

2 安全制御における計測技術

条 川 壮 一*
杉 本 旭*
深 谷 潔*
清 水 尚 憲*

Fail-safe Mechanism and Application for Man-Machine Systems

by Soichi KUMEKAWA*
Noboru SUGIMOTO*
Kiyoshi FUKAYA*
Shouken SHIMIZU*

Safety discussions are always heated one. Particularly with the development of safety for new types of machinery with a minimum record of accidents, safety that is traded off with economy is subjectively evaluated and intensive discussions sometimes fall through due to "differences of opinion".

Not only innovative machinery such as robot, numerical control machinery, automatic guided vehicle, stacker crane, machining center but various kinds of conventional automated machine are no exception in this sense.

To bring to end now a repetition of subjective discussions on safety and to approach the safety of automated machines from a common point of view, in this paper, establishment of a "principle of safety" is tried. According to the Principle, safety discussions can be continued for machinery with a short accident record, like robots, from a common standpoint. And conclusion satisfactory to everyone concerned can be reached.

This paper presents the development of the Principle by discussing construction of safety sensor sensing human accessing to danger zone/point and interlocking mechanism to be reasonable. And robot-related human operation in Shuttle-working system and pneumatic grinding system improved in fail-safe are developed and evaluated from a point of view of the Principle.

KEYWORDS : Robot, Numerical Control Machinery, Automatic Guided Vehicle,
Principle of Safety, Safety Sensor Sensing,
Interlocking Mechanism, Shuttle-Working System,
Fail-Safe Mechanism and Application for Man-Machine Systems

* 機械研究部 Mechanical Safety Research Division

2.1 電磁ノイズによる 制御機器の誤動作

2.1.1 まえがき

最近のマイクロエレクトロニクス技術の機械技術分野への適用は著しく、その実態はメカトロニクス機器（以下「メカトロ機械」と略称する）として、FA (Factory Automation) 分野や OA (Office Automation) 分野等において数多く利用されているところである。

一般に、メカトロ機械は知能をもつメカのことである。センサー、判断（演算）装置、メモリおよびアクチュエータの4つから構成されるシステムであるとされている。

従来の機械では、パワー・エネルギーを媒体として機械のアクチュエータ等の制御を行っていたが、これに対しメカトロ機械では「情報（信号）」を媒体としてアクチュエータ等の制御を行う訳であり、この情報処理のための、CPU（中央演算処理装置）やメモリを装備しており、電気信号として処理している。

そして、このようなメカトロ機械における暴走事故の原因分析は非常に困難である。メカトロ技術の発達により、適用されている電子回路やメカニズムが余りに複雑になってしまったため、事故を発生した機械の構成状態を把握するだけでも大変複雑な仕事となる。ましてや、その原因を調査分析する場合においては、従来の機械における故障によるもののようにある程度再現性のあるときには、再現実験や電算機シミュレーションによる原因分析手法が適用可能であるのに対して、メカトロ機械では、どこからか突然侵入してくる単発的な電磁ノイズによってさえ誤動作等を起し、その結果として災害に結びつくことがあるが、このような場合に行われる非常停止操作後の再スタートによって全てが初期状態にリセットされてしまい、暴走を再現させることは殆んど期待できないことも多い。

また、メカトロ機械は別名 ME (マイクロエレクトロニクス) 制御機械とも呼ばれるように、非常に小さな電気信号で大きなパワーを制御するといった大変アンバランスなシステムであり、ちょっとした信号の乱れがそのまま大パワーの乱れ（暴走）となって危険な状態を作り出す可能性が大きい。

このような、制御用の電気信号を乱れさせる機械側の要因は、次の2つに大別して考えられる。

- (a) ハードウェアの障害：これはいわゆる制御回路の構成要素が不良となった状態、狭義の信頼性技術における故障の定義¹⁾と同じ状態であり、一度機械が正常に動作しない状態になってしまうと、自然に回復することはない。
- (b) ソフトウェアの障害：故障とは無関係な状態にあっても、外部から制御回路の処理能力を超えた信号等が入って発生する誤動作などで、外部の原因となるものが除去されると正常な状態に復帰するものと、メモリに格納されたプログラムが破壊されたりして、外部の原因となるものが除去されても正常に復帰せず危険な状態がそのまま残るものがある。この種の障害の原因としては、リミットスイッチやリレーの開閉の際に発生するサージ、雷サージ、電源の瞬断・電圧急変、静電気放電などの電磁ノイズ²⁾及び入力信号の相互のタイミングのズレなどがあげられる。

これら2つのうち特に(b)の電磁ノイズによって機械が誤動作して災害に至った場合には、その災害原因を究明することは極めて困難になる。しかも、このような機械の誤動作によって直接災害に結びつく事故や、誤動作を生じた後の処理の段階で災害を発生する事故が、機械のメカトロ化の進展に伴って増加することが考えられるため、本特別研究の一環として、電磁ノイズが制御機器に対して与える影響を把握することを目的として実験的検討を行った。

2.1.2 電磁ノイズの概要

メカトロ機械に適用されているマイクロエレクトロニクスは、従来からのアナログ方式に加え、デジタル方式が主として用いられていることに特徴があるが、デジタル回路に関する電磁ノイズの影響は、アナログ回路に対するそれと比較して、一般的に次のような基本的な相違があるとされている。

アナログ回路の入出力特性は連続的であり、外来ノイズ（外部から侵入する電磁ノイズ）から受ける影響の度合いも連続的である。すなわち電磁ノイズの大きさが大きくなれば、それにつれてその影響も大きくなる。また、瞬間的に侵入した電磁ノイズに対しては、計器の指示が一瞬振れてもとにもどるようあくまでも過渡的な影響にとどまり、電磁ノイズ源がなくなれば

ば回路の特性は元の状態に復帰する。

一方、デジタル回路を構成する論理素子は、スレッショルドレベルとそれに対応した一定の雑音余裕度(ノイズマージン)を有しているので、外来ノイズの各論理素子に対する影響がこの雑音余裕度を超えない限り、回路の機能は正常に動作する。しかし、この雑音余裕度を超えるような電磁ノイズが侵入してきた場合は、これが論理素子により増幅・整形されて系の誤動作の要因となるだけでなく、誤動作の過程でフリップフロップや記憶装置に保持された情報が失われてしまうと、電磁ノイズ源を取り去っても、もとの動作状態にもどれない危険性をはらんでいる。

また、デジタル回路により構成された制御機器は、ソフトウェア(記憶装置に格納されたプログラム)によりその機能が与えられる場合が多いが、電磁ノイズによりプログラムが破壊されれば勿論のこと、仮に破壊されなかったとしても、アドレスバスなどが外乱を受けると、プログラムの暴走を招く危険もあり、回路が予期しない状態に陥って、その状態から脱出できないようなこともあり得る。

このように、デジタル回路は、電磁ノイズなどの外乱が過渡的なものであっても、内部の記憶要素の中にその履歴が残って、電磁ノイズ源を取り除いても回路の状態が元の状態にもどらない危険性がある点において、アナログ回路と本質的に異なっている²⁾。

電磁ノイズによる制御機器のトラブルについて電気学会が行った実態調査によるとデジタル系のものが70%にも達している (Fig. 2.1-1 参照)³⁾。

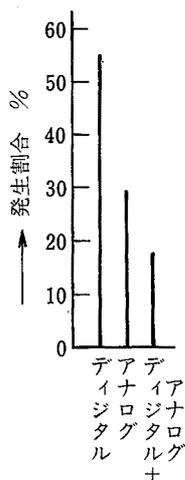


Fig. 2.1-1 Error movement of electronic controllers
制御機器の誤動作

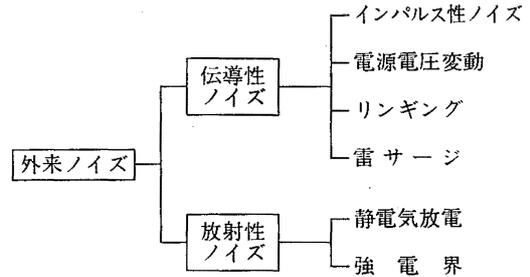


Fig. 2.1-2 Inter system noise which bring on error movement of electronic controllers on machinery

制御機器の誤動作要因となる主な外来ノイズ

ところで、このように電子制御機器の誤動作を発生させる要因となる主な外来ノイズを分類すると概略 Fig. 2.1-2 に示すようになる。インパルス性ノイズは接点において電力投入または遮断時に発生する電磁ノイズである。電力投入時の電流の急激な流れによって生ずるノイズと、電力遮断時に接点間で発生するシャワーリングアーク(接点間げきに生ずる放電現象)によって発生する電磁ノイズはいずれもインパルス性ノイズになる³⁾。特に、遮断時の電磁ノイズは複雑なノイズ状態になり、その波高値も非常に高い電圧となるため、制御機器等の誤動作の原因の多くは、この遮断時に発生するインパルス性ノイズによるものと思われる。

2.1.3 制御機器用直流電源装置の電磁ノイズによる影響

Fig. 2.1-2 に示したように、メカトロ機械用制御機器の誤動作の要因となる電磁ノイズには、種々のタイプのものがあるが、伝導性ノイズの中のインパルス性ノイズによる影響を検討することとした。また、メカトロ機械への電磁ノイズの侵入の仕方についても種々のものが考えられるが、まず基本的な部分として、メカトロ機械のアクチュエータを制御する制御用電源への電磁ノイズの侵入の影響について取り上げることとした。

2.1.3.1 供試体

近年、マイコン及びコンピュータ応用機器、制御機器、NC 機械、その他デジタル機器等のモジュール電源として多く使用されているスイッチング・レギュレータを対象にし、本実験では市販されているもので、単出力、2 出力、3 出力のもの 6 機種のスイッチング・

レギュレータを供試体とした。

出力容量についてみても 14.4 W~100 W までの種々のものであり、その各々の仕様は、Table 2.1-1 に示すとおりである。なお、これら供試体としたスイッチング・レギュレータは、上記のメカトロ機械等の組込み用電源として製作されたものである。

2.1.3.2 実験装置

供試体に擬似電磁ノイズを注入するために実験で使

用した電磁ノイズ発生装置は、東北金属工業㈱製のインパルスノイズシミュレータ HTG-3222 A であり、その構成基本回路の概要は、Fig. 2.1-3 に示す。またその性能については、Table 2.1-1 に示すとおりである。

波形の観測に用いたオシロスコープは、岩崎通信機㈱製の SS-5121 B (DC~100 MHz) である。

Table 2.1-1 Specification list of switching regulators as experimental samples
直流電源供試体の仕様一覧

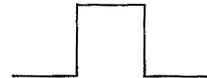
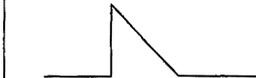
供試体記号	A	B	C		D	E			F	
			C-1	C-2		E-1	E-2	E-3	F-1	F-2
ch	—	—	CH 1	CH 2	—	CH 1	CH 2	CH 3	CH 1	CH 2
定格出力電圧	5 V	5 V	5 V	24 V	24 V	+ 5 V	+12 V	-12 V	15 V	15 V
定格出力電流	20 A	5 A	1 A	0.4 A	0.6 A	5 A	1 A	1 A	1.5 A	1.5 A
総出力容量	100 W	25 W	14.6 W		14.4 W	49 W			45 W	
入力条件	電圧許容範囲		AC 90~132 V, DC 110~175 V		AC 90~132 V					
	周波数		47 Hz~440 Hz							
	効率		75% (TYP)		65% (TYP)	75% (TYP)	70% (TYP)			
	突入電流		20 A (TYP)	15 A (TYP)	15 A _{MAX} (定格入力, +25°C)					
	入力電流		2.1 A (TYP)	0.74 A (TYP)	0.45 A (TYP)	0.35 A (TYP)	1.3 A (TYP)			
	ノイズフィルタ		内				蔵			
出力条件	電圧可変範囲		±10%		±5%	±10%		固定	±10%	
	リップル・ノイズ		出力電圧×1.0%+50 mV P-P _{MAX} (DC~100 MHz)							
	入力変動		出力電圧×0.4% _{MAX}							
	負荷変動		出力電圧×0.8% _{MAX}							
	ドリフト		出力電圧×0.5%+15 mV _{MAX} (投入 1H 後 8H)							
	保持時間		20 mS _{MIN}							
付属機能	立上り時間		100 mS _{MAX}		200 mS _{MAX}	100 mS _{MAX}	200 mS _{MAX}			
	過電流保護		垂下特性 (自動復帰)							
	過電圧保護		内蔵 (スケルチ方式)		クローバ方式	ツェナーリミッタ方式	リミッタ方式	クローバ方式	リミッタ方式	クローバ方式

2.1.3.3 実験方法

伝導性電磁ノイズであるインパルス性ノイズの伝播経路は 2 種類に大別される。その 1 つは、ノーマルモード (正相成分) であり、Fig. 2.1-4 の (a) に示すように電源 (入力) 電圧に直列になるもので線間を伝播する電磁ノイズ成分である。このノーマルモードの電磁ノ

イズは、一般には伝播路となる電源線で高周波成分は減衰する。他方のものは、コモンモード (同相成分) であり Fig. 2.1-4 の (b) に示すように電源 (入力) の 2 本の線がアースに対して同相の電磁ノイズを生ずるのである。このコモンモードの電磁ノイズは、線-アース間を伝播路とするため減衰することなく遠方に伝わっていくものである。

Table 2.1-2 Specification of an electromagnetic noise generator
インパルスノイズシミュレータの性能

項目	規格	
ノイズ電圧	方形波 0~2,000V 連続可変 (負荷インピーダンス: 50Ω)	三角波 0~4,000V 連続可変 (負荷インピーダンス: 50Ω)
ノイズ立上り時間	1 nsec 以下	10 nsec 以下
パルス巾	 50/100/200/250/400 nsec Max 1.0 μsec	 350 nsec (50Ω 負荷時)
ノイズ繰返し返り	商用電源50/60Hz に同期 内部可変30~60Hz 外部トリガ0~60Hz ワンショットトリガー	
極性	+/- 切換え	
ノイズ注入	U-E/V-E/W-E/N-E/切換	
ノイズ注入角	0~360° 連続可変	
被試験器電力容量	三相, 単相100/200V, 20A Max (DC も可能)	

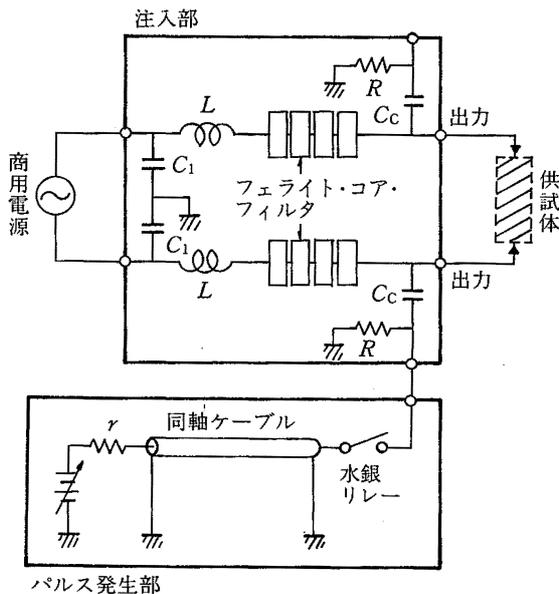


Fig. 2.1-3 Schematic construction of an electromagnetic noise generator

電磁ノイズ発生装置の構成基本回路の概要

従ってインパルス性の電磁ノイズについての評価は、一般にコモンモードテストだけで十分であると考えられている³⁾。

そこで本研究においては、コモンモードの電磁ノイズについての実験を中心として行い、参考としてノーマルモードについても行って見た。コモンモードについての実験の概略構成は Fig. 2.1-5 のブロック図に示

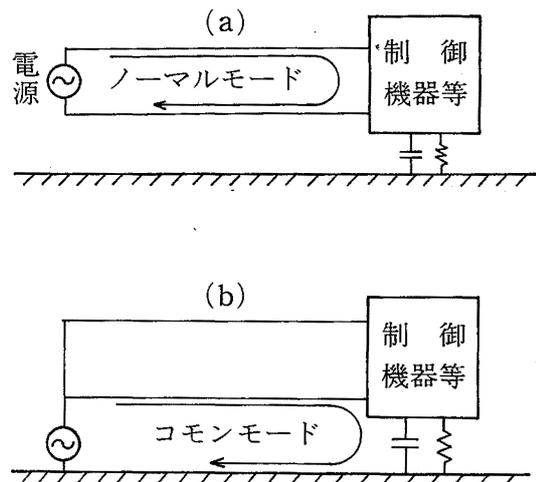


Fig. 2.1-4 Normal mode noise (a) and common mode noise (b)

(a) ノーマルモード電磁ノイズと(b)コモンモード電磁ノイズ

すとおりである。

電磁ノイズ発生器から供試体へコモンモードとして入力される擬似ノイズは、パルス幅 1 μs の矩形波であり入力繰返しサイクルは商用電源 (50 Hz) に同期させた。この場合の供試体の出力については、オシロスコープによって観察測定を行った。

本実験では、Fig.2.1-5 の下側に示したように擬似ノイズパルスの電圧レベル V_i を電磁ノイズ発生器の電圧設定ダイヤルによって変化させ、それに対応する供

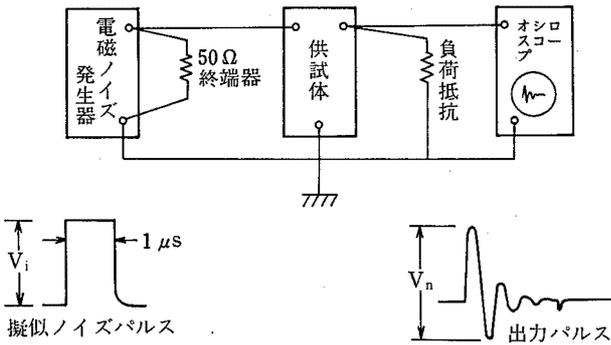


Fig. 2.1-5 Block diagram of common mode noise test
コモンモード実験のブロック図

試体のコモンモード出力の波形の全幅 V_n を測定した。
また、参考として行ったノーマルモードについての
実験の概略構成は、Fig. 2.1-6 に示すとおりであり、擬
似ノイズ及び供試体の出力波形についても、コモンモ
ードの場合と同様に V_i 及び V_n の測定を行った。

2.1.3.4 実験結果

Fig. 2.1-5 に示したコモンモードノイズ実験の結果
については Fig. 2.1-7 (a)及び(b)にプロットしたもの
を示す。

Fig. 2.1-7(a)では、各供試体へ電磁ノイズ発生器から
注入した擬似ノイズ電圧 V_i を横軸にとり、各供試体

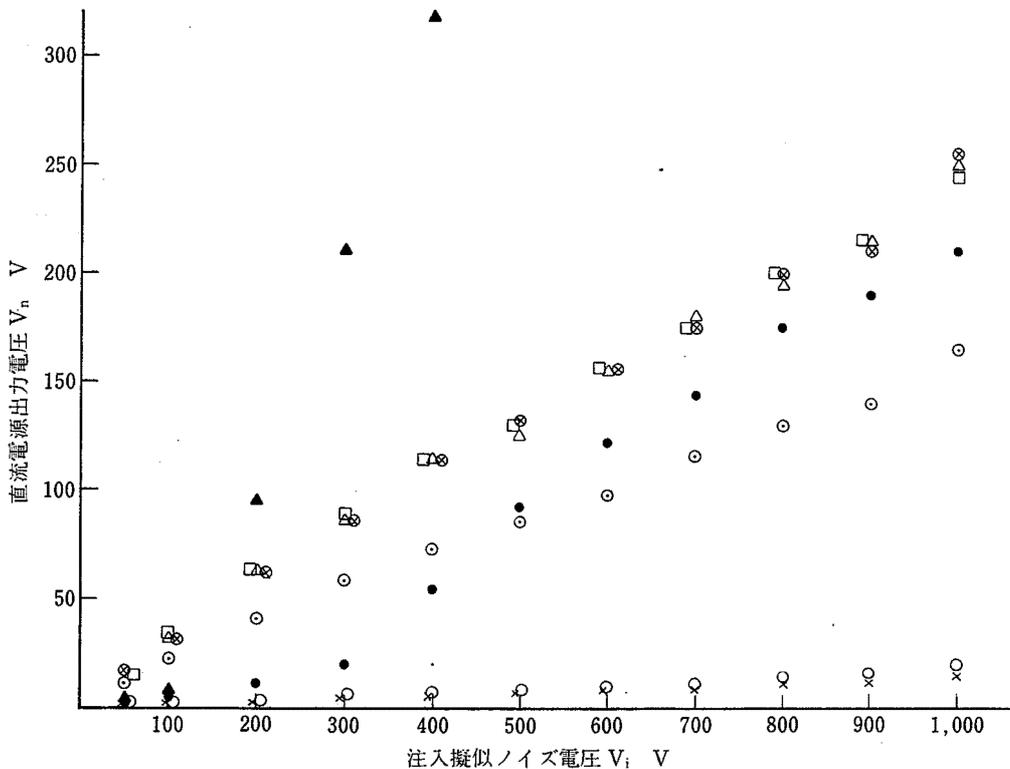


Fig. 2.1-7(a) Result of common mode test コモンモード試験の結果

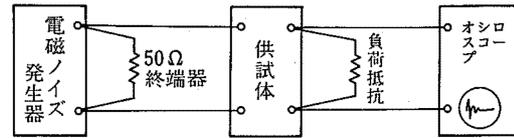


Fig. 2.1-6 Block diagram of normal mode noise test
ノーマルモードノイズ実験のブロック図

のコモンモード出力電圧 V_n を縦軸にとってプロットし
ている。このプロット結果では、各供試体によって、
非常に異なった特性を示していることがわかる。

なお、Table 2.1-1 に示した各供試体と実験結果を
示すプロット記号との関係は、次のとおりである（但
し、同アルファベットのものは、多出力の端子の場合
を示す）。

供 試 体	A	B	C-1	C-2	D	E-1	E-2	E-3	F-1	F-2
プロット記号	●	▲	○	×	⊙	△	⊗	□	□	○

また、Fig. 2.1-7(b)では、各供試体へ注入した擬似
ノイズ電圧 V_i を横軸にとり、この V_i の値に対する各
供試体のコモンモード出力電圧 V_n の減衰量 D を縦軸に
とってプロットしている。ここで減衰量 D は下記の 2.1-1
式により算出したものである。

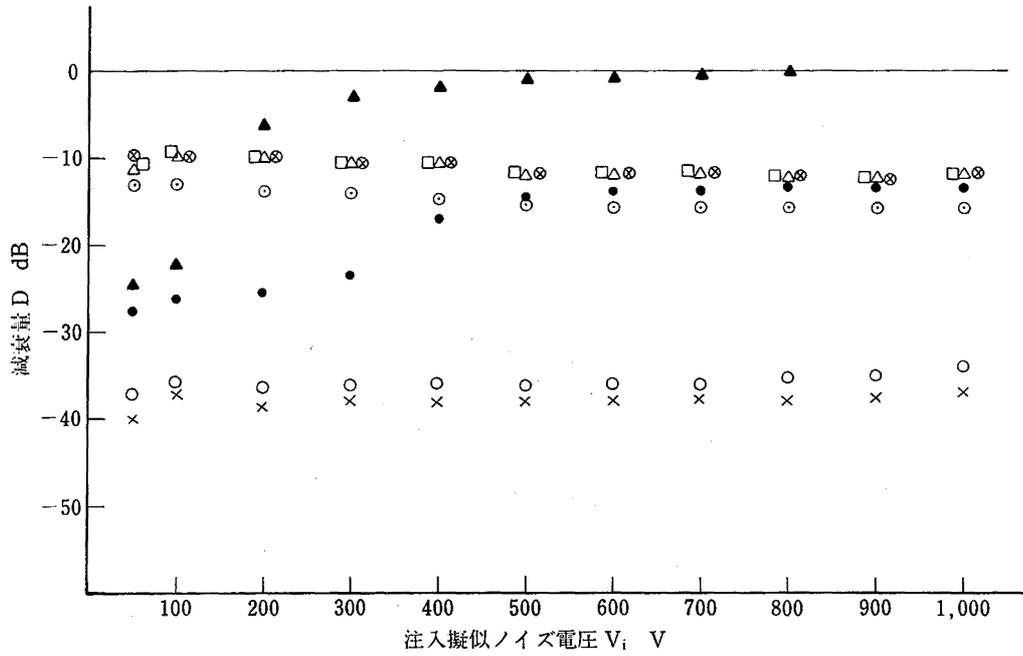


Fig. 2.1-7(b) Result of common mode test (gain)
 コモンモード試験の結果 (減衰量)

