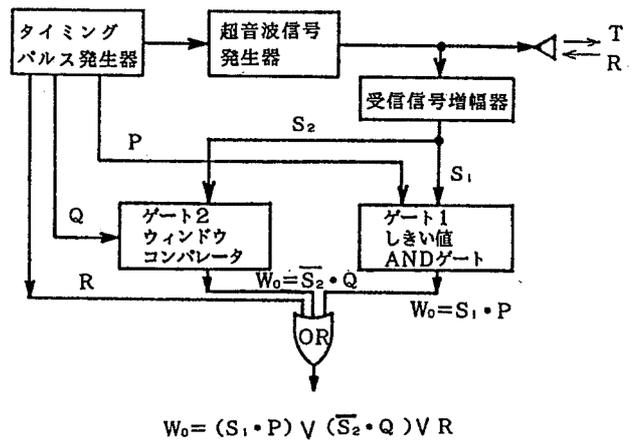


Fig. 3.2-3 Signal processing unit of ultrasonic sensor. 超音波センサの信号処理回路

ることが要求される。例えば、タイミングパルス発生器が発振停止すると、 P , Q , R は出力しないから、(3.2-1) 式より $W_0 = 0$ となる。また、送受波器の故障時は $S = 0$ となり、ゲート1、ゲート2ではおのおのフェールセーフなANDゲート (3.5 節参照) とフェールセーフなウィンドウ・コンパレータを利用して、故障時に $W_0 = 0$ をうることができる。

(2) 時間軸上のフェールセーフな信号処理

Fig. 3.2-3 の回路で時間軸上のフェールセーフな信号処理を行うには、タイミングパルス発生器の故障時に P , Q , R を生成しないこと、および回路の劣化時に Q のパルス幅が長くなる側に遅延することが必要である。このために、タイミングパルス発生器では特殊な回路を構成しているが、この詳細は参考文献 3) で述べる。

3.2.5 検知空間の形状

以上、信号処理回路のフェールセーフ化について述べたが、検知空間の形状に関しては、3.2.2 節の条件 1~3 が満足されなければならない。ここで、稼働率の向上に関する条件も考慮すれば、上記の条件は具体的に次のようになる。

- ① センサが検知対象とする物体が監視空間 S_R に侵入した時は、確実にこれを検出できること。
- ② 監視空間外の物体を誤って検出しないこと (実際には、検出頻度を最小限に抑えること)。

以上の条件を満足する空間を、以後、理想的検知空間と呼ぶ。ここで、①、②の条件を同時に満足するのは、実際上容易ではない。例えば、実際の現場では、監視空間内にセンサが検出したい (例えば傾きの大

きい) 物体が存在し、監視空間のすぐ外にセンサが検出しやすい (例えば傾きの小さい) 物体が存在することがある。この場合、一般のレーダ型のセンサでは、両者を明確に区別できない。

この問題に対処するには、監視空間のすぐ外側で急激に受信レベルが低下するようなセンサを構成することである。このために、空気中で減衰特性を持つ物理的手段を必要とするが、これは現在のところ音 (超音波) を利用する以外ない。これが、物理的手段として超音波を利用する理由である。この場合、センサの特性は、理論的には次式となる。

(1) 減衰特性

超音波が直径 a (m) の円形音源より送信されるとし、Fig. 3.2-4 のように音源の中心位置を X_s 、 X_s を始点とする円の法線上で X_s から距離 r (m) だけ離れた位置を X_A 、 X_A での音圧レベルを P_A (dB) とすると、 P_A は理論的には次式となる。

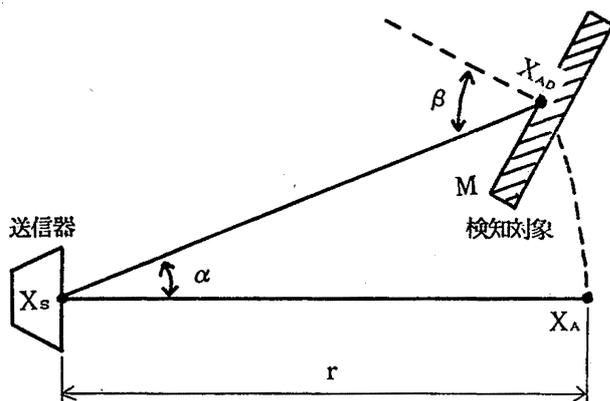


Fig. 3.2-4 Ultrasonic sensor and detection object.
超音波センサと検知対象

$$P_A = -4.34m(f)r \quad (r < a/\pi) \cdot (3.2-2)$$

$$P_A = -20 \log_{10}(r\pi/a) - 4.34m(f)r \quad (r \geq a/\pi) \cdot (3.2-3)$$

ここで、 $20 \log(r\pi/a)$ は超音波の拡散を、 $4.34m(f)r$ は空気中での減衰を表す。 $m(f)$ は、周波数 f (Hz) の超音波が、空気を伝播する際の減衰定数 (dB/m) である。なお、地表面の影響、大気中の温度分布、風の影響等は考えず、超音波を散乱・回折・吸収する物体等も存在しないとし、直径 a の円形ホーンと一辺 a の正方形ホーンは、近似的には同一の形状であると仮定する。

(2) 指向特性

Fig. 3.2-4 のように X_s から距離 r (m) だけ離れ、 X_s を始点とする円の法線と角度 α をなす位置を X_{AD} とする。また、 X_{AD} での音圧レベルを P_{AD} (dB) とすると、 P_{AD} は理論的には次式となる。

$$P_{AD} = P_A - 20 \log_{10} f_1$$

$$f_1 = \left| \frac{1}{\frac{v}{\pi a f \sin \alpha} J_1 \left(\frac{2\pi a f}{v} \sin \alpha \right)} \right| \dots (3.2-4)$$

ただし、 v は音速 (m/s)、 J_1 は第 1 種のベッセル関数で、(3.2-2)、(3.2-3) 式と同様、地表面の影響等は考えない。

(3) 検知特性

Fig. 3.2-4 のように、空間内の位置 X_{AD} において、検知対象 M の法線が超音波の入射方向と角度 β をなして存在する時、受波器は送波器と同一位置とすると、受波器には次に示す音圧レベル P_R (dB) が生じる。

$$P_R = P_{AD}|_{(r < -2r)} - 20 \log_{10} \left| \frac{1}{K(\beta, f)} \right| (3.2-5)$$

ただし、 $P_{AD}|_{(r < -2r)}$ は、 P_{AD} の r を $2r$ としたものである。また、 $K(\beta, f)$ は、検知対象の法線と角度 β をなす方向から周波数 f の超音波を入射した時の反射率 ($0 \leq K \leq 1$) であり、主に検知対象の材質と形状 (特に傾き) に依存する。

以上の特性は、すべて超音波センサの周波数特性に依存する。そこで、次にいかなる周波数領域が理想的検知空間の条件を満足できるかを推定する。

(a) 周波数 f が低い場合 (数 kHz 程度)

この周波数領域では、減衰定数 $m(f)$ はきわめて小さいから、監視空間の内と外を明確に区別できず、理想的検知空間の条件①、②を同時に満足できない。従って、無人搬送車のセンサには不適である。

(b) 周波数 f が高い場合 (数 100 kHz 程度)

この周波数領域では、減衰定数 $m(f)$ はきわめて大きいから、送波器の直前にしか検知空間を形成できず、理想的検知空間の条件①を満足できない。従って、無人搬送車のセンサには不適である。

(c) 周波数 f が中程度の場合 (数 10 kHz 程度)

この周波数領域は、理想的検知空間の条件①、②を同時に満足できる周波数を含んでいると推定される。そこで、実際に、発音周波数 25.0, 61.1, 73.9 kHz の

フェールセーフな超音波パルスレーダ型センサの性能評価を行って、最適周波数を求めることを考える。

3.2.6 性能試験の方法・結果・考察

《設備および試験方法》

(a) 超音波センサ

本実験で使用した超音波センサは、次の2つである。

- ① ホーン半径 32 mm, 発音周波数 25.0 kHz (f_1), 発音継続時間 5.5 ミリ秒, 発音間隔 280 ミリ秒であり, 送波器と受波器が同一位置のもの。
- ② ホーン半径 10 mm, 発音周波数 61.1 (f_2) と 73.9 (f_3) kHz, 発音継続時間 1.6 ミリ秒, 発音間隔 90 ミリ秒, 送波器と受波器は別位置のもの。ホーンは, 左 (L), 中央 (C), 右 (R) × 2 (送波器, 受波器) × 2 (周波数分) あるため, ホーンの総数は 12 個である (Photo 3.2-1 参照)。

(b) 測定装置 (Photo 3.2-1 参照)

測定に使用したマイクロホン, B.K 社製の 4138 型で, これに増幅器 (2660, 2636A 型) を取り付けている。

(c) 検知対象

検知対象としては, 作業衣を着用させた人間, アルミ平板 (幅 100, 150, 200, 1000 mm, 高さ 1000 mm), アクリル円管 (直径 100, 150, 200 mm, 高さ 1000 mm), 木材, ビニル, 発泡スチロール, スポンジ等を使用。

(d) 適用した無人搬送車

無人搬送車は, 定常走行速度が 2.5km/h, 停止距離が約 75cm のものである。

(e) 測定方法

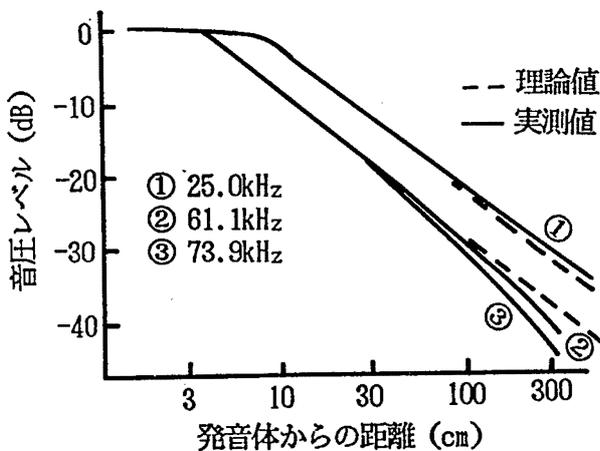


Fig. 3.2-5 Attenuation characteristic.
減衰特性

減衰, 指向特性は, Fig. 3.2-4 の X_A , X_{AD} の位置に, おおのマイクロホンを設置し測定。検出特性は, Fig. 3.2-4 の M の位置に検知対象を設置し, その反射波を X_s に位置したマイクロホンで測定。いずれも, 無響室で実施。

《測定結果》

(a) 減衰特性

Fig. 3.2-5 に, 周波数 f_1 , f_2 , f_3 での超音波の減衰特性を示す。図の理論値は, 超音波の拡散だけを考慮して計算したものである ((3.2-2), (3.2-3) 式参照)。従って, 理論値と実測値の不一致は, 超音波の空気中での減衰の影響と考えられる。図からも明らかなように, 周波数が 25.0 kHz の時は, 減衰の影響がないのに対し, 周波数が 61.1 および 73.9 kHz の時は, 送波器より 30cm ほどから減衰の影響が現れ始め, 3m を越えると減衰の影響が顕著となる。

(b) 指向特性

Fig. 3.2-6 に, 周波数 f_2 での超音波の指向特性を示す。図からも明らかなように, 半値角 (音圧レベルが 6 dB 減衰する角度) は 13.0 度 (左), 14.4 度 (右) である。また, 周波数が f_3 の時の半値角を測定したところ, 11.0 度 (左), 8.4 度 (右) であった。これより, 周波数が高くなるほど指向性は鋭くなるのがわかる。なお, 実測値 > 理論値となるのは, ホーン表面の音圧分布が, 中心部で強く, 周辺部で弱くなるためと考えられる。

(c) 検知特性

Fig. 3.2-7 に検知特性が材質や形状に影響される状況を示す。図からも明らかなように, 検知特性は, 対

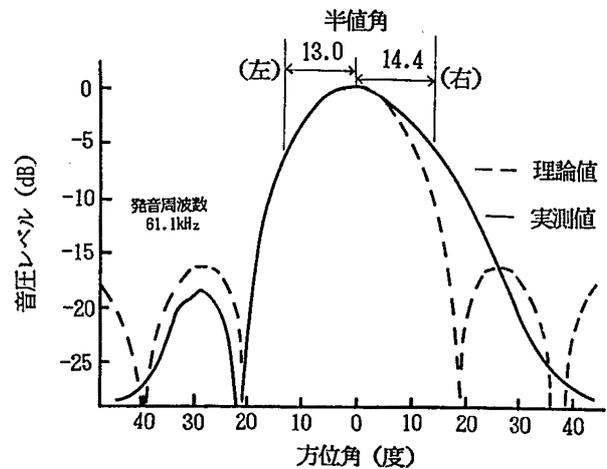


Fig. 3.2-6 Directivity characteristic.
指向特性

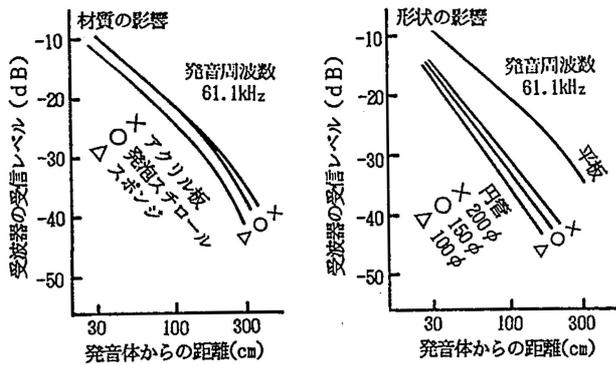


Fig. 3.2-7 Influence of materials and forms.
材質・形状の影響

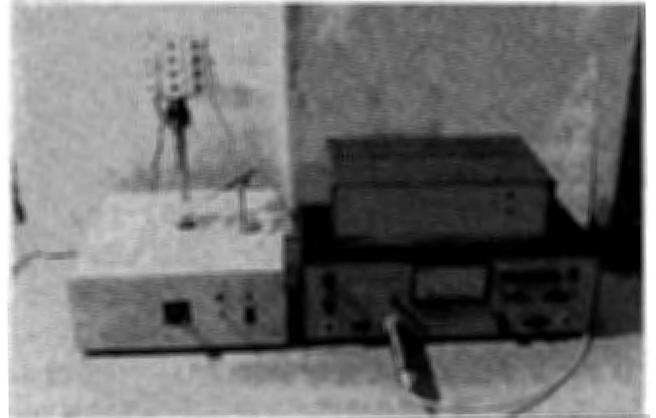


Photo 3.2-1 Ultrasonic sensor and evaluation equipment.
超音波センサと評価装置

象物の材質よりも、むしろ形状（特に傾き）に依存する（発音周波数 61.1 kHz）。

(d) 外部からエネルギーが侵入した時の特性

Fig. 3.2-8 に、ホーンから数センチ離れた位置で、手拍子と、周波数の異なる他の超音波を発音した時の、しきい値判定後の信号の状態を示す。図からも明らかのように、しきい値判定後の信号は、必ず安全側 ($W_0 = 0$) となる。

(e) 無人搬送車での実環境試験

検知対象が、アルミ平板（幅 1000 mm、高さ 1000 mm）の時は、物体の手前 2.25m (f_2) と 1.97m (f_3) の位置で無人搬送車が停止した。また、検知対象が、無人搬送車の前方より通常の歩行速度で侵入する作業着を着用した人間の時は、人間の手前 1.05m (f_2) と 0.80m (f_3) の位置で無人搬送車が停止した。

《考察》

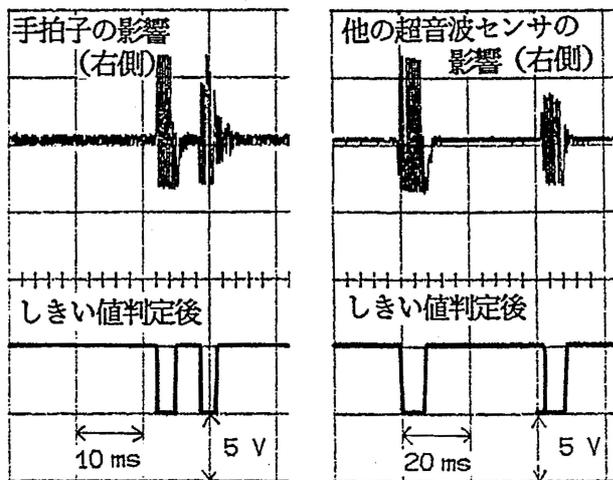


Fig. 3.2-8 Influence of unexpected energy from the environment.
環境からの予期しないエネルギーの影響

以上の結果は、周波数 f_2 , f_3 のセンサが、理想的検知空間の条件①, ②を同時に満足し、かつ、外部からの予期しないエネルギーの侵入時にも確実に安全側 ($W_0 = 0$) となる特性を持つことを示している。従って、このセンサは、実際の無人搬送車に適用できる基礎的条件を備えているといえる。これに対し、周波数 f_1 のセンサでは、空気による超音波の減衰が認められないから、理想的監視空間の条件①, ②を同時に満足できず、無人搬送車に適用するセンサとしては適切でない。