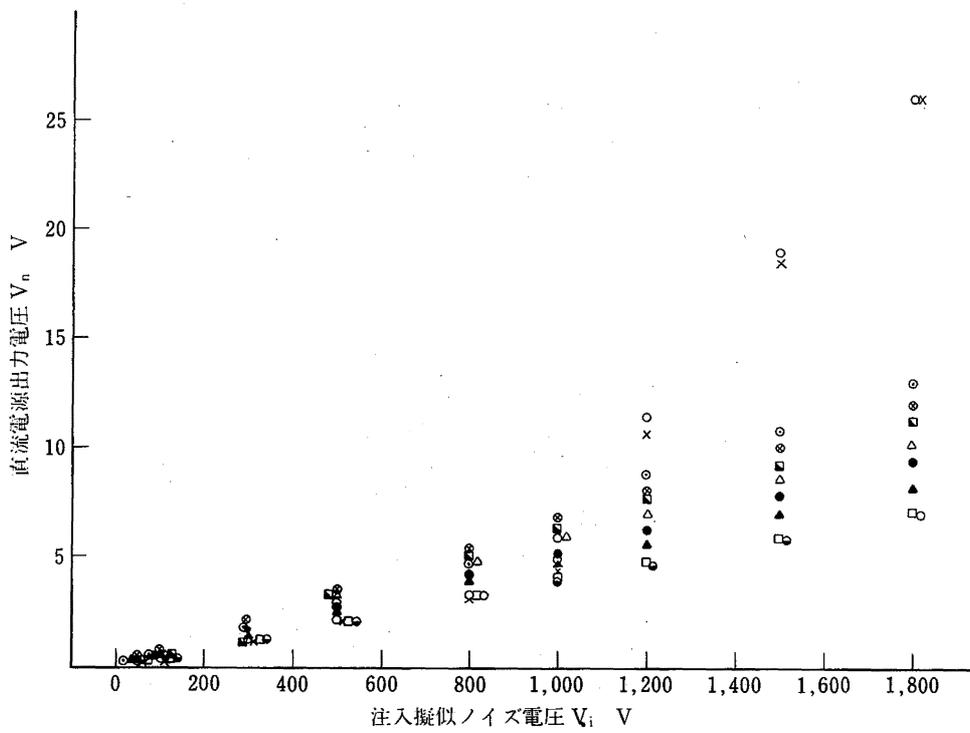


Fig. 2.1-8(a) Result of normal mode test
 ノーマルモード試験の結果

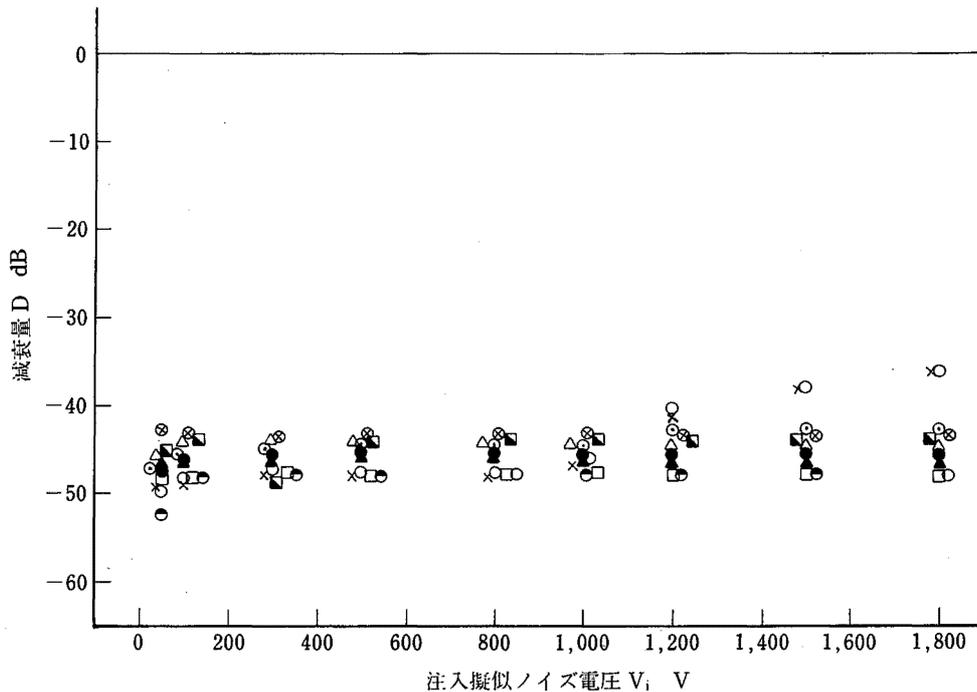


Fig. 2.1-8(b) Result of normal mode test

ノーマルモード試験の結果 (減衰量)

$$D = -20 \log \frac{V_n}{V_i} \quad [\text{dB}] \quad (2.1-1)$$

このプロット結果では、各供試体によって電磁ノイズに対する減衰特性が非常に異なっていることがわかる。

Fig.2.1-6 に示した参考として行ったノーマルモード・ノイズ実験の結果についてプロットしたものが、Fig. 2.1-8 の(a)及び(b)に示すものである。

Fig.2.1-8(a)では、各供試体へ電磁ノイズ発生器から注入した擬似ノイズ電圧 V_i を横軸にとり、各供試体のノーマルモード出力電圧 V_n を縦軸にとってプロットしている。このプロット結果では、供試体Cの場合を除いては、擬似ノイズ電圧 V_i の増加に伴ってやや差が見られるが、ほぼ同様な特性の傾向が認められる。

また、Fig.2.1-8(b)では、各供試体へ注入した擬似ノイズ電圧 V_i を横軸にとり、この V_i の値に対する各供試体のノーマルモード出力電圧 V_n の減衰量 D を縦軸にとってプロットしている。このプロット結果では、各供試体の電磁ノイズに対する減衰特性が、供試体Cの場合を除いて、 $-40 \text{ dB} \sim -50 \text{ dB}$ とほぼ一定の特性を示している。

なお、Photo. 2.1-1 は、コモンモード試験における擬似ノイズ波形と出力波形の例を示したものである。

2.1.3.5 考察

コモンモード試験の結果の Fig.2.1-7(a)から認めら

れるように、擬似ノイズ電圧 V_i の増加に伴って各供試体の出力 V_n の増加する傾向に大きな差異があることがわかる。そして、Fig.2.1-7(b)の各供試体の電磁ノイズに対する減衰特性を見ると、 V_i が 100 V 以下の場合でも減衰量 D は $-10 \text{ dB} \sim -40 \text{ dB}$ の範囲に大きく分散しており、各供試体間の減衰特性の差異が著しいこと、また、供試体A及びBの場合には V_i が 200 V 以上では、やや減衰特性が小さくなる傾向さえ認められる。

ところで、参考として行ったノーマルモード試験では、Fig.2.1-8(a)に見られるように、 V_i に対する出力 V_n もかなり小さく、また、Fig.2.1-8(b)に見られるように減衰量 D も大きく各供試体間にも大きな差異は認められない。

すなわち、供試体としての直流定電圧電源である各スイッチング・レギュレータは、パルス幅 $1 \mu\text{s}$ の矩形波で繰返し数 50 Hz のインパルス性電磁ノイズを注入した場合、ノーマルモードノイズにより受ける影響は比較的小さいが、コモンモードノイズにより受ける影響は非常に大きく、また、その受ける影響の程度は、それぞれのスイッチング・レギュレータによって著しく異なることが明らかとなった。

2.1.4 プログラマブル・シーケンサの耐ノイズ特性の劣化について

プログラマブル・シーケンサは、産業用ロボットを

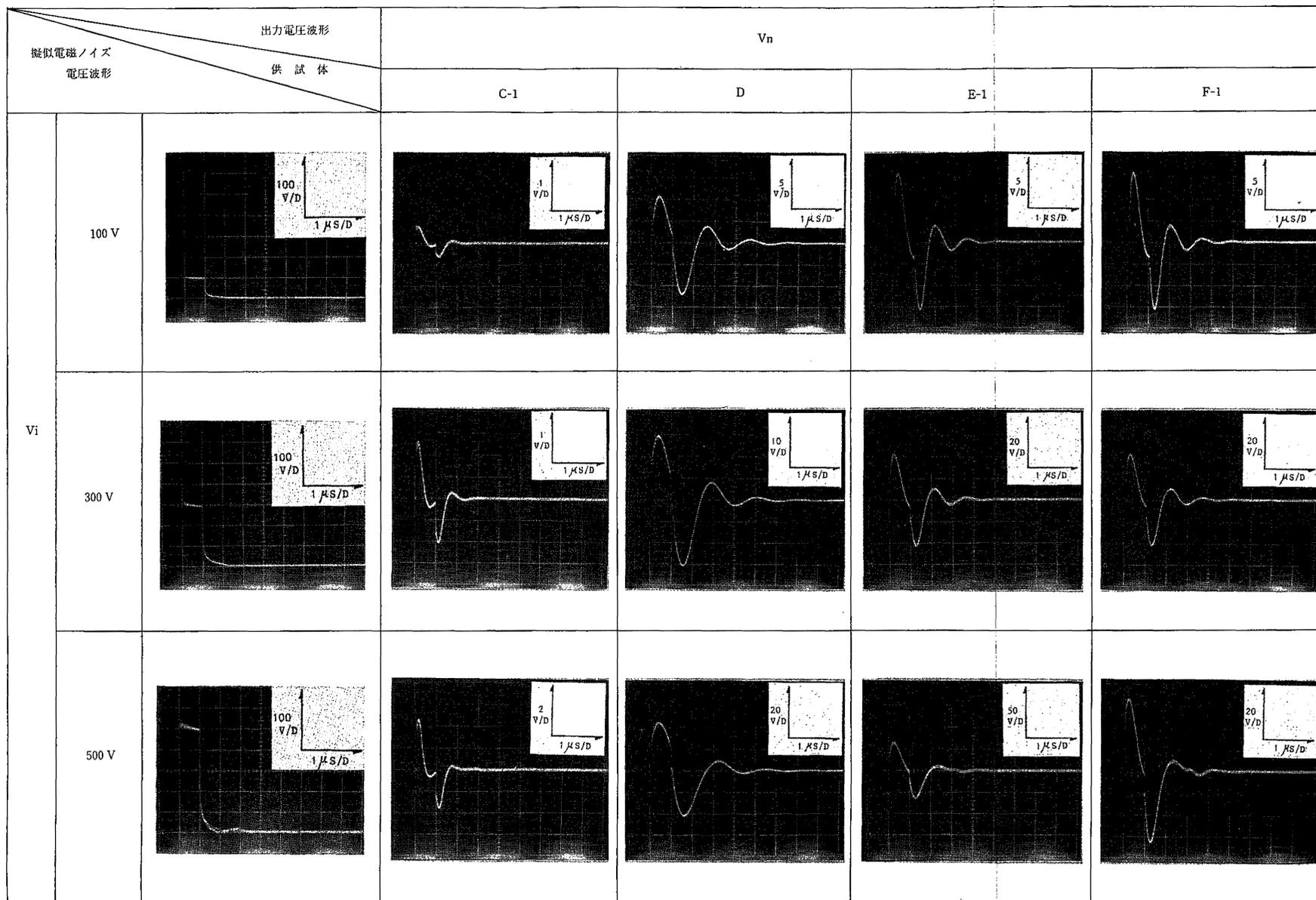


Photo 2.1-1 Examples of noise wave and output wave in common mode test
 コモンモード試験における擬似ノイズと出力波形の例

はじめてとして各メカトロ機械の制御用装置として多く用いられている。筆者らは、上記 2.1.3 におけるスイッチング方式の直流電源装置の電磁ノイズにおける影響に関する実験的研究を進めている過程で、たまたま当所既存のエア駆動式ロボットの制御機器の電源入力側への擬似ノイズの注入を試みた。この時、ある擬似ノイズ電圧になると、エア駆動式ロボットの動作に異常が発生したが、その後に擬似ノイズの注入を止めて、再び擬似ノイズ電圧を徐々に増加させてみたところ、再びエア駆動式ロボットの動作に異常が発生した擬似ノイズ電圧が、最初に誤動作が発生した時より低い電圧であることに気づいた。そこで、プログラマブル・シーケンサの誤動作についての耐ノイズ特性が、擬似ノイズ注入回数によってどのような影響を受けるか、実験的に検討を行うこととした。

2.1.4.1 供試体

当所に既存のエア駆動式直交座標型ロボットの制御装置であるプログラマブル・シーケンサと同機種のもの 5 台を購入し供試体とした。なお、供試体の仕様は、Table 2.1-3 に示すとおりであり、シリーズ方式の多出力直流電源装置を内蔵したものである。

2.1.4.2 実験装置

供試体に擬似電磁ノイズを注入するために、この実験で使用した電磁ノイズ発生装置は、上記 2.1.3 の実験に用いたインパルスノイズシミュレータ HTG-3222 A である。また、供試体の出力信号を観察記録するのに用いた記録計は、(株)日置電機製のメモリ・ハイコーダ 8802 である。

なお、実験装置及び供試体の構成は、Photo. 2.1-2 に示すとおりであり、本実験及び上記 2.1.3 における実験も擬似ノイズ以外の外乱の侵入を防止するため、Photo. 2.1-3 に示すような電磁シールド室内において行った。

2.1.4.3 実験方法

本実験においては、供試体の入力電源として 100 V (50 Hz) の商用電源を 1 対 1 のトランスを介して接続し、供試体に予めプログラムしたシーケンス動作をさせ、供試体の出力（動作リレーの出力）を記録し、正常状態を出力信号とした。次に、電磁ノイズ発生器から 50 Ω の終端器を介して供試体の入力電源端子へ、ノーマルモードとしてパルス幅 1 μs の矩形波を商用電源 (50

Table 2.1-3 Specification of programable sequential controller

供試体 (プログラマブル・シーケンサ) の仕様

仕様	項目	内容
入力仕様	方式	無電圧接点入力, オープンコレクタ入力
	電圧	DC 15 V
	電流	8 mA
	最少入力パルス幅	5 mS
	絶縁方式	フォトカプラ
	動作表示	20点 LED
	端子接続方式	20点/4 コモン
出力仕様	方式	リレー接点
	定格容量	DC 30 V 2 A, AC 240 V 2 A MAX
	機械的寿命	1,000万回以上
	電氣的寿命	50万回以上
	動作表示	16点 LED
	端子接続方式	16点/3 コモン
	負荷短路保護ヒューズ	2本
一般仕様	定格操作電圧	AC 100 V または AC 200 V, 50/60 Hz
	許容操作電圧範囲	+10% ~ -15%
	定格消費電力	40 VA 以下
	絶縁耐圧	AC 1,500 V/1 分間
	耐振動	16.7 Hz 複振巾 3 mm
	周囲温度	0~55°C
	周囲湿度	30%~90%
	保存温度	-10°C~65°C
	耐ノイズ	1,500 V(電源)1,000 V(入出力)
	絶縁振抗	50 MΩ 以上 (DC 500 V メガー)
周囲雰囲気	腐蝕性ガス不可	
重量	3.2 kg	
性能仕様	制御方式	ストアードプログラム
	プログラム方式	ステップ式
	プログラムステップ数	48ステップ
	入力点数	20点 (a0~h1, a2, b2, c2, d2)
	出力点数	16点 (A0~H1)
	内部リレー	8点 (A7~H7)
	タイマー機能	0.1~100 秒
	リピート機能	1~255
センサー用 DC 電源	DC 15 V 0.4 A	
リモート端子	4 点	

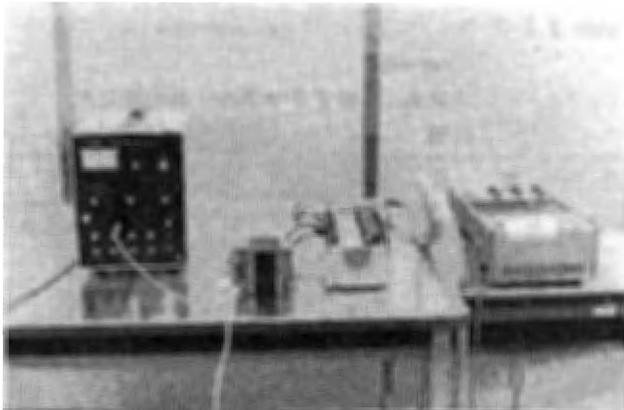


Photo 2.1-2 Schematic construction of an experiment on a sequential controller
実験装置の構成

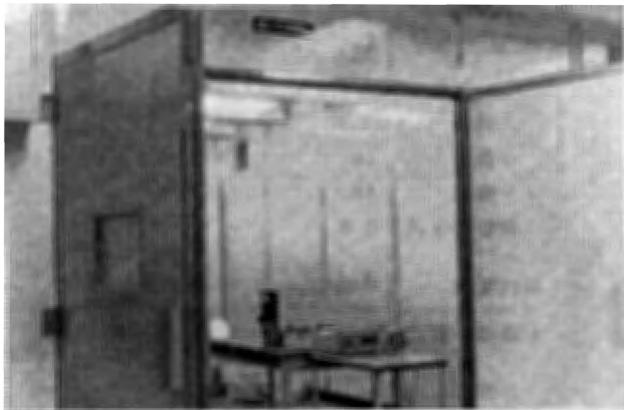


Photo 2.1-3 Electromagnetic shield room
実験用電磁シールド室

Hz)に同期させて注入する。この時、電磁ノイズ発生器から注入される擬似ノイズ電圧 V_i を徐々に増加させていき、供試体の出力を記針装置で観測し、異常状態の信号を発生した時の擬似ノイズ電圧 V_i を供試体の第1回目の誤動作発生時のノイズ電圧とした。そして、直ちに擬似ノイズ電圧 V_i を低下遮断し、供試体が正常状態の動作をしていることを確認した上で再び擬似ノイズ電圧 V_i を徐々に増加させ、供試体の出力信号に異常が表われた時に第2回目の誤動作発生時の擬似ノイズ電圧とした。以下、同様にして擬似ノイズの繰返し注入試験を行った。

2.1.4.4 実験結果

上記の実験方法により、5台の供試体について同様の擬似ノイズの繰返し注入試験を行った結果が、Table 2.1-4 に示したものである。なお、供試体が誤動作を発生した V_i の最低値（例えば、No. 1 では 700 V, No. 2 では 600 V）は、その電圧より 100 V 低い V_i で、擬

Table 2.1-4 The number of noise test repetition and noise voltage unexpected motion of the controllers

プログラマブル・シーケンサにおけるノイズ試験回数による誤動作劣化

試験繰返し回数	誤動作発生時の擬似ノイズ電圧 V_i (V)				
	供 試 体				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
1	1,400	1,450	1,300	1,400	1,300
2	1,200	1,300	1,200	1,300	1,200
3	950	1,200	1,100	1,200	1,100
4	900	1,000	1,000	1,000	1,000
5	800	900	900	900	900
6	750	800	800	800	800
7	750	700		800	
8	750	600			
9	750				
10	700				

似ノイズ注入試験を5回繰返しても供試体が誤動作しなかったという結果に基づくものである。

Table 2.1-4 の結果から、誤動作を発生する時の擬似ノイズ電圧 V_i は、絶対値として各供試体によって異なっているが、試験の繰返し回数の増加に伴って次第に低い電圧となっていることが認められる。

なお、Fig. 2.1-9 に供試体からの出力信号の正常状態及び誤動作時の異常状態の記録例を示す。

2.1.4.5 考察

Table 2.1-4 の結果について、供試体が第1回目の誤動作を発生した時の擬似ノイズ電圧に対する比率を縦軸にとり、第2回目以降の誤動作を発生した擬似ノイズ電圧と試験繰返し回数との関係を5台の供試体についてプロットすると、Fig. 2.1-10 のようになる。これを見れば、明らかなように、擬似ノイズによって誤動作を発生した供試体は、繰返して擬似ノイズを注入した場合は、前回より低い擬似ノイズ電圧で誤動作を発生する現象が認められる。また、誤動作を発生する擬似ノイズ電圧の低下は、比較的顕著であり、繰返しの回数が10回未満であっても、初回の誤動作時の擬似ノイズ電圧の50%程度で、誤動作を発生している。

ただし、Fig. 2.1-9 の No. 5 供試体の例に見られるように、供試体としてのプログラマブル・シーケンサの誤動作が、動作停止という状態に至ることもあったことが観測された。

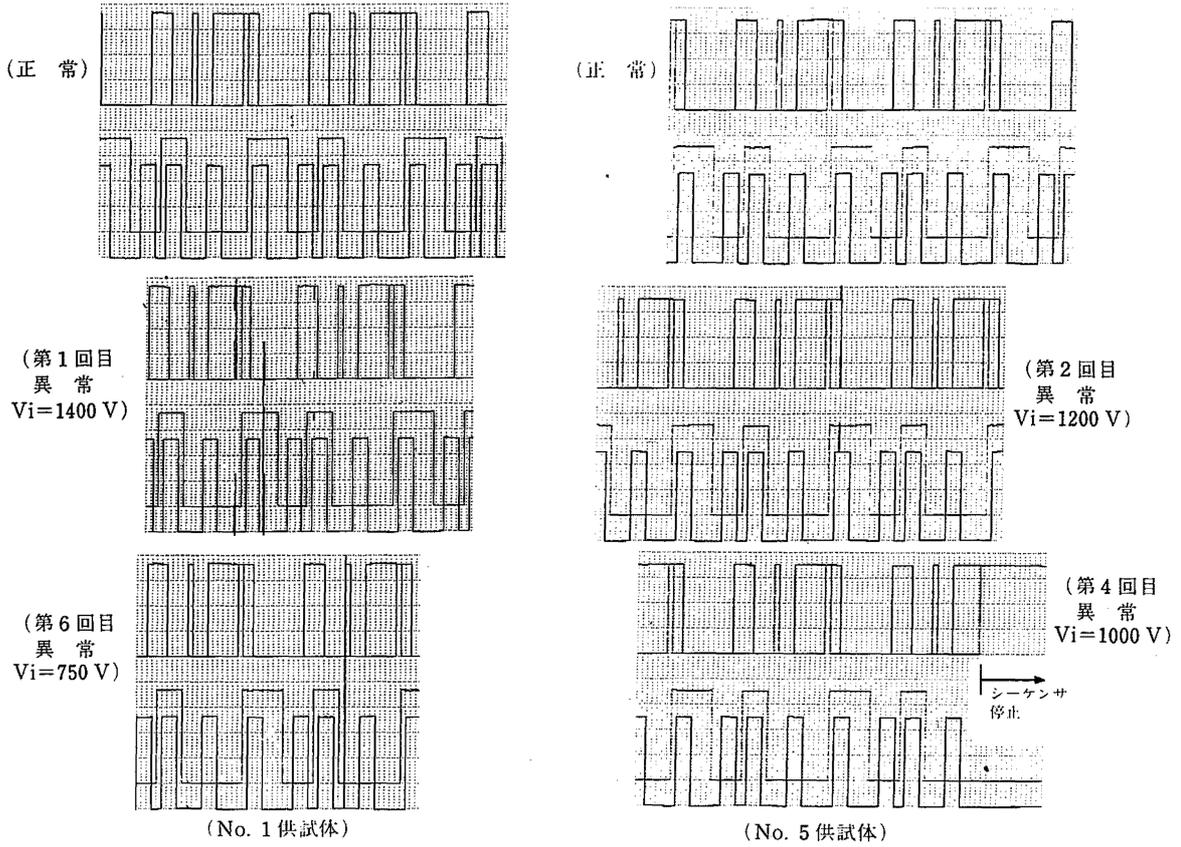


Fig. 2.1-9 Examples of out-put signal of the sequential controllers

プログラマブル・シーケンサの動作出力信号の例

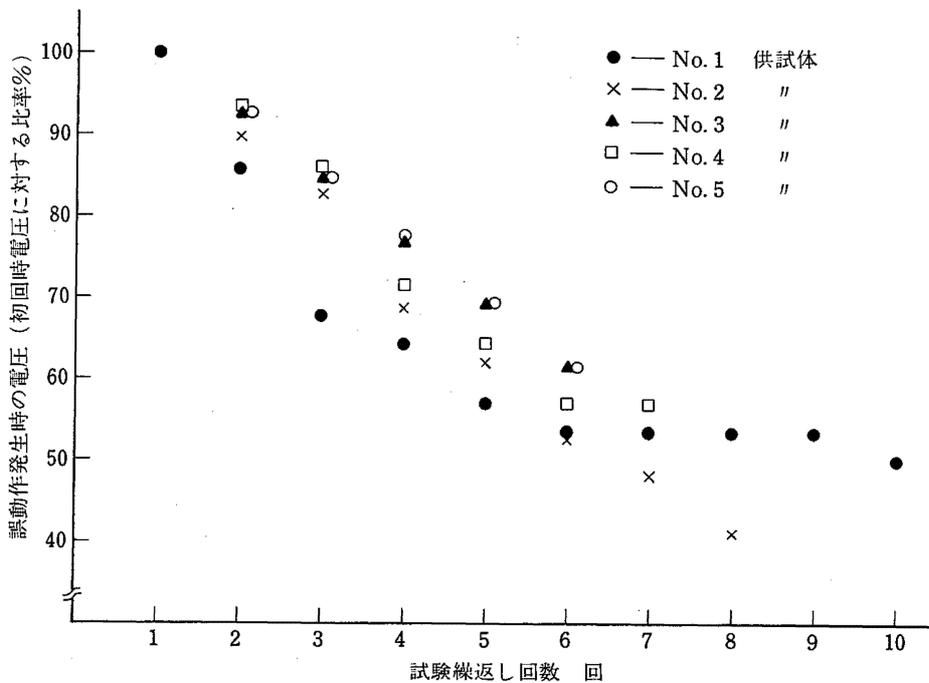


Fig. 2.1-10 The number of noise test repetitions and noise voltage occring unexpected motion of the controllers

プログラマブル・シーケンサの電磁ノイズによる誤動作劣化

すなわち、シリーズ方式多出力直流電源を内蔵したプログラマブル・シーケンサを供試体とした本研究の実験結果から、誤動作についての耐ノイズ特性は、電磁ノイズにより発生する誤動作を繰り返し発生する度に、劣化の傾向があることが判明した。

2.1.5 おわりに

本研究においては、メカトロ機械等の制御装置用電源として多く用いられているスイッチング・レギュレータ及び、制御機器としてのプログラマブル・シーケンサを供試体として、電磁ノイズ発生装置により擬似ノイズを注入し、それらの影響について実験的に検討を行った。

その結果、次の問題点が明らかとなった。

制御機器用モジュール電源については、コモンモードの電磁ノイズに対しては、比較的大きな影響を受け易く、その程度は機種によって著しく異なっている。このことは、安全技術の点から見ると、数機種の電源装置を制御用電源として使用している産業用機械が同一工場内に（同じ電磁ノイズ環境内に）設置されている場合、電磁ノイズにより受ける影響の度合いが、それぞれ著しく異なってしまう状態となることを意味し、それぞれの電源装置の耐ノイズ特性を明確に把握することは、現実として非常に困難であり（一般に電源メーカーでコモンモード試験を全ての機種について実施しているところは殆んどないと思われる）、従って、全ての電源装置に対して完全に耐ノイズ対策を実施することは不可能に近いことになる。

また、電磁ノイズによるプログラマブル・シーケンサの誤動作発生の特性に劣化現象が存在することは、制御機器等の耐ノイズ性の評価として、初回の誤動作発生時の値で行ったものでは、不十分であること、また、安全技術の点から見ると、ある電磁ノイズレベルで誤動作を発生した制御機器を装備している機種の電磁ノイズに対する危険性は、以前より増大した状態となっているということである。

従って、これらの問題点を改善する安全対策としては、各種機械装置自体が電磁ノイズを発生することを可能な限り防止すること、また、各機械装置に侵入する電磁ノイズを減衰させるような方策を採ることが必要であるが、これらの対策を全ての未確認の外来ノイズに対して完全に対策することは不可能であり、電磁

ノイズによる機械装置の誤動作による危険性を本質的に防止する安全技術が重要となる。この問題を提起して、次章から安全技術の論理へと進めることにしよう。

参考文献

- 1) JIS Z 8115 信頼性用語
- 2) たとえば山崎弘郎他，電子回路のノイズ技術，オーム社
- 3) (社)電気学会，制御機器の雑音と対策，電気学会技術報告（II部）第123号，昭和56年11月