ただし、検知対象の形状（特に傾き）によっては、周波数 f_2 , f_3 のセンサでは検出できないものが想定されるから、送波器出力の増加や、複数のセンサを取り付けていかなる傾きにも対応できるようにするなどの対策が必要と考えられる。

3.2.7 おわりに

無人搬送車への適用を目的としたセンサに要求される機能はさまざまであるが、このうち、本報告では、

- ① センサの故障や劣化、外部からの予期しないエネルギーの侵入時にも、確実にセンサ出力が安全側 ($W_0 = 0$) となる
- ② センサが形成する検知空間が、理想的検知空間の条件を満足している

という 2 つの条件を提示し、これを満足するためのセンサの形態について検討した。

検討の結果、レーダ型のうちでも、超音波を用い、発音周波数が 60 ~ 70 kHz 程度の形態が、上記の条件を満足するための基礎的条件を備えていることがわかった。ただし、検知対象の傾きや、温・湿度条件等の今後検討を要する問題点も残されており、これら

については引き続き検討を行う予定である。

3.3 光線式センサ^{4,5,6)}

3.3.1 はじめに

産業用ロボット等の自動機械では、作業者の安全を確保するための安全センサが不可欠である。従来、このためのセンサとして、複数の光ビームを自動機械の危険領域の侵入箇所に配置してきている。しかし、自動機械を人間機械系安全作業システムとして捉える時、このセンサシステムはフェールセーフな構造でなければならないが、従来このような配慮がなされていない。そこで、本節では、まず、自動機械で必要とされる光ビームセンサの構成法と、このためのセンサデバイスが改めて開発されねばならないことを述べる。次に、フェールセーフな光線式センサの構成理論に言及し、最後に開発したフェールセーフな光線式センサを紹介する。

3.3.2 現状の光線式センサ

本節で扱う光線式センサは、光ビームを空中で伝播させて、この空間の異常を検出するセンサシステムである。このため、空間に外から混入する太陽光やネオン灯、蛍光灯等による外来光のノイズを受けやすいと同時に電気/光変換による減衰（投受光で約 1/100 になる）、伝播する光ビームの広がりによる減衰を伴うから、通常は高利得の受信増幅が必要となる。

ノイズを受けやすい環境で、低レベルの受信信号を扱う時の常套手段はフィルタリングである。しかし、通常市販されている高利得の受光素子は、本報告で必要とするようなフェールセーフな特性を持たないデバイスであるばかりでなく、以下に示すように、信号のフィルタリングを行いやすい構造となっていない。ここでは、このメカニズムをまず明らかにしておく。

Fig. 3.3-1 は代表的なフォト・トランジスタの光入力信号に対する出力電圧の特性図である。図から次の 2 つの特性が分かる。

- イ) 低レベルの光入力レベルに対して、事実上線形性を有していない。
- ロ) 受光レベルに対する感度は、受光素子の負荷抵抗を大きくすることによって高くなる。

上に示すような特性の素子（いわば、スイッチ素子）によって高感度の受光増幅を行うと（すなわち負荷抵抗を大きくすると）以下の問題が生ずる。

- 1) 入出力特性が線形である領域で信号を受信すれば、利得が高すぎて小さな雑音によって出力レ

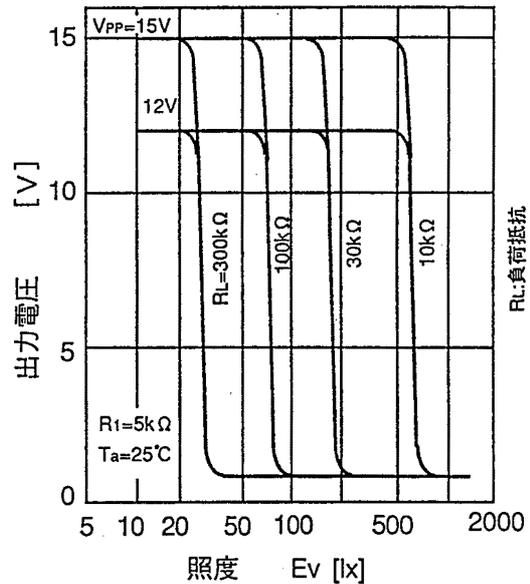


Fig. 3.3-1 Typical characteristic of photo receiver devices.
市販受光素子の代表特性

ベルは飽和状態となり、受信すべき信号は出力信号として発生しない。

- 2) このため、無信号レベルを線形領域の外に設定し（この設定は負荷抵抗を調整することによって行えばよい）、受信すべき信号がこのしきい値を超えた時「信号あり」の出力信号を得る方法を採用せざるをえない。しかし、この方法は、しきい値以下の小信号を抽出できない欠点を有するばかりでなく、入力信号と同一レベルのノイズが混入した場合、高い利得を持つ増幅器であるために（利得が小さいと期待するしきい値がえられない…しきい値設定と利得設定が同一の電子要素によって行われることの最大の欠点である）、このノイズによって出力信号が飽和してしまっており、やはり受信信号を抽出することができない。

上述の理由によって、Fig. 3.3-1 の出力特性を持つ受光素子で、ノイズを含む受信信号をフィルタリングによって抽出することは困難であることが分かる。

著者らは、ノイズを含む入力信号に対してフィルタリング可能で、かつ高利得の増幅が行えるフェールセーフな光線式センサの実現をねらって、以下の配慮を行っている。

- ① 扱う入力信号に対して少なくとも 30 dB 以上の線形性を持つこと。
- ② 利得は 60 dB までとることができること。

- ③ フェールセーフな出力特性として故障時出力信号が発生しない特性であること。
- ④ 電源雑音に対して防護され、かつ、フェールセーフな特性としてこの防護対策が故障した時、出力信号が発生しない特性を持つこと。

通常、アナログ増幅器としてよく利用される現状の演算増幅器は、本質的にフェールセーフな回路とはなりえない。すなわち、開ループ利得が大きいために、故障した時雑音の出力信号を発生する危険があることと、帰還がない時出力抵抗零、入力抵抗無限大の特性を理想として実現される増幅器であるために、帰還抵抗に断線故障が生じた場合の雑音による誤り動作が定まらない、という理由による。

3.3.3 自動機械の光ビームセンサ

(1) インタロック

Fig. 3.3-2 に産業用ロボットの安全装置として取り付けられた光ビーム（多光軸）センサの例を示す。このシステムでは、人間がロボットのマニピュレータと接触しないよう、マニピュレータの存在領域に人間が侵入していない時に限りロボットの運転が許可されるフェールセーフなインタロック（安全を示す情報がないのに、誤ってロボットの運転を許可することのないインタロック）を必要とする（Fig. 2.2 参照）。

(2) 光ビームセンサ

Fig. 3.3-2 に示す光ビームセンサは上下に広い範囲の検知領域を必要とし、しかも小さな障害物（少なくとも掌を横にした時の幅）を検出しなければならない。このため、光ビームセンサは多数の光ビームを持つセンサ（多光軸センサ）とならざるをえない。そして、検出すべき対象が小さくビーム間隔が狭いので、

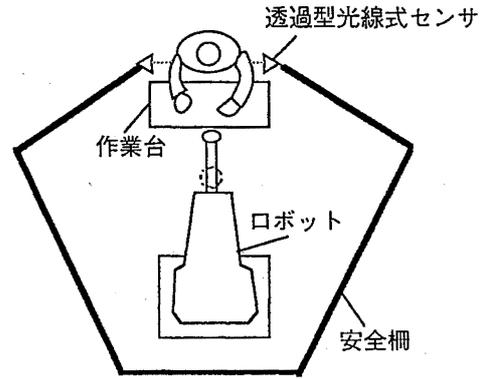


Fig. 3.3-2 Application of light-beam sensor. 光ビームセンサの適用

1個の受光素子には、対向する投光素子からの光ビームだけでなく、その周辺の投光素子からの光ビームも受信されることになる。これは、また、光ビームのビーム幅をあまり小さくすると、対向する光ビームの軸合わせが難しくなって実用的でなくなる配慮からも起こる。

(並列受信による光ビームセンサ)

複数の対向する投受光器を用いて投受光器間に存在する障害物を検知する場合、通常採用される方法は、対向する1体の投受光器を順次操作して時間軸上で異なる時刻におおの投受光器間に障害物が存在するか否かを検知する方法である。

Fig. 3.3-3 は、この走査形光線式センサの構成例を示し、検知領域 (X) に対向して配置した対をなす複数の投受光素子群を、共通のクロックパルスを計数するカウンタの出力信号を用いて、マルチプレクサで順次走査する構成である。

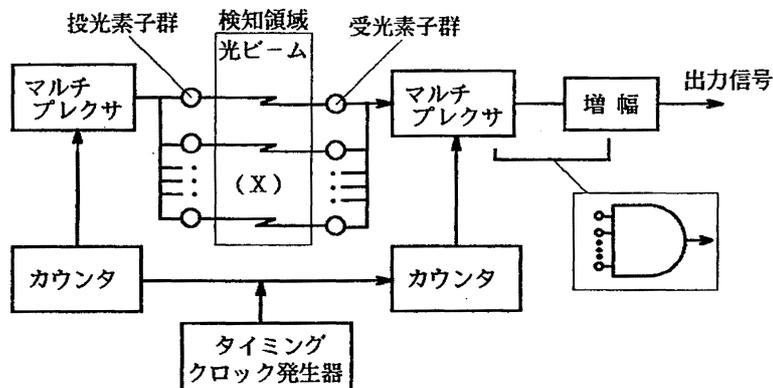


Fig. 3.3-3 Sensor using beam scanning. 走査形光線式センサ

Fig. 3.3-3の構成は、複数の投光素子と受光素子で構成される回路がおのの投光側と受光側に、対向して並列に並べられ（投光素子を●で受光素子を○で表す）、受光回路のすべてに光ビーム受信の出力信号が発生した時のみ安全を示す出力信号が発生する方式（この機能を矢印のANDゲートで示す）である。Fig. 3.3-4におけるAND機能は、①故障時誤って自ら安全を示す出力信号を発生しないこと、②例え故障してもすべての入力満たされていない限り出力を発生しない特性を持つ要素（例えばC-MOSによる2入力ANDゲートは故障時1入力だけで出力を発生してしまう故障モードが存在し、この特性を有しない）、すなわち、フェールセーフな論理積要素でなければならない。

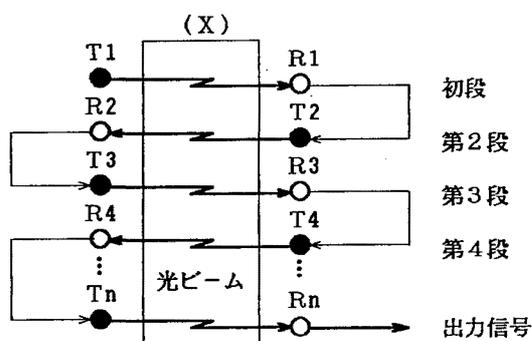


Fig. 3.3-4 Serial model.
直列モデル

(直列受信による光ビームセンサ)

投光回路と受光回路を Fig. 3.3-4 に示すように、検知領域 (X) を挟んで交互に配置し、最初に検知領域から受けた受光パルスを受光回路で受信し、この受信パルスを次段の投光信号として検知領域に発射し、この投光信号を受信した受光回路は次々段の投光パルス信号としてこの受信パルスを伝達する方式が考えられる。この方式は、最初に初段で受信される受光パルスが、細線で示すように、順次後段の投受光対回路にシリアルに伝達される方式になっており、投受光回路が検知領域を挟んで交互に存在する直列回路方式となる。

Fig. 3.3-4の直列モデルは、ビーム間隔が広い場合、すべての光軸が障害物によって遮られない時のみ出力信号が発生するので、Fig. 3.3-3の並列モデルにおけるフェールセーフなANDゲートを必要としない。しかし、自動機械における光線式安全装置のようにビーム間隔が狭く、1個の投光パルスが対向する受光

回路だけでなく、他の受光回路でも受信されてしまう場合、例え対向する投光/受光回路間の光ビームが障害物によって遮断されても、他の受光回路で受信された光信号によって、出力信号が発生してしまう。例えば、Fig. 3.3-4の投光回路 T1 で発生した光パルスが、受光回路 R1, R3 の両方で受信されるものとする、例え T1-R1 間でビームが遮断されても、T1-R3 間で伝達された光パルスは受光回路 R3 → 投光回路 T4 → 受光回路 R4 → … として出力信号が生成されてしまう。また、検知領域に入った障害物によって乱反射した光ビームが後段の受光素子に入って出力信号が生ずる危険があり、これは、次に述べる投受光のおのの遅延要素を持つ場合にも懸念されることである。

このような危険を回避するために、各投光回路は異なる時刻に光パルスを発射し、対向する受光回路はこれに同調して受光できる構成とすれば、前者の問題は解決しやすい。Fig. 3.3-5 は、各ステージの光軸が投光遅れ DT を持ち、受光側は、これを受信するための受光遅れ DR を持つ直列モデルの光線式センサの構成法を示す。この方法では、均一な遅延要素（実は時間軸上で遅れてはいけないフェールセーフな要素）が不可欠となる。

(多光軸並列連続式センサ)

Fig. 3.3-5 で示した光線式センサが、自動機械の安全装置として利用される場合、光軸の間隔が狭いため作業領域を異なる時刻の光ビームで走査する構造をとっている。この時間処理にカウンタ、あるいは遅延回路を用いなければならないが、これらの故障を配慮した時間処理要素は複雑になる。例えば、Fig. 3.3-3 で、投光側カウンタが故障して一部の投光素子だけが所定の周期で発光したり、飛び越し動作が起こった場合の異常抽出は難しい。また、検知領域を走

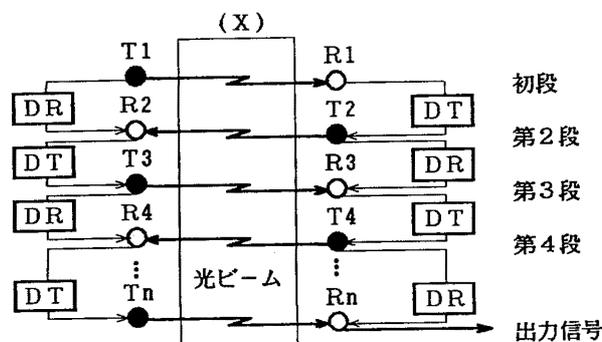


Fig. 3.3-5 Serial scanning model.
直列走査モデル

査する速度は非常時停止の応答に直接関係するから、走査速度は高速化せざるをえない。しかし、この場合は広帯域増幅となって、耐雑音特性が悪化する。

一方、並列モデルとして各光軸に異なる周波数を用いる方法は、光ビームを連続的に検知領域に放射することができ、検出の応答と外来雑音に対する耐性は使用周波数とフィルタによって決定できる（応答速度が光軸数に依存しない）。現状では、すでにフェールセーフな AND ゲートが著者らによって開発されている。すなわち、①受光側には、対向する光ビームが常時受信されるために、高速パルスを必要とせず、狭帯域増幅となって雑音に対する耐性が備わる。②また、各光軸間の送受信回路だけが機械的に並べられ、単純で分かりやすい回路構成となる（安全装置は単純な構造であるほど評価しやすく、通常よしとされる）。しかも、外来光ノイズ対策として、もともとフィルタは不可欠である。

3.3.4 フェールセーフな光ビームセンサの構成理論

(1) 安全情報抽出の原理

センサで受信される情報はエネルギーとして入力される。いま、トランスデューサに入力されるエネルギーが安全と危険を意味する 2 値の入力情報であるとする。

- a) まず、入力されるエネルギーのない時が安全を意味し、ある時が危険を意味するものとする。物理的に入力信号をこのように定めると、入力されるエネルギーがない場合（例えばエネルギーの発生源に故障が起こった場合）すべて安全を意味する情報（安全情報）となる。
- b) 次に、入力されるエネルギーのある時が安全を意味し、ない時が危険を意味するものとする。この場合、入力エネルギーがない時はすべて危険を意味する情報となる。

上の説明を人が安全な領域と危険な領域を移動する場合について考察してみよう。

今、赤外線センサで人（体温）を検出するものとする。危険領域にこのセンサを設置すれば、人の検出（エネルギー発生）は危険を意味し、上記 a) となり、このエネルギーが受信できない時（例えば何かで遮へいされた場合）すべて安全となる。安全領域にこのセンサを設置すれば、人の検出は危険領域の安全を意味し、上記 b) となって、このエネルギーが受信できない時すべて危険となる。すなわち、フェールセーフな情報の抽出は、トランスデューサに受信されエネルギーを 2 値の論理変数 L_0 （ある時を 1，ない時を 0 とする）、安

全を同様に S （安全を 1，安全でない時を 0 とする）で表せば、抽出される情報（安全情報） $I \in \{1, 0\}$ は次式で表される。

$$I = L_0 \cdot S \dots\dots\dots (3.3-1)$$

Fig. 3.3-2 の光ビーム空間では、人の手のない時が安全である。従って、安全情報 I を抽出するには、空間に投光器を使ってエネルギーを放射し、この放射エネルギーが受信される時を安全とする構成によって (3.3-1) 式が満足される。

(2) ビーム遮断を用いた光センサの構成理論

Fig. 3.3-2 における光ビームセンサは、障害物が存在しない時を安全とするセンサで基本的には Fig. 3.3-6 の構成となる。すなわち、Fig. 3.3-6 は空間 X に投光器 T から光ビーム L_1 を放射し、この透過光出力 L_0 を受光器 R で受信して、電気的出力信号 I を生成する光線式センサのモデルである。図の受光器は、人体が空間 X にあるだけでなく、人体でない別の障害物が存在する場合も受光器側に光ビームは到達しない特性、すなわち、受信の光ビームが、空間 X が正常である時のみ発生する特性を持つ。

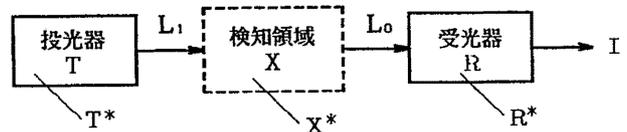


Fig. 3.3-6 Model of photo-beam sensor. 光線式センサのモデル

図で投光および受光される光信号（エネルギー）と出力信号（エネルギー）を、エネルギーが生成されている時を 1，生成されていない時を 0 として論理変数 $L_1, L_0, I \in \{1, 0\}$ とおくと、 $L_0 = I$ は安全を示し、出力信号 $I = 1$ （安全情報）は少なくとも入力 $L_0 = 0$ （危険）である時生成されてはならず、また、 $L_0 = 1$ は $L_1 = 0$ の時生成されてはならない（ $L_1 = 0$ の時 $L_0 = 1$ を生じるということは、空間 X における光雑音によって安全を示す信号 $L_0 = 1$ が生成されることを意味する）。従って、論理的には次式（ユネイトな伝達系で、一般的に $A \geq B$ ，即ち $A=0, B=1$ だけは許されない関係）が成立しなければならない。

$$L_1 \geq L_0 \geq I \dots\dots\dots (3.3-2)$$

(3.3-2) 式は、投光器と受光器の動作状態を論理変

数 T^* , R^* で表し, 正常時を1, 故障時を0とし, 空間 X の環境状態を同様に論理変数 X^* で表して, 正常時を1, 異常時を0とおくと, 出力信号 $I \in \{1, 0\}$ は次式で示さねばならないことを意味する。

$$I = T^* \cdot X^* \cdot R^* \dots \dots \dots (3.3-3)$$

ここに, $T^* = 1$ は光ビーム $L = L_1$ を意味し, $T^* = L_1$ である。また, $T^* \cdot X^* = 1$ は, 検知領域 X が安全である時のみ発生し, (3.3-1)式における安全 S を含む。(3.3-3)式の $I = 1$ は, この領域 X における安全($S = 1$)を含むと同時に, フェールセーフな回路特性として投光器と受光器が正常である時のみ出力信号 $I = 1$ を出力すべきことを意味している。

(3) フェールセーフな信号処理の原理

フェールセーフな信号処理には, 交流信号が用いられる。Fig. 3.3-7はこの構成原理を示し, 電源 E を使ってスイッチされたトランジスタ Q の出力信号が電源 E に重畳される倍電圧整流の出力信号 V として生成され, 出力信号 V のあり/なしが2値出力信号に対応する。そして, Fig. 3.3-6の出力信号 $I \in \{1, 0\}$ はFig. 3.3-7の入力信号 I であり, 論理値1, 0は交流信号 e の包絡線である。

図の構成によれば, 次のようにフェールセーフな信号処理が実現する。

- 1) トランジスタ Q で構成される増幅回路に故障が生じた場合, 出力信号 V が生じない。
- 2) 出力信号が電源 E に重畳されるために, 電源雑音による影響を受けない。

ここで, 2値の入力信号 $\{1, 0\}$ を変調信号として伝達している交流信号は, 少なくとも入力信号1がない

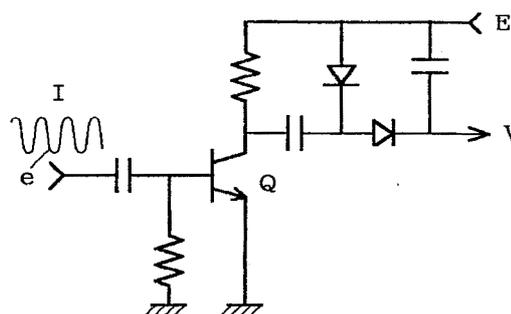


Fig. 3.3-7 Principle of fail-safe signal processings.
フェールセーフな信号処理の原理

のに, 回路の故障で誤って出力信号1が生じないための回路の検査信号である。

3.3.5 フェールセーフな光線式センサ

前節で示したように, 自動機械で必要とする光ビームセンサは, 多光軸であると共に以下の特性が要請される。

- 1) 検知領域(X)が定められた範囲で決定されること(障害物検知範囲は領域 X を含み, かつ領域 X 以外から光ビームが入ってこないこと)。
- 2) 投光器および受光器の故障で出力信号 $I = 1$ を生じないこと(すなわち, フェールセーフであること)。
- 3) 外来光および電気的外来雑音によって誤りの出力信号 $I = 1$ を生じないこと。

著者らは, 光センサデバイスとして, 特に上記2), 3)に着目して, 安価で高い線形性を持つフェールセーフなアナログ受光回路の開発を行った。Fig. 3.3-8はこのアナログ受光増幅を行う光線式センサである。入力信号は, 前節で述べたごとくフェールセーフな処理

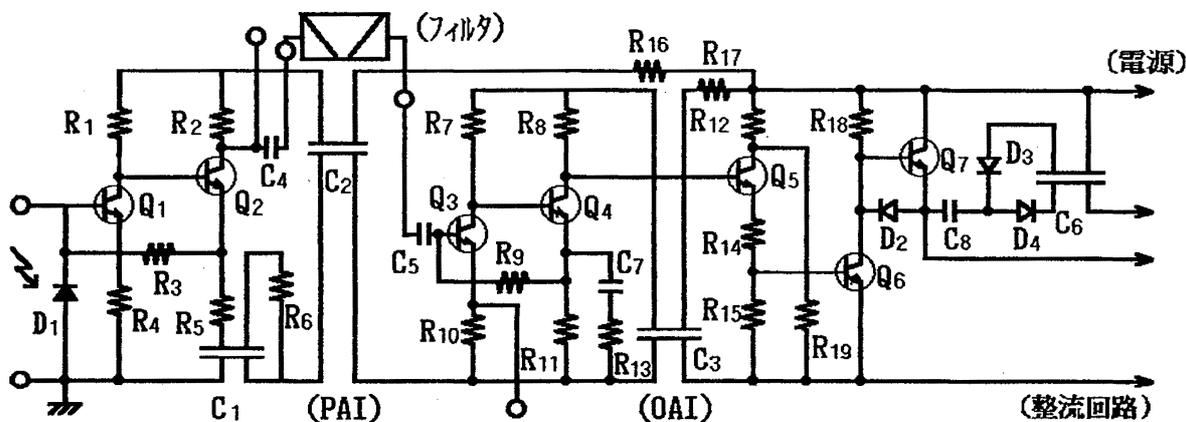


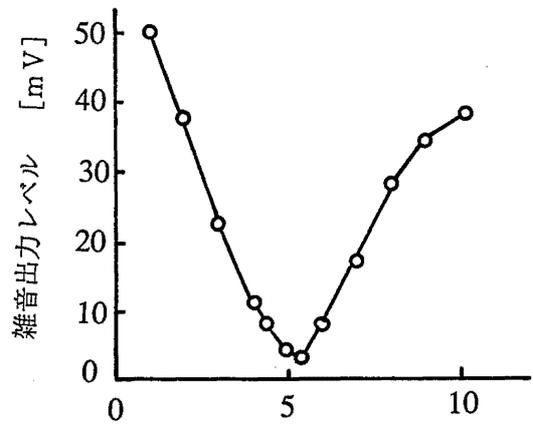
Fig. 3.3-8 Photo amplifier.
受光増幅回路

とするための交流信号であり、 D_1 はこの受光素子である。図の回路で、トランジスタ Q_1, Q_2 は受光信号を線形増幅する前置増幅回路 PAI を構成し、40 dB の増幅度を持つ。トランジスタ Q_3, Q_4 は受信増幅された信号のフィルタ出力信号を増幅する出力増幅回路 (OAI) を、トランジスタ Q_6, Q_7 は整流のための出力増幅回路をおのおの構成している。フィルタには安価で入手しやすいメカニカルフィルタを利用し、使用周波数 (回路の検査周波数) は1 ~ 3 kHz を利用している。図の回路は以下の特徴を備え、少なくとも入力信号がないのに、出力信号を生じることのないフェールセーフな回路となっている。

- 1) 出力信号は、交流光の包絡線検波出力信号となって、電源電位に重畳して出力される。
- 2) アナログ増幅回路はトランジスタ Q_1, Q_2 (Q_3, Q_4) による直結構成を基本とし、バイアス電位を与える抵抗 R_3, R_9 は帰還抵抗をかねて、利得が安定すると共に、回路を構成する抵抗に断線故障が生じたり、トランジスタに故障が生じた場合出力信号が発生しない特性を持つ。なお、Table 3.3-1 に Fig. 3.3-8 の回路を構成する要素の故障解析結果を示す。
- 3) コンデンサ C_1, C_7 に断線故障が生じた場合、利得が低下する。ただし、コンデンサ C_1 は後述の 4) 項の理由から 4 端子コンデンサとしている。
- 4) 前置増幅器 PAI は入力抵抗約 30k Ω 程度 (許可外来電気雑音 $0.5 \times 10^{-9}W$) で、かつ、電源雑音は少なくとも 20 dB 低下する構成としている (初段の雑音は後段で増幅されるので、特に注意を要する)。

Fig. 3.3-9 に抵抗 R_4 を変えた時の電源雑音の減衰量を示す。この特性は抵抗 R_4 の代わりに抵抗 R_6 を変えても同様の結果となる。また、Fig. 3.3-10 に前置増幅器の周波数特性を示す。太陽光等による線形性の減少を防止できる構成になっていることが分かる。コンデンサ C_1 で定まる帰還は、電源から直接フィルタに入力される雑音とトランジスタ Q_1 を介してトランジスタ Q_2 のベース側にこの帰還によって入力される雑音とを平衡させると同時に、線形性の拡大役を担っているのである。

- 5) その他電源雑音の吸収には 4 端子コンデンサを利用している。



エミッタ抵抗値 (R_4) の変化 [k Ω]

Fig. 3.3-9 Power source noise characteristic of photo amplifier.

受光増幅回路の電源雑音特性

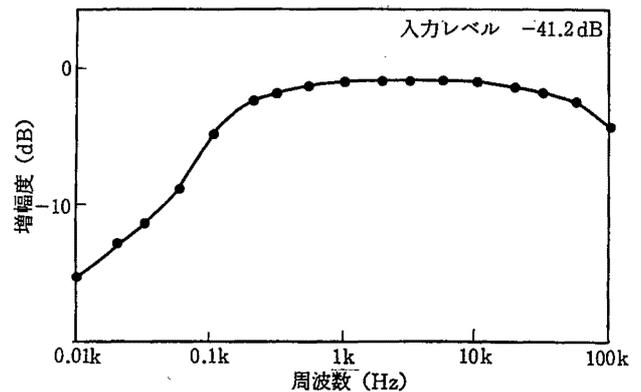


Fig. 3.3-10 Frequency characteristic of pre-amplifier.

前置増幅器の周波数特性

3.3.6 おわりに

自動機械の安全装置としての光ビームセンサの構成法と、このセンサをフェールセーフにするための構成理論について述べた。さらに、高感度、高線形性を有するフェールセーフな光線式センサは、現状では新しく開発しない限り存在しないことを述べ、具体的に開発した光線式センサの特性を述べた。

3.4 フェールセーフ・安全マット^{7,8)}

3.4.1 はじめに

安全マットは人間の侵入防止用センサ (人間が機械の危険領域に誤って侵入することを防止するためのセンサ) として、産業現場で広く利用されている装置である。この装置には、当然フェールセーフな特性が要求されるが、従来の安全マットでは必ずしもそのよう

Table 3.3-1 Failure analysis of photo amplifier.
受光増幅回路の故障解析

回路要素	モード	出力	効果	
抵抗	R ₁	断線	なし	Q ₂ ベース電流なし
	R ₂	断線	なし	Q ₂ コレクタ電流なし
	R ₃	断線	なし	Q ₁ ベース電流なし
	R ₄	断線	なし	Q ₁ エミッタ電流なし
	R ₅	断線	なし	Q ₂ エミッタ電流なし
	R ₆	断線	なし	Q ₂ エミッタ電流なし
	R ₇	断線	なし	Q ₃ コレクタ電流なし
	R ₈	断線	なし	Q ₄ コレクタ電流なし
	R ₉	断線	なし	Q ₃ ベース電流なし
	R ₁₀	断線	なし	Q ₃ エミッタ電流なし
	R ₁₁	断線	なし	Q ₄ エミッタ電流なし
	R ₁₂	断線	なし	Q ₅ エミッタ電流なし
	R ₁₃	断線	なし	Q ₅ オン
	R ₁₄	断線	なし	Q ₅ コレクタ電流なし
	R ₁₅	断線	なし	Q ₆ オン
	R ₁₆	断線	低下	出力低下
	R ₁₇	断線	なし	出力増幅電源なし
	R ₁₈	断線	なし	Q ₆ OFF
	R ₁₉	断線	低下	出力低下
コンデンサ	C ₁	断線	なし	Q ₂ エミッタ電流なし
	C ₁	短絡	なし	Q ₁ バイアス移動
	C ₂	断線	なし	受光増幅電源なし
	C ₂	短絡	なし	受光増幅電源なし
	C ₃	断線	なし	出力増幅電源なし
	C ₃	短絡	なし	出力増幅電源なし
	C ₄	断線	なし	フィルタ入力なし
	C ₄	短絡	影響なし	
	C ₅	断線	なし	フィルタ出力なし
	C ₅	短絡	影響なし	
	C ₆	断線	なし	
	C ₆	短絡	なし	R ₁₆ 間短絡
	C ₇	断線	なし	
	C ₇	短絡	なし	
	C ₈	断線	なし	
	C ₈	短絡	なし	
トジラスタ	Q ₁	断線	なし	増幅度低下
	Q ₇		なし	
ダイオード	D ₁	断線	なし	受光入力なし
	D ₁	短絡	なし	受光入力なし
	D ₂	断線	なし	
	D ₂	短絡	低下	Q ₇ 働かず
	D ₃	断線	なし	C ₆ 整流不可
	D ₃	短絡	なし	
	D ₄	断線	なし	
	D ₄	短絡	なし	整流されず

な配慮がなされていない。そこで、本報告では、まず 3.4.2 節で従来の安全マットの問題点を明らかにした後、3.4.3 節でフェールセーフな安全マットの構成原理を示す。次に、3.4.4 節で著者らが開発した振動検知型のフェールセーフな安全マットについて解説し、3.4.5 節ではその試験結果を述べる。

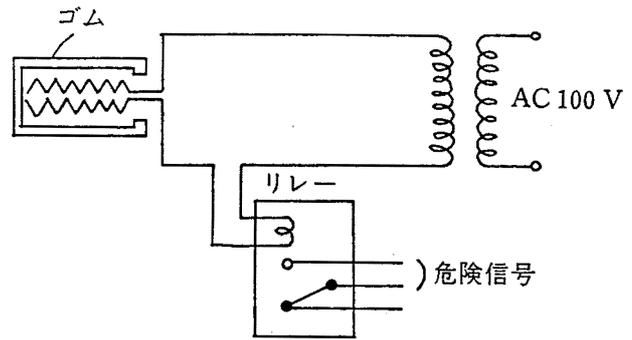


Fig. 3.4-1 Primitive mat switch.
簡易なマットスイッチ

3.4.2 従来の安全マットの問題点

(1) a 接点構造の安全マット

一般に市販されている安全マットは、Fig. 3.4-1 のように多接点を持つ踏板をゴムなどで包んだ構造 (a 接点構造) のものである。この方式は、構造が簡単であるので、自動ドアの開閉装置などにそのまま利用される。しかし、この装置はそのまま人間の侵入防止用センサとしては利用できない。なぜなら、この装置では、人間がマットに乗っている時は ON 信号 (この場合は危険信号) を出力し、人間がマットに乗っていない時は OFF 信号 (この場合は安全信号) を出力するから、リード線の断線、コネクタや接点の接触不良、電源電圧低下等の故障が生じると、センサは危険信号 (ON 信号) を出力すべき時に誤って安全信号 (OFF 信号) を出力してしまうためである。これは、危険を誤って安全と通報することに相当するから、安全上到底許されるものではない。