2.2 安全制御の論理

多くの場合、安全が確率統計で語られる。そこでは確率的に災害がレアケースとなるオーダであれば安全対策を要しないと結論を導き出す。また、もしも災害発生率が高くとも、その被害が小さければ安全対策の程度に妥協を許すと結論を導き出す場合もある。

しかし、災害のほとんどはレアケースであり、確率統計論によっては危険性を予知することはできないことは誰も認めているところである。すなわち、もし確率統計論によって確実に安全上の欠陥が指摘されるほどに、それに含まれる危険性が高いものであったら、すでに災害を生じて、対策が検討されているはずである。

システムの論議は、一般にその要素が、それぞれの立場によって異なる不可分割要素、すなわちブラックボックスから開始し、それらの関連付けを行ってゆく。しかし、確率統計論によって安全論議を行う場合に問題なのは、かなり複雑なシステムレベルにあるものをくくってシステムの最小単位、すなわちブラックボックスにしている点である。その場合、ブラックボックスはすでに高度の技術レベルに達していても、その中身（構造）を論ずることはできない。しかし、実はその構造自体がシステム全体の安全性に大きく関わっているのである。すなわち、安全性は、ブラックボックスの中身の構造を問題とするのであり、それに含まれる技術が高度であること自体よりはむしろ、それに込められる安全技術によって評価されるべきである。しかも、安全上の欠陥があった場合の対策は、ブラックボ

ックスの中身を開いて具体的な構造の改善としてなされるべきなのである。

例えば、プレス機械や産業用ロボットの制御では、機械の誤り動作や人間の不安全行動によって生ずる危険性を回避するために、人体（あるいは人体の一部）を検知して、この出力と運転制御の命令との間にインターロックを設けることが一般になされている。光線式安全装置を取り付けたプレス機械では、フレームに投光器と受光器を取り付けて、この間の光ビームを手が遮っているとき、スライドは下降しないようなインターロックをとる。さらにこのようなインターロックでは、一度センサから運転禁止の信号が出たら、この信号が解除されても改めて運転命令が発せられない限り、運転が再開されない構造をとるのである。

このような安全制御の根本に関するセンサや制御回路はどのような構造を持つものであってもよいというわけではない。その中身の構造も極めて重要なのである。すなわち、後で示すフェールセーフに構成されていなければならない。

一般に、安全技術といわれるものは、安全のメカニズムをシステムに盛り込む技術であるとすれば、安全のメカニズムとは何かを明確しておかなければならない。そこで、ここでは安全の論議が共通した観点から行われるよう、まず安全の基礎となるべき「安全の論理」の構築をめざすことにする。

2.2.1 「安全の論理」の構築

(1) 信頼性から安全性へ

a. 安全の立場

安全の論理の構築は「安全はすでに生じてしまった災害を事後処理するのではなく、まだ災害の経験のない機械であってもそこに潜在的危険性が存在するのであれば、先手を打って安全対策を講じておく必要がある」という考え方をとることから出発する。しかも、安全対策を追及する場合、その対象が人間である限りは決定論的（確率統計論ではなく）な態度をもってこれに臨むことが必要である。

システムのトラブル（故障や人間のミス）の発生する頻度を下げて安全性を向上させようと大いに努力をしても、これによって到達できる安全性のレベルにはおのずと限界がある。

生産技術者でさえ、生産性の確保のために信頼性が

けに頼らずに、「生産のプロセスにトラブルが発生することを回避しきれない」という前提に立って、トラブルに対処するための体制作りの重要性を主張している。安全性の観点から機械や生産システムを見る場合、トラブル（人間のミスを含めて、確率的に発生するシステムの障害）の発生に対して、一層シビアな対応が要求される。そのためには、トラブルの発生する頻度を下げるというアプローチは重要である。しかしそれ以上に、トラブルが与える影響に検討を加えて、トラブルが例え発生しても人に怪我をさせないようにする機能（危険側移行率を下げる機能）を設計の際に盛り込んでおくことに重点を置くべきである。この点が、「人」を対象とする安全防護のアプローチの、機械や情報に対するそれと比べて特筆すべきところである。

b. 危険側移行率の改善

安全の広い分野では（人間と機械の両方を含めて）危険性を表現するのに次の式を用いると安全論議の展開が容易になる。

$$\text{危険性} = \left[\begin{array}{c} \text{エラーの} \\ \text{発生頻度} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{危険側} \\ \text{移行率} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{傷害の} \\ \text{大きさ} \end{array} \right]$$

(不) 信頼性 (不) 安全性

…式(1)

ここで、「エラーの発生頻度」とは、信頼性の低い状態の程度を表わし、また、「傷害の大きさ」の意味は自明である。また、「危険側移行率」では、エラーの仕方を問題にする。機械がたとえ故障したとしてもそれが止まってしまう故障（安全側故障）であるのか、動き出したり、止まらなくなったりする故障（危険側故障）であるかによって機械の危険性が大きく変わってくるのである。すなわち、「危険側移行率」とは、発生する可能性のあるエラーに対して、たとえそれが生じても危険とはならないよう（安全側のエラーとなる）、故障の仕方が安全側になるよう設計の際に安全機能をシステムに盛り込むことによって危険性を下げようとする考え方が込められている。

この式によれば、「安全性は信頼性を向上することによっても達成されるはずである」とする主張が正しいとされるのはあくまでも理論の上にすぎない。その主張が人の安全とは無関係に、機械の安全の討議の中でなされるのなら何も反論することはない。しかし、ことが機械ではなく、人間の安全となると問題は別である。そうなると、高い信頼性を達成したと主張されるシステムに関して極めて信頼にたる信頼度の数値を

提示して、それを明確に証明しなければならない。

現在使われている産業用ロボットなど多くのメカトロ機械は多品種少量で生産されているため、信頼性の理論がそのまま適用できないし、そのコントローラで使用されているハイブリッドICも同じである。また機械は全ていつか必ず故障する。このような状態で、もし具体的な信頼度を提示して、危険性がないと主張できる人がいたら、それは大変な嘘つきである。人間の安全を対象にして機械に講ずるべき安全対策を考える場合、機械もそれを扱う人間も故障したりミスをするものだとまず割り切って(信頼性は分からないものだ)、たとえそのようなことが生じて、少なくとも人に怪我をさせることのないようにすべきである。このことは、安全技術者、安全管理者は勿論、機械を設計する技術者も危険側移行率を極めて低いレベルにまで下げるよう、それぞれの立場・観点に応じた努力に集中すべきであることを意味している。しかし、この重要な結論でさえ「安全の論理」の構築の入り口を少し入ったにすぎない。

(2) 危険検出型から安全確認型 (非対称故障率)

さらに、「安全の論理」の追求を続けることにする。

安全対策を講ずる場合、これまでのやり方は、危険を捜し出して、(あるいは、災害を生じて危険の存在を知らされて)、安全対策に着手するという手順を踏んできた。安全の法規制を制定する場合も同様であり、認識された危険性が規制の対象となってきた(これを危険検出型規制とここでは呼ぶことにする)。これらのことは、これまで安全が後手後手に回されてきたことを意味している。

事故を生じた、または十分にそれを予測できる状態—「危険の状態」—と、安全であることが論理的に証明された状態—「安全の状態」—との間に、これまでの事故の経験はないが、はたして安全であるのか危険であるのか分からない状態(確率論的には災害が発生しうる状態)—「不安の状態」—が存在する(Fig. 2.2-1 参照)。安全の論理と議論を進める上で、重要なことは、「不安の状態」を「危険の状態」と同じであると見なして安全対策を講じなければならないとする立場をとることである(「不安の状態」にあっても確率論的に安全である場合もありうるという淡い期待を寄せても、それが明確に安全であるとは言えない限り、人間に「賭」を強いることは許されるべきものではない)。

ある種のセンサ(自己故障診断のために用いるセン

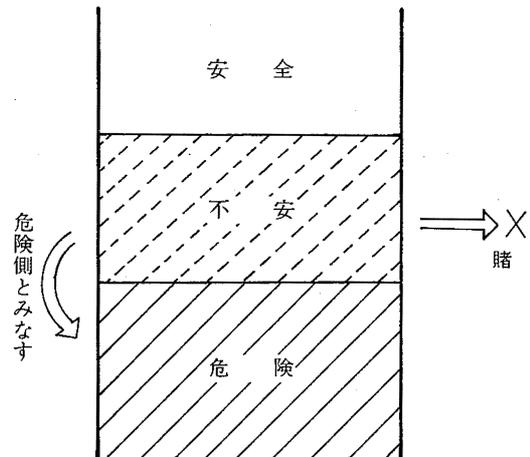


Fig. 2.2-1 Three conditions of safety concerned 「安全」に関する3つの状態

サの多くが含まれる)は、危険が生じたことを検出して機械を停止させるものである。このタイプのセンサが安全の上から大変問題なのは、これが故障して危険を検出することに失敗した場合(「不安の状態」)、機械を安全に止めることができないので、場合によっては(運が悪ければ)事故を生ずることになり、更に運が悪ければ人を死に至らしめることにもなる。このタイプを危険検出型センサと呼ぶ。

これに対して、安全確認型センサは故障によって「不安の状態」になると機械を運転できない状態にしてしまう。すなわち、センサが安全確認能力を失うと機械を止めて、その旨を人間に知らせてくるのである。詳しくはセンサの項目で述べるが、安全が確認されている時だけ「安全」であることが信じられるのであり、危険が検出されていなければ「安全」だとは必ずしも言えないのである。このことから、安全の対策を安全確認型にしてゆくことが重要であると言える。

(3) 安全の論理とフェールセーフ

これまでの「安全の論理」の議論は遂に「フェールセーフ」に到達したと思われるかもしれない。確かに、フェールセーフは故障(広くは人間のミスも含めて)を前提とした安全の論理展開の重要な結論ではある。しかし、一般にシステム論におけるフェールセーフの概念は「人間の安全」を対象とする場合は不完全が残り、さらに思い切った修正にこれを加える必要がある。

それは、安全を検出するセンサ(スイッチの場合もある)からコントローラを経て駆動装置に至るまで「安全」を伝える信号やパワーは明確にその性質を規定しなければならないことである。すなわち、安全を伝え

る媒体が電気信号なら、故障はそれを OFF 信号に変化させ、同様に、電力は遮断され、動力は（ノーマル・リターン）ブレーキによって、バネはノーマル・リターン・メカニズムによって、重力は落下によって、人間に危険なエネルギーが及ぶのを防ぐよう、故障後の安全の媒体の性質とエネルギーの状態を明確に規定しなければならない。これが守られないと、時として、狂ったコントローラに安全のためのコントロールを任すといった矛盾した運転を伴うことになり、あるいは、故障が生じたら決して機械が動き出さないという保証が得られないことにもなる。

(4) 安全とメンテナンス

生産技術の中ではメンテナンスは重要であるが、「安全の論理」に適った機械や装置においては安全の確保をメンテナンスに委ねることはしない。しかし、「安全の原理」を無視した機械や装置は（例えば多くの安全マツスイッチが危険検出型装置である）、信頼性に安全が委ねられることになるから、出荷の時にメーカーは性能と信頼度の保証を行わなければならないし（安全に対する保証は常に極めて厳密に行わなければならないので、大抵はコストが大きい）、またユーザも極めて綿密なメンテナンスをしかも継続して行わなければならない。安全の論理に従って機器の設計をすることはコストを下げる効果を生む。

(5) 安全装置とバックアップ

例えば Photo. 2.2-1 は AGVS (Automated Guided Vehicle System) の接触センサ（安全バンパ）と非接触センサ（反射型光電センサ）である。これらは共に、人間と AGVS が激突することによる装害を防止するための安全手段である。それではなぜこのように 2 種の安全手段を併用する必要があるのだろうか。

「安全の論理」からいえば、安全バンパは安全装置として見なされるべきである。なぜなら本来、安全装置はフェールセーフな構成がなされていなければならないが、安全バンパはそれが可能であるのに対して、放射型の非接触人間センサはそれができないからである。

しかし、非接触人間センサは触れる前に AGVS を停止させることができるという特長を持っている。このような危険検出型の安全手段は、本当の安全装置による安全の最後の「切り札」が控えていてこそ、その特長が生かせるのである。このようにどちらが本物の安全装置で、どちらがバックアップ装置かを判断するのに「安全の論理」に従って検討すれば、より明確な結

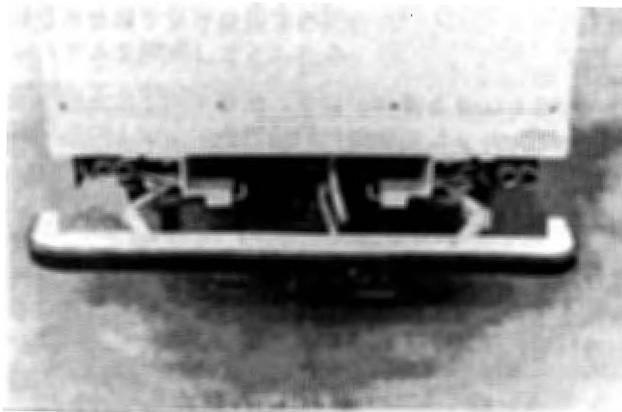


Photo 2.2-1 Two safety measures in AGVS
無人搬送台車における 2 つの安全手段

論が引き出せる。

(6) 安全の論理における公理

これまでの議論は遂に「安全の論理」に到達した。

「安全の論理」を要約すると、

一機械のコントロールやオペレーションは安全が確認されなければ決して運転が許可されないようにする—
ということになる。すなわち、平たく言えば、「(a)分
からなければ(b)無理をしない」ということである。

この言葉のうち、「分からなければ」は、作業を継続するには安全を検出して確認するための検出手段が必要であることを意味し、コントローラなどにおいても、コントロールを継続するためには常に安全が確認されていなければならないことになる。

もう一つの「無理をしない」という言葉は、故障時に無理をせずに (OFF 状態：パワーダウン、ノーマル・リターン、コントロール・ストップ)、機械の運転を停止させるよう設計することを意味している。

これを人間が行うことは大変難しい。また、コンピュータも同様である。これらはエラーを生ずると偶然に安全側だったり、危険側だったりする。そのため、フェールセーフなインターロックによって、それらの危険側のエラーを防止できる安全対策が必要となる。

これまでの議論を整理して、「安全の論理」から生まれた公理をまとめると、次のようになろう。

- 1) 災害の発生前に安全対策を盛り込むこと
- 2) 安全対策に対しては決定論的な態度をとること
- 3) 安全を検出する手段が安全を確認するものであること
- 4) その情報処理は安全を伝えるものであること
- 5) 安全を伝える信号はエネルギーアクティブ（ポテンシャル：ON 状態）を用いること

- 6) 安全を伝える信号を誤って発生させてはならないこと
- 7) 安全を伝える媒体が安全の伝達を停止した場合は OFF 状態(ノーマル:信号 OFF, エネルギダウンなど) されること
- 8) 安全を確認するシステムは公表して、「安全の論理」に適用することを証明すること
- 9) 人間の安全をそのまま委ねることがあってはならないこと。

2.2.2 産業用ロボットの潜在危険性と対策への決定論的アプローチ

(1) ロボットの衝撃危険性の評価実験の概要

産業用ロボットの危険の元凶はそのパワフルなアームにある。それがどれほどの危険性をもつのかを評価するために、ダミーを使って衝撃試験を行った。ここで用いたダミーは自動車の衝突実験用に開発されたものである。

頭部に 3 軸加速度計を取り付けたダミーを立たせておき、その後頭部をロボットアームで打撃を与えた時の衝撃波形を記録した。実験対象のロボットは 2 種類(アーク溶接用電気ロボット、及びスポット溶接用油圧式ロボット)である。

実験の結果を Fig. 2.2-2 に示す。油圧ロボットでは、最大衝撃加速度が 200 G を越え(衝撃速度 2.4 m/s)、電気式ロボットでは 90 G に達する。人間の耐衝撃性に関して過去に我々が行った研究によれば、衝撃加速度の安全限界 35 G を越えると危険であることがわかっていいる。これと比べてロボットとの衝撃は極めて危険な事態となるうることがこの実験結果から分かる。

Fig. 2.2-2 は安全帽を着用した場合には、それを着用しない場合と比べて 1/3~1/4 に最大衝撃加速度が小さくなることを示している。これによって、産業用ロボットの危険領域で行う作業は安全帽の着用が不可欠であると言えるが、それと同時に、ロボットを十分に低速に設定しておく必要がある。これに関する詳細については他の報告書に譲ることにする。

(2) 教示速度の自動設定機能

教示速度が低速に設定されていると思い込んで教示操作をしたため、高速のロボットアームにたたかれた事故例がある。そこで日本では「産業用ロボットの使用等の安全基準に関する技術上の指針」で、「運転状態の教示の状態に切替えた場合に、マニピュレータの作

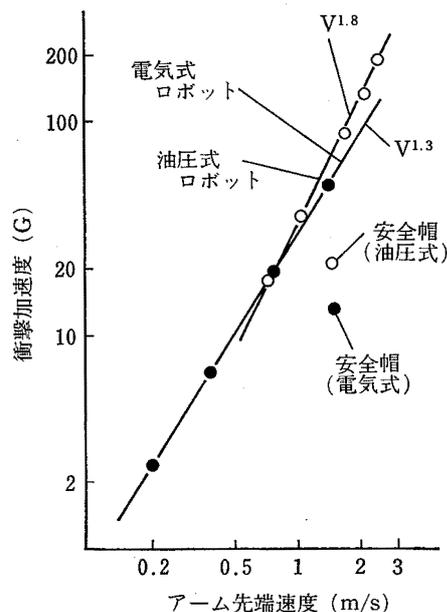


Fig. 2.2-2 Crash impact acceleration
衝撃加速度 (Vは速度)

動速度が自動的に低下すること」と規定されている

そこで、教示基準速度—「教示の状態に切り替えた場合に、この教示基準速度に自動設定され、この後、もし速度の変更を必要とする場合は、別の切替えスイッチ等により作業者が意識的にその変更を行うようにする」—を決定するための実験を行った。

a. 実験の方法

被験者に模擬ティーチングボックス(これはロボットの上下の動きを操作する 2 つのデッドマン押しボタンと非常停止ボタンがついている)を操作させて、上下動の自由度を使った教示操作能力試験を繰り返し行っている間に、12 回に 1 回の割合で、上下動(人間の意志による)を前後動(不意の動作)に切替える(コンピュータによって行う)。被験者は異常動作に気付いて、デッドマン押しボタンから手を離してロボットを停止させる。この時の応答時間を測定した。

被験者は 11 名で、3 名の女性と 1 名の高験者を含んでいる。

b. 実験結果

応答時間の内訳は、ロボットが動き出してから人間がロボットの異常動作に気付くまでの時間 T_1 と気付いてからロボットまでの停止操作をするまでの時間 T_2 とすると、

$$V < \frac{150 - \text{Lower}}{T_1 + T_2}$$

を満足するように教示基準速度 V を決めればよい。ただしここでは、安全距離を 150 mm としている。そして、Lover はロボットが停止信号を受けてから停止するまでのオーバーラン距離である (Fig. 2.2-3 参照)。

測定によれば $T_1 + T_2$ の平均値は 0.53 秒 (標準偏差 0.208 秒) であった。ロボットを低速にすれば Lover は十分に小さくなるので、結局 $V < 140$ mm/s となる。ただしここでは、応答時間として、 $+2\sigma$ を用いている。

この速度は「教示モード」に設定した直後に自動的に切り替わる速度であり、実際の教示運転では作業者の意識で元の作業に応じた速度に変更される。しかし、この教示速度の上限値も十分な低速になるよう決められるべきである。

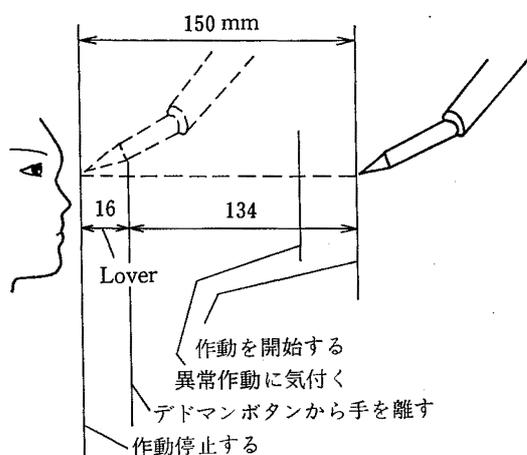


Fig. 2.2-3 Breakdown of safety distance
安全距離のブレイクダウン

(3) ロボットとの接触を防止する対策

我々の調査によれば、これまでに発生したロボット災害の 4 分の 3 は、アームが人間の死角となる方向から人間を不意に襲ったため、人間は挟まれるまで危険に気付かなかつたために生じたものである。従って、産業用ロボットの安全上最も好ましい使い方はロボットと人間が同じ領域を共有しないことである。しかし、現実には、このことを完全に踏襲することが不可能であるのなら、できる限り「安全確認型」の安全対策を講じてゆくべきである。

一般に、「危険検出型」の安全対策をとったことで、あるいは高い信頼性を得たというだけで、安全対策が完成したと思われがちである。多重回路による安全化の方法がこの典型的な例である。危険検出型の安全回路はいくら多重にしてもフェールセーフとはならず、「何重にしたら、安全上満足できるのか」の議論が決して

尽きることはない。あるいは、人間のミスを許さないシステムを構成したとしたら、どんなに人間を教育・訓練しても安全は確保されない。その上、これらの「危険検出型」の安全対策は常に綿密なメンテナンス (人間には教育・訓練一機能的な訓練よりは、「分らなければ、無理をしない」の教育が重要であるが、このような教育・訓練だけでどの程度安全性が向上するか常に疑問が残る) を継続して行う必要があり、メーカ、ユーザ共に安全のための大きなコストを覚悟しなければならない。

「安全確認型」の安全対策をとることでコストの低減を達成した例も少なくない。しかも今後、「安全確認型」の安全対策の重要性が認められれば、例えばフェールセーフなインターロック用 AND 回路 (筆者等の研究によりすでに開発されている) はハイブリッド IC として量産されることによって極めて安価に得られるようになる。

Table 2.2-1 はアームに接触する危険性を防止する安全対策を整理したものであるが、できるかぎり、「安全確認型」にもってゆくことに努力すべきである。

(4) 安全柵の高さの決定

ロボットの可動範囲の周囲に設ける安全柵は適切な強度と高さをもっていなければならない。特にそれが低い場合は容易にロボットに手が届いてしまい、自動運転中の安全が確保できない。

安全柵はロボットの可動範囲の外側に 400 mm 以上離して設置すべきである。これは人間の胸部の身体寸法から得られる数値であり、一般に挟圧災害を回避するに採られる安全距離とされている。そこで、安全柵を越えて 400 mm だけが手先が届くような安全柵の高さを求めれば、それが安全限界の柵高さとしてすることができる。そして、これ以上の高さの柵を使用すれば、「決定論的アプローチ」が達成されたとみなしてよい。

Fig. 2.2-4 は日本人 800 人について行った身体計測における柵越え腕リーチの測定の結果である。これによると、柵を越えて届く範囲の最大値が 400 mm (平均値 $+ \sigma$) となるのは柵高さが 1750 mm の場合である。従って、一応これ以上の柵高さをとれば良いといえる。

このように、安全に関する決定論的数値の多くは各国によって、あるいは時代と共に変化する。国際的視野に立って安全基準を作成する場合は、各国から提案される数値の最も安全側の数値を採用すべきであり、また、常に時代の変化に対応する用意をしておくべき

である。

Table 2.2-1 アームとの接触防止対策

安全確認型 (安全の原理)	危険検出型 (要メンテナンス)	信頼性依存型 (要メンテナンス)
パワーの低下 安全柵の設置 メカニカル・ストップ デッドマン・スイッチ 3点スイッチ B接点スイッチ (Fail-safe) インターロック 透過型光電スイッチ シールドビームセンサ 安全確認型センサ (Fail-safe) コントローラ	速度低下 自己故障診断機能 ソフトウェア・リミット A接点スイッチ ノーマル・インターロック 人間検出 安全マット モニタリング 超音波センサ 静電型センサ レーダ型センサ 反射型光電センサ オペレータ 非常停止操作 監視の強化 二人組作業 メンテナンス 警告・警報 教育・訓練	2重系回路 2 out of 3 非常停止ホールド ソフトウェア・サーボ ノイズ対策 オペレータ 警告・警報 メンテナンス 二人組作業 教育・訓練

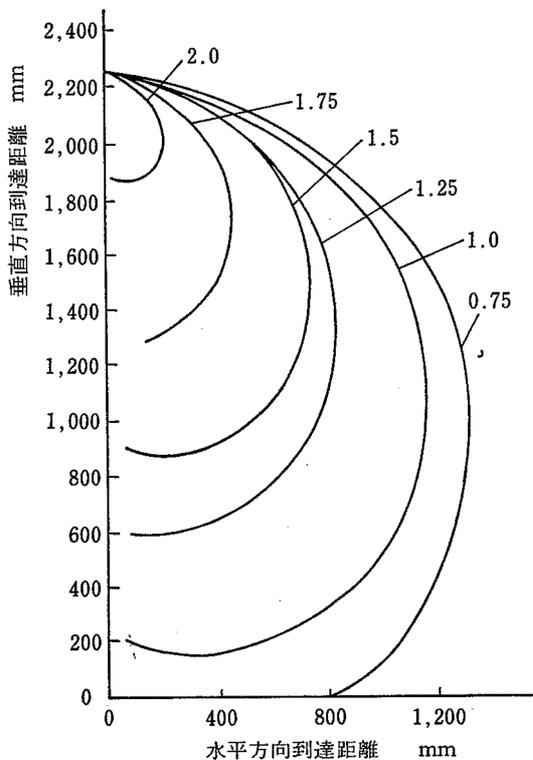


Fig.2.2-4 Reach curve according to fence height (medium + 2σ)
柵高さに対する柵越え腕リーチカーブ

従って、柵高さに関しては、日本人の身長が低いことを考えれば、上記の検討結果は国際的な標準とはできない。ここではあくまでも安全柵の高さを決めてゆくときの決定論的アプローチを参考にしてほしい。

2.2.3 安全制御の論理

(1) 狭義のフェールセーフ論理

システムの安全性は、安全であることを検出し、安全を伝達し、安全が出力されてはじめて運転が許可される(パワーが出力される)方式によって達成される。従って、検出部、伝達部(処理部)、出力部のいずれにおいても、誤って安全情報(信号)が発生してはならない。