このような問題点を解決するには、安全マットは次に示す構造を必要とする。

- ① 人間がマットに乗っていない時は、ON 信号 (この場合は安全信号) を出力する。
- ② 人間がマットに乗っている時は、OFF 信号 (この場合は危険信号) を出力する。
- ③ マットに故障が生じた時も、OFF 信号 (危険信号) を出力する。

(2) 断線検出型の安全マット

Fig. 3.4-2 は、上記①~③の条件を満足するように Fig. 3.4-1 の a 接点構造の安全マットを改善したものである。この装置では、人間がマットに乗っていない時は、図のリレーに常時電流が流れ、リレー出力は ON となる。一方、人間がマットに乗ると、電流はリレーを流れず踏圧接点回路を流れるので、リレー

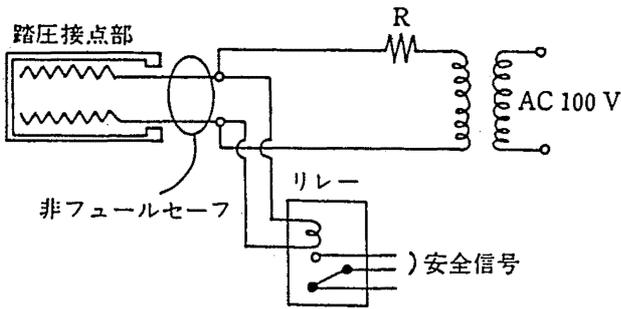


Fig. 3.4-2 Mat switch improved partly in safety.
安全を一部考慮したマットスイッチ

出力は OFF となる。さらに、抵抗、リレー、トランスの断線故障や電源電圧低下に対しても、リレー出力は OFF となる。

明らかに、以上のような構成とすれば、危険信号 (OFF 信号) を出力すべき時に誤って安全信号 (ON 信号) を出力するような事態は少なくなる。ただし、この装置を完全なフェールセーフ構成とするには、次の要件が満足される必要がある。

- [A] 踏圧接点部は接触不良が生じてはならない。
- [B] 踏圧接点部からの 2 本のリード線は、断線してはならない。

上記[A], [B]の事態が生じると、危険信号を出力すべき時に誤って安全信号を出力するおそれがある。そこで、実際の安全マットでは、踏圧接点部の接点数を多くして、人間ができるだけ多くの接点を踏めるようにすると共に、断線しにくいリード線を使用し、信頼性を確保していかなければならない。

(3) 感圧導電ゴムを用いた安全マット

以上の議論は、a 接点構造の安全マットのフェールセーフ化には、限界があることを示している。そこで、著者らは、上記①~③の条件を満足でき、かつ、[A], [B]の問題を生じない無接点構造の安全マットを開発した。これは、Fig. 3.4-3 のように、無負荷時は数 10kΩ 程度の安定した抵抗値を示し、重量が印加されるに従いアナログ的に抵抗値が低下する感圧導電ゴム (PCR) を利用したものである。

この安全マットは、Fig. 3.4-4 のように PCR を電極で両側から挟み込む構造となっている。いま、PCR に人間の体重が印加されると、抵抗値は Fig. 3.4-3 のようにアナログ的に低下していく。ここで、抵抗値の領域は次の 3 つに区分できる。

- (a) マット上に人間がいる、電極間短絡など (0 ~ 10kΩ)

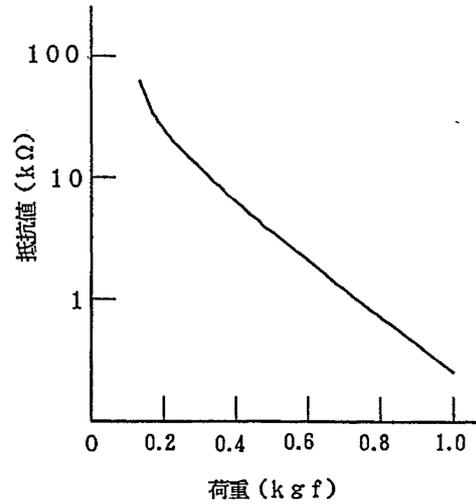


Fig. 3.4-3 P-R property of pressure conduction rubber.
感圧導電ゴム (PCR) の特性

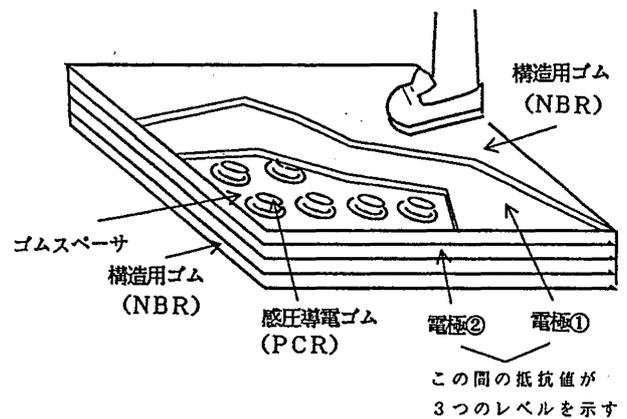


Fig. 3.4-4 Safety mat using PCR.
PCR を利用した安全マット

- (b) マット上に人間がいない (10 ~ 20kΩ)
- (c) リード線の断線、コネクタの接触不良、PCR と電極との接触状態の不良など (20 ~ ∞kΩ)

従って、フェールセーフなウィンドウ・コンパレータ (3.6 節参照) を用いて、抵抗値が (b) の状態の時に限り安全信号を出力する構成とすれば、フェールセーフな安全マットが構成できる。ただし、この装置は、実際上次のような問題点を有する。

- [I] PCR の特性が不安定であり、再現性に欠ける。このため、ウィンドウの設定によほど余裕をみておかないと、危険を誤って安全と通報するおそれがある。
- [II] 外乱ノイズの侵入や電源電圧の増大により、危険を誤って安全と通報するおそれがある。

変数を S^* (正常に空間 S を生成している時を 1, 異常時を 0), 空間 S へのノイズの侵入を意味する論理変数を S_N (侵入ありを 1, なしを 0) とすれば, センサ出力 S_E^0 は, 次式で与えられる。

$$S_E^0 = (S_G^0 \wedge S^* \wedge \overline{H}) \vee (S_N \wedge \overline{H}) \dots (3.4-1)$$

(3.4-1) 式の第 1 項は, S_G と S がどのような状態にあっても, 少なくとも人間の侵入時 ($\overline{H} = 0$) にはセンサ出力が停止できることを意味している。すなわち, S_G はフェールセーフである必要はなく, 誤り (例えばノイズなど) を含むことが許容される。また, 第 2 項は, 空間 S がノイズの侵入によってエネルギーで満たされた状態となっても ($S_N = 1$), 少なくとも人間の侵入時 ($\overline{H} = 0$) にはセンサ出力が停止できることを意味しており, 空間 S においてもノイズによる誤りが許容される。

(2) 実際の構成

実際の安全マットは, Fig. 3.4-6 に示すように振動板 (ステンレス板) の左右に復帰用バネを設け, 加振器にはプランジャ型電磁石を使用し, 電磁コイルに流れる電流が 0 になった時, 必ず同じ位置に振動板が復帰するような構成とした。ここで, 振動板の変位を x とし, プランジャより振動板にかかる力を F , バネ定数を k_1, k_2 , 振動板の質量を m , 減衰係数を η とすると, Fig. 3.4-6 の系は次の運動方程式で表現できる。

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + (k_1x + k_2x) \dots (3.4-2)$$

次に, 系の共振周波数 f_s は (3.4-2) 式より次式で与えられる。

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(k_1+k_2)}{m}} \dots (3.4-3)$$

(3) 設計手順

実際の安全マットでは, この振動系の変位 x を Fig. 3.4-6 の変位センサ Pu で検出し, 増幅の後レベル検定してセンサ出力とする。この場合, 変位 x は, Pu で検出できるほどの大きさでなければならない。このためには, 共振周波数 f_s は低いほど好都合である。しかし, f_s があまりに低いとセンサ出力の生成の遅れが大きくなり問題となる。そこで, これらの点を考慮して $f_s = 5 \sim 10\text{Hz}$ 程度に設定した。

次に, 人間がマットに乗ることによって振幅 a は大幅に減少する必要があるが, このためには $M \gg m$ が要求される。そこで, $M = 50\text{kg}$ に対し $m = 100\text{g}$ に設定した。

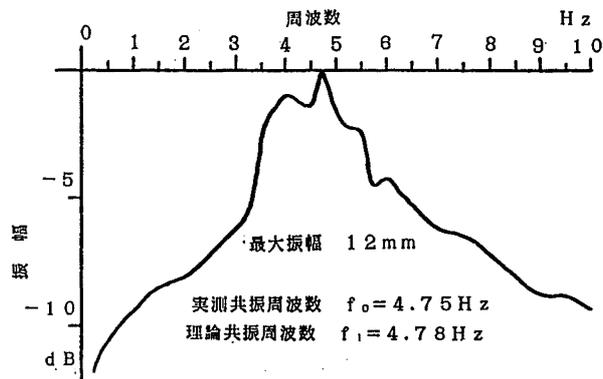


Fig. 3.4-7 Frequency characteristic. 周波数特性

3.4.5 性能試験の結果

(1) 試作した安全マットの周波数特性

Fig. 3.4-7 に試作した安全マットの周波数特性を示す。図からも明らかなように, この装置で最大振幅を得るためには無負荷状態で周波数を約 4.75Hz にすればよいことが分かる。ただし, 振動部分 (振動板, プランジャ型電磁石の鉄芯, その他振動板に付随する部品) の総重量 m は 0.1 kg, バネ定数は一本につき 50N/m であるから理論的にはこの系の共振周波数 f_1 は 5.03Hz である。なお, 試作したマットの最大変位を測定したところ 12 mm であった。

(2) 検知空間での安全情報の均一性

安全マットが理想的な検知空間を生成するには, 例えばシールドビームセンサのように透過型光線式センサの投光器と受光器との間をつないだゴムチューブの内側のように空間 S が “接触しない (安全)” と, “壊れていない (正常)” という 2 つの情報を生成するためのエネルギーが空間に満たされていなければならない。これは Fig. 3.4-5 の検査信号 S_G のエネルギーを振動として空間に均一に分散させることを意味する。もう一つの均一性の意味は空間のどの位置に検知対象が侵入しても必ず全空間の振動を停止できることである。

Fig. 3.4-8 は振動板の上部に測定点を 10 箇所設けて共振周波数 4.75Hz で加振させた時のそれぞれの測定点での振幅を表したものである。結果, すべての測定点でまったく同じ振幅がえられた。またどの位置で振動を停止させても振動板は完全に停止した。従って, 振動板の振幅はいずれかの代表点で測定すればよいことが分かる。つまり, 加振された振動板 (監視空間 S) は常に均一な安全エネルギーによって満たされているという理想的な構成となることが分かる。

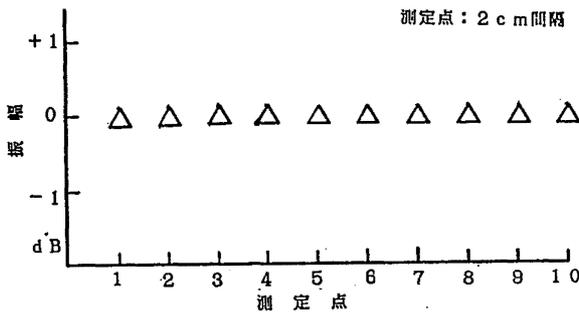


Fig. 3.4-8 Energy distribution in safety monitoring space.
安全監視空間のエネルギー分布

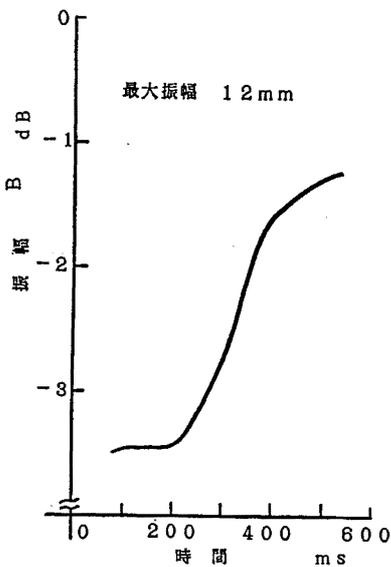


Fig. 3.4-9 Vibration energy characteristic.
振動エネルギーの特性曲線

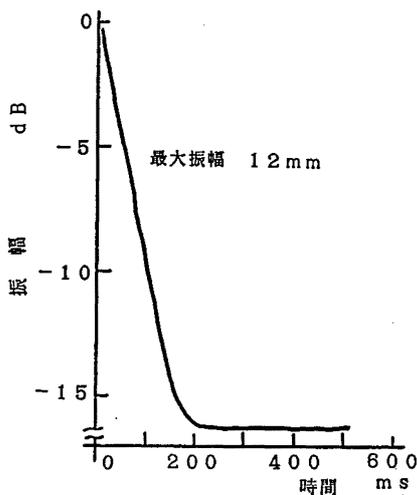


Fig. 3.4-10 Energy dissipation characteristic in case of hazard detection.
危険検出時のエネルギー消散特性

(3) 安全伝達の立ち上がり特性

安全センサが安全を伝えるだけのレベルに立ち上がる時間的關係を表したものが Fig. 3.4-9 である。ここで遅れ時間 600 ms は、安全センサの正常性を確認するための時間であり、ノイズ等と区別できる安全情報の有意性を確認するために必要な時間でもある。

(4) 危険対象物検知特性

機械側から見て人間—機械系の安全を考えた場合、危険対象物は人間である。安全センサはエネルギーを伴った機械の可動部への人間の侵入を検出し、時間的に機械の可動部へ接触する以前に機械の可動部のエネルギーを停止するよう命令を出力しなくてはならない。このことを決定論的に保証するためには次の条件が必要になる。

<危険検出に関するエネルギー的条件>

安全センサの安全監視空間は危険対象物を検出していない時にエネルギーを満ち、危険対象物を検出した時にはエネルギーを消散する(エントロピー増大則によるエネルギーの決定論的な消散)構造を必要とする。

Fig. 3.4-10 は安全マットの踏み板上部に荷重(10 kg)を加えた時の振動エネルギーの消散過程を表したものである。時間的には荷重を加えた時より 200 ms で振動エネルギーは 16 dB 以上さがりエネルギーが消散されたことを表している。なお、荷重 20, 30, 40, 50 kg についても同じ結果がえられた。このことによって Fig. 3.4-5 に示すようにインターロックの關係が物理特性として満たされていることが分かる。

(5) 異常時検知特性

安全センサの信号生成過程では、安全・正常状態をエネルギーあり(論理変数 1)、危険・異常状態をエネルギーなし(論理変数 0)とすることが必要である。異常状態にあっては次の条件が必要となる。

<異常状態検出に関するエネルギー条件>

検知空間を生成する装置自体が故障した時は装置内部に蓄積されたエネルギー(位置エネルギー)を確実に消散できる構造を必要とする。

Fig. 3.4-11 は安全マットの断線時の振動エネルギーの消散過程を表したものである。時間的には断線より 500 ms で 16 dB 以上の減衰がえられた。

(6) 安全センサとしての検討

安全装置とは、先に述べたようにフェールセーフであることが絶対条件である。すなわち、人間自身の安全にかかわる装置はそれ自身の故障や異常に対して

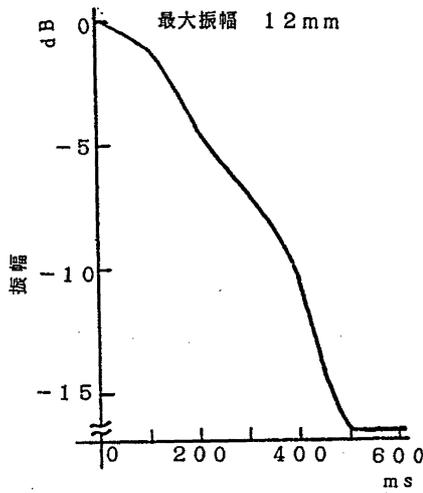


Fig. 3.4-11 Energy dissipation characteristic in case of disconnection.
断線時のエネルギー消散特性