この安全制御の構成には、次の基礎条件が不可欠である。

1) 安全確認のためのセンサ(またはスイッチ)は、運転命令(誤った命令がなされることを考慮に入れる)に対して許可信号を与えることになるから、センサ(またはスイッチ)の出力は、故障で誤って許可の出力を発生しない構成でなければならないこと。

2) 安全確認用センサによるインターロックに用いるゲート回路は故障により誤って制御出力を発生しないと同時に、運転命令だけで誤って制御出力を発生しない構造の要素であること。

これらは共に、故障時に出力を発生しないゲート回路およびセンサやスイッチであって、このような要素の特性を狭義のフェールセーフという。以降の説明では2値信号 α に対して故障を含まないとき $\langle \alpha^1, \alpha^0 \rangle$ であらわし、信号 α を出力するデバイスの故障を含むとき(故障信号だけのときもある) $\langle (\alpha)^1, (\alpha)^0 \rangle$ であらわし、 $(\alpha)^1, (\alpha)^0$ の故障率を $[\alpha]^1, [\alpha]^0$ であらわすものとする。

Fig. 2.2-5において、制御出力信号 f と入力信号 Ia, Ib は、2値信号 $\langle 1, 0 \rangle$ のうち制御の許可信号 $\langle 0 \rangle$ を f^0, Ia^0, Ib^0 であらわし、ゲート G の故障のうち出力が $\langle 1 \rangle$ に誤る故障 $(G)^1$ 、出力が $\langle 0 \rangle$ に誤る故障 $(G)^0$ (固定故障という)とすれば、出力関数 $f(\exists \langle f^1, f^0 \rangle)$ は次のように表わすことができる。

$$f^1 = (Ia^1 \wedge Ib^1) \vee (G)^1$$

$$f^0 = (Ia^0 \vee Ib^0) \vee (G)^0$$

…式(2)

安全確認のためのセンサの故障を配慮する場合、検知すべき信号があるときを P^1 とし、検知の対象がない

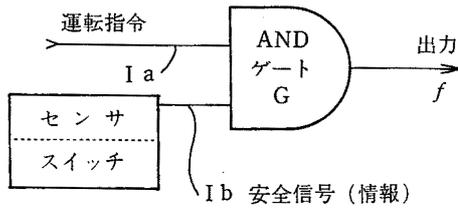


Fig. 2.2-5 Interlock mechanism
インターロックの構造

ときを P^0 とする。また、センサの故障のうち<1>側故障（許可信号側出力）を $(S)^1$ 、<0>側信号（禁止信号側出力）を $(S)^0$ とすると式（2）は次のようになる。

$$f^1 = (Ia^1 \wedge (P^1 \vee (S)^1)) \vee (G)^1$$

$$f^0 = (Ia^0 \vee P^0 \vee (S)^0) \vee (G)^0$$

ここで、ゲートおよびセンサの<1>側故障率を $[G]^1$ 、 $[S]^1$ 、<0>側故障率を $[G]^0$ 、 $[S]^0$ とし、入力 Ia （ $\exists < Ia^1, Ia^0 >$ ）および P （ $\exists < P^1, P^0 >$ ）に誤りのないものとする、

$$f^1 = (S)^1 \vee (G)^1$$

$$f^0 = (S)^0 \vee (G)^0$$

となる。

また、十分な故障検出時間を取り得るものとするれば、制御出力 f の全故障に対する安全側故障の発生率 η^0 及び危険側故障の発生率 η^1 は次式となる。

$$\eta^0 = \frac{[G]^0 + [S]^0}{[G] + [S]}, \quad \eta^1 = \frac{[G]^1 + [S]^1}{[G] + [S]}$$

ここで例えばリード線の断線等を考えれば、 $[G]^1 \gg [G]^0$ 、 $[S]^1 \gg [S]^0$ を物理的に実現することは不可能に近い。その代わりに安全であることをアクティブに伝達することによって、 $[G]^0 \gg [G]^1$ 、 $[S]^0 \gg [S]^1$ はフェールセーフなゲートやセンサとして実現可能であって、このときの $\eta^0 = 1$ 、 $\eta^1 = 0$ となり、危険側と安全側の採障発生比が η^1/η^0 を非対称故障率とすれば、これは η^1 にほぼ一致する。

従って、確認すべき安全の状態とはどのような状態なのかを追及することがまずもって安全のメカニズムを求める出発点である。そして、障害の発生に対して著しく安全側に非対称性をとることで安全な状態を確保するものが安全制御の基本であり、また、これを決定論に基づく対策といえることができる。

(2) フェールセーフ・インターロック

コントローラ本来の処理情報（信号）に安全を示す情報（信号）を含ませることができれば、これを容易に達成できる。例えば、これまでの有接点リレーを用いたシーケンス回路はこれに最も近いものを求めるこ

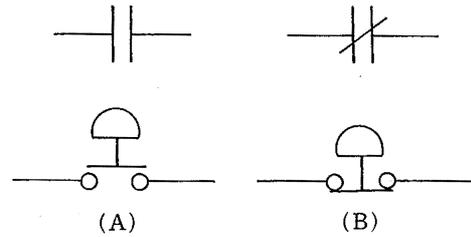


Fig. 2.2-6 Two types of contact relay
有接点リレー・ボタン

とができる。なぜなら、Fig. 2.2-6に示すようなシステムの要素であるB-接点リレーは、本来のON/OFF信号の他に安全信号を含ませることができるからである。すなわち、ON信号は接点不良や電源未投入など（「不安の状態」に含まれる）が生じていないという情報を含んでおり、ON信号は本来の論理信号と安全信号の両方を伝えていると解される。この点では、B-接点の電磁リレーや押しボタンスイッチ（一般に非常停止用の押しボタンスイッチはB-接点タイプを用いるのが当然のこととされてきたが、その理由がここで明確になった）などは、非対称故障率（接点不良など発生しやすい障害に対して危険を示す信号—OFF信号—を出力する）をもつ回路素子といえる。

近年、エレクトロニクス論理素子やハイブリッドIC化されたアナログ回路においても、誤って安全を伝えない非対称故障素子が実用化されてきている。

しかし、一般にコントローラとしてCPUが用いられると、安全の伝達システムを達成することが大変難しくなる（筆者等の目下の研究はCPUコントローラのフェールセーフ化である—しかし、これは2重系ではない）。この場合は、安全信号を本来の信号にのせることができないので、安全を別系統でバイパスして後段に伝えるメカニズムが必要になってくる。これを達成するのがインターロックである。このインターロックは安全情報（信号）そのものを伝える目的を持つものであるから、これ自体が誤って安全情報を発生させることがあってはならない。これをフェールセーフ・インターロックという。

安全のためのインターロック回路は基本的にはFig. 2.2-5のような構成をとる。ここでは検出器の出力は安全を示すものであり、危険を示す信号を否定処理(NOT)したのではない。なぜなら、NOT回路はフェールセーフ化が不可能であるからである。また、ANDゲート回路はフェールセーフ化が構成されていなければならない（本研究では交流処理をしてフェールセーフを達

成している)。このようにすれば、運転命令(人、コンピュータ、その他フェールセーフでないコントローラによってなされる)が、たとえ間違っただけでも、安全が確認されないかぎり、運転許可信号 f を出力することはない。これを“信号あり”を正とする正論理のフェールセーフ論理演算によるインターロック方式という。

本研究では、フェールセーフなインターロック回路を構成したが、その詳細は後段に述べる。また「安全は公表すべき」という公理に従い当研究所に付随する産業安全技術館にそのモデルを提示して、一般に公開している。

(3) フェールセーフ・インターロック用センサ

フェールセーフ・インターロックは、フェールセーフを必要条件とする安全装置にそのまま適用される。従って、安全装置用のセンサ(検出部)は安全を検出するもの(安全情報を正論理とする)でなければならない。

一般に、対象を正信号で検出するセンサはパルスレダ(A)であり、負信号で検出するセンサはビーム遮断センサ(B)である。具体的にロボットの制御で、安全な領域に人が戻ったならば、アームの動作を許可するセンサは(A)であり、危険領域に人がいたらアームの動作を禁止する場合はセンサ(B)でなければならない。これらを逆に用いると、NOT回路を挿入しなければならない。これらを用いると、NOT回路を挿入しなければならないので、フェールセーフ化が不可能になる。

本研究では、これらの考察から、ロボットのアームに直接取り付ける安全装置としてシールドビームセンサを開発した。

このセンサの詳細については後述するが、これは上記のセンサ(B)に対応し、安全を検出するセンサである。更に、この安全信号は、センサの後段に続くフィルタ回路、増幅回路、比較回路、リレー回路(出力)に伝達され、しかも誤って安全信号が発生しないよう、各要素がフェールセーフな構成になっている。この安全装置は大変安価にフェールセーフが達成されており、しかも、ゴムチューブによる接触センサとしての多くの特長があるので、すでに多くが使用されている。また、これについても、産業安全技術館に制御回路とともに展示・公開している。

(4) シャトル作業方式の安全化設計

産業用ロボットにアーク溶接を行わせる場合、最も

一般的な方法としてシャトル方式がある。これは、ロボットの可動範囲内にワーク置き治具を2つ以上用意し、一方でロボットが自動溶接している間に、もう一方で人間がワークの着脱を行い、両方の作業が終了するとそれぞれの作業位置を交替するという一連の作業シーケンスを繰り返すものである。

従来のこの方式は労働安全衛生規則 150 条の 4 (自動運転中のロボット可動範囲内への立ち入り禁止)に抵触するものであるが、労働安全規則は「安全が確認されれば、その適用から除外される」という基本的な考え方をとっている。従って、徹底した「安全確認型」の安全対策がとれば、法律の拘束から開放されうると考えてよい。その時の「安全が確認された」とする条件は、安全対策された作業安全対策の非対称誤り比率(危険側移行率と同じと考えてよい)が 10^{-4} 以下であるとしている。

すなわち、ここではシステム内部に発生しうる故障等、ロボットの誤動作、人間の不安全行動など、確率的に発生する要素に対して非対称誤り比率が常に 10^{-4} 以下であることが明らかになったとき、その安全対策に対して、「決論的なアプローチに従って安全が確認された」という評価が与えられる。シャトル作業方式における安全性評価については項を移してその詳細を述べる。

2.2.4 安全確認の評価

以上の例に示されたように、安全を伝達する電磁リレーの機能(これは非対称誤り比率が極めて小さいことを意味しているが、近年、エレクトロニクス・リレーにおいても同様のレベルが達成されているものがある)、及びフェールセーフ・インターロックによる安全のバイパス機能を用いて適切なシステム設計がなされれば、極めて高度の安全性が確保される。しかも更に重要なことは、そこで得られた安全性の程度が非対称誤り比率として明確な数値で表わすことができることである。

安全技術からのチャレンジによって安全が確保された結果、安全の法規制が打破されてゆくことは、望ましいと考えるべきである。それには、従来のような「危険検出型」の安全対策では不可能である。それに対して、「安全確認型」からのアプローチをもってすれば、非対称誤り比率の 10^{-4} 障壁をクリアできる可能性は

大きい。現在は技術の時代と言える。安全の分野においても多くの問題を技術によって打破してゆくためのモチベーションをこのような方法で高めていく必要がある。

2.3 安全制御のための センサの構造

プレス機械や産業用ロボットの制御では機能の誤り動作による危険を回避するために人体（あるいは、人体の一部）を検知して、この出力と運転制御の命令の間にインターロックをとる。

例えば、Fig. 2.3-1 に示すように、光線式安全装置を取り付けたプレス機械では、フレームの両サイドに投光器と受光器を取り付けて、この間の光ビームを手が遮っているときスライドが下降しないようなインターロックの構造をとる。Fig. 2.3-2 は光ビームを作業台上に設置し、人が作業していないときのみアームの移動を許可するロボット制御のインターロックの構成を示している。万一、誰かが運転ボタンを押してしまっても、人が作業台を離れない限りはアームは動き出さない構成である。

更に、運転制御では、一度センサから運転禁止の信号が出たら、この信号が解除されても改めて運転命令

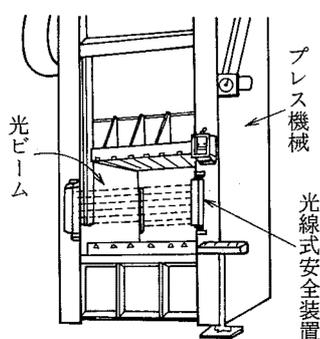


Fig. 2.3-1 Safety device of Press machine
プレス機械における安全装置

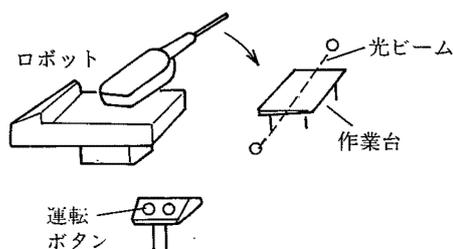


Fig. 2.3-2 Photo-electric safety measure of Robot
ロボット制御における安全手段

が発せられない限り、運転が再開されない構造とする。

このような安全制御の根本に関係するセンサや制御回路は、フェールセーフに構成されなければならない。

ここでは、安全制御で利用されるセンサや運転制御の回路が、どのように構成されるかを示し、また実際に構成した光線式安全センサについてその評価を行うことにする。

2.3.1 センサの構成と原理

(1) センサの運転制御

Fig. 2.3-3 は、光線式センサを用いた運転制御装置の構成例で、センサ部と運転制御部より構成されている。

センサ部は安全制御の公理(3)に従って、投光器から発せられる光パルス（交流の光信号）を、人がビームを遮断しないとき受光器で受光し、出力信号を発生する。すなわち、人がいないという安全情報を受光器が受けていることになる。運転制御部は、フェールセーフな制御の演算を行う必要から、センサから出力と運転の命令信号をレベル変換し、センサから安全情報があるときのみ運転制御の出力を発生する。

(2) フェールセーフな情報の処理

フェールセーフな情報の処理では、一般の処理装置で配慮される雑音の外に、装置を構成する電気的・機械的要素の故障によって生ずる信号の変化も一種の雑音として配慮し、出力される安全情報の中に誤り信号を含まないようにする。つまり、電源線を介したり、電磁波結合として侵入する外来雑音の外に装置の故障による誤り信号を考える。公理の(4), (5)に従って、安全情報の伝達が確実に行われねばならない。

ここに、安全情報とは、運転制御で「安全であるから、運転命令に従ってよい」という運転許可の信号と解することもできる。

センサからの出力には、「安全である」という安全信号と「危険である」または禁止の情報がある。この2つの情報は通常「出力あり」（論理値1）と、「なし」（論理値0）の2つで表わされる。上の説明は2つの雑音により誤り信号が少なくとも出力の論理値1には含まれないような構成をするという意味である。

一般の設備では故障に対して無防備に近いものが多いようである。安全の論理に従ったフェールセーフな信号処理ではこれに対して十分な配慮がなされなければならない

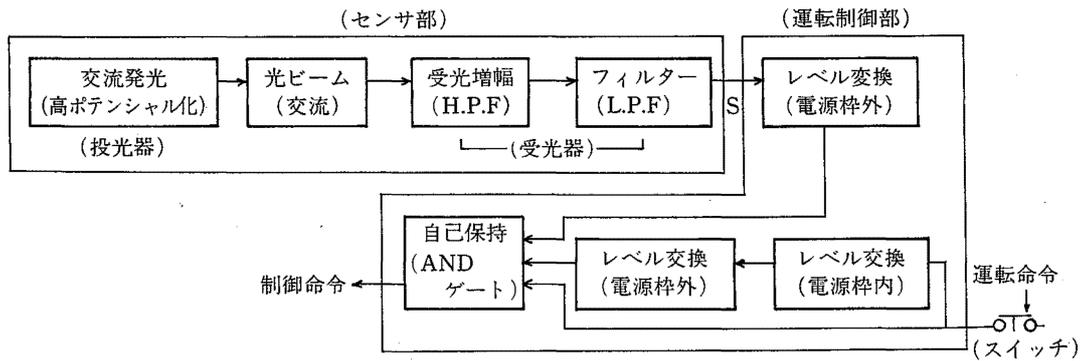


Fig. 2.3-3 A construction of operation control by means of Photo-electric sensor
光線式センサを用いた運転制御装置の構成例

フェールセーフな情報の処理では、装置を構成する要素に故障が起こったら、この故障による信号が出力側に伝播して、出力信号を危険情報としなければならない、誤って安全情報を発生させてはならないことは、公理(5)の示すところである。この故障の検知は、すべての構成要素(パーツ)について行わなければならない。よく構成要素が故障したら故障検知器を動作させる処理が採られる。しかし、この方法、すなわち危険検出型の検知方式は危険情報を伝えるものとなり、全ての構成要素に適用することが困難である。特に故障検知器自身の故障検知まで配慮すると、システムを構成することが殆ど不可能に近いものとなる。全ての要素の故障を監視するには、故障信号が出力に伝播する構成が最も単純な構成となる。これが安全確認型のシステム構成である。

(3) センサ部の構成と原理

Fig. 2.3-3の投光器はパルスではなく、通常のランプ光ビーム(直流光)を発光して、この光が遮断したとき受光側で「人あり」の検知情報を出力するセンサを構成することができる。しかし、安全情報を得るためにあえて交流発光としているのである。このことは重要なことなので少し説明を加える。

一般的に、機械はエネルギーに関係した部分が故障したときは停止してしまうほうが多いものである。また元のエネルギーを抑えてあればそれ以上のエネルギーは出力されない。信号もエネルギーを消費する点では同じこ

とがいえる。

投光器から光を放射する場合、直流電源に直接発光素子(ランプ)を繋いで光を出すのは、直流電源を使ってまず交流信号を発生させ、この交流信号で素子を発光させるときより、消費するエネルギーが少なくなる。Fig. 2.3-4の(a)と(b)はこれを比較したものである。(b)で発生する交流信号を整流して直流にし、この出力で(a)と同じ出力を得るためには、数倍の消費電力を必要とする。

一方、投光器で発光するビームを受光器で受信し、増幅する過程が故障した場合、通常発振して交流信号を発生するような故障状態は起こらないと考えてよい。これは、上述のとおり、発振が高いエネルギー消費を必要とし、故障によっては起こり難いからである。実際には、増幅器の中に発振の故障モードが存在する。しかし、このような構造は工学的に決まっており、特別な場合に限定される。従って、上の過程は故障時の特定の電圧(または電流)レベル、すなわち直流となって通常交流を生じない。この方法は公理(4), (5), (6)を踏襲するための具体的方法の一つである。

Fig. 2.3-3のセンサで、人が光ビームを遮断しないとき、すなわち光信号が正しく受信されるとき安全情報が生成する。従って、受光器は単に投・受光器間で減衰した信号を増幅するだけでなく、この過程で混入し易い外来雑音と故障によって生じる誤り信号から、上の交流信号を分離するフィルタリングの機能をもつこ

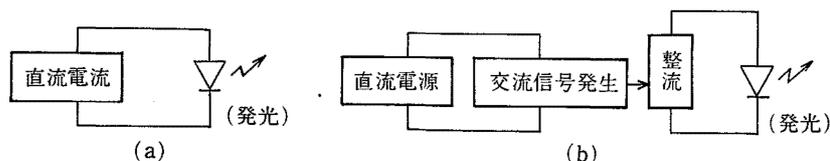


Fig. 2.3-4 Signal transfer with high energy dissipation
高エネルギー消費による信号伝達

とが必要になる。ここにフィルタは故障して自ら安全情報を生成することのない特性をもたねばならない。また、受光器の出力には、故障発生時に瞬時的交流信号が発生する。安全情報の利用の仕方によっては、これに対する配慮を必要とする場合があるので注意しなければならない。

上述の通り、Fig. 2.3-3は投光器の光出力を交流として、強制的にエネルギー消費の高い状態（高ポテンシャル）にしておき、この信号を故障で誤りを生じることのないフィルタで受信することによって安全情報を得ている。この安全情報の生成のテクニックは、実は光雑音に対しても適用されている。一般に、受光器で受信される光雑音は太陽光や電灯などの照明光である。これらの光は直流あるいは低周波光で、投光器で発生するようなエネルギー消費の大きな高周波としては起こらない。従って、受光器は光雑音のフィルタリングも行っていると言える。この方法は公理(4)における安全情報だけを取り出して、これを後段に伝える具体的な手段と見なされる。

Fig. 2.3-3のフィルタリングは増幅器が低周波雑音を除去し（H. P. F）、フィルタが高周波雑音を除去（L. P. F）することによって帯域通過ろ波器を構成している。

(4) 運転制御部の構成と原理

運転制御部は危険領域に人がいないときのみ、運転の命令を制御出力として伝達する。従って、センサ部の出力と運転命令の論理積演算となる。また、この論理積演算の出力は、演算の間違いや故障で誤って制御出力を発生しない構成の出力、すなわち、安全情報でなければならない。

前述した通り、装置の故障による誤り信号と入力情報を分離するにはエネルギー消費の高い状態、すなわち交流信号を使う方法がとられる。すなわち、上の演算を行う論理積演算器は2つの入力信号に対して交流の論理積演算を行う必要がある。このような演算器として論理積演算発振器がある。論理積演算発振器は2つの入力（直流）が共にあるときのみ発振して交流出力を生じるANDゲートである。Fig. 2.3-5に、2入力論理積演算発振器の構成原理を示す。通常増幅器（詳しくは位相反転増幅器）を2段連続接続して、この入出力間を接続（フィードバック）すれば発振して交流出力を生じる。この2段増幅器の電源入力 I_1, I_2 を論理積演算の入力端子とすれば、増幅器が故障した時発振できなくなるので、出力を生じないことになる。

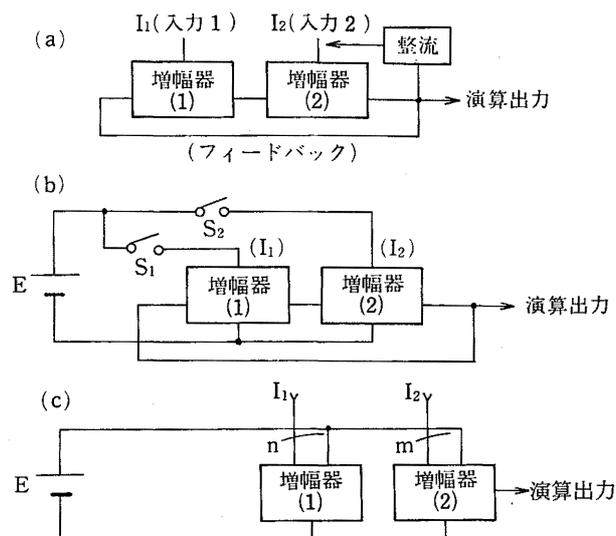


Fig. 2.3-5 Principles of operational oscillator
演算発振器の原理

また、演算の誤りは、2つの入力信号が揃っていないのに、つまり、片方の入力だけで演算出力を生じるときに起こる。通常、よく利用されているANDゲート（トランジスタ、ダイオード、TTL、C-MOS等によるものすべて）は、故障によって一方の入力だけで出力を生じる故障モードをもっている。しかし、Fig. 2.3-5によるANDゲートは、一方の入力信号だけでは、他方の増幅器の電源が供給されないために発振できず、出力を生じない。

Fig. 2.3-3の運転制御部では、後述の事情からANDゲートをメモリ（自己保持）として使っている。このメモリは、Fig. 2.3-5(a)の出力を整流して、入力的一方（Fig. 2.3-5(a)では I_2 ）に戻すことによって作られる（出力は交流信号であるが、入力は直流信号である点要注意）。このように帰還すれば入力1（ I_1 ）が入力されている間、入力2（ I_2 ）の信号を記憶することができる。

Fig. 2.3-5(a)は、故障で誤り信号を発生しないANDゲートの構成原理図である。通常の半導体スイッチ素子の入力、電源のON/OFF信号によって与えられる。

Fig. 2.3-5(b)に、これと同様に演算発振器によるANDゲートの増幅器に電源Eからスイッチ S_1, S_2 で入力信号を与えている模様を示す。電源Eからスイッチで直接ANDゲートに入力電圧を印加すると、スイッチ S_1 が故障して導通（短絡）したとき、入力信号がないときでもANDゲート I_1 に入力電圧が印加されることになる（ S_2 の信号だけで出力してしまう）。従って、実用の演算発振器はFig. 2.3-5(c)に示すように増幅器の一部に電源（線n, m）を供給し、これとは別の入力端

子 I_1, I_2 を設け、この電源 E より高い電位の入力で発振するよう構成する。これを電源枠外電位による入力印加という。Fig.2.3-3で、センサ部と運転制御部の AND ゲートの間に挿入されたレベル変換は、この電源枠外入力電位を得るための操作回路である。

ところで、演算発振器は、電源枠外の入力電位を必要とする。従って、スイッチで入力される運転命令は当然電源電位より高い入力レベルとなる。従って、スイッチに導通故障が起こった場合、前述の故障により誤りを生じる危険から、運転命令は電源電位以下の電位で発生しなければならず、後述の事情で電源電位より高いレベルで発生した運転命令を電源電位以下の信号にまず変換し(電源枠内変換と呼ぶ)、この信号を改めて電源枠外の電位に変換して演算発振器の入力とする。

2.3.2 フール・プルーフへの配慮

スイッチ操作によって発生する運転命令は、Fig. 2.3-6のタイム・ダイアグラムAで示すように、運転の開始情報 a (立ち上がり) と運転の終了情報 b (立ち下がり) と、運転の継続を意味する情報 c とから構成されている。この3つの情報の中で情報 a は明らかに運転の意志を表わしている。もし、誤ってスイッチを押した場合を配慮するならば、複数回スイッチを押したときの情報 a であれば間違いないといえる。しかし、運転の継続を意味する情報 c は、誤って運転スイッチを ON し続けた場合に生じる。例えば、高速で運転される場合、運転者の操作ミスで終了情報 b の発生が遅れるときに相当する。従って、Fig.2.3-6のタイム・ダイアグラムAで示される運転の意志を表わす情報が a だけであるとすれば、運転継続の意志は、Fig.2.3-6のタイム・ダイアグラムAのcとなる。現実的には、運転命令は Fig.2.3-6のタイム・ダイアグラムBの a_1, a_2, \dots, a_n の包絡線(細線)で、表わされることになり、この包絡線で表わされた結果のタイム・ダイアグラムA(相当)は真の運転命令を表わすことになる。

現実の運転で、運転継続の意志をわす情報 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ を高速で与えるわけにはいかない。従って、Fig.2.3-3の運転制御部ではスイッチで発生するタイム・ダイアグラムAの運転命令と、この立ち上がりの運転開始成分 a と、センサからの安全情報出力を AND ゲートの入力とし、AND ゲートは運転命令の立ち上がり成分を記憶(自己保持)している。この記憶は運転

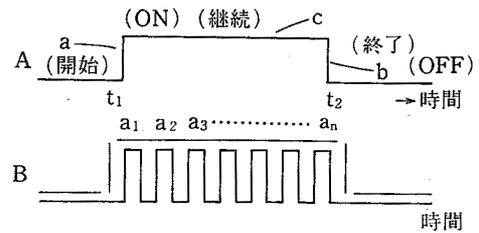


Fig. 2.3-6 Product of Safety information (Signal) in operation

運転制御における安全情報の生成

命令が OFF したり、センサからの安全情報がない場合消失し、制御出力は OFF する構成である。この構成によれば、センサ部から安全情報が出力されている間、制御出力は OFF し、改めてスイッチが投入されない生じてセンサに危険情報(出力 OFF)が発生すれば、制御出力は OFF し、改めてスイッチが投入されない限り、制御出力は生じない。

次に、運転者が誤ってスイッチを押した場合を考えてみる。運転者が誤って複数回スイッチを ON することは考えられない。もし何回もスイッチを押すようであれば、それは故意に誤りを起こしていると解釈すべきである。従って、Fig.2.3-6のタイム・ダイアグラムBの情報が真の運転命令であることに変わりはない。しかし、通常の運転命令はタイム・ダイアグラムAで発生する。この場合、命令がある程度継続したことをもって、真の運転命令の発生として解釈され、運転命令の立ち上がりにオン・ディレーの遅れ成分をもたせる。このオン・ディレーの遅れ時間は故障で遅れ時間が短縮されない特性でなければならない。もし故障で遅れ時間が短縮されてしまうようであれば、いざ誤り運転発生時に役に立たないことになる。具体的遅延設備は、故障時遅延時間が延長されるか、また故障で出力の発生しない構造であることが必要である。Fig. 2.3-7は、光線式センサの出力にオン・ディレーの機能を追加した例である。運転命令の立ち上がり成分にオン・ディレーの機能を付加するには、Fig.2.3-3の電源枠内のレベル変換をオン・ディレーの回路で行えばよく、立ち上がり成分の遅れ時間が得られると同時に電源枠内のレベル変換を行うことができる。

センサによる監視で危険領域を十分カバーできない場合、複数のセンサを利用する等の配慮が必要になる。また、一度、センサに危険情報が発生する場合、十分な遅れ時間をもたせることは有意義である。Fig.2.3-7は、この場合のオン・ディレー付きセンサの構成図である。センサ出力としてのオン・ディレーの安全情報

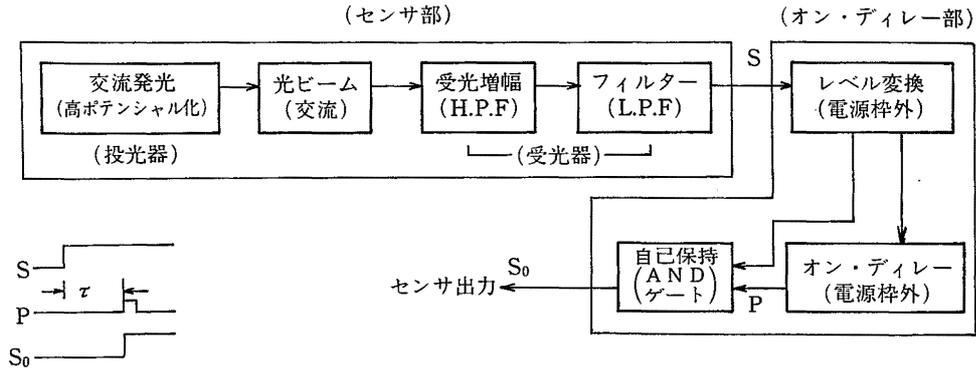


Fig. 2.3-7 Photoelectric sensor including on-delay circuit
オン・ディレーを含む、光線式センサ

でなければならない。従って、Fig.2.3-7のオン・ディレー部には先の説明した演算発振器によるANDゲートを用いている。

すなわち、ANDゲートは、センサ部に発生した安全情報とこの安全情報が発生してから所定の遅れ時間(τ)後に発生するオン・ディレーパルス(P)の論理積演算を行うと同時に、オン・ディレーの出力パルスPを記録(自己保持)する。そして、もしも、そのセンサ部に危険情報(出力S:OFF)が発生すれば、オン・ディレー部の出力はOFFして危険情報となる。

2.3.3 具体的回路構成

(1) センサ部

Fig. 2.3-8はセンサ部の具体的回路構成を示す。点線で囲った各機能要素は次の動作を行うものである。

a. 発振・発光回路

発振・発光部は、PUT発振器で発生した出力パルスでホト・ダイオード D_1 をスイッチして、約2kHzの交流の光ビームを発生する。

b. 受光・増幅回路

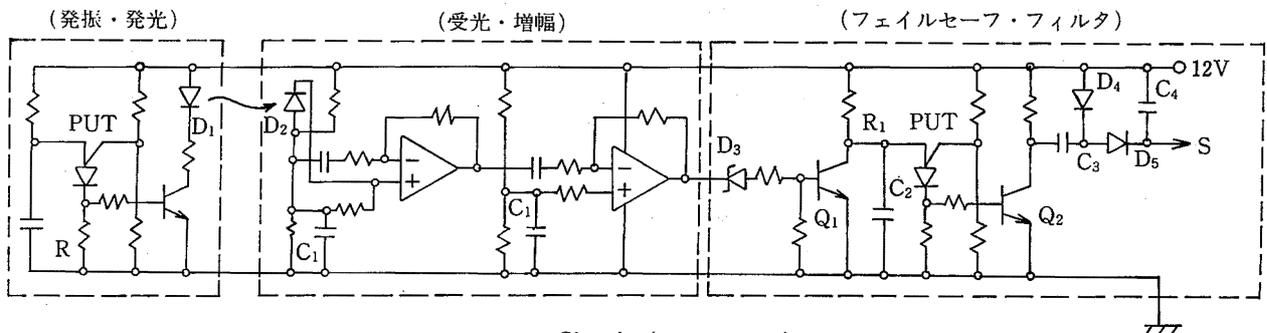


Fig. 2.3-8 Circuit (sensor part)
具体的構成1 (センサ部)

受光素子(太陽電池) D_2 で光パルスを受信して、この信号を2段の演算増幅器で交流増幅する。

c. フェールセーフ・フィルタ

増幅された入力信号をPUT発振回路による検定回路でパルス幅検定する。入力信号が $C_2 \cdot R_1$ の時定数のパルス幅を越える時、出力パルスが発生する。この出力パルスはコンデンサ C_3 とダイオード D_4 で、12Vの電源電位に重畳され、ダイオード D_5 とコンデンサ C_4 で電源枠外電位(電源電位より高い出力電圧)の直流出力電圧となる。入力側のゼナー・ダイオード D_3 は増幅器の直流電位をレベルシフトするためのものである。

(2) 運転制御部

Fig. 2.3-9は運転制御部の具体的回路構成図である。運転命令はスイッチで与えられ、センサ部の出力は端子Sに入力される。運転命令はフェールセーフなANDゲート(論理積演算発振器)に直接入力される(f)と同時に、レベル変換器を経て立ち上がり成分だけがダイオード D_2 を介して(h)に入力される。フェールセーフ自己保持回路は、この2つの入力信号の外にセンサ部からの出力(S)があるとき発振して、ゼナー・ダイオード D_5 の入力側に交流信号を生成する。この交流信号

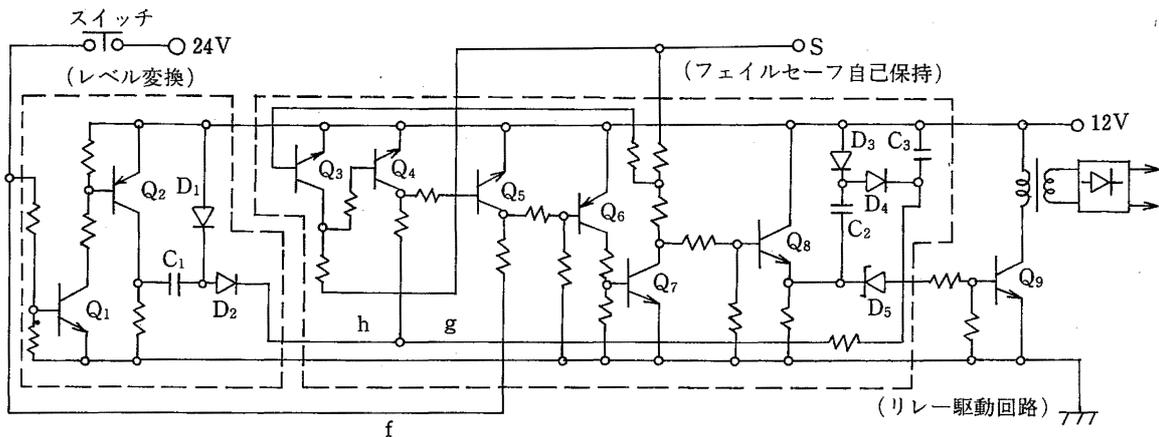


Fig. 2.3-9 Circuit (control part)
 具体的構成 2 (運転制御部)

は同時に C_2, C_3, D_4, D_5 で構成される倍電圧整流回路に入力されて直流となり、フィードバックルート g を介して入力側に帰還され自己保持回路を形成している。

ゼナー・ダイオード D_5 の入力側に発生した交流信号は、トランジスタ Q_9 で電力増幅されてトランス結合による高出力として出力され、例えば電磁リレーを駆動することができる。

a. レベル変換回路

スイッチによる運転命令は、これで後続の自己保持回路が発振できるように電源電位 12V より高いレベルで発生するものである。レベル変換回路のトランジスタ Q_1 、この信号をまず電源枠内電位のスイッチ信号にレベル変換する。このレベル変換されたスイッチ信号は、発生した運転命令とは逆の位相になっているので、トランジスタ Q_2 で同相に戻し、このスイッチ信号の立ち上がり信号は、ダイオード D_1 で電源電位に重畳されるので、電源枠外電位の出力信号となっている。

b. フェールセーフ自己保持回路

フェールセーフ自己保持回路は、フェールセーフな AND ゲートと、この出力を整流して直流にし、入力側に帰還するフィードバックから構成されている。

フェールセーフな AND ゲートはトランジスタ Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7 で構成され、入力信号 S (端子 S に入力される信号) と、スイッチからの信号 f 及びスイッチからの信号の立ち上がり信号 h が入力されているとき発振する。この発振出力はトランジスタ Q_8 で増幅されて、リレー駆動回路となり、また、一部はコンデンサ C_2 を介して電源枠外電位の直流出力となってフィードバック・ルート g を介して入力側に帰還される。従って、

入力信号 S と f があるとき立ち上がり信号 h が入力されれば、AND ゲートが発振して出力を生じ、この出力の一部がフィードバック・ルート g を介して帰還されるので、立ち上がり信号 h が消滅しても発振を持続する。この発振が停止するのは、入力信号 S が OFF するかまたはスイッチからの信号 f が OFF したときとなる。

(3) オン・ディレイ部

Fig. 2.3-10 にオン・ディレイ部の具体回路構成を示す。センサ部の出力信号は端子 S に入力される。入力信号 S (端子とに印加される信号) を発生すると、PUT 発振回路で構成されるオン・ディレイ部の出力 (h) には、特定数の C_1R_1 だけが遅れて出力パルスが生成する。また、入力信号 (S の一部は、抵抗 R_2 、ダイオード D_1 を介してトランジスタ Q_1 に入力され、この出力はフェールセーフの自己保持回路の入力 i となっている。ここで、トランジスタ Q_1 は自己保持回路の入力抵抗をインピーダンス変換するために挿入されている。フェールセーフ自己保持回路は、入力 i があって後、遅延パルス h があると発振して増幅用トランジスタ Q_6 に交流の出力信号を生じる。この出力信号の一部はリレー回路の入力信号となり、一部は整流されて電源枠外電位の直流出力となってフィードバック・ルート f を介して入力に帰還される。

a. フェールセーフ・オン・ディレイ

入力信号 S が入力されると、PUT 発振回路が所定の時間後に発振する。この出力パルスはゼナー・ダイオード D_2 を介してトランジスタ Q_2 に入力され増幅される。この増幅は電源枠内でないとできない (電源枠外では電源がない) ので、電源枠外で行われた遅れ出力

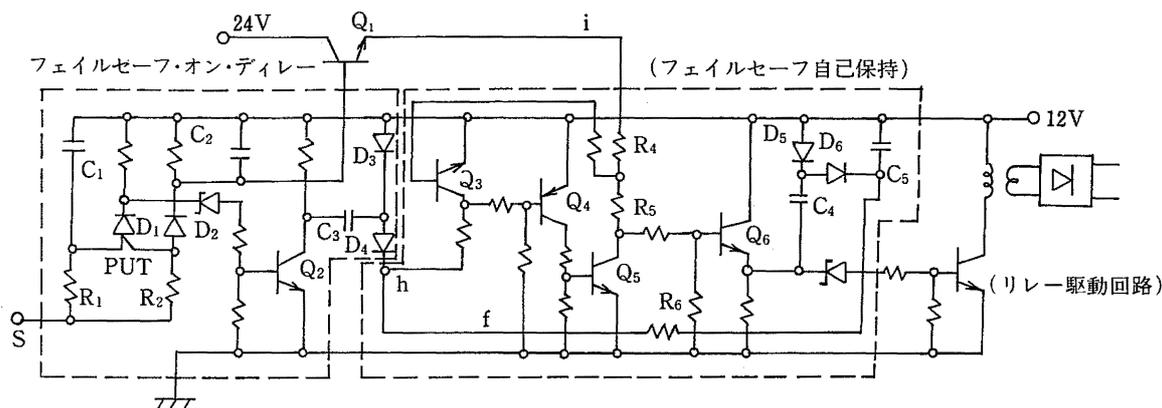


Fig. 2.3-10 Circuit (on-delay part)

具体的構成 3 (オン・ディレイ部)

の信号をレベルシフトする目的でゼナー・ダイオード D_2 は挿入されている。電源枠内で増幅された遅延パルスは、再び C_3, D_3 で電源枠外電位の出力パルスとなって出力される。入力信号 S の一部は抵抗 R_2 、ダイオード D_2 を介してトランジスタ Q_1 に入力される。入力信号 S が PUT のゲート抵抗 R_2 を経由するのは、PUT 遅延回路の計時中に抵抗 R_2 に断線故障が生じると遅れ時間が短縮されるため、抵抗 R_2 を介して入力信号 S を伝達しておけば断線時入力 i が発生せず、自己保持回路の出力が消滅することになる。コンデンサ C_2 は、PUT 発振回路に出力パルスが生じたとき入力 i がレベル低下するのを防止する目的で挿入され、ダイオード D_1 はコンデンサ C_2 の放電ルートを制限する目的で挿入されている。

フェールセーフ・オン・ディレイは、フェールセーフな信号処理の中でも最も難しいものの 1 つとされている。

b. フェールセーフ自己保持回路

フェールセーフ AND ゲートは 2 入力用として構成されている。すなわち、入力信号 i と h が共にあるときトランジスタ Q_3, Q_4, Q_5 で構成される発振回路が発振して、トランジスタ Q_6 の出力側に交流信号を生じる。このトランジスタ Q_3, Q_4, Q_5 による発振回路は Fig. 2.3-9 における自己保持回路の Q_5, Q_6, Q_7 でだけ構成されていることに相当する。そして、この発振回路は発振できる入力レベルに上限をもっている。発振条件に電源枠外電位の入力レベルでかつ入力レベルに上限をもっているため、この条件を窓と呼ぶ。この演算発振器は、このようにフェールセーフな AND ゲートであると同時に窓をもっているため、フェールセーフなウィンドウ・コンパレータとも呼ばれている。トランジスタ

Q_1 によるインピーダンス変換は故障に対してこの窓特性を利用している。すなわち、トランジスタ Q_1 が故障してコレクタ・エミッタ間に導通故障が起こると、電源の 24 V が入力になってしまうため窓の外の入力レベルとなって、自己保持回路は発振できなくなっている。

自己保持のためのフィードバックについては Fig. 2.3-9 と同じであるので説明を省略する。

2.3.4 故障解析

Fig. 2.3-8~2.3-10 の回路構成について故障解析を行う。前述の通り、センサ部及び運転制御部は外来雑音に対してフィルタリングを行うと同時に、回路を構成する要素が故障したときの誤り信号に対してフィルタリングの機能をもたねばならない。ここでは、Fig. 2.3-8~2.3-10 の構成が、外来光による雑音を含む外来雑音に対して十分な耐性を有する使用周波数とエネルギーレベルで安全情報が伝達されているものとする。これは、通常の産業機器の使用環境では実現可能な条件である。従って、構成要素の故障による誤りに対して解析を行うことにする。

十分な耐雑音性をもった電子回路の故障は、通常構成するパーツが導通してしまう故障 (短絡故障) と、非導通になってしまう故障 (断線故障) とがある。これを、縮退故障という。そして、通常、半導体はこの 2 つの故障モードが等しい確率で現われるものとしている。従って、半導体の出力は 2 値論理の内、1 と 0 のいずれかの故障信号を発生することから対称故障率素子あるいは対称誤り素子と呼ばれる。一方、抵抗器は発熱による断線しか起こりえないと考えてよいので、このような素子を非対称故障率素子あるいは非対称誤

り素子と呼んでいる。また、半導体、特に増幅器が次第に劣化して増幅度を失う場合があるが、安全情報が伝達されない側の故障となるので、通常出力の故障モードを2値として縮退故障で扱う（このような故障を配慮するような場合、例えばアナログ出力ではウィンド・コンパレータによるレベル検定を行う）。

さらに Fig.2.3-8~2.3-10 に点線で示す各ブロックは、安全情報を各々高エネルギー状態（論理値1）で伝達しなければならない。各ブロックは高エネルギー状態、すなわち、交流信号あるいはこれを整流した出力を論理値1とし、また入力も同様でなければならない。もし、安全情報と危険情報の論理が入れ代わる処理として Fig.2.3-11 のように否定の演算が入ると、出力の安全情報（論理値1）の中に否定演算回路の故障信号（論理0）が含まれることになって、安全情報を伝達できないからである。

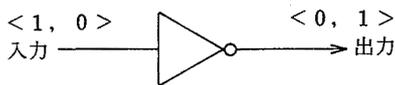


Fig. 2.3-11 NOT logic, not transferring safety signal
否定演算は安全情報を伝達できない

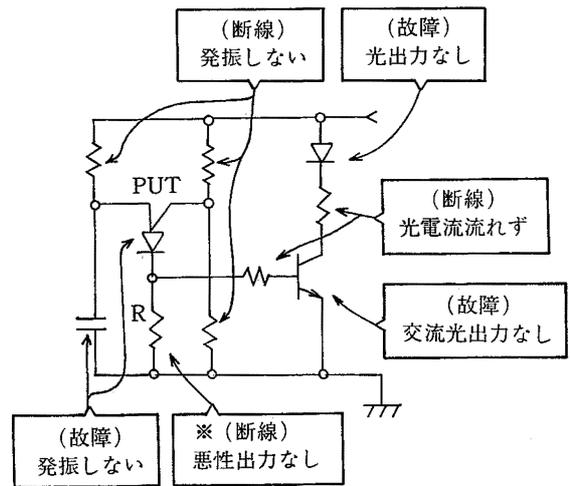
これを安全情報伝達の単調性という。そして、ブロックを構成するパーツに対称故障率素子が使用されていても、入力が安全情報であるとき出力に安全情報を発生し、少なくとも故障で安全情報を発生することのない回路（デバイス）もまた非対称故障率素子、あるいは非対称誤り素子と呼ばれる。

Fig.2.3-8~2.3-10 の回路構成は、従って、各ブロックが非対称故障率素子になっていて、各ブロックが単調な関係で結合されていけばよいことになる。

(1) センサ部

Fig.2.3-12~Fig.2.3-14はセンサ部を構成する各ブロックのパーツ故障に対する出力故障を示している。各図で、抵抗器については断線故障が起こった場合の出力状況を示し、半導体とコンデンサについては断線または、短絡故障（図では単に「故障」として表わしている場合がある）が起こったときの出力電圧が消滅するとは限らないことを意味する。ただし、この故障によって危険情報が安全情報に化けるような誤りは決して起こらない。この出力状況を呈する故障は、次に発生するパーツ故障で出力が危険情報（出力なし）となる。このような処置は、例えば雷サージから機器を防御するときのように直接機能に関係しないで、対策した処

置が故障して後、次に発生する異常で「出力0」とするような対策である。Fig.2.3-12の抵抗器Rは、トランジスタのコレクタ・ベース間の漏れを放電する目的で挿入されており、やがてトランジスタに故障が発生したとき出力0となり、それまで安全情報の伝達に支障なく正常動作する場合のあることを意味している。このような処置は、特に、信頼性向上策として一部に要素冗長性をもたせるときに採られるものである



※ 2次故障で出力 OFF
(OFFであるべきとき、ONしない)

Fig. 2.3-12 Diagnosis of circuit (Oscillation and Emission part)
発振・発光部の誤り診断

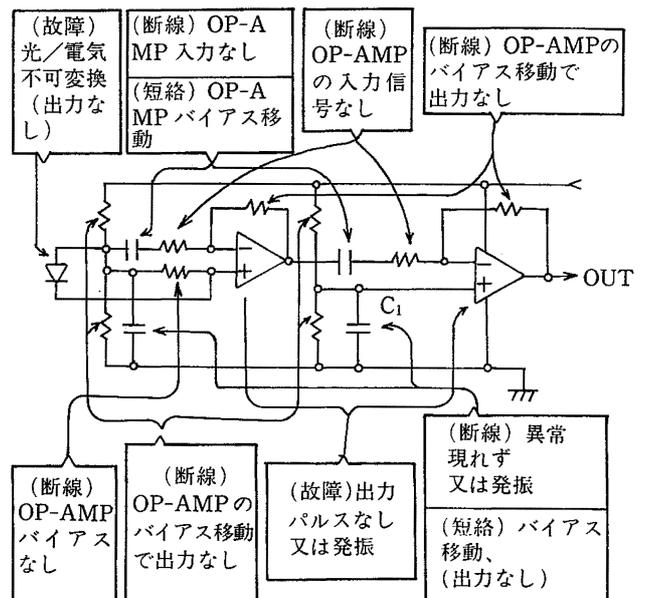


Fig. 2.3-13 Diagnosis (Emission and Amplifier part)
受光・増幅部の誤り診断

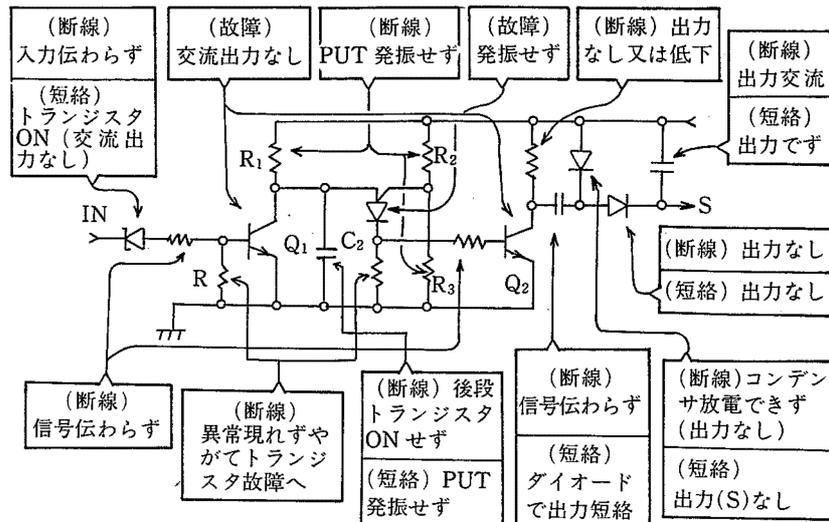


Fig. 2.3-14 Diagnosis (Fail-Safe filter part)

フェイルセーフ・フィルタの誤り診断

Fig. 2.3-12 は PUT 発振器が故障したり増幅用トランジスタが故障した場合に、直流の光出力が生じることはあっても、交流の光信号は発生しない構成になっている。

Fig. 2.3-13 は交流光だけ受光し、交流増幅するものである。従って、入力信号に対して高周波通過の特性をもっている。演算増幅器は故障したとき内部で正帰還の高周波発振を起こす危険がある。従って、増幅器が高周波通過特性をもっていることも併せて、後段に低周波通過特性をもつフィルタを必要とする。また、増幅器は故障で低周波通過の特性になってはならない。Fig. 2.3-13 で低周波阻止を行っているパーツは、増幅器と受光素子間、及び増幅間の結合用コンデンサである。この短絡故障で出力 0 となる構造とするのが理想的である。Fig. 2.3-13 で、バイアス移動とは結合用コンデンサに短絡故障が起こった場合や演算増幅器の動作点を与えるバイアス抵抗が断線したとき、動作点を与える電位が移動して、出力が消滅する低レベルとなることを意味する。コンデンサ C_1 に断線故障が起こると電源の出力インピーダンスが高い場合増幅器に高周波発振の起こる恐れがある（殆ど起こらないと言えるが）、後段の低周波通過のフィルタでフィルタリングされる。

Fig. 2.3-14 のフェイルセーフ・フィルタはセンサ部の持つ最後のフィルタであるので、雑音を除去すると同時に少なくとも入力信号がないのに出力信号が発生することはあってはならない。低周波通過特性をもっているところは PUT 発振回路である。PUT 発振回路

のアノード抵抗 R_1 は、ゲート抵抗 (R_2 と R_3 の合成抵抗) より小さい値なので、PUT はサイリスタの動作をする。従って、入力側のトランジスタ Q_1 が ON/OFF の交流動作をしないと出力が発生しない。また、PUT 発振回路の出力側トランジスタ Q_2 は PUT 発振出力に対するレベル検定を行っているので、積分用コンデンサ C_2 に断線故障が起こった場合出力を生じない。

Fig. 2.3-14 の入力側はゼナー・ダイオードで前段の増幅器に結合している。このゼナー・ダイオードに短絡故障が起こると、トランジスタ Q_1 が ON 状態となってスイッチングされない。また、出力側の整流回路も故障で入力がないのに出力が発生しないので、Fig. 2.3-14 は少なくとも入力信号がないのに出力信号を発生することのない非対称故障率素子ということができる。