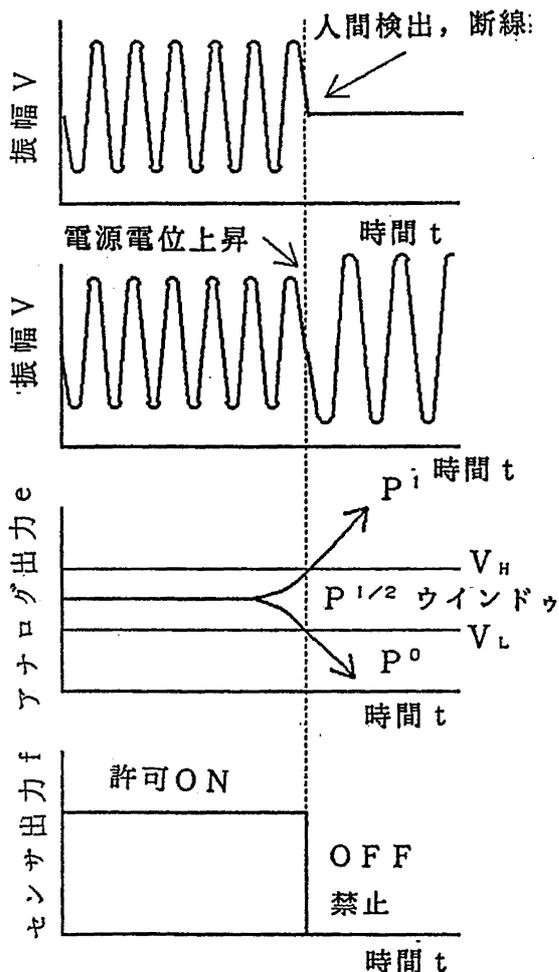


Fig. 3.4-12 Fail-safe level discrimination of safety mat.
安全マットのフェールセーフなレベル検定

も安全が保証されていなければならない。安全マットの場合、人間が乗ることで検査信号 S_G の受信レベルが下がる特性を規定している。具体的には電気回路、電源の故障（異常）に対し上昇，下降の2つの特性変化が考えられるので，レベル検定にはフェールセーフなウィンドウコンパレータを用いて判断を行う必要がある（Fig. 3.4-12 参照）。スレシヨルド V_H , V_L によって出力 e を P^1 , $P^{1/2}$, P^0 の3つのレベルに分離し，ウィンドウを $P^{1/2}$ に設定する（ウィンドウ内を出力 1）。これにより出力増大側，減少側には OFF 信号をうることができるので， P^1 , P^0 の異常に対してもフェールセーフな構造が規定される。

3.4.6 おわりに

人間—機械系における「安全作業の条件」を満足するには，一般に，安全を確実に確認するセンサと安全を伝達する手段，それを判断する要素が必要となるし，その時の伝達される安全確認エネルギーは危険もしくは故障時を 0 とし，ノイズよりも高いレベルで伝達されなければならない。しかし，本安全マットでは，ノイズを許容する構成を採り，例えノイズによる誤動作があっても少なくとも人間が安全マットに乗っている時だけは，必ず OFF 信号を出力できる構成を採っている。また安全装置の一般的特性として，危険を発見してから機械を止めるまでに時間的な規制がある場合は，必ずエネルギーの消散側（エントロピ増大の方向）で止めざるをえないが，本安全マットでは危険そのもの，すなわち人間の侵入がそのままエネルギー消散を実行する形態を採っている。

以上のことから，今回提案した「振動伝達方式の安全マット」は安全な状態にあっては常にエネルギーを満たし，危険，故障時には蓄積されたエネルギーをすみやかに消散する安全センサの構成原理を満たしている。

3.5 フェールセーフ・AND ゲート

3.5.1 はじめに

AND ゲートは，入力信号 I_1 , I_2 が共に ON 信号の時に限り出力信号 V_0 を ON 信号とする素子であり，安全作業システムでは運転命令に許可を与えるための論理積判断要素として利用される。

いま，この素子に市販のゲート IC を用いると，入力信号 I_1 , I_2 が共に OFF であるにもかかわらず，故障により誤って V_0 が ON 信号となる場合がある。そこで，故障時には V_0 を必ず OFF 出力に固定できる

フェールセーフな AND ゲートを開発した。これは、フェールセーフ化技術の一つである論理積演算発振器を利用したものである。

本節では、以上の構造を有するフェールセーフ・AND ゲートの構成原理について述べる。

3.5.2 フェールセーフな AND ゲート

フェールセーフな AND ゲートは、電気的には発振回路を用いて実現できる。なぜなら、発振によって生成される交流信号は直流信号に比べて高いエネルギー消費を必要とし、通常は発振回路の故障によりエネルギーレベルの高い交流信号を生じないからである（発振回路の故障モードは、故障時、一般には直流モードに限定される）。従って、交流信号を用いれば、素子や装置の故障やノイズ等による誤り信号と、入力情報（安全情報）を分離できる。

実用的なフェールセーフ・AND ゲートは、Fig. 3.5-1 のような論理積演算発振器で構成できる。図で OSC は演算発振部、AMP は増幅部、REC は整流部である。OSC 部は入力 I_1 または I_2 が印加されない時、

Q_1 :OFF, Q_2 :ON, Q_3 :ON

の状態であり、入力 I_1, I_2 が共に印加された時、

Q_2 :OFF \rightarrow Q_3 :OFF \rightarrow Q_1 :ON

\rightarrow Q_2 :ON \rightarrow Q_3 :ON \rightarrow Q_1 :OFF

\rightarrow Q_2 :OFF ...

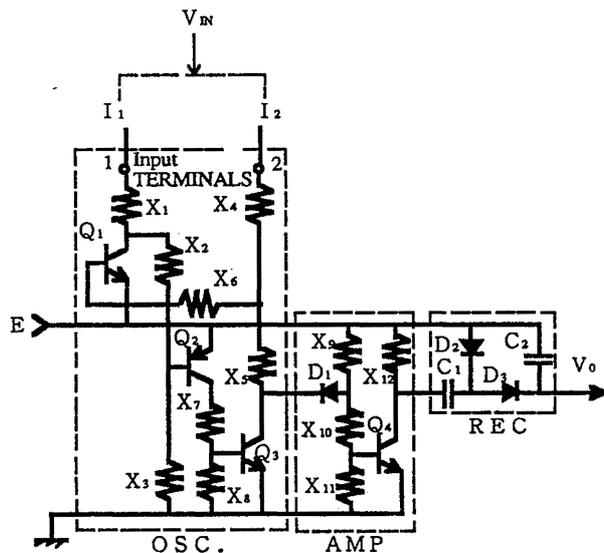


Fig. 3.5-1 Circuit of fail-safe AND-gate.
フェールセーフな AND ゲートの回路構成

の順序で発振を開始し、Fig. 3.5-2 のような OSC 出力を生じる。この出力は交流であるから、この演算出力を他の回路の入力として用いるためには、整流回路が必要となる。

Fig. 3.5-1 の REC 部はこのための倍電圧整流回路であり、詳しくは Fig. 3.5-3 に示すように、発振器により発生した交流信号が電源電位 E に重畳されて整流される。

この倍電圧整流は、演算発振器の入力が電源との混触を防止するために、電源電位より高いレベルを必要とすることから用いられる。これにより、入力端子が回路内で混触しても発振することがなく、フェールセーフな論理演算を行うことができる。この電源電位より高いレベルの信号処理を電源枠外処理という。

3.5.3 フェールセーフな AND ゲートの故障解析

Table 3.5-1 は、Fig. 3.5-1 に示すフェールセーフな AND ゲートの故障解析結果である。図で回路に用いられている素子は、ダイオード (D)、コンデンサ (C)、抵抗 (R)、トランジスタ (Q) である。

これらのうち、対称故障率素子、すなわち短絡故障と断線故障の両方の故障モードを有するものは、ダイオード、コンデンサ、トランジスタである。従って、

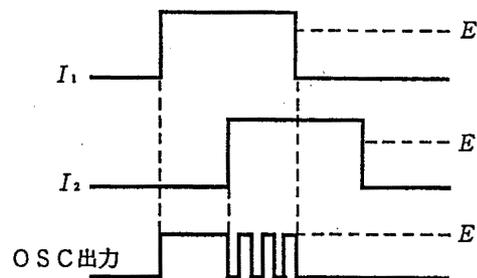


Fig. 3.5-2 Input-output relation of fail-safe AND-gate.
フェールセーフな AND ゲートの入出力関係

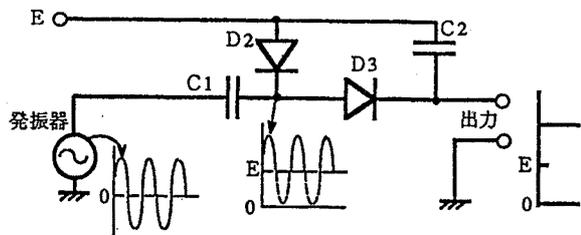


Fig. 3.5-3 Double voltage rectification circuit.
倍電圧整流回路

Table 3.5-1 Failure analysis of fail-safe AND-gate.
フェールセーフ AND ゲートの故障解析

構成要素	記号	故障状態	結果
トランジスタ	Q ₁ ~ Q ₃ Q ₄	3端子間おのおの短絡・断線 3端子間おのおの短絡・断線	演算発振器発振できず。 発振出力なし, または出力低下。
ダイオード	D ₁	短絡 断線	発振出力なし。 発振出力なし。
抵抗	X ₁ ~ X ₈ X ₉ ~ X ₁₂	断線 断線	演算発振器発振できず。 発振出力なし。

これらの素子出力は2値論理のうち、ONとOFFの両方の故障信号を発生してしまうおそれがある。

これに対し、抵抗は、発熱による断線しか起こりえないと考えてよいので、これは非対称故障率素子である。

Table 3.5-1は、各素子の故障に対する出力状態である。図で、単に「故障」と表しているものは、断線と短絡の両方の故障を含む。また、出力低下状態となる故障は安全情報の伝達に支障がないか、あるいは安全情報が伝達されない側の故障であり、危険情報が誤って安全情報に変わることはない。

3.5.4 おわりに

フェールセーフなANDゲートは、安全作業システムを構成する際の最も基本となる素子である。このような素子では、その汎用性を高めるために多入力化を図っていくことが必要と考えられる。これについては、今後の検討課題としたい。

3.6 フェールセーフ・ウィンドウコンパレータ⁹⁾

3.6.1 はじめに

コンパレータ (comparator) は比較器という意味であり、入力信号のレベルを任意の基準レベルと比較して判定するものである。この基準レベルを2つ、すなわち上限と下限を設けると、この限られた範囲内に入力信号のレベルが収まっている時、コンパレータは判定出力を発生する。この「限られた入力値の幅」をウィンドウ (窓) といい、また入力の限られた範囲内だけで出力を発生する素子を「ウィンドウ・コンパレータ」と呼ぶ。

ウィンドウ・コンパレータは、例えば安全確認手段 (安全センサ) 等のアナログ出力のレベル検定に利用される。しかし、既存のウィンドウ・コンパレータをレベル検定に用いた場合、故障時に誤って判定出力を

生じるおそれがある。そこで、故障時には判定出力を生じないフェールセーフなウィンドウ・コンパレータを開発した。これは、3.5節で述べたフェールセーフなANDゲートを利用したものである。

本節では、フェールセーフ・ウィンドウコンパレータの構成原理と、これを安全センサのレベル検定に適用した場合の例について述べる。

3.6.2 安全センサとスレッシュホールド

安全センサは、前節で述べたフェールセーフ・ANDゲートと同様に、故障時OFF出力となるフェールセーフな構成が要求される。このために、従来はフェールセーフ化の手法として、故障時OFFとなるアナログ出力を発生する安全センサ (トランスデューサ) と、同じく故障時OFFとなるレベル検定器を用いて安全センサを構成している (Fig. 3.6-1 参照)。

これは、一般には故障によりセンサの持つエネルギーは低下し、OFF出力を発生するためである。ただし、電源との混触等により、アナログ出力が増大する場合がないとはいえず、センサのアナログ出力が故障時高レベル ($e \rightarrow 1$)、または低レベル ($e \rightarrow 0$) のいずれに変化しても、検知出力をOFFとするためには、上限と下限のスレッシュホールドを設ければよい。すなわち、センサ出力は Fig. 3.6-2 に示すように2つのスレッシュホールド V_H , V_L により、3値で表されることになる。この2つのスレッシュホールド間 ($V_H - V_L$ 間) がウィンドウとなり、この区間で検定出力を発生する素子がウィンドウ・コンパレータということになる。

図において、ウィンドウ・コンパレータの入力端子 I_a はスレッシュホールド V_L 以上の入力を検定出力発生の条件とし、入力端子 I_b はスレッシュホールド V_H 以下の入力を検定出力発生の条件とする。これは入力端子 I_a , I_b の検定機能をおのおの X , Y とすると、Fig. 3.6-3 のように X と Y の積 W を利用することになる。従っ

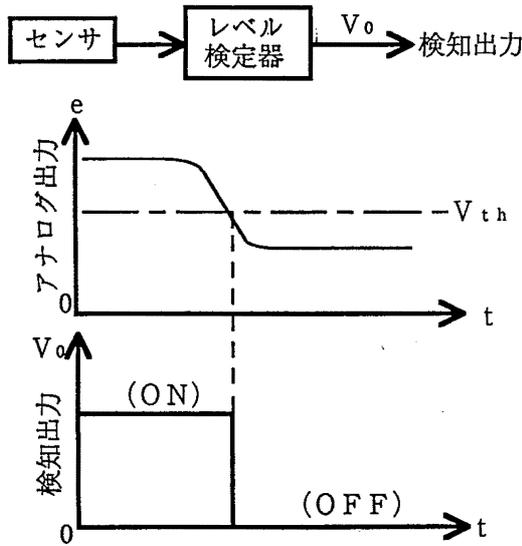


Fig. 3.6-1 Fail-safe sensor using level discriminator.
レベル検定器を用いたフェールセーフなセンサ

て、ウィンドウ・コンパレータは、スレッシュホールドを持つ AND ゲートということになる。ただし、センサ出力 e は、「危険領域に人間がない」という安全情報を生成するものであるから、検定されるウィンドウはノイズ等の外乱レベルより高くなければならない。

3.6.3 フェールセーフなウィンドウ・コンパレータ
すでに述べたように、論理積演算発振器は入力がかすべて印加された時、論理積演算を行うフェールセーフな AND ゲートの特性を持つ。これをウィンドウ・

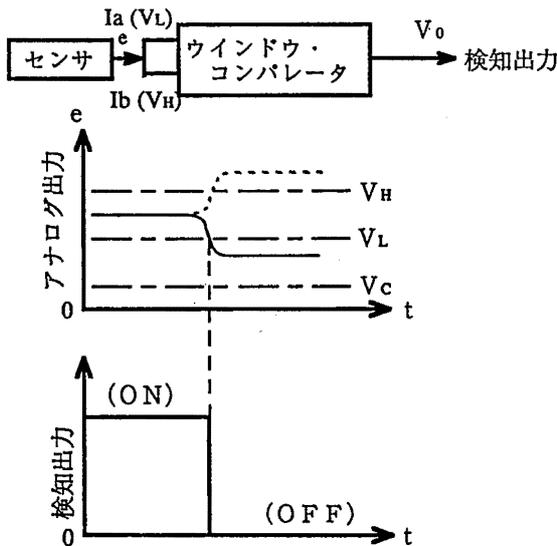


Fig. 3.6-2 Fail-safe sensor using window comparator.
ウィンドウ・コンパレータを用いたフェールセーフなセンサ

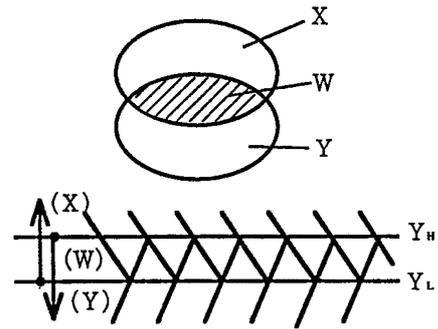


Fig. 3.6-3 Operational function of window comparator.
ウィンドウ・コンパレータによる演算機能

コンパレータとして利用する場合は、Fig. 3.5-1 の論理積演算発振器は、入力 I_1 が次に示す電圧 V_L 以上であり、入力 I_2 が次に示す電圧 V_H 以下であることを必要とする。

$$V_L = (X_1 + X_2 + X_3)E/X_3 > 0 \dots \dots \dots (3.6-1)$$

$$V_H = (X_4 + X_5)E/X_5 \geq (E + V_D) \dots \dots \dots (3.6-2)$$

ただし、 V_D はダイオードの順方向電圧 ($\cong 0.5V$) である。このフェールセーフな AND ゲートは、入力 I_1 、 I_2 を共通して単一入力で使用しても、フェールセーフな特性を持っている。すなわち、入力 I_1 、 I_2 を共通にして入力 V_{IN} を印加すると、 V_{IN} が次の範囲内で発振して出力を発生するフェールセーフなウィンドウ・コンパレータとなる。

$$\begin{aligned} (X_4 + X_5)E/X_5 &\geq V_{IN} \\ &\geq (X_1 + X_2 + X_3)E/X_3 \dots \dots \dots (3.6-3) \end{aligned}$$