Fig. 2.3-13, Fig. 2.3-14 共に、出力信号が入力信号に同相で追従するので単調な関係にある。

(2) 運転制御部

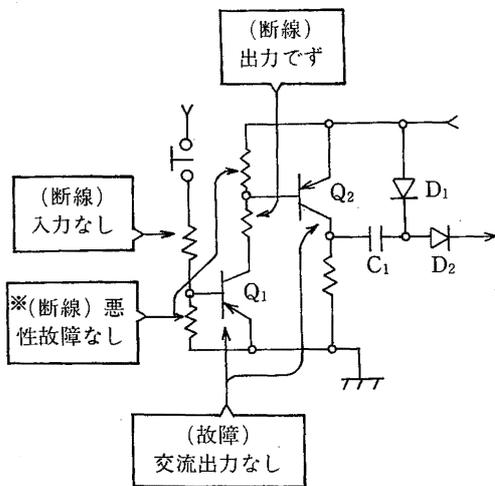
Fig. 2.3-15, Fig. 2.3-16, Fig. 2.3-17 の運転制御部を構成するレベル変換部とリレー駆動部のパーツ故障に対する出力状況を示す。フェールセーフ自己保持回路は後述のオン・ディレー部で説明する。

Fig. 2.3-15 のレベル交換器は故障で発振することのない非反転直流増幅器で構成されている。出力の変化分はクランプ用ダイオード D_1 で電源 12 V に重畳されるので、コンデンサ C_1 , ダイオード D_1 に断線または短絡の故障が発生した場合、変化分が電源電位に重畳しなくなって後段の AND ゲートが動作しない。またダイオード D_2 に短絡故障が起こった場合は、結合用コンデ

ンサ C_1 による微分の負パルスで後段の自己保持回路が自己保持しない場合が生じる。

Fig.2.3-16 は出力として直流リレーを駆動している例である。トランス結合なので、自己保持回路で安全情報として発生する交流信号だけが伝達され、回路を構成する半導体及び抵抗の故障で出力を生じない。直流リレーに直流電圧を供給する整流回路が故障すると、高周波の交流電流がリレーに流れるが、直流リレーが動作することはない。

Fig.2.3-15, Fig.2.3-16 共に入力と出力の安全情報は位相が反転していないので、単調な入出力関係にある。



※直接出力断、又は2次故障で出力断
(少なくともOFFであるべき時ONしない)

Fig. 2.3-15 Diagnosis (Level-changer part)
レベル変換部の誤り診断

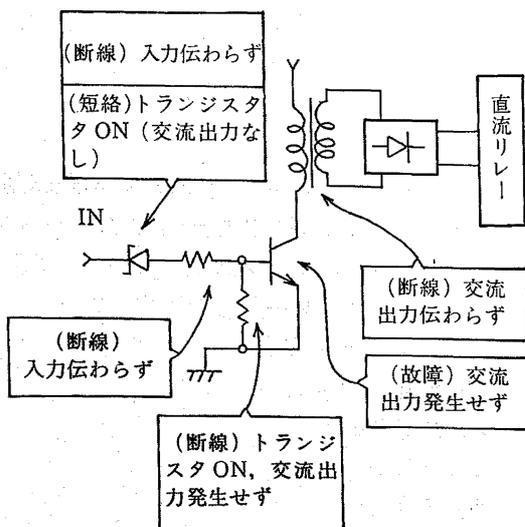


Fig. 2.3-16 Diagnosis (Relay driver part)
リレー駆動部の誤り診断

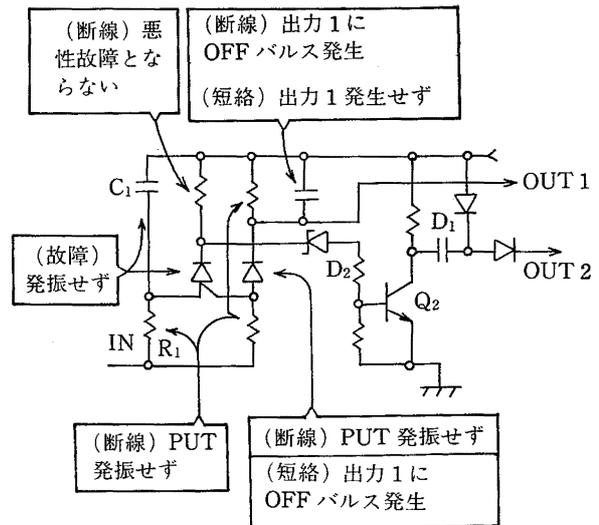


Fig. 2.3-17 Diagnosis (Fail-Safe on-delay part)

フェイルセーフ・オン・ディレー部の誤り診断

(3) オン・ディレー部

Fig.2.3-17 は Fig.2.3-8, Fig.2.3-10 のオン・ディレー部に点線で示したブロックのパーツ故障に対する出力状況を示している。

Fig.2.3-17 は、オン・ディレーの時限部が、PUT 発振器を構成するパーツに故障があった場合、出力パルスを生じない。オン・ディレー回路が電源枠外電位で構成されているのは、後段の AND ゲートが電源枠外の入力レベルを必要とするからである。ゼナーダイオード D_2 からトランジスタ Q_2 を経て、クランプ・ダイオード D_1 に電源枠外出力パルスを得る過程は、Fig.2.3-15 と同一なので説明をここでは省略する。

Fig.2.3-10 の自己保持回路は、演算発振回路で構成される AND ゲートとフィードバック回路から構成されている。AND ゲートはトランジスタ Q_3, Q_4, Q_5 と帰還抵抗 R_6 で発振器を構成している。入力 i と h が電源電圧 E より高い電位で入力されると、入力電位が印加されない時、 $Q_4: ON, Q_5: ON, Q_3: OFF$ の状態にあった回路が、 $Q_4: OFF \rightarrow Q_5: OFF \rightarrow Q_3: ON \rightarrow Q_4: ON \rightarrow Q_5: ON, Q_3: OFF \rightarrow Q_4: OFF \rightarrow Q_5: OFF \rightarrow \dots$ のように帰還発振を起こす。

この発振は、Fig.2.3-9 の AND のように、さらに 2 個のトランジスタ増幅器を追加しても起こる。そして、発振回路を構成するいずれが故障しても、発振は停止して出力 (交流) を生じない。この発振の起こる条件は、Fig.2.3-10 で入力端子では、

$$V_i < \frac{R_4 + R_5}{R_5} E, \quad V_i > E$$

の条件を満足する入力電位 V_i であり、 $V_h > E$ となって、入力 i の側は窓特性を持つ。従って、インピーダンス変換用トランジスタ Q_1 のコレクタ・エミッタ間に万一短絡故障が起こっても、窓外の入力レベルとすることによって発振が停止する。

上の発振出力を増幅・整流して入力に帰還し自己保持するには、入力レベルを電源枠外とするので、当然整流回路の出力は電源 E に重畳した形式になる。結合用コンデンサ C_4 とダイオード D_5, D_6 の構造は Fig.2.3-17, あるいは Fig.2.3-15 と同じであるが、平滑用コンデンサ C_5 に断線故障が起こると整流出力（倍電圧）は交流となる。しかし、たとえフィードバック・ルートの信号が交流になっても、自己保持して出力（交流）が発生するか、あるいは出力 0 となるかのいずれかであって、入力がないのに出力を生じることはない。これは Fig.2.3-14 の出力を運転制御回路の入力としたときも同様である。

最後に、自己保持回路の 2 つの入力と出力は、単調な関係にある。

以上、Fig.2.3-8, Fig.2.3-9, Fig.2.3-10 で示した回路構成は、いずれも各ブロックが非対称故障率素子を構成し、かつ各ブロックは単調な関係で結合されているので、誤りなく安全情報を伝達できることになる。

2.4 人間検出センサーの構造と評価

2.4.1 人間検出センサーとインターロック

自動運転されている時の機械の可動部は、それが作動中は勿論のことであるが、停止している場合でも、それに接近することは危険である。

自動機における災害は、次の 4 つに大きく分けられる。

a. 作業者が誤って機械の作動を開始して災害を受ける。

b. 自動機の作動中にトラブル（一般に小さなものだが）を発見した作業者がとっさに処理しようと手を入れたり、危険領域に侵入して作動中の危険部に触れて災害を受ける。

c. 自動機の停止中（一般に条件待ち停止）に、ト

ラブルを発見した作業者が、停止中であることから安心して処理に当たっている時に、危険な可動部が作動を開始して災害を受ける。

d. 自動機の制御装置が故障するなど、異常を生じて（危険側誤りによって）、停止中の機械が不意に作動を開始したり、停止すべき機械が停止しなかったため災害を受ける。

これらの災害は全て、安全確認がとられていない状態で機械の作動が開始されたり、継続してしまっているために起こったものといえる。特に上記 a による災害では、誤って起動ボタンを操作する、あるいは条件待ち用リミットスイッチにうっかり触れるなどにより（例えば、ワーク確認用リミットスイッチに誤って触れて不意に機械を起動させることがある）、機械が不意に作動を開始して、その本人または、本人以外の者が被災する例が多い。

非常停止ボタンのように、人のミスによって止まる側（安全側の誤り）の操作ボタンはキノコ型とするなどできる限り押しやすく、また起動ボタンのように動き出す側（危険側の誤り）のものは、ガイドリングを設けたり埋頭型とするなど、操作スイッチなどにおいても、人間のミスに対してできる限り安全側に非対称性をとるように（危険側移行率をできる限り安全側となるように）している。しかし、これによる安全化への到達しうる限界を認めざるをえない。

上記 b, c による災害においても、現在産業用ロボットで採られている柵や囲いによる対策は全ての自動機に適用できるわけではない。すでに提示したように、安全の論理の基本は全てのトラブルの発生を人間・機械システムから排除しようとするものではない。むしろ安全が確認されている間は人間も機械もミスを許すとする立場をとることである。すなわち、自動化の安全対策に適用できる方法の 1 つとして危険部（例えば産業用ロボットの可動範囲内）に人がいないという確認をとりつけている間だけ、人間からの運転命令を受け付け、また、その命令に従って機械が作動を開始または継続することが可能となるようにするのである。この方式による安全対策は、すでに述べたインターロックによる方法の代表的なものの一つである。そして、これを達成するのに、人間を検出するセンサを備えて、安全を確認するための信号を出力のための装置として一体化したものが一般にいわゆる（機能的）安全装置であり、自動化の安全対策における有力な手段と言え

る。

すでに多くの安全装置が利用されているが、一般に、人間の安全防護を目的とするものにあつては、それ自体が故障（障害）を生じても危険な状態となつてはならない。すなわち、その装置の入力部（検出部）から処理部を経て出力部に至る信号の流れにおいて、安全の論理の基本を満たすものでなければならない（フェールセーフでなければならないが、フェールセーフは安全装置としての必要条件であるが十分条件であるとはいえない）。従つて、人間を検出するセンサにおいても、単に人間の検出特性が優れているというだけでは、安全装置にそのまま用いられうるとは限らないのである。人間検出のためのセンサは多く考えられるが、あるものは危険検出型センサを安全確認型に改善でき、またあるものは安全確認型の達成が不可能である。

そこでここでは、これまで人間検出に応用しうる可能性あるセンサについて安全確認型としての評価を試みることにする。

2.4.2 フェールセーフなセンサの構成

一般に人間検出センサの特性は、Fig. 2.4-1 のように6つのパターンに分類できる。

Fig. 2.4-1 (a)は最も単純な人間検出センサの構成例である。検出器（トランスジューサ）からの出力を検出することによって負信号、すなわち検出信号として出力電圧なし $<0>$ を発生するものにあつては、 V_1 においてレベル検定を行い、 $V > V_1$ の条件で出力1としてこ

れを安全確認信号とできる。すなわち、センサ故障においても $V < V_1$ となるためフェールセーフ化が可能である。ただし、センサからの出力 V_0 の増幅器の故障や劣化に対して増幅度の低下傾向を呈するよう、またレベル検定出力 V_1 は、故障や劣化に対して大きくなるように回路設計を行う必要がある。後者の方は原理的に難しいので、一般に交流を用いて安全信号を共振によって伝え、それを整流して出力するようにする。

これに対して Fig. 2.4-1 (b)は、フェールセーフ化が不可能である。なぜなら、人間を検出しない信号（安全信号）がセンサ故障信号と一致する方式をとっているからである。この方式は、一般にCPUを用いたコントローラにおいて、自己故障診断のセンサとして多く用いられている。そしてこの方式を安全対策の決定的手段と見なされて、よく驚かされることがある。

しかし、正信号型、すなわち人間を検出すると出力電圧が増加して出力するタイプは、フェールセーフ化がすべて不可能かという、そのようなわけではない。

Fig. 2.4-1 (c)は、2つのレベル検定を行い、 $V_L < V < V_H$ の条件を満たせば安全信号を出力するようにする。しかし実際には、レベル検定の代わりにフェールセーフなウィンドウ・コンパレータを用いることが多いが、原理は同じである。

Fig. 2.4-1でいまアナログ出力 e をレベル順に信号 $<P^0, P^{1/2}, P^1>$ の3値（順3値）に分離し、ウィンドウ・コンパレータの窓を $P^{1/2}$ に設定する（ $P^{1/2}$ の入力範囲で $<1>$ を発生する）ものとする。このとき、ウィンドウ・コンパレータの出力 Z は $(S_1)^0$ をウィンドウ・コンパ

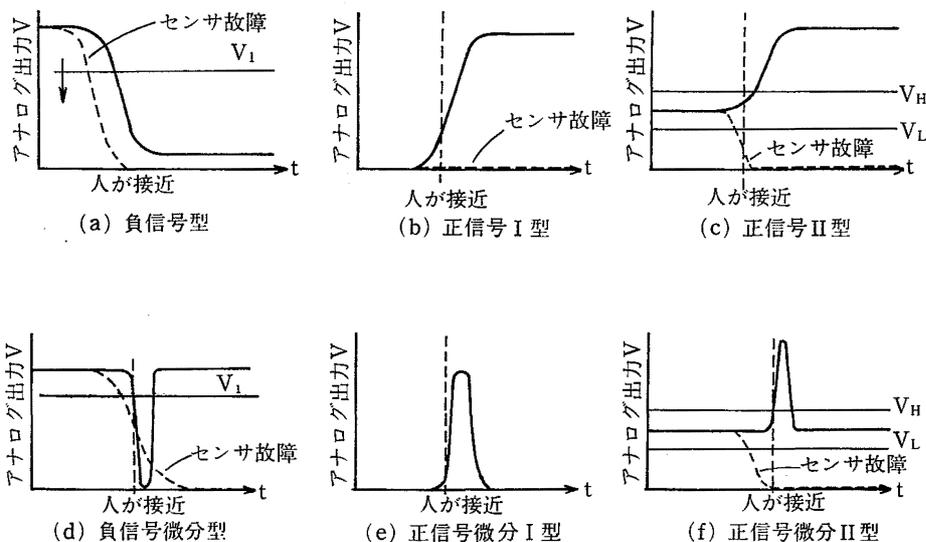


Fig. 2.4-1 Classification of Human sensor
人間検出センサの特性の分類

レータの故障出力とすると、

$$Z^1 = P^{1/2}$$

$$(Z)^0 = (S_1)^0 \sqrt{P^1} \sqrt{P^0}$$

となって、トランスジューサ出力の増大する信号からでも減少する信号からでも負信号のセンサ出力得ることができる。すなわち、ウィンドウ・コンパレータを使えば、トランスジューサ及び増幅器が故障して P^1 側に誤っても P^0 側に誤っても出力は $<0>$ 側となるので、 $<1>$ 側と $<0>$ 側の故障を発生する対称故障モードのアナログセンサをフェールセーフにすることができる。

人間が接近するという行為を動作としてとらえるセンサのタイプが同図(d)~(f)である。(e)はフェールセーフ化が不可能であり、(d)、(f)はそれぞれ V_1 及び V_H, V_L によってレベル検定すれば良いように思われるかもしれないが、人間が接近するときの動作速度によってセンサ出力が大きく変わるのでこの方式のセンサのフェールセーフ化はそれぞれのセンサの物理特性（劣化特性を含めて）を十分に把握していかなければならない。

(1) 光電スイッチ

光電スイッチに用いるトランスジューサは一般に CdS, ホトダイオード, ホトトランジスタであり、これ自体の特性は光入力に対して正信号型 (Fig.2.4-1(b)) である。従って、このまま用いると、フェールセーフ化が不可能であるが、以下に示す透過型の人間センサのシステムを構成すれば負信号型 (Fig.2.4-1(a)) に変更できフェールセーフ化が可能となる。これは Fig.2.4-2 に示すように、投・受光部、アンプ部、電源・コントローラ部より構成され、その動作原理は投光素子より発せられた光を受光素子によって検出するか否かによって出力を得るものである。投光される光は外乱光の影響を避けるため、ある周波数で変調がかけられ、受光側で復調するようになっている。また、受光器の検出方法によって、基本的には次の2つの方式がある。

a) 透過型光電スイッチは Fig.2.4-3 に示すように、投光器と受光器を対向させ、受光器が常に信号を受け

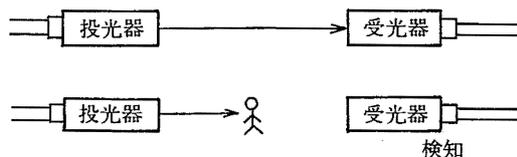


Fig. 2.4-3 Photo-electric switch 光電スイッチの構成

るように設置され、投光・受光器間に人間が入ると光線が遮られ、これを検出し停止信号を出力するものである。この透過型の特徴は、

- 検出距離が長くとれる
- 表面反射の影響がない
- レンズの汚れのため遮光した場合、停止信号を出力する

この方式によれば、原理的に Fig.2.4-1(a)の負信号型センサの構成となるのでフェールセーフに構成することが可能である。

b) 反射型は検出物体(人間)自身の表面反射によって動作する光電スイッチである。つまり、Fig. 2.4-4 に示すように、投・受光器を横に並べ、投光器より発せられた光が人間の侵入などによって反射し受光出力となるものである。これは光軸合わせが不用で光電スイッチ本体は一個なので設置場所を取らない等の長所を持つが、反射光型スイッチが検出位置、検出体の大きさ、反射率に大きく影響されるため安定な出力を得るのは難しい。また、レンズの曇りなどにより、人間を検知しなくなることがあるため注意を要する。

このようにそれぞれ長所、短所をもちあわせるが、いずれも光(赤外線)を用いているため、悪環境ではレンズのメンテナンスが必要で、さらに周囲照度によっても影響を受ける。フェールセーフ化の点ではこのセンサの構成が基本的に Fig.2.4-1(b)における正信号型なのでフェールセーフ化は不可能である。このことから AGVS に用いている人間の非接触センサは本物の安全装置とは認められず、安全バンパに対する補助的

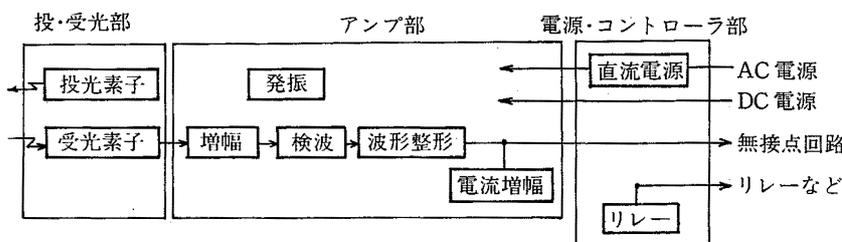


Fig. 2.4-2 Transparent type of Photo-electric switch 透過形光電スイッチ

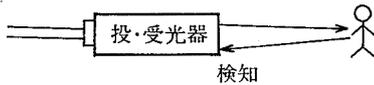


Fig. 2.4-4 Reflection type of Photo-electric switch
反射型光電スイッチ

役割を担っているとみなされる。

(2) 熱線スイッチ

熱線スイッチに用いる焦電型センサは受動型であり、背景温度と測定対象物との温度差の4乗に比例した出力が得られるが、この出力は温度変化を検出する微分型 (Fig.2.4-1(d)) のものであり、このままではフェールセーフとはならない。

しかし、一般に用いられている方法は、連続出力を得るためにチョッパ等で入射赤外光を断続している。人体検知の場合は、人体からの赤外線をセンサに与えるためチョッパは必要なくなる。人間検出のブロックダイアグラムは Fig. 2.4-5 に示すように、まず人体から放射される赤外線エネルギー密度は距離の2乗に反比例して減少するため、光学的に増幅して、それをさらに電氣的に増幅する。また人間の動きは 10 Hz 以下と考えられるため、ローパスのアクティブ・フィルタでノイズ・リップルを除去し、出力信号とする。

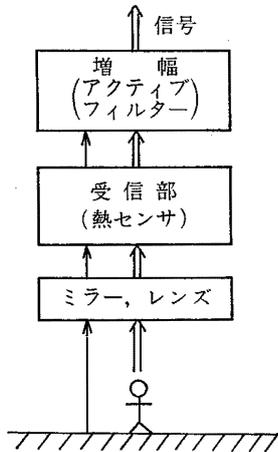


Fig. 2.4-5 Infrared ray sensor switch
熱線スイッチ

焦電型センサの内部構造は Fig. 2.4-6 のような等価回路で表わすことができる。原理は赤外線入射により、焦電素子に発生した電荷が R_g に流れることにより FET のソースフォロワで電圧として出力される。出力信号は Fig. 2.4-7 に示すが、これは同図中破線のようにウィンドウを設けて Fig. 2.4-1(c) のタイプに変換することが考えられるが、素子自体のインピーダンスが 10^{12} オ

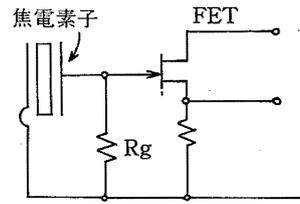


Fig. 2.4-6 Electric circuit of the sensor
焦電型センサの構造

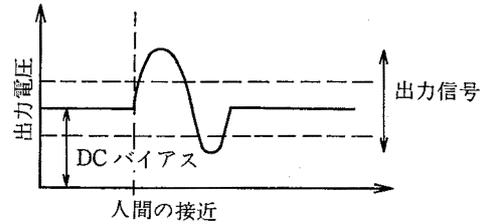


Fig. 2.4-7 Output signal pattern of the sensor
焦電型センサの出力

ームのオーダであり、このままでは素子自体から安全確認信号は取り出せないのので、素子自体の特性変化はそのキャパシタスの変化を監視するなど、フェールセーフ化には他の工夫が必要である。

(3) レーダスイッチ

レーダスイッチの原理を Fig. 2.4-8 に示す。センサはある一定周波数の電波を常時発信、人体等が発信電波エリア (検知範囲) に入った際に生じるドップラー効果を利用して雑音や乱光線等の影響がなく、性能が安定しており、また動体検知型のため床、壁、固定物等が検知範囲内にあっても影響されないという特長を持つ。この方式は微分型なのでフェールセーフ化にはその構造を十分に把握する必要がある。

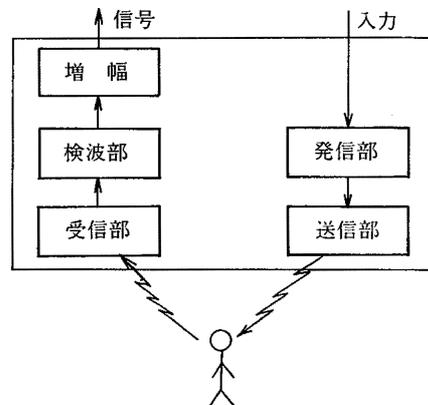


Fig. 2.4-8 Radar switch
レーダスイッチ

(4) 静電容量型センサ

この人間検出の方法は物体（人間）の接近による静電容量の変化を検知するものであるつまり Fig. 2.4-9 に示すように、安全な環境での静電容量と、ある一定の L とのタンク回路を組み、そのタンク回路の共振周波数で発振させるようにしておく。動作領域内に人間が侵入して周波数が増加し同調点がずれると共振回路の出力は、Fig. 2.4-9 (b) のようになり信号を出力するのである。その構成を Fig. 2.4-10 に示す。

この場合、Fig. 2.4-11 のように人間の接近が周波数の変化として現われるので、出力電圧ではなく、共振周波数 f_c について f_H と f_L によって周波数レベル検定を行うことによってフェールセーフが達成しうる。しかし、接近する物体によって感度が大きく異なるため、

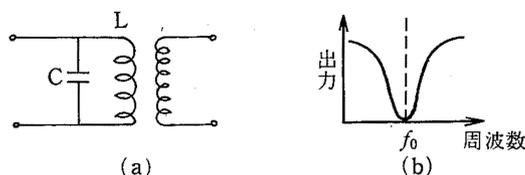


Fig. 2.4-9 Principle of electrostatic capacity sensor
静電容量型センサの原理

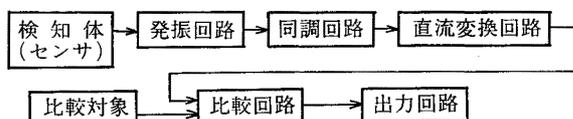


Fig. 2.4-10 Construction of electrostatic capacity sensor
静電容量型センサの構成

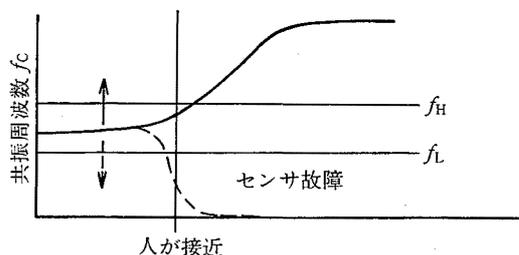


Fig. 2.4-11 Type II of positive resonance signal
共振正信号II型

検出感度を作業条件に応じて調整する必要があり、あまり感度を落とし過ぎると検知できないことがある。従って、その利用には限界があると考えねばならない。

2.5 無人搬送車用光線式障害物検出装置について

2.5.1 はじめに

生産工場の加工ラインや倉庫等の分野における加工物や製品等の搬送作業については、近年の生産の合理化、工場の FA 化や FMS 化に伴って、コンピュータコントロールによる無人搬送車システムが急速に普及の度合いを高めている。

無人搬送車システムは、その名に示す如く移動搬送システムにおいて無人化を図ったものであるが、今までのような単なる工程間の搬送から、より多様化した一段と高度な無人搬送車システムが可能になり、以前では非常に複雑で困難とされていた自動移載（予め入力された一定のプログラムに従って積荷を台車と機械装置の間で自動的に積み込み、荷卸しを行うこと）も可能となってきている。

無人搬送車システムは、自動車製造業、電気・機械器具製造業などの業種で主として導入されてきているが、その他の業種への普及も次第に広がってきている状況（例えばスーパーマーケットやデパートなど）が見られる。しかしながら、本格的な開発に着手されてからまだ歴史が浅いこともあり、開発途上段階にある技術であるため、その安全確保のための技術については、確立された基準や法規則等は整備されておらず、種々と検討がなされているのが現状である。

2.5.2 無人搬送車システムの概要

無人搬送車に関する分類、制御方式（誘導方式）及び周辺附属装置等の概要を整理すると次のようになる。

(1) 無人搬送車

何等かの無人誘導方式により自動操舵・走行・搬送する産業車両で次のように分類される。

1) 無人搬送台車

- ① 本体に人手により荷物を積み込み、指示された所まで自動走行して人手により荷卸しをする車両。
- ② 本体が荷物を自動積み込みし、指示された所まで自動走行の上自動荷卸しをする車両。

- 2) 無人牽引車
 - ① 被牽引部の荷物が積載された台車を牽引して指示された所まで自動走行し人手により荷卸しをする車両。
 - ② 被牽引部の荷物が積載された台車を牽引して指示された所まで自動走行し自動荷卸しをする車両。
- 3) 無人フォークリフト 荷物積載用のフォークなどを上下させるマストを備え、フォークなどに荷物を自動積載し指示された所まで自動走行し自動荷役作業をする車両。

(2) 誘導方式 (制御方式)

誘導方式を2大別すると、レール上を走行する軌条方式のもの、これによらない無軌条方式のものがあ。ここで、無軌条方式のものを分類すると、次のようである。

- 1) 固定経路式 (連続経路設置されたもの)
 - 電磁誘導式
 - 光学誘導式
- 2) 半固定経路式 (断続経路標識設置されたもの)
 - 無線誘導式
 - レーザ誘導式
 - パターン認識式
- 3) 自律走行式 (経路上無標識であり本体そのものが自律走行するもの)
 - 極座標方式
 - ジャイロ方式

(3) 周辺附属装置

単機能システムで考えた場合の主な周辺の附属装置は次のようである。

- 1) 充電装置
 - 手動式
 - 自動式
- 2) 走行上の安全装置
 - インターロック装置
 - オートドア制御装置
 - 衝突防止装置
 - 警報装置
- 3) 車両運行装置
 - 制御装置
 - 走行装置
- 4) 地上側移載装置
 - 移載装置本体
 - ・ インターロック装置
 - ・ 制御装置

(4) 複合システム関連設備

上記のほか、複合システムとして考えた場合の主

な関連設備には、次のようなものがある。

- 1) 自動倉庫・ラック棚
- 2) 各種コンベヤ装置
- 3) 各種ロボット装置
- 4) 情報処理装置
- 5) その他システム構成に必要な諸機器

2.5.3 無人搬送車システムの安全対策の概要

無軌条式の誘導式の無人搬送車システムの無人搬送車安全対策として一般に検討されている項目¹⁾の主なものは、次のようなものである。

- 無人搬送車本体に関する安全対策
- 誘導路及び地上局に関する安全対策
- 周辺設備に関する安全対策
- 設置環境、導入準備に関する安全対策

これらの中で、無人搬送車に関する安全対策については、さらに次の6つの仕様区分で検討されている。

- ① 本体外形、構造に関する一般的な安全の配慮
- ② 自動運転時、発進時及び異常発生時などの警報
- ③ 搬送車相互あるいは人や他の物との衝突防止
- ④ 最高速度制限や速度超過検出など走行速度の制御
- ⑤ 緊急時の非常停止機能
- ⑥ 制御一般の安全の配慮

そして、電磁誘導式や光学誘導式など無軌条式の無人搬送車システムの場合には、自動的に発進・走行・停止を行う無人搬送車方向の同一作業床面上に存在する作業員や他の台車などとの衝突事故を防止するため非接触式の障害物検出装置を装備しているが、現在多く使用されているものでは、光線式検出装置と超音波式検出装置とに大別される。

2.5.4 無人搬送車用光線式障害物検出装置について

上述のように、無人搬送車の衝突防止対策として光線式障害物検出装置が多く使用されているが、本研究では、光線式の障害物検出装置の代表的なものを例として、対象障害物の傾斜角度及び材質等の差による検知特性を実験的に調べると共に、実際の無人搬送車に装備した場合の停止特性実験を行い、無人搬送車用障害物検出装置としての安全機能について検知特性を中心に検討を行った。

2.5.4.1 実験方法

2.5.4.1.1 検出センサの検知特性実験

この実験においては、Fig. 2.5-1 に示すように、小型レールにガイドされる対象障害物移動台を遠方からレール端に設置した拡散反射型赤外線センサへ徐々に近づけてゆき、センサの検知出力をオシロスコープによって観測して検知距離 l を測定した。

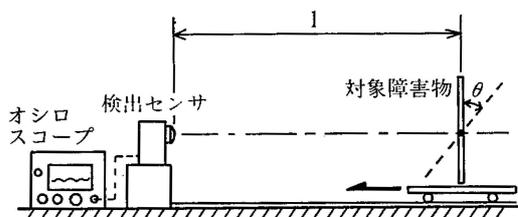


Fig. 2.5-1 Sensitivity test of reflective type beamsensor

検出センサの検出特性実験の概略

実験条件としては対象障害物の材質、色、検出センサに対する傾斜角度等の諸因子を変化させた。なお、この実験における対象障害物の寸法は、横 910 mm × 縦 400 mm の横長として、検出センサに対する傾斜角度については水平方向の中心を軸として、Fig. 2.5-1 に示す θ の方向に対象障害物を回転させて角度を設定した。

また、対象障害物の幅寸法が小さくなった場合、検出センサの検知距離がどのようになるかを知るための実験では、移動台上に検出センサ及びオシロスコープ等を設置し、移動台の進行方向の検出センサの光軸上に、対象障害物としての白紙の中心（幅方向）が位置するようにして、白紙の幅寸法を変化させて、検知距離の測定を行った。この場合の白紙の高さ方向（幅と垂直方向）の寸法は 800 mm で一定とした。

2.5.4.1.2 検出装置を装備した無人搬送車の停止特性実験

この実験においては、Fig. 2.5-2 に示すように、上記 2.5.4.1.1 で用いた検出センサを適用した光線式障害物検出装置を装備した電磁誘導無人搬送車（最大積載重量 300 kg : Photo. 2.5-1) 参照を用いて、走行方向の前方に対象障害物を設置した誘導路上において定常速度（約 68 m/min）で走行させ、検出センサの障害物検知によって無人搬送車が停止した後の無人搬送車の前部（前バンパの前面）と対象障害物との距離（停止距離） L を測定した。実験条件としては対象障害物の材質、色及び走行路面に対する傾斜角度等の諸因子を変化さ

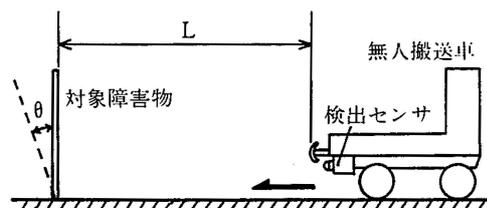


Fig. 2.5-2 Stop test of an guided vehicle with reflective type beamsensor

検出装置を装備した無人車の停止特性実験の概略

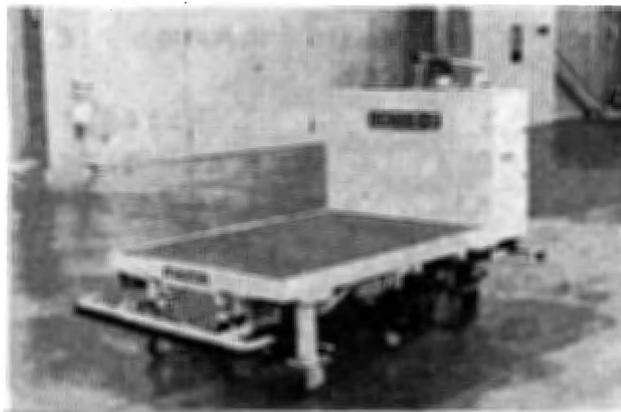


Photo 2.5-1 An automated guided vehicle in this experiment

実験に使用した無人搬送車

せた。また、環境照度（走行路面より 1 m の高さの照度）を変化させた場合の停止距離についても測定した。なお、対象障害物の寸法は、横 1600 mm × 縦 800 mm で横長の形状であり、無人搬送車に装置してある検出センサは、車体前面の下方に左右 2 基（間隔 650 mm、床上 300 mm）である（Photo. 2.5-2 参照）。

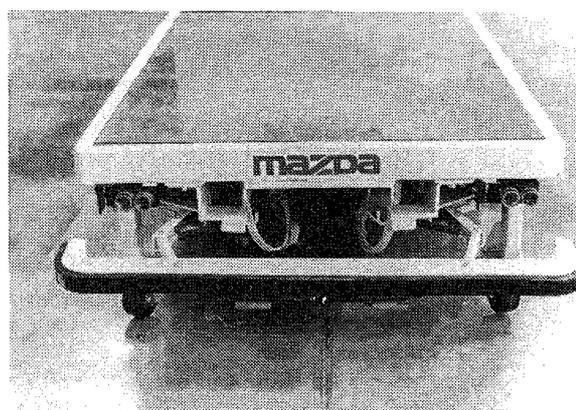


Photo 2.5-2 Reflective sensors installed in front of an automated guided vehicle

車体前面に取付けられた検出センサ

2.5.4.2 検出センサの検知特性の実験結果

2.5.4.2.1 対象障害物の材質による影響

検出センサに対する対象障害物の面を垂直 ($\theta=0^\circ$) として対象障害物の材質を白紙, 木材及びカガミとした場合の検知距離の測定結果を白紙の場合を 100 とした指数で表現すると, Table 2.5-1 に示すような結果となり, 黄, 赤, 桃, 青などは白の場合とほぼ同程度の検知距離ではあるが, 白の場合に比べて緑の場合では約 10% 程度検知距離が短くなり, 黒の場合では著しく 33% も検知距離が短くなっている。

2.5.4.2.3 対象障害物の傾斜角度による影響

種々の対象障害物について, 検出センサに対する傾斜角度を変えて検知距離を測定した結果を白紙の傾斜角度 $\theta=0^\circ$ の場合を 100 とした指数で表現してプロットしたものが, Fig. 5-3 である。全体的には対象障害物の傾斜が大きくなるにつれて検知距離は短くなる傾向が認められる。

Table 2.5-1 Target materials and sensitivity of a reflective type beamsensor
対象障害物の材質による影響

対象障害物の材質	検知距離
白紙	100.0
木材 (合板)	103.3
カガミ	514.4

Table 2.5-2 Target color and sensitivity of a reflective type beamsensor
対象障害物の色による影響

対象障害物の色	検知距離
白	100.0
黄	99.6
赤	100.6
黒	67.0
緑	90.6
桃	98.2
青	98.0

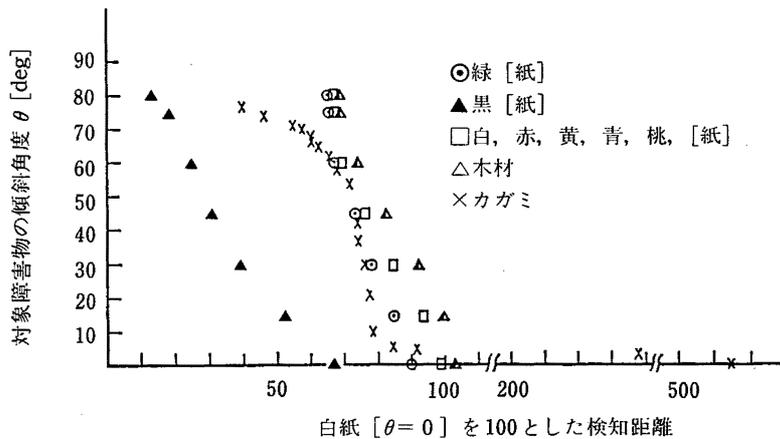


Fig. 2.5-3 Target inclination and sensitivity of reflective type beamsensor
対象障害物の傾斜角度と検知距離

特に, 黒色の場合は検知距離が著しく短くなっている。例えば, 傾斜角度が 45° の場合について見ると, 黒以外のものは白紙 ($\theta=0^\circ$) の場合の 75~80% の検知距離であるのに対して, 黒では 30% 程度の検知距離しかない状態である。また, カガミの場合についてみると傾斜角度が小さい $\theta=0\sim4^\circ$ の範囲において, 白紙 ($\theta=0^\circ$) の 510% 程度から急激に 90% 程度の検知距離に減少していることが顕著である。

2.5.4.2.4 対象障害物の幅寸法の影響

検出センサに対する対象障害物の面を垂直 ($\theta=0^\circ$)

とした状態で対象障害物 (白紙) の幅寸法 b を変化させた場合の検知距離の測定結果を $b=180\text{ cm}$ の場合を 100 とした指数で表わしプロットしたものが Fig. 2.5-4 である。これを見ると対象障害物の幅が 20 cm 以下になると, 検知距離が急激に短くなっている。

2.5.4.3 検出装置を装備した無人搬送車の停止特性の実験結果

2.5.4.3.1 対象障害物の材質及び色による影響

無人搬送車の走行路面に垂直な状態に対象障害物を設置した場合の障害物検出装置作動による停止時の無

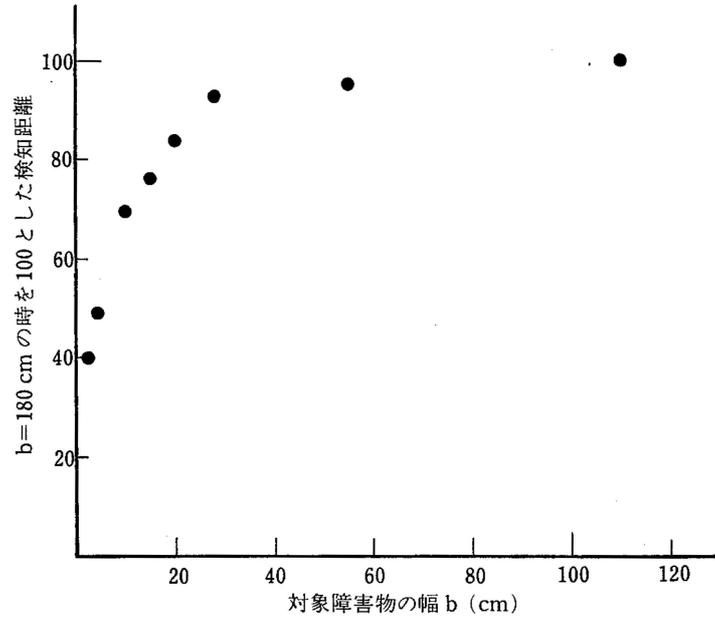


Fig. 2.5-4 Target width and sensitivity of reflective type beamsensor
対象障害物の幅寸法と検知距離

人搬送車と対象障害物間の距離を測定した結果のプロットが Fig. 2.5-5 である。

材質が紙の場合の色の差異による影響は、上記 2.5.4.2.2 の検出センサにおける検知距離と同じ傾向が見られ、黄、白、赤、灰、青などは同程度であるが、緑の場合はそれらよりやや停止距離が短く、特に黒の場合には対象障害物の前わずか 20~30 cm の位置まで

近づいて停止している。

また、紙以外の材質の差異も停止距離に影響を与えている状態がよくわかる。特に、アルミニウム板やアルミ箔など乱反射の少ない反射率の高い材質の場合には停止距離は大きい、そのバラツキが非常に大きくなっていることが認められる。これは検出センサの実験においてカガミの場合に見られたように、検出装置に対する傾斜角度の影響が強く、無人搬送車のわずかな蛇行走行状態 (Photo 2.5-3 参照) によるものと思われる。

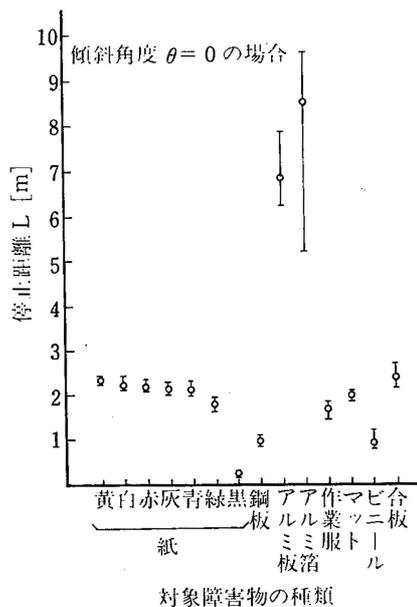


Fig. 2.5-5 Various targets and stop distance
対象障害物の種類と停止距離

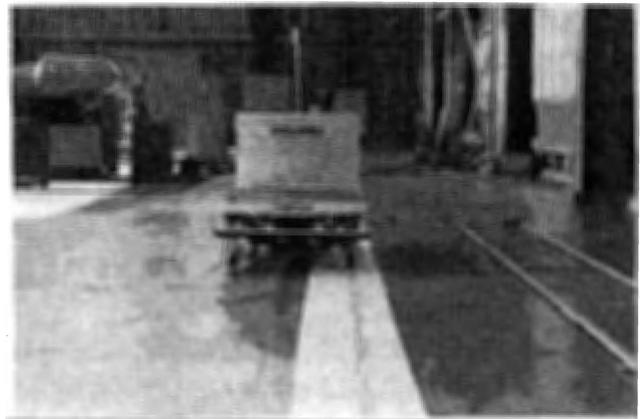


Photo 2.5-3 Wave motion of an automated guided vehicle
蛇行走行の状態

2.5.4.3.2 対象障害物の傾斜角度の影響

種々の対象障害物について、無人搬送車の走行路面に対する傾斜角度を変えて停止距離を測定した結果をプロットしたものが Fig. 2.5-6 である。

対象障害物の傾斜角度と停止距離との関係は、上記の 2.5.4.2.3 の検出センサの場合における傾斜角度と検知距離との関係と同様な傾向が見られており、検知距離の短かった黒の場合では、停止距離も短く傾斜角度 $\theta=15^\circ$ の場合には、5 回の繰返し実験の内 4 回も対象障害物に無人搬送車が衝突した。

また、 $\theta=0^\circ$ の場合には停止距離が 7 m 程度あったアルミニウム板の場合においても、傾斜角度の影響が著しく $\theta=45^\circ$ のときには、5 回の内 4 回も対象障害物に無人搬送車が衝突したことが注目される。

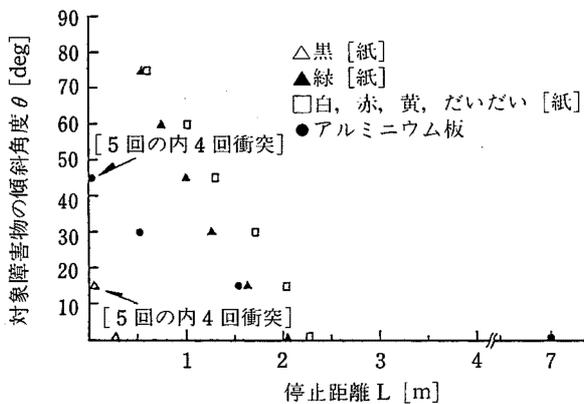


Fig. 2.5-6 Target inclination and stop distance
対象障害物の傾斜角度と停止距離

2.5.4.3.3 環境照度の影響

無人搬送車が走行する実験室天井に設置されている照明装置の調光操作により、環境照度を変化させたが、実験室外からの光線などにより一定の照度条件を長時間保持することはできないため、実験の実施時ごとに走行路床面から 1 m の高さにおける照度を測定した。およそ、30 Lux から 460 Lux 位の範囲で照度を変えた場合の停止距離の測定結果は、Fig. 2.5-7 に示すとおりである。このデータによると、この程度の環境照度の変化による停止距離への影響はほとんど無いものと思われる。

ところで、本実験に用いた無人搬送車は、最大積載荷重が 300 kg のものであるが、参考として、積載荷量を変えた場合の停止距離への影響について実験を行ってみた。その結果は、Fig. 2.5-8 に示すとおりであり、対象障害物の色の差異によるバラツキは、かなり見ら

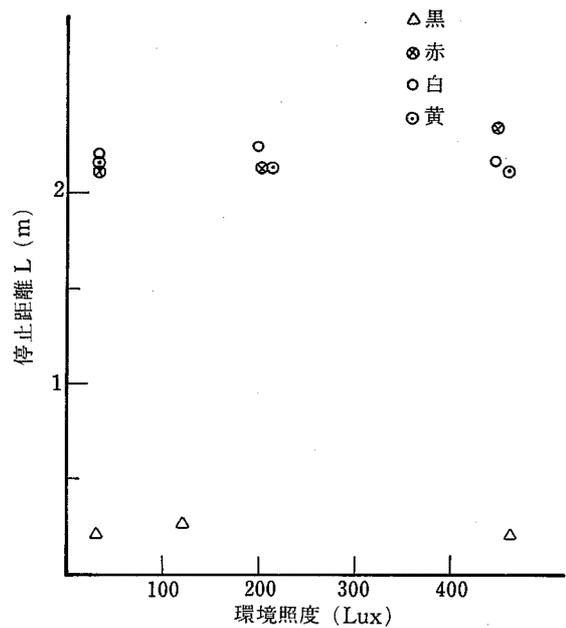


Fig. 2.5-7 Environment brightness and stop distance
環境照度と検知距離

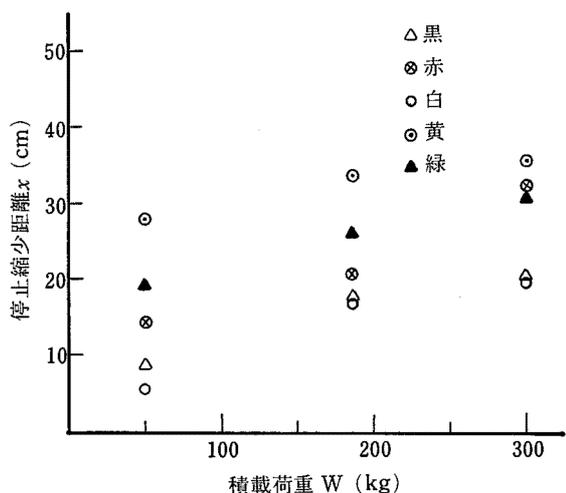


Fig. 2.5-8 Carrying capacity and reduction of stop distance
積載荷重と停止距離

れるが、積載物が無い場合に比較して、50 kg 積載時で 6~28 cm, 185 kg 積載時で 17~34 cm, そして 300 kg 積載時には 20~36 cm 程度と積載重量が増加するに従って、やや停止距離が短くなる傾向が見られる。

なお、本研究における各実験は、当所の清瀬実験場の機械安全システム実験棟内大実験室で乾燥状態のコンクリート床上で行ったものである。

2.5.4.4 考察

2.5.4.4.1 障害物検出装置の検知特性について

拡散反射型赤外線センサを用いた一実験例ではあるが、その検知特性が対象障害物の材質、色及び傾斜角度などに大きく影響を受けることが判明した。また、これを無人搬送車の障害物検出装置として適用した場合には、特に黒色の障害物に対しては衝突の可能性があり、15°程度の傾斜角度であっても衝突してしまうことが多いこと、そしてアルミニウム板など反射率のよい材質の障害物では、検出装置に対して垂直の場合は極めて停止距離が大きいにもかかわらず、傾斜角度がわずかであっても著しく停止距離が短くなり、傾斜角度が45°程度になると衝突する可能性が非常に高いことが明らかとなった。

従って、検出特性の観点から検討すると、拡散反射型赤外線センサを使用した光線式障害物検出装置を無人搬送車へ適用する場合は、検知感度の設定時に白紙障害物のみによって行うことは、安全の面から不十分であって黒色障害物を考慮した感度設定を行うことや、傾斜角度に対する対策も必要と考えられる。

2.5.4.4.2 反射型光線式センサのフェールセーフ評価

本実験で用いた、拡散反射型赤外線センサは、いわゆる反射型光線式センサの一つのタイプである。ここでは、これについてのフェールセーフ評価を試みることにする。

Fig. 2.5-9 は、反射型光線式センサの一般的な構成例

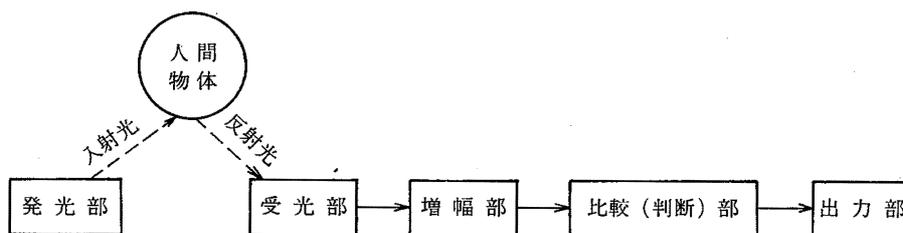


Fig. 2.5-9 An example of construction of a reflective beamsensor
反射型光線式センサの構成例

である。この検出センサの適用方式では、発光(発振)器から発射される赤外線(超音波)を物体に反射させてそれを受光(受振)器で検知することにより人間や物体接近などを判断する。

しかし、この方式では検出部において「危険を検出する」方式であり、もし発光器か受光器が故障を生じた場合や回路における断線などを生じると機械(無人搬送車など)を停止できない事態もありえる。すなわち、このような反射型の光線式検出センサによる方式では、フェールセーフの構成はできないわけである。

2.5.5 おわりに

本研究では、無人搬送車光線式障害物検出装置について、その検知特性及びフェールセーフ機能の観点から検討を行ったが、反射型光線式センサを用いた障害物検出装置は危険検出型であるため、安全補助装置と見なされるものである。従って、無人搬送車における衝突防止装置としては、フェールセーフ機能をもつことのできる接触式安全バンパとの組み合わせにより、非接触検出装置としての特性を把握した上で、その特長を活用することが重要であろう。

参考文献

- 1) (社)日本産業車両協会, 無人搬送車の安全基準に関する調査研究報告書, 昭和60年7月

2.6 シールドビームセンサ

2.6.1 軟接触型センサの必要性

近年のマイクロエレクトロニクスの進展に伴い、機械の自動化が単一可動部から多数の可動部へと、その対象範囲を拡大しており、またその可動範囲も大きくなってきている。これらの多自由度化された機械が組み合わされて生産システムを構成すると、可動部の数の増加とその可動範囲の拡大が急激に進行することになる。