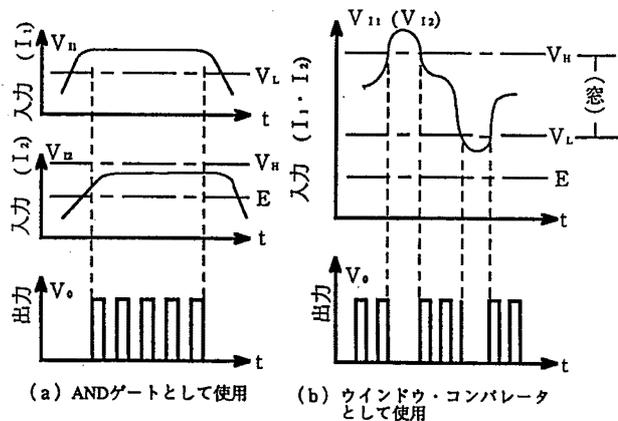


Fig. 3.6-4 Application of logical product oscillator.
論理積演算発振器の応用

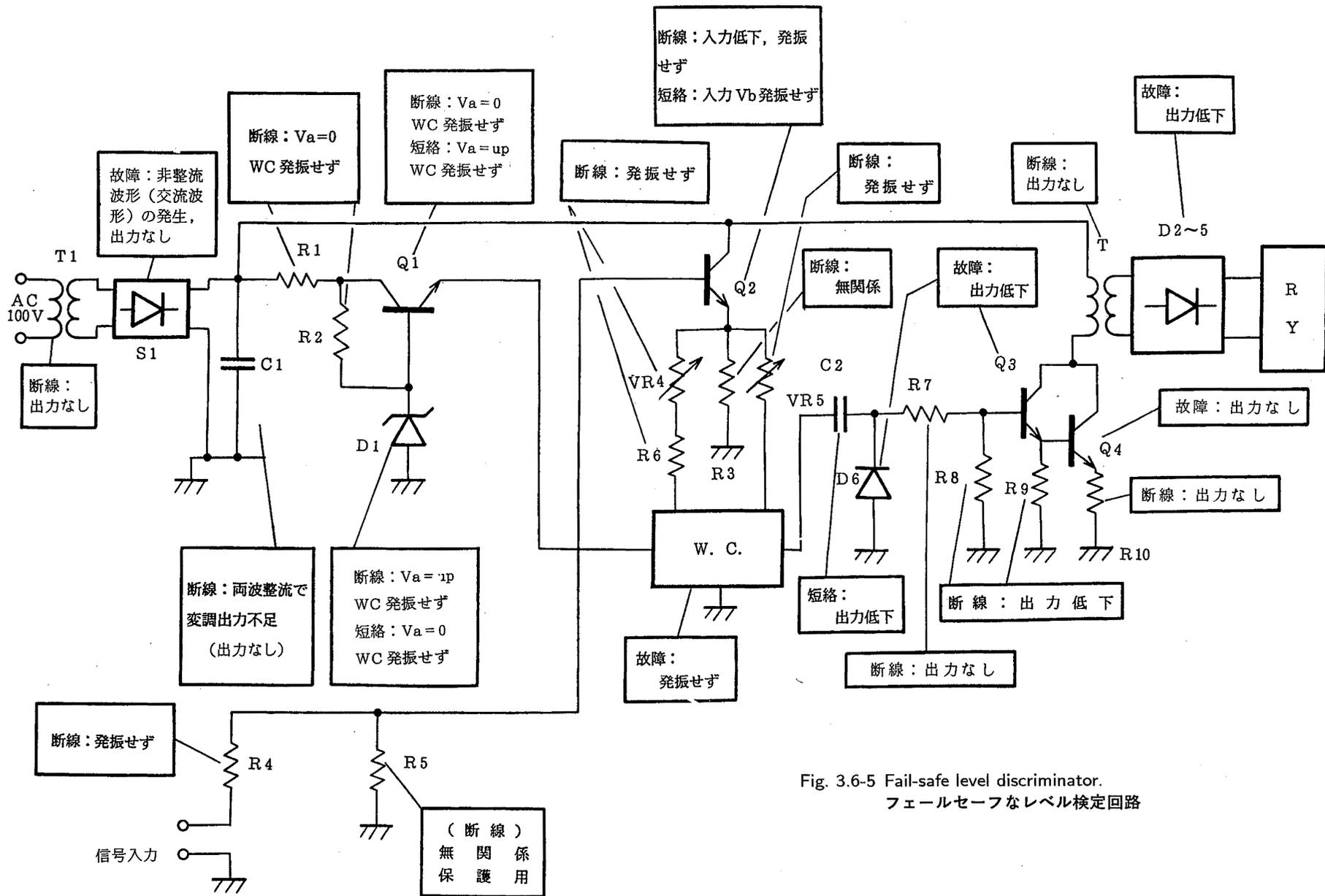


Fig. 3.6-5 Fail-safe level discriminator.
フェールセーフなレベル検定回路

このウィンドウの上下限（スレッシュホールド）は、抵抗（実用的には X_1, X_4 ）を変えることにより自由に設定でき、フェールセーフなレベル検定を行うことができる。このように、論理演算発振器は、Fig. 3.6-4の入出力の関係に見るように、ANDゲートと安全センサ（ウィンドウ・コンパレータによるレベル検定）の両方に利用することができる。

3.6.4 フェールセーフなレベル検定回路の故障解析

Fig. 3.6-5は安全センサに用いられるフェールセーフなレベル検定回路の故障解析図である。

図で回路に用いられている素子は、T：トランス、D（およびS）：ダイオード、C：コンデンサ、R：抵抗、VR：可変抵抗（ボリューム）、Q：トランジスタ、ウィンドウ・コンパレータ IC (WC) および出力リレー (RY) である。

これらのうち、対称故障率素子、すなわち短絡故障と断線故障が等しい確率で現れるものは、ダイオード、コンデンサ、トランジスタである。従って、これらの素子出力は2値論理のうち、1と0のいずれかの故障信号を発生してしまうおそれがある。

一方、抵抗は、発熱による断線しか起こりえないと考えてよいので、これは非対称故障率素子である。また、トランスも巻線の巻き方を配慮しておけば、断線による故障のみ起こると考えられる。ここでウィンドウ・コンパレータ IC は、トランジスタを用いた半導体素子で構成されているが、前述したように交流発振と電源枠外処理により故障時、出力0となる非対称故障率素子である。

図からも明らかかなように、この回路では故障時誤ってセンサ出力を生じない構成が保証されている。

3.7 フェールセーフ・ON/OFF デイレー^{10,11}

3.7.1 はじめに

計時の始まり時刻が外側から与えられるものとし、時間軸上である時刻を定めるものとする、現状の計時手段を用いて正確に計時することはきわめて困難であって、必然的に誤差を伴う。例えば3つの時計を用意して、この多数決によって時刻を定めようとしても、おそらくいずれの時計の間でも計時時刻は一致しないであろう。この場合、誤差の範囲を定めて、この範囲内に計時された時刻を正しい時刻とせざるをえない。

この誤差の範囲は時間軸上の窓である。しかしここでこの窓自身をいかに与えるかという新しい問題

が生ずる。すなわち、新しい計時時刻を与えなかったにもかかわらず、計時時刻の基準となる上限と下限を定めるための計時手段が要請されるのである。このため、新しい時刻の計時ができないことを認め、もともと計時手段は誤るものとして、ただし誤り方を限定する方法が考えられる。

Fig. 3.7-1(a) は時刻 t_0 を定める手段として、許容できる時刻の下限 t_1 と上限 t_2 を窓として定めた場合を示す。図で、時刻 t_0 を定める窓幅は小さくなる側に誤る方がより正確である。この場合、同図 (b),(c) で示すように窓の下限 t_1 と上限 t_2 を別々に定めるものとし、この計時手段として ON デイレーと OFF デイレーを用いて、時間軸 (t) 上で定まる窓幅 $a \in \{1, 0\}$ を Fig. 3.7-1(b),(c) の信号 $b \in \{1, 0\}$, $c \in \{1, 0\}$ の論理積 $a = b \cdot c$ で表すものとすれば、矢印で示すように ON デイレーの計時手段は計時時刻の遅れる側の誤りが許されることになり、OFF デイレーの計時手段は、計時時刻の進む側の誤りが許されることになる。すなわち、計時手段は、時間軸上で非対称誤りの出力特性を有すればよいことになる。

3.7.2 フェールセーフシステムにおける ON/OFF デイレーの適用

時間軸上で非対称誤りの出力特性を持つ計時要素は、フェールセーフシステムにおいて Fig. 3.7-1 (a) ~ (c) における論理値1を安全情報（安全状態を示す情報）とすることによって利用される。すなわち、Fig. 3.7-1において (b) の ON デイレー（論理値1）は安全情報発生が遅れるを意味し、(c) の OFF デイレー（論理値0）は危険発生を意味し、(a) の論理値1は安全通報期間を表す。また、矢印の許容される誤り方向は、(a) では安全通報期間は短くなる側、(b) では

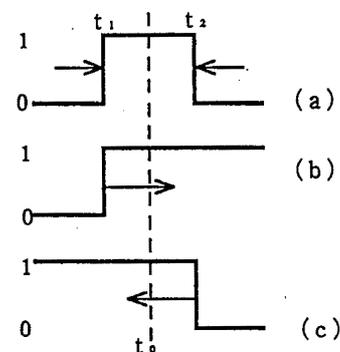


Fig. 3.7-1 Asymmetrical characteristic of time measurement.

計時の非対称性

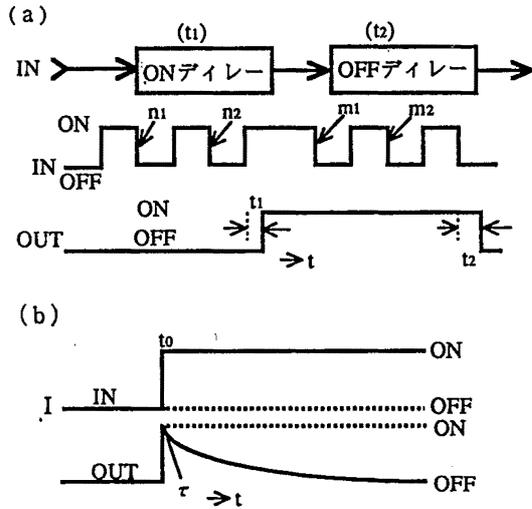


Fig. 3.7-2 Application of ON/OFF delay.
ON/OFF デイレーの適用

安全通報の遅れる側、(c)では危険通報の早まる側が安全側となる。

フェールセーフな ON/OFF デイレーは上述の目的で使われる。ON デイレーは瞬時的誤り信号（雑音）に安全情報が追従しないようにフィルタリングとして使用される（例えば、機械起動の立ち上がり遅れ要素やガスの点火遅れ要素など）。また、OFF デイレーは頻繁な出力遮断を行う要素での遅れ要素として使用される（例えば、踏切の遮断、降下の遅れ要素、ガスの点火時間要素、遮断的信号断の遅れ要素（パルス幅延長）、微分信号の発生等）。

Fig. 3.7-2 に ON/OFF デイレー要素の適用例を示す。図で ON は安全を意味し、この ON 信号で危険行為が行われる。従って、OFF で危険発生を意味し、危険行為の停止が行われる。Fig. 3.7-2(a) は、ON デイレーと OFF デイレーを使って、入力が ON/OFF する信号のフィルタリングを行っている例である。入力信号 IN には、立ち上がり時 n_1 , n_2 , 立ち下がり時 m_1 , m_2 の不安定の信号が存在する時、この不安定な信号に追従しないように立ち上がりに対して ON デイレー機能 (t_1) を設け、立ち下がりに対して OFF デイレーの機能 (t_2) を設けて波形整形する。この不安定な信号は、例えば電磁リレーのチャタリングやセンサのしきい値、あるいは入力信号が不安定な時に起こる。そして、遅れ時間 t_2 は単なる誤り防止で、安全制御（安全である時のみ出力エネルギーを発生する制御）上で、一般に不要とされる機能である。

Fig. 3.7-2(b) は、ステップ入力信号 (I) に対する微分出力信号 dI/dt を示す。この微分演算の目的とするところは、ステップ入力信号の立ち上がり時刻 t_0 を明らかにすることである。従って、この微分による立ち上がり信号は OFF デイレーに相当し、時間軸上では進む側に誤る方が許される。このため、微分の時定数では短くなる側の故障が許されることになる。

次に機械系におけるフェールセーフな ON/OFF デイレーの適用例として、NC 工作機械などなどの主軸モータの起動スイッチ回路を Fig. 3.7-3 に示す。

Fig. 3.7-3 において、主軸モータの電源は機械（コントローラ）から与えられる。モータの回転命令 MC(ON) に基づき、自己保持回路の出力リレー R によって通電されるものとする。命令 MC が OFF すると、OFF デイレーによって所定時間 (t_1 秒) 後に自己保持回路がリセットされて出力リレー R が OFF する。次にモータの駆動命令 MC (ON) がコントローラより与えられると、コントローラの命令 MC だけでは動かない。次に、作業員によって起動スイッチ（バネ復帰型）が投入 (ON) されると、所定時間 (t_2) 後に ON デイレーの出力が生じ、この ON デイレー出力信号が OFF した時自己保持回路はプリセットされてモータ起動の電源が通電される。この制御回路の主要な狙いは次の 3 つにある。

- ① 主軸モータの起動をコントローラだけに依存させない。

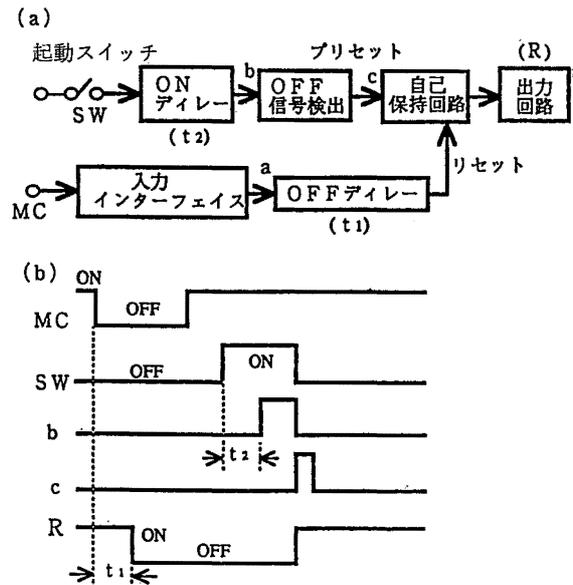


Fig. 3.7-3 Application to motor control circuit.
モータ制御回路への適用

け遅延される要素)に蓄積され、出力電圧 (OUT) を生じている。入力信号 (IN) が消滅すると、2相発振器の出力信号 P_1 によって、コンデンサ C_1 が放電され(この時演算発振 U_2 が発振し信号 P_1 と逆相の信号 P_2 によって無負荷状態にあるコンデンサ C_2 がこの発振出力で充電される)、コンデンサ C_1 の出力電圧が演算発振器 U_2 のしきい値以下になると演算発振器 U_2 が発振できなくなり、次にコンデンサ C_2 が信号 P_2 によって放電され、この出力電圧が演算発振器 U_3 のしきい値以下になると演算発振器 U_3 は発振器できなくなり、出力端子 OUT に所定時間の遅延出力信号を生じる。ここに、2相発振器は雑音等による誤り等が生じてかまわない。

3.7.4 おわりに

本研究では、フェールセーフな ON/OFF ティレー要素の構成に関する基本的考え方と、この要素の安全装置への適用例を示した。本研究により、産業機械の時間計測をフェールセーフに行うことが可能となった。これは、プレス機械や産業用ロボット等の産業機械にも適用可能なものである。

3.8 インテリジェント・リレー^{12,13)}

3.8.1 はじめに

SSR (Solid State Relay) は、有接点リレーに比較して入出力間の信号伝達の応答が早く、寿命が長い利点を有していることから、高速化しつつある産業機械に必須の構成要素となっている。一方、安全を重視する設備では、SSR における短絡故障(これは、多くの場合、モータの突入電流やサージ等により発生するものと考えられる)をおそれて依然として有接点リレーが利用されている。これは、産業用ロボットの非常停止装置をはじめ、エレベータ制御、鉄道信号設備等の例からみても明らかである。

安全制御を目的とする装置では、本質的に信頼性技術と安全確保のための技術(安全技術)を必要としており、SSR は後者の技術的検討が不足しているに過ぎない。一方、有接点リレーはSSR に対抗して高速化、高寿命化された機能を求めるのではなく(機械的接触の高速動作は再現性において信用がおけない)、現状のSSR では物理的に実現できない安全の保証を行うべきである。この点で Fig. 3.8-1 のインタロックは重要な意味を持ち、一つの操作出力エネルギーの発生は、論理的に $S_C \geq E_0$ ($S_C \cup E_0$)としてユネイトに信号が伝達されて安全を保証する系と、 $C_M \cup E_0$

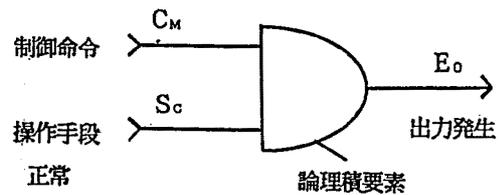


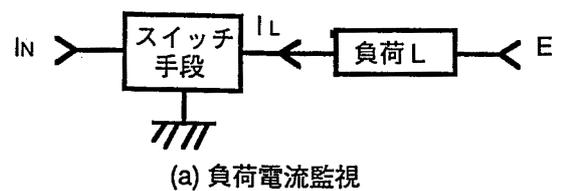
Fig. 3.8-1 Output energy interlocking. 出力エネルギー系のインタロック

として必ずしもユネイトに信号が伝達されない系の論理積で与えられる。ここで、前者は本来頻繁な動作(信頼性)を必要としないのに対し(例えば接点溶着が許されない系)、後者は高速・高頻度の動作(信頼性)が求められ、その代わりに接点溶着が許される系である。

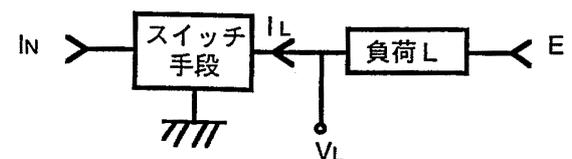
インテリジェント・リレーは、非溶着リレーを前者に用い、SSR を後者に用いて信頼性の欠点(すなわちSSR の短絡故障)を確定論的な安全性(すなわち銀/炭素接点の非溶着特性)で補完するものである。本節はインテリジェント・リレーの構成原理を明らかにすると共に、電流導通、遮断時における雑音発生を防止する機能をSSR に付加することとした。

3.8.2 出力エネルギー操作系におけるインタロックの構成論理

負荷駆動電力を $I_L \in \{1,0\}$ とおき、通電時を1、非通電時を0とし、この負荷電流をスイッチする手段の入力エネルギーを $I_N \in \{1,0\}$ として、エネルギーありを1、エネルギーなしを0とし、入力 $I_N = 1$ によってスイッチ手段は操作出力電流(負荷電流) I_L が生成



(a) 負荷電流監視



(b) 負荷電圧監視

Fig. 3.8-2 Load monitoring model. 負荷監視モデル

Table 3.8-1 Truth table of load monitoring model.
負荷監視モデルの真理値表 (1)

$I_N \backslash I_L$	1	0
1	正常	異常
0	異常	正常

されるものとする。Fig. 3.8-2 は、この負荷駆動モデルを示し、E は負荷 L の動力源（電源）である。同図 (a) において、2 値で表される論理変数 I_N と I_L の間では Table 3.8-1 で示される論理的関係しか生じえない。すなわち、入出力間のエネルギー伝達が正常である時を 1、正常でない時を 0 で表し、この状態変数を $y \in \{1, 0\}$ とおけば、 y は次のように表現される。

$$y = I_L \cdot I_N \vee \overline{I_L} \cdot \overline{I_N} \dots\dots\dots (3.8-1)$$

$$\overline{y} = \overline{I_N} \cdot I_L \vee I_N \cdot \overline{I_L} \dots\dots\dots (3.8-2)$$

(3.8-1) 式は正常（安全）を示す情報の抽出に対応し、(3.8-2) 式は異常（危険）を示す情報の抽出に対応する。もし、上の情報を Fig. 3.8-1 のインタロックの入力信号 S_c として、スイッチ手段正常の情報を与えるものとするならば、(3.8-2) 式によって与えられる情報 \overline{y} を入力信号 S_c とするには否定演算が必要となる。しかし、入力信号 S_c と出力信号 E_0 の間には否定演算を含むことが許されず ($S_c \geq E_0$)、当然入力信号 S_c と異常情報 \overline{y} の間にも $\overline{y} \geq S_c$ の論理的関係が成立すべきであって、(3.8-2) 式は Fig. 3.8-1 のインタロックの入力情報として採用しえない。

一方、(3.8-1) 式に基づいて抽出される情報 y は直接（否定演算を経由しないで）Fig. 3.8-1 のインタロックの入力信号 S_c に適用でき、 $y \geq S_c$ が成立する。ただし、(3.8-1) 式からも分かるように $I_L = 1, I_N = 1$ の情報を抽出するだけでなく、 $I_L = 0 (\overline{I_L} = 1)$ と $I_N = 0 (\overline{I_N} = 1)$ の情報も抽出しなければならないことを意味する。

Fig. 3.8-2(b) はスイッチ手段によって制御される負荷電流 I_L をを監視する代わりに、スイッチ手段の端子電圧 V_L を監視する場合を示す。ここに、端子電圧 $V_L \in \{1, 0\}$ は電圧発生を 1、電圧零を 0 とし、 $\overline{V_L} = \overline{V_L}$ である。そこで (3.8-1) 式と同様にスイッチ手段の動作状態を表す論理変数を y とおけば、 y は次のように表現される。

Table 3.8-2 Truth table of load monitoring model.
負荷監視モデルの真理値表 (2)

$I_N \backslash V_L$	1	0
1	異常	正常
0	正常	異常

$$y = I_N \cdot \overline{V_L} \vee \overline{I_N} \cdot V_L \dots\dots\dots (3.8-3)$$

ここで、Table 3.8-1 において $I_N = 1, I_L = 0$ の状態は誤り状態であるが、流れてもよい安全の状態であるにもかかわらず電流は流れない状態であるので、危険でないという理由で無視するものとする。これは、Table 3.8-2 においては $I_N = 1, V_L = 1$ の状態が対応する。しかし、 $I_N = 0, I_L = 1 (V_L = 0)$ の状態は出力電流が決して流れてはならない状態で、危険状態を意味するので、少なくともこの時 $y = 0$ とするものとする。この場合、 $I_N = 1, I_L = 0 (V_L = 1)$ の状態を正常とすればよいから、(3.8-1) および (3.8-3) 式に対応する状態変数は、おのおの次式となる。

$$y = I_N \cdot (I_L \vee \overline{I_L}) \vee \overline{I_L} \cdot \overline{I_N} \\ = I_N \vee \overline{I_L} \cdot \overline{I_N} \dots\dots\dots (3.8-4)$$

$$y = I_N \cdot (V_L \vee \overline{V_L}) \vee \overline{I_N} \cdot V_L \\ = I_N \vee \overline{I_N} \cdot V_L \dots\dots\dots (3.8-5)$$

すなわち、入力信号がない ($\overline{I_N}$) のみ出力電流（出力電圧）を監視すればよいことを意味する。これは前報で示した監視例に相当する。

3.8.3 非ユネイト系スイッチ手段のエネルギー伝達系

Fig. 3.8-2 は、Fig. 3.8-1 における制御命令 C_M と出力 E_0 が必ずしもユネイトに伝達されない系のスイッチ手段に対応する。ここで、負荷電流 I_L が大電流でかつ商用の交流電流であるとすると、スイッチングに伴う雑音発生を最小限に止めなければならない。これは安全性の観点からすれば、素子の破壊につながり、場合によって自ら誤りの正常信号 $S_c = 1$ を生成しかねないからである。このためには、入力エネルギー $I_N = 1$ は負荷電流 I_L の零点で（すなわち、 $I_L = 0$ の時）投入されなければならない。すなわち、入力エネルギー I_N は制御命令 C_M と出力電流 $I_L = 0$ の検出情報 ($i_0 \in \{1, 0\}$ とおく) の論理積 $C_M \cdot i_0$ で発生しなければならない。

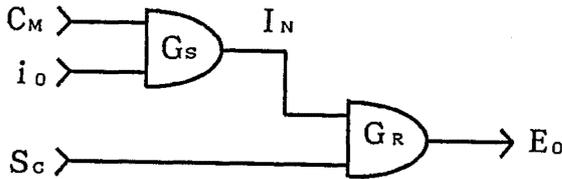


Fig. 3.8-3 Output energy interlocking considering electrical noise.

雑音を配慮した出力エネルギー系インタロック

ここに、誤って零点でない時に負荷電流 $I_L = 1$ が発生しないためには、零点 ($I_L = 0$) 検出信号 $i_0 = 1$ がないのに、Fig. 3.8-2 の入力エネルギーとしての出力信号 $I_N = 1$ が発生しない特性 $i_0 \geq I_N$ (ユネイト性) が成立しなければならない。ここで、 C_M 、 i_0 、 S_c と E_0 の論理的關係は、 $C_M \cup E_0$ 、 $i_0 \geq E_0$ 、 $S_c \geq E_0$ となり、Fig. 3.8-1 のインタロックは Fig. 3.8-3 として示される。

ここに、 C_M と i_0 の論理積要素 G_s の動作状態を論理変数 $G_s^* \in \{1, 0\}$ とし、 G_s の故障時 ($G_s^* = 0$) の出力状態を G_s' (安全状態を 0、危険状態を 1) とすると、スイッチ手段の入力エネルギー I_N は次式で表される。

$$I_N = C_M \cdot i_0 \cdot G_s^* \vee \overline{G_s^*} \cdot G_s' \dots\dots\dots (3.8-6)$$

従って、論理積要素 G_s は誤って入力エネルギー $I_N = 1$ を発生しないフェールセーフな構成でなければならない。一方、論理積要素 G_R も同様の特性が要求される。インテリジェント・リレーは、この特性を非溶着リレーでもたせている。SSR では故障で負荷回路に通電され続けたり、通電不能となることがあっても、誤って負荷駆動の交流電源の零点に同期しない状態で、スイッチされることがない構成をとる。すなわち、制御命令 (通電命令) C_M だけは、故障によってスイッチの入力エネルギー I_N とはならない構成である。

3.8.4 零点スイッチ回路の構成原理

SSR を用いた零点スイッチ回路は、Fig. 3.8-4 のような構成となる。ここで零点検出信号 i_0 を生成するセンサは、直接 $\overline{I_L} = 1$ を検知するもので、すなわち、センサ自身が否定演算を含まないものでなければユネイト性が保証されない。ここで、スイッチ回路への入力信号 I_N (エネルギーありを 1、なしを 0 とする) は、センサの正常状態を論理変数 $S^* \in \{1, 0\}$ で表すと、次のようになる。

$$I_N = C_M \cdot \overline{I_L} \cdot S^* \dots\dots\dots (3.8-7)$$

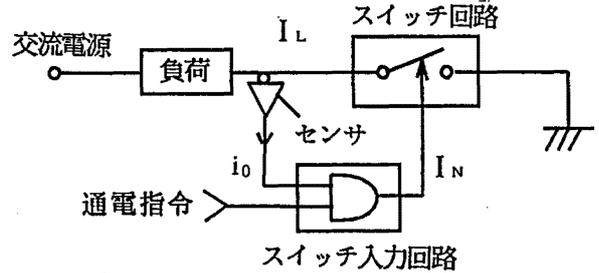


Fig. 3.8-4 Structure of zero point switch circuit. 零点スイッチ回路の構成

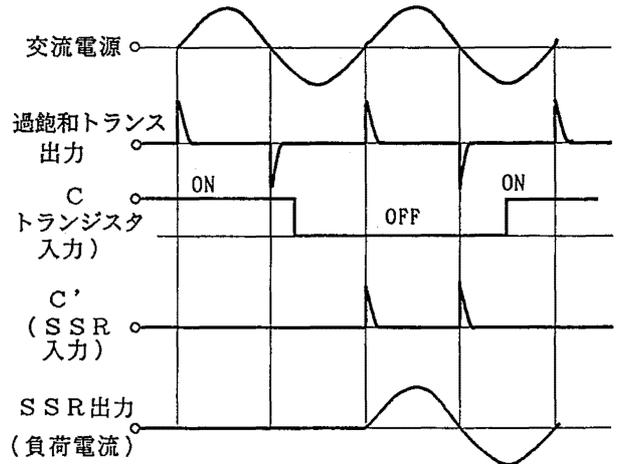
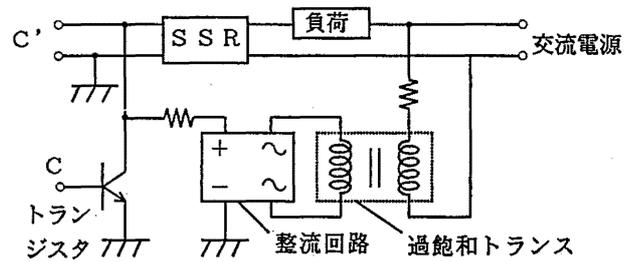


Fig. 3.8-5 Structure of switch circuit using SSR and transformer.

SSR とトランスを用いたスイッチ回路の構成

零点スイッチ回路の構成は、スイッチ回路と、スイッチ入力回路 (零点検出センサを含む) からなる。スイッチ回路のスイッチング素子は、高速のスイッチングを行うため、通常 SSR 等の無接点半導体素子を使用し、スイッチ入力回路は、商用周期の交流電圧の零点 ($I_L = 0$) を検出してスイッチ回路にトリガを与えるものである。

Fig. 3.8-5 に、一般の SSR と過飽和トランスを使って、少なくとも交流電源に同期しないで SSR を通電することのない零点スイッチ回路の側と、その動作特

性を表すタイムダイアグラムを示す。図は、交流電流の立ち上がり、立ち下がり成分を抽出する過飽和トランスと、その過飽和トランスの出力信号を整流するための整流回路で構成されるセンサ部と、入力電圧が印可されている間整流回路の出力パルスを供給しないスイッチ用トランジスタより構成される。センサ部の過飽和トランスは、交流電源の零点付近で非飽和パルスをうることができ、 $i_0 = \overline{I_L}$ の機能を構造として持つ。この正と負のパルスを整流回路で正パルスとした信号 (I_0) が、トランジスタが OFF している時のみ、入力端子 C' に SSR の導通命令 (I_N) として与えられる。SSR の制御命令 ($C_M = 1$) がトランジスタの入力端子 C に印可されると、トランジスタが ON して、整流回路の出力パルス (I_0) は SSR の制御入力 (I_N) として発生している。図の構成はトランジスタが ON 状態にあっても、OFF 状態にあっても、整流回路からの電源同期のパルスが来ない限り SSR の入力信号は発生しない。すなわち、トランスや整流回路、抵抗、トランジスタに故障が起ころうと、電源同期パルス以外の信号が SSR に印可されることがない (トランジスタに OFF 側故障があると、同期パルスは SSR の導通命令がないのに SSR に入力されるが、電源非同期ということはない)。なお、サイリスタを用いた SSR は ON 状態の保持機能を持つため、負荷電流は $I_L = 0$ で遮断される。

3.8.5 おわりに

制御装置がますますマイクロ・エレクトロニクス化する反面、アクチュエータ出力は、大パワー化しており、出力系の接点開閉に伴う雑音発生は、制御装置にとって深刻な問題である。零点スイッチ手段は、この対策として有効であるが、機能を求めて故障に対する配慮が忘れられてはならない。インテリジェント・リレーは、安全性と機能性が両立するものであり、その用途は広い展開が期待される。

3.9 ホールド停止監視装置¹⁴⁾

3.9.1 はじめに

これまで、産業用ロボット等の自動機械に接近する場合は、あらかじめ駆動エネルギーを遮断する必要があった。これは、自動機械をホールド状態 (電源が入ったままでロボット等が停止している状態) として、人間がロボットに接近すると、故障や外乱 (ノイズ) の影響によりアクチュエータが不意に作動した時に、人間が危害を受けるおそれがあるためである。

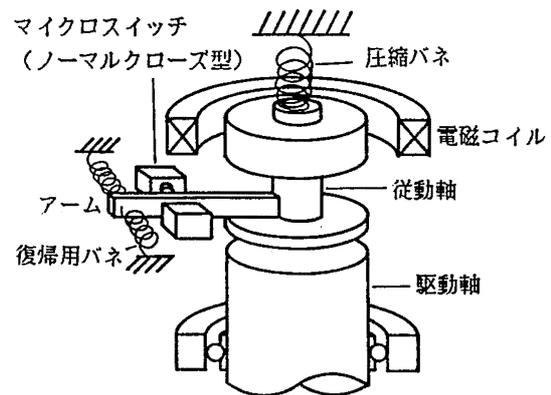


Fig. 3.9-1 Structure of mechanical window switch.
メカウィンドウスイッチの構造

しかし、最近、駆動源ダウンによる作業性の低下が指摘され、ホールド停止中の作業を可能とする安全システムの必要性が求められている。そこで本節では、ホールド停止中の作業の安全を確保するための安全装置 (以下、ホールド停止監視装置と呼ぶ) として、筆者らが開発したメカウィンドウ監視方式を提案する。

3.9.2 メカウィンドウによるホールド位置監視

(1) 構造と原理

Fig. 3.9-1 に本装置 (以下メカウィンドウスイッチと呼ぶ) の基本構成を示す。これは、基本的には、図のような負作動クラッチ (バネリターン型) を構成しており、通常作業時にはコイルに電流を流し、これにより発生した磁界でバネの復帰力に抗して駆動軸 (アクチュエータ側) と従動軸 (ロボットアームの位置を監視する側) を機械的に離しておく。

一方、人間がロボットに接近する時は、ホールド指令 (これは、例えばホールドボタンを押す等の行為によって意志表示される) によってコイルへの通電を停止させ、駆動軸と従動軸を機械的に結合させる。

この状態で何事もなければ、駆動軸、従動軸とも動かないままであるから、人間はロボットに通電したままの状態でもロボットに接近して作業ができる。これに対し、万一、故障や外乱 (ノイズ) 等の影響によりアクチュエータが暴走した時は、駆動軸が回転するから、これに従い従動軸やアームも旋回し、マイクロスイッチが動作して駆動源を OFF とできる。

(2) 安全システム

Fig. 3.9-2 にホールド停止監視装置の安全システムを示す。

メカウィンドウスイッチが有効に働き、しかも、ロボットアームがメカウィンドウ (位置の許可変動幅

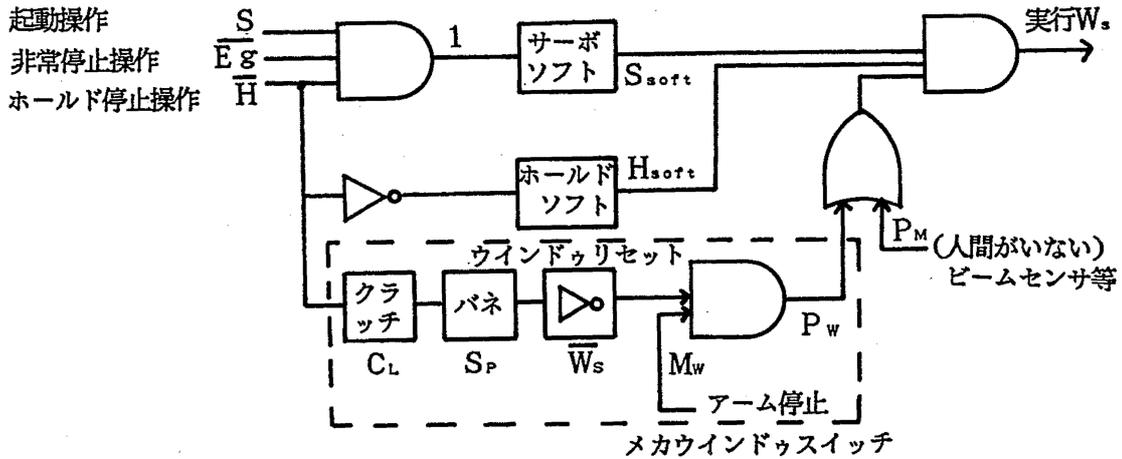


Fig. 3.9-2 Hold monitor safety system.
ホールド停止監視装置

を検定する窓)の中にあれば、安全 P_W がON出力する。このためには、次式が必要である。

$$W_s \cup M_W \dots\dots\dots (3.9-1)$$

すなわち、メカウィンドウがセットされていれば ($W_s = 1$)、その結果えられるメカウィンドウスイッチ出力 M_W は1と0の両方があり、 $M_W = 0$ となるのは故障時またはロボットアームの暴走時である。それに対して、 $\bar{H} = 0$ (ホールドボタンを押す行為によって0信号を出力する) から、メカウィンドウのリセット \bar{W}_s までの情報の流れはエネルギーの高い側を1ととれば、次式となる。

$$\bar{H} \cup C_L \cup S_P \cup \bar{W}_s \dots\dots\dots (3.9-2)$$

ここでは2つの否定回路が入っている。 \bar{H} については、ホールドボタンを操作しない時は ($\bar{H} = 1$)、ビームセンサによるインターロックが有効であるので問題を生じないが、 $S_P \cup \bar{W}_s$ を達成するには構造的検討が必要となる。

そのため、ここではノーマルリターン型バネを用いている。これは、クラッチ通電時に蓄積した機械的エネルギーを放電時に利用する構造であり、信号の否定処理を伴うことなく、構造としてウィンドウリセット \bar{W}_s を作り出している。このような否定処理を構造として持つ要素によってユネイトな関係が保持される。式 (3.9-2) を達成すれば、少なくとも $\bar{H} = 0$ によってウィンドウはセットされる。

実用的には、Fig. 3.9-3のタイムチャートで示す構成とする。ここでは、ロボットの停止に要する時間に

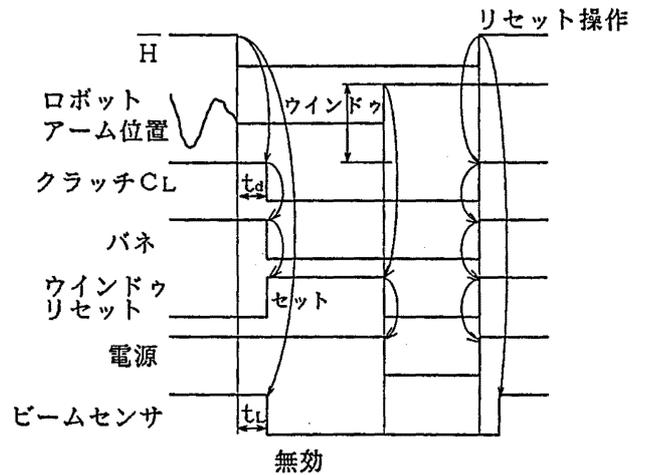


Fig. 3.9-3 Time chart of hold monitor system.
ホールド停止監視装置のタイムチャート

よって、クラッチのオフディレイ時間 t_d 、およびビームセンサを無効にする時間 t_L が決まる。

(3) メカウィンドウスイッチの設計の手順

本装置は、設計時に式 (3.9-2) に示すユネイト性を保証できる十分な検討が必要である。基本的な構造は Fig. 3.9-1 に示すように、定常運転時はエネルギーアクティブ (電磁コイル励磁)、接点閉となり、故障時 (電磁コイル断線、接点不良) は非常停止とする。

以下に、個々の要素を設計する際、指針となるべき条件をあげる。

- (a) 非定常作業を想定し、作業者がホールドボタンを押して、そこで発生する OFF 信号によって機能すること。
- (b) 重力、取り付け位置の影響を受けないこと。

- (c) ウィンドウのセットを保持するために、接点アームのバネトルクに打ち勝つ摩擦（制動）トルクがあること。
- (d) ホールド停止の際、オーバーシュートで誤動作しないこと。
- (e) 機能作動（非常停止）後、通電で接点がリセットされること。

従って、電磁コイルについて、(b) より吸引力を、(d) より OFF デイレー時間を考慮し、クラッチ復帰用のコイルバネについては (b), (c) を、接点については (c), (e) より接点アームのバネ定数を、シューについて (c) を考慮して設計する。

まず、軸結合時における静摩擦（制動）トルクを T_s とすると、

$$T_s = \mu \cdot r_m \cdot f_b \dots \dots \dots (3.9-3)$$

となる。ただし、 μ はシューの摩擦係数、 r_m はシューの平均半径、 f_b はクラッチ復帰用コイルバネのバネ圧力である。ここで、接点アームにかかるトルクの最大値を T_L とすると、 $T_s > T_L$ でなければならない。条件 (e) に従って接点アームのバネ定数をある程度大きくする必要があるが、安全係数 $f (= 1.5 \sim 2.0)$ を考慮して、次のように決める。

$$T_s \geq f \cdot T_L \dots \dots \dots (3.9-4)$$

次に、電磁コイルの吸引力 f_c は、空隙部の有効断面積を S 、有効磁束密度を B_g とすると、

$$f_c = (2 \times 10^7) \cdot B_g^2 \cdot S \dots \dots \dots (3.9-5)$$

となるが、本実験では既成の電磁ブレーキを改良して用いた。

電磁力とコイルバネの関係は Fig. 3.9-4 に示すようになる。ただし、 m は電磁コイル部重量、 δ_0 は初期クリアランス、 f_{b0} は δ_0 におけるバネ圧力である。前述の条件により、 $0 \sim \delta_0$ の間では、

$$f_c > f_b + m \dots \dots \dots (3.9-6)$$

でなければならない。

以上により、電磁コイルおよびコイルバネの設計を行うが、電磁コイルの設計は経験によるところが大きいため、スペースファクタ、連続通電定格（消費電力、温度上昇）を考慮して f_c , m , f_b (すなわちバネ定数) を最適値に調整する必要がある。

また、ホールド指令後にロボット関節軸の停止に

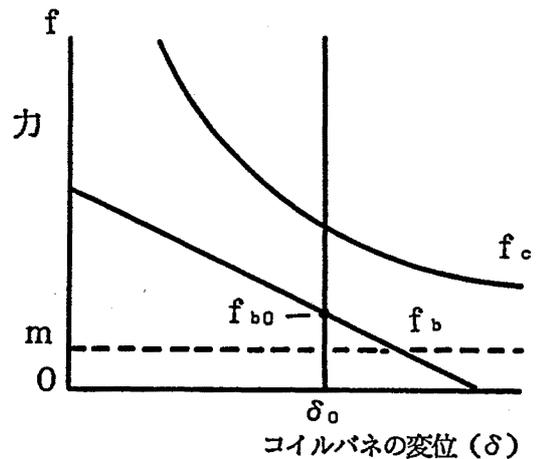


Fig. 3.9-4 Relation between electro-magnetic force and coil-spring force.
電磁力とコイルバネ力の関係

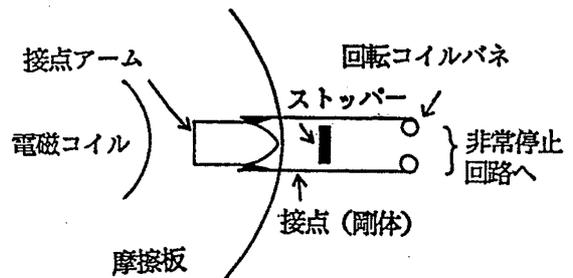


Fig. 3.9-5 Structure of contact part.
接点部の構造

要する時間が電磁コイルの開放時間を上回る場合は OFF デイレー回路を挿入しなければならない。今回実験の対象とした産業用ロボット（安川電機製モトマン L10W）においては、高速度動作からホールド停止させる場合、急停止による衝撃を避けるため、減速制御を行っており、約 0.2 秒の OFF デイレー時間が必要となる。ただし、この OFF デイレーは故障時、デイレー時間が短くなるようにする。接点については、許容変動幅（位置のウィンドウ）に合致するように、接点間隔、および接点アームのバネ定数を検討する。

接点部の構造は Fig. 3.9-5 のように、コイルバネを回転方向で用いる。アーム軸、接点の厚さを無視して考えると、ウィンドウ幅を決定するには、最高速度動作中に非常停止をかける時のオーバーシュートを考慮する。いま、設計によってメカ的に設定するウィンドウ θ の片側のみを考えると、次式で与えられる。

$$\theta_w/2 = \theta/2 + \theta_{0V} \dots\dots\dots (3.9-7)$$

ただし、 θ_{0V} は最大オーバーシュートによる検出角、そして θ_w は許容ウィンドウ幅である。 θ_w は実際に接点 OFF を検出した後にロボットアームが停止するまでの位置を考慮した検出角であり、これをロボットアームの先端の移動量に換算して安全上許容されるかが確認されなければならない。

3.9.3 実験結果および考察

以上の設計指針に基づき、試作機を電気式ロボット の U 軸関節に取り付けた。ただし、電磁コイル電流は、ホールド指令の OFF で遮断され、電源スイッチ投入直前にリセットスイッチ ON で流れるものとする。本ロボットでは、ホールド停止に要する時間は最大 0.2 秒であった。そこで、OFF デイレー時間を 0.3 秒とした。

また、本ロボットにおいては、最高速度からの非常停止を行うと、オーバーシュートは下降時 2.1 度 (実測) であったため、許容ウィンドウ幅を 6.1 度 (片側) とした。これは、機械的ウィンドウ幅 4 度、ロボットアーム先端変位 101 mm に相当する。Fig. 3.9-6 はホールド停止状態から、最高速度 (1400 mm/s) で下降方向に暴走したことを想定して行った実験結果である。ただし、暴走状態はプログラムによって模擬した。同図により、暴走発生時刻から接点が開くまでの時間 (機械的ウィンドウ通過時間) t_w は 0.11 sec、暴走発生時から停止するまでの動作角 θ_{w0} は 6.1 度とな

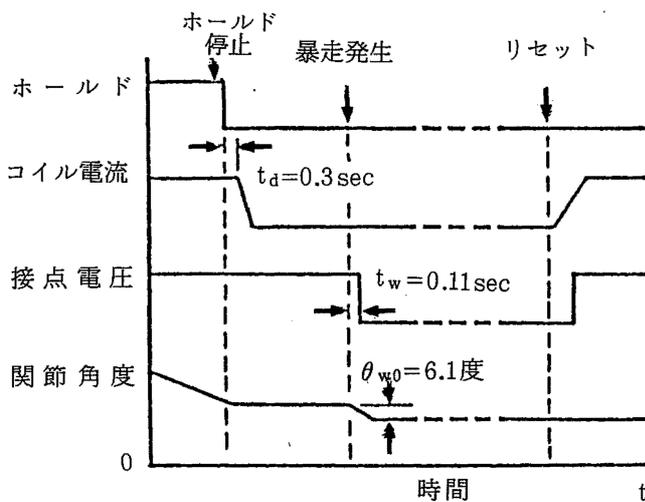


Fig. 3.9-6 Characteristics of mechanical hold monitor system.
ホールド停止監視装置

り、設計目標に合致した結果を得た。また、暴走速度が遅くなるに従い t_w , t_{0V} が短くなり、同速度においては下降時よりも上昇時の方が θ_{w0} は小さくなる傾向がみられる。

今回は、関節軸に取り付けたため、ウィンドウ幅を大きめに設定したが、電動機軸あるいは減速機軸に取り付ければ、許容ウィンドウ幅をさらに小さく設定可能である。構造的には、負作動型電磁クラッチのような可動部を 2 つ持つ (アーマチャ、アーマチャハブ) 機構とすれば、構造はいたって簡単になる。また、ホールド停止状態時に作業当事者以外が勝手にホールドを解除しないように、プラグ式ホールドキースイッチ等を用いる必要がある。

3.9.4 おわりに

本節では、ホールド停止中の作業の安全を確保するためホールド停止監視装置を提案した。本装置を産業用ロボット等の自動機械に適用することにより、保守・点検等の作業の安全性を飛躍的に向上させることが可能となる。

(平成 2 月 11 月 30 日受理)

参考文献

- 1) 杉本, 蓬原他: パルスレーダセンサの開発と安全制御の論理, 第 4 回日本ロボット学会学術講演会, pp.493-494 (昭 61)
- 2) 糸川, 梅崎, 蓬原: 無人搬送車に適用した超音波パルスレーダ型センサの性能評価, 第 7 回日本ロボット学会学術講演会, pp.125-128 (平元)
- 3) 蓬原, 向殿: 超音波パルスレーダによるフェールセーフな障害物検出, 電学論, Vol. 110-D, No. 3 (平 2) pp.218-226
- 4) 糸川, 杉本, 蓬原他: 機械の制御回路の安全化のための調査研究報告書, 産業安全技術協会 (平元)
- 5) 杉本, 向殿他 2 名: フェールセーフな安全制御用 IC を用いた光線式センサ, 第 7 回日本ロボット学会学術講演会, pp.133-136 (平元)
- 6) 杉本, 梅崎, 池田, 金子他 1 名: 光線式人間検知センサの特性評価システム, 第 8 回日本ロボット学会学術講演会, pp.339-342 (平 2)
- 7) 梅崎, 清水, 池田: 安全センサの監視空間に関する一考察, 日本機械学会山梨地方講演会, pp.85-86 (平 2)
- 8) 杉本, 清水, 梅崎: 振動検知型安全マットの開発,

- 第 8 回日本ロボット学会学術講演会, pp.359-362 (平 2)
- 9) 杉本, 池田, 梅崎: フェールセーフ技術 (その基礎と応用), 自動機械安全設計コーステキスト, 日本 NUS (平元)
- 10) 糸川他 2 名: フェールセーフな ON/OFF ディレイ要素の安全システムへの適用, 第 7 回日本ロボット学会学術講演会, pp.171-174 (平元)
- 11) 糸川, 杉本, 蓬原, 向殿: フェールセーフ・ON ディレイの構成, 第 19 回安全工学シンポジウム (平元)
- 12) 池田, 蓬原他 1 名: 安全制御を目的とするインテリジェントリレーの開発, 第 7 回日本ロボット学会学術講演会, pp.137-140 (平元)
- 13) 加藤, 高橋他: 非溶着リレーを使った非常停止装置, 第 6 回日本ロボット学会学術講演会 (平元)
- 14) 杉本, 池田, 蓬原, 向殿他 2 名: 産業用ロボットの安全システムの構成, 第 5 回日本ロボット学会学術講演会, pp.83-90 (昭 62)
- 15) 杉本, 蓬原, 向殿他 2 名: 光結合を利用したインタロック用論理素子, 第 6 回日本ロボット学会学術講演会, pp.383-386 (昭 63)
- 16) 糸川, 杉本, 深谷, 佐藤, 江川, 清水他: 安全制御における計測技術, 産業安全研究所特別研究報告, RIIS-SRR-86, No. 1 (1986)
- 17) 杉本, 向殿他 1 名: 雑音による誤り防止を配慮したホールドモニタ, 第 7 回日本ロボット学会学術講演会, pp.129-132 (平元)
- 18) 蓬原, 杉本, 向殿他: 雑音による誤り防止を配慮したロボットの安全装置, 第 19 回安全工学シンポジウム, pp.185-189 (平元)