そこで、これまでは安全対策を講ずる上で、危険作業がその対象となってきたが、今日の自動生産システムでは、危険領域という危険性の2次元的広がりをとらえて、それを安全対策の対象とするようになってきた。

これらの自動化の流れを考えると、終局的には、人間の検出をできる限り広い範囲で検出できる手段が必要となることになるだろうが、実際には点から面の自動化レベルの間に多くの中間的なもの、すなわち、ラインの自動化レベルや狭い範囲の面の自動化レベルが今後も多く残存することになるはずであり、これらの中間的レベルに関する安全対策も忘れてはならない。この中で特に問題となるのは、ロボットアームやAGVSのように人間の作業範囲とそれらの可動範囲がオーバーラップする物にあつては、危険部に直接設置し、人間との接触を検出した機械を停止させる接触型センサが必要となる。しかし、危険部に直接ぶつかる前に接触センサに触れる必要があることから、接触センサ自体は剛体ではならず、軟接触型である必要がある。勿論、そのセンサからの検出信号によって機械が停止するまでのオーバーシュート量を考慮したセンサの適正な設置方法を採用することが必要なのはいうまでもない。

2.6.2 シールドビームセンサ

Fig. 2.6-1 は安全装置のフェールセーフ構造を踏襲して開発したシールドビーム式光線センサの仕組みと構成である。まず、ゴムチューブの両端にそれぞれ発光器と受光器をセットする。チューブが曲がって

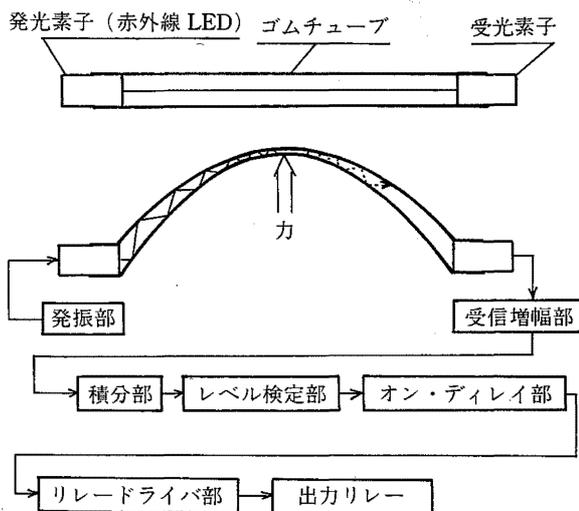


Fig. 2.6-1 Shield-beam sensor
シールドビーム式光線センサの構成

いないとき（安全時）は、ゴムチューブの中を光（赤外線）が進み、受光された光は電気信号にかわり、リレーを駆動してON出力することによって安全であることを出力する。人がチューブに触れてこれを曲げると、光がチューブ内を伝わる際にチューブの面に反射する回数が増し、そのため受光器に達する光が減少する。曲がる量が増すとそれにつれて到達する光の量がアナログ的に減り、その指定したしきい値以下に下がると危険を知らせることができる。また、投・受光器の内部故障においても同様にOFF出力するので、機械を停止することができる。

ゴムチューブとしては安価で入手しやすい生ゴムのチューブを用いたが、材料、内径、長さにより動作特性が多少変化するので、いくつかのパラメータについて特性実験を行った。Fig. 2.6-2 はチューブの内径による変化を示している。チューブの内径を小さくすると、変位を与えた時に、受光器まで到達できる光の量の対変位減少率が大きくなることがわかる。また、チューブ内径が発光器のレンズの径より小さくなるとさらにその傾向は大きくなる。この実験結果から、大きな変化を必要とするような使い方をする場合には、内径を太く、逆の場合は、細くすればよいことが分かる。Fig. 2.6-3のようにチューブの材質によっても変位に対して到達する光の量に変化が見られるが、これはチューブの内面の光の反射特性による違いである。センサを長くしたい時はシリコンゴム等反射特性のよいものを使うとよい。また、光ファイバを用いると大きな曲がり

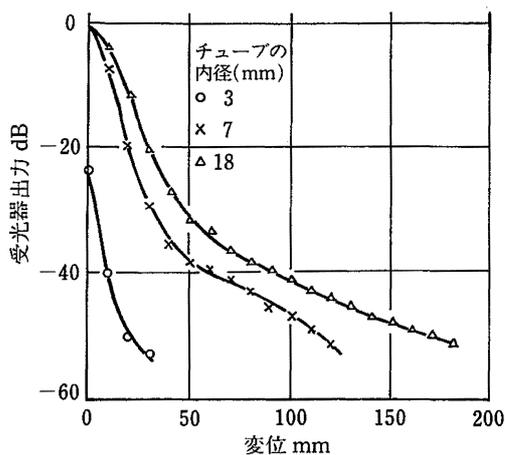


Fig. 2.6-2 Output property (innerdiameter)
チューブ内径の影響(長さ 2 m, 生ゴム(黒))
(内径 18 mm 変位 0 mm の出力を 0 dB とした)

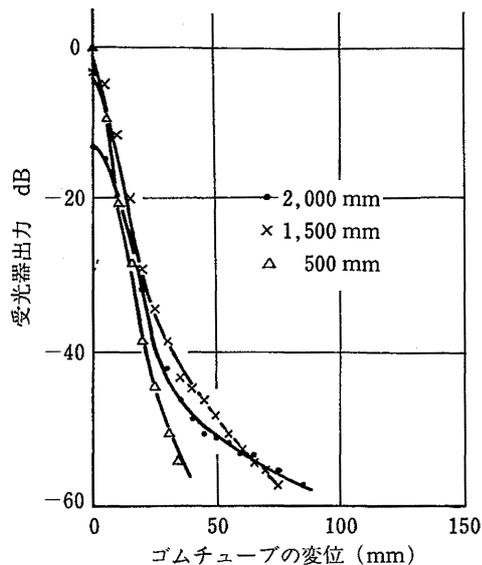


Fig. 2.6-4 Output property (length)
長さによる影響(内径 2 m, 内ゴム(黒)) (長さ
500 mm, 0 mm の出力を 0 dB とした)

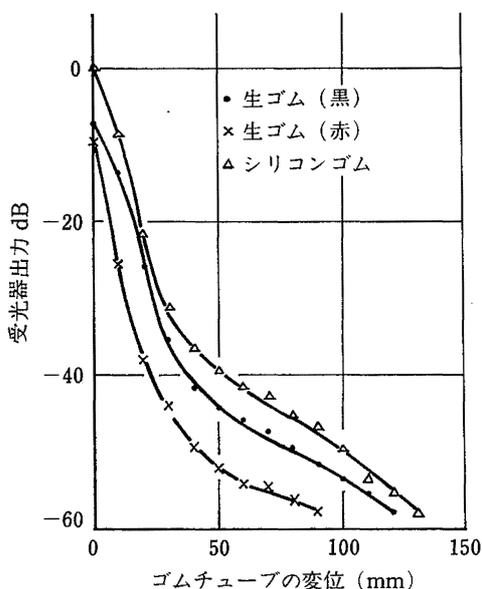


Fig. 2.6-3 Output property (Ruber tube material)
チューブの材質による影響(長さ 2 m, 内径 7 mm)
(シリコンゴムで変位 0 mm の出力を 0 dB とした)

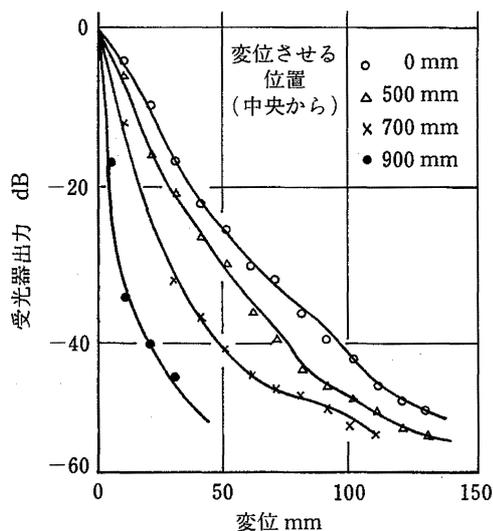


Fig. 2.6-5 Output property (position of force applied)
力の作用位置の影響(長さ 2 m, 生ゴム(黒))
内径 7 mm) (変位させる位置 0 mm 変位 0 mm の出力を 0 dB とした)

にも反応しなくなるので、チューブを曲げて用いる場合はその曲部に光ファイバを用いばよい。Fig. 2.6-4 は長さによる影響を示したものである。ここで変位 0 mm の時には短い方が受光出力が高いが変位に対する減衰率が大きくなっている。これは短い方が同じ変位に対して曲率半径が小さくなり、またチューブもつぶれて光の通過する断面積も小さくなるからである。パラメータによる特性の違いを十分評価し、使用に当たっては、それぞれの条件に応じてチューブの適切な選

択をする必要が出てくる。更に増幅部によるゲインとしきい値を変化させることにより、使用条件に最も合ったものを作ることができる。Fig. 2.6-5 は力の作用位置による影響を調べたものであるが、変位に対して最も感度の低い中央の特性でしきい値を設定すれば、どの位置で接触しても安全センサとして十分な機能を果たすことができる。

次にこのセンサで用いる受光器回路の構成について

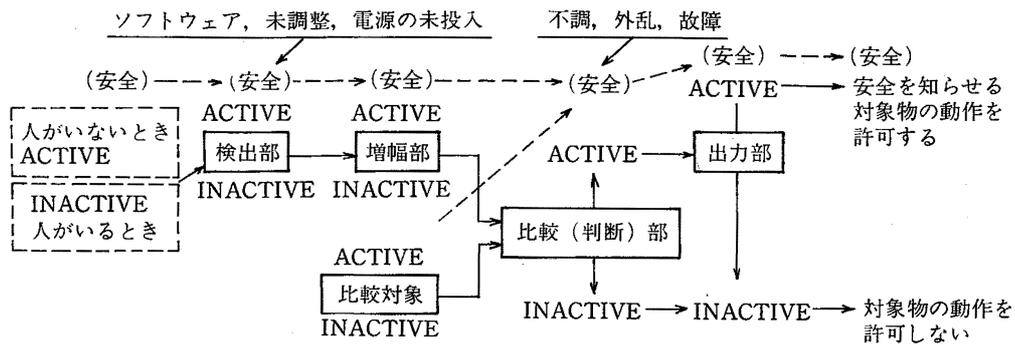


Fig. 2.6-6 Signal transfer in Fail-Safe in Safety devices
安全装置におけるフェールセーフな信号伝達

まとめる。

(1) 基礎的構造条件

多様な安全装置の中で、特に人間の安全防護を目的とするものにあつてはそれ自体が故障（障害）を生ずることを前提とした安全設計すなわちフェールセーフ設計がなされていなければならない。この点では、シールドビームセンサも同じである。

フェールセーフを達成するためには Fig. 2.6-6 に示すように検出部、信号処理部、出力部にわたって一貫して安全（正常）な状態である時のみオン信号（アクティブ）を出し、それ以外は全て出力零（イナクティブ）となるようにする。これによって、危険を検知した場合は勿論、いずれに未調整、故障、電源未投入を生じてオフ信号が出力されて機械はインターロックされる。すなわち、受光回路は次の基礎的条件を満足する構成のものとする。

(a) 電源及び受光素子を含めすべての構成要素の故障に対して受光出力断となるフェールセーフ構成とする。

(b) 高周波誘導雑音及び等価直流雑音による誤動作を防止するためにフィルタリングを行う。

(c) チューブの曲り（変位）に応じて変化するが出力は安全／危険の <1, 0> とする。

(d) フィルタリングは、故障時、受光出力断となるように時間軸上の配慮を行う。

(e) 受光出力断となつてから復帰するまで、オン・ディレーを持つものとし、このディレーは故障時にディレー時間が延長されるか、または、出力断となる（継続する）ものとする。

(2) 各部の構成

チューブがはずれた際にも直流光を受信しないため

に、交流（パルス）光を使う。また、交流光を使うことによって、受光回路を構成する半導体の ON/OFF 故障で受光出力の OFF とすることができる。光信号は高周波誘導雑音と区別し易いように高々 $50 \mu\text{s}$ 程度のパルスとする。消費電力を小さくするために周期は $30 \mu\text{s}$ 以上程度を選ぶ。積分回路は後段のレベル検定回路と一緒にパルス幅増幅を行う。Fig. 2.6-7 のタイムダイアグラムで示すように積分回路の出力は τ_1 だけ遅れて発生し、 τ_2 だけ遅れて消滅する (V_{th} はレベル検定回路のスレシヨールドレベル)。ここで τ_1 は、受光素子に誘導雑音が発生した場合や、増幅器が発振したとき、積分出力がレベル検定回路のスレシヨールドレベルに達しないように設定される。従つて、 τ_1 を定める時定数は故障時小さくならないようにする。また、パルス幅増幅の時定数 τ_2 は故障出力が発生しないように、従つて大きくならないようにする方がよい。この時間軸上の故障は振幅軸上でスレシヨールドレベル V_{th} が故障で低下しないように配慮することも必要がある。

レベル検定回路は、スレシヨールドレベルが故障で低下しないと同時に故障で発振しない回路構成としなければならない。そうしなければ、受光信号がないのに故障で出力を生ずることになる。

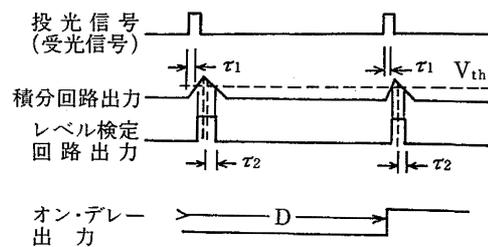


Fig. 2.6-7 Time-diagram
タイム・ダイアグラム

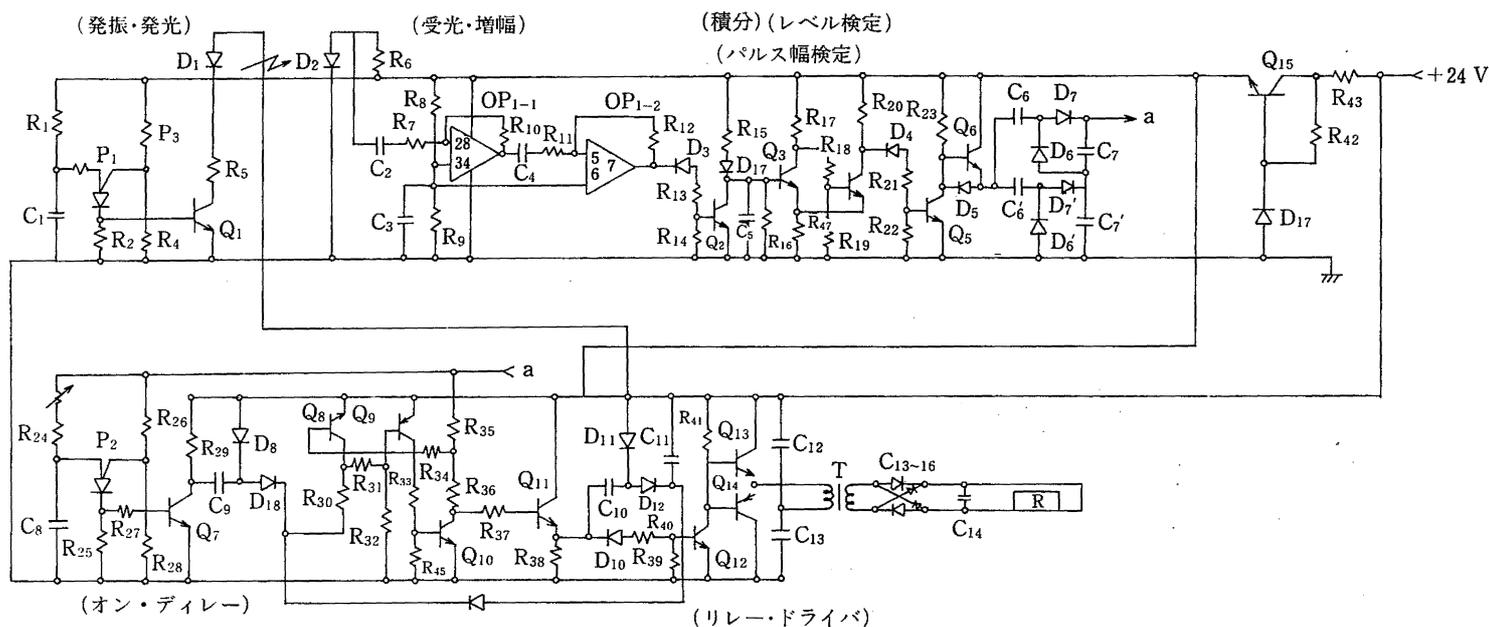
オン・ディレー部は、レベル検定回路に出力パルスがあつて、ディレー回路で定まる所要時間後に交流出力を発生するこのディレー回路は、受光信号があつてすぐOK(安全)の出力信号を出す不安を避けるためにあり、故障時少なくともディレーの延長される側が安全である。延長される時間が故障で無限大であるとき故障時出力断に等しい。

(3) 故障解析

実際に構成した回路 (Fig. 2.6-8) について故障解析を行う。

a. 発振・発光部

部品番号と故障モード	出力	症状
R ₁ オープン	OFF	PUT 発振せず
R ₄₆ オープン	OFF	//
R ₂ オープン	OFF	//
R ₃ オープン	OFF	//
R ₄ オープン	OFF	//
R ₅ オープン	OFF	D ₁ に電流流れず
C ₁ オープン	OFF	PUT 発振せず



記号	名称	仕様	記号	名称	仕様	記号	名称	仕様
P ₁ , P ₂	PUT	N13T1	C ₆ , C ₆	タンタルコン	1μF 25V	R ₁₄	抵抗	33kΩ
OP 1	オペアンプ	μpc4556C	C ₇ , C ₇	"	1μF 16V	R ₁₅ , R ₂₆	"	5.1kΩ
Q ₁ ~ Q ₈	トランジスタ	2SC943	C ₈	アルミコン	10μF 25V	R ₁₆ , R ₁₉ , R ₃₂	"	51kΩ
Q ₉ , Q ₁₄	"	2SA603	C ₉	フィルムコン	0.047μF 50V	R ₁₇ , R ₂₀	"	3.9kΩ
Q ₁₀ ~ Q ₁₃	"	2SC943	C ₁₀ , C ₁₁	"	0.01μF 50V	R ₂₁ , R ₃₄ , R ₃₇	"	20kΩ
Q ₁₅	"	"	C ₁₂ , C ₁₃	アルミコン	22μF 25V	R ₂₂	"	"
D ₁	発光ダイオード		C ₁₄	"	10μF 25V	R ₂₃	"	4.7kΩ
D ₂	受光ダイオード					R ₂₅	"	200Ω
D ₃	定電圧ダイオード	3.9V	R ₁ , R ₁₂ , R ₂₄	抵抗	100kΩ	R ₂₉ , R ₄₀ , R ₄₆	"	2kΩ
D ₄	"	6.2V	R ₂	"	30kΩ	R ₃₀	"	18kΩ
D ₅ ~ D ₉	ダイオード	IS1558	R ₃ , R ₂₇ , R ₃₈	"	1kΩ	R ₃₁ , R ₃₉ , R ₄₂	"	6.2kΩ
D ₁₀	定電圧ダイオード	6.2V	R ₄ , R ₄₁	"	3kΩ	R ₃₅	"	20kΩ
D ₁₁ ~ D ₁₈	ダイオード	IS1558	R ₅	"	820kΩ	R ₃₆	"	10kΩ
C ₁	フィルムコン	4700pF 50V	R ₆ , R ₁₈	"	2.7kΩ	R ₄₃	"	"
C ₂ ~ C ₄	"	22000pF 50V	R ₇ , R ₈ , R ₃₃	"	10kΩ	R ₄₇	"	1.5kΩ
C ₅	"	0.01μF 50V	R ₉	"	5.6kΩ	R ₄₅	"	1kΩ
			R ₁₀	"	510kΩ	R ₁₃ , R ₂₆	"	15kΩ
			R ₁₁	"	420kΩ	VR	ポリウム	100kΩ

Fig. 2.6-8 Electric circuit of shield-beam sensor

シールドビーム式光センサに用いる投受光回路

ショート	OFF	〃
P ₁ 出力H	OFF	D ₁ 交流発光せず
出力L	OFF	D ₁ 発光せず
Q ₁ 出力H	OFF	〃
出力L	OFF	D ₁ 交流発光せず
D ₁ オープン・ ショート	OFF	発光しない/交流発光せず
Q ₁ 入・出力短絡	OFF	レベル小

ただし、出力は交流発光

b. 受光・増幅部

部品番号と故障モード	出力	症状
D ₂ オープン	OFF	受光できず
ショート	OFF	〃
D ₆ オープン	OFF	〃
D ₇ オープン	OFF	増幅器入力なし
D ₈ オープン	OFF	増幅器バイアスなし
D ₉ オープン	OFF	〃
D ₁₀ オープン	OFF	〃
D ₁₁ オープン	OFF	増幅器入力なし
D ₁₂ オープン	OFF	増幅器のバイアスなし
D ₁₃ オープン	OFF	信号伝わらず
C ₂ オープン	OFF	〃
ショート	OFF	増幅器の入力バイアス移動
C ₄ オープン	OFF	信号伝わらず
ショート	(OFF)	正常または出力小化
C ₃ オープン	(発振)	正常または発振
ショート	(OFF)	増幅器の入力バイアス移動
D ₃ オープン	OFF	信号伝わらず
ショート	OFF	Q ₂ : ON で交流出力出ず
OP ₁₋₁ 出力H	OFF	交流信号出ず
出力L	OFF	〃
発振	OFF	パルス幅検定出力出ず
OP ₁₋₂ 出力H	OFF	交流信号出ず
出力L	OFF	〃
発振	OFF	パルス幅検定出力出ず

c. 整流回路

部品番号と故障モード	出力	症状
C ₈ , C ₆ オープン	OFF	信号伝わらず
ショート	OFF	出力H
C ₇ , C _{7'} オープン	(OFF)	出力交流
ショート	OFF	出力ゼロ

D ₆ , D _{6'} オープン	OFF	C ₆ , C _{6'} 放電できず
ショート	(OFF)	出力レベル低下
D ₇ , D _{7'} オープン	(OFF)	〃
ショート	OFF	出力交流
d. オン・ディレー部		
部品番号と故障モード		
R ₂₄ , R ₂₅ オープン	OFF	P ₂ 発振できず
R ₂₆ , R ₂₈ オープン	OFF	〃
R ₂₇ オープン	OFF	P ₂ 出力伝わらず
R ₂₉ オープン	OFF	Q ₇ 出力伝わらず
C ₉ オープン	OFF	Q ₇ 出力伝わらず
ショート	OFF	〃
C ₈ オープン	OFF	C ₉ 放電できない
ショート	OFF	D ₁₈ 入力電源電圧レベル
D ₉ オープン	OFF	自己保持できず
ショート	(OFF)	(入力パルス C ₁₁ で低下)
Q ₇ 出力H	OFF	出力パルスにあらず
出力H	OFF	〃
入-出力短絡	OFF	レベル小
R ₃₀ , R ₃₁ , R ₃₂ オープン	OFF	演算発振できず
R ₃₃ , R ₃₄ , R ₃₅ オープン	OFF	〃
C ₃₆ オープン	OFF	〃
Q ₈ , Q ₉ , Q ₁₀ 故障	OFF	〃
R ₃₇ , R ₃₈ , Q ₁₁ オープン	—	演算発振出力伝わらず
C ₁₀ オープン	OFF	帰還 OFF
ショート	OFF	〃
C ₁₁ オープン	(OFF)	帰還交流(四端子化)
ショート	OFF	帰還 OFF
D ₁₁ オープン	OFF	C ₁₀ 放電できず
ショート	OFF	帰還 OFF

e. リレードライバ

部品番号と故障モード	出力	症状
D ₁₀ オープン	OFF	信号伝わらず
ショート	OFF	Q ₁₂ : ON
R ₃₉ オープン	OFF	信号伝わらず
R ₄₀ オープン	OFF	Q ₁₂ : ON(2次破壊発生)
R ₄₁ オープン	OFF	Q ₁₂ 出力出ず
Q ₁₂ 出力H	OFF	交流にあらず
出力L	OFF	〃

入—出力短絡	OFF	レベル小
Q ₁₃ 出力H (短絡)	(OFF)	レベル低下
出力L (オープン)	(OFF)	レベル低下
入—出力短絡	(OFF)	//
Q ₁₄ 出力H (オープン)	OFF	//
出力L (短絡)	(OFF)	//
入—出力短絡	OFF	//
C ₁₂ , R ₁₃ ショート/オープン	(OFF)	//
T トランス故障	OFF	信号伝わらず
C ₁₃ ~C ₁₆ ショート/オープン	(OFF)	レベル低下

f. 電源部

部品番号と故障モード	出力	症状
Q ₁₅ 出力H	OFF	P ₁ 発振できず
出力H	(正常)	スレシヨールド up, 正常動作(2次破壊へ)
D ₁₇ オープン	(正常)	//
ショート	OFF	P ₁ 発振できず
R ₄₂ オープン	OFF	//
R ₄₃ オープン	OFF	//

ゴムチューブが切れてたれ下がったり抜けたりすれば、その隙間から光が通過しなくなり出力はダウンするので安全側の故障となる。

以上のような詳細にわたる検討を加えていけば、いずれの要素が故障しても出力はダウンしてしまうため、故障によって誤って安全であるという信号を出力することがないことがわかる。

2.6.3 シールドビームセンサの他の特徴

シールドビームセンサはそれ自体がフェールセーフ構造を有するという大きな特長以外にもいくつかの特徴がある。これらをまとめると、

- a. 軟接触型センサであり、人間との接触によって危険を生じない。
- b. 発光器、受光器のレンズがチューブで覆われているので汚れない（塗装作業などにも使用できる）。
- c. ゴムチューブで発信器・受光器を繋いでいるので、光軸合わせが容易でかつ多少のぶれでは誤動作しない。
- d. 受光器出力がアナログ量として変化するので、スレシヨールドを変化させることにより特性を変える

ことができるが、あくまでもフェールセーフ構造は保持される。

e. センサそれ自体に故障があっても安全側の故障となる。

f. 装置の構成が単純であり、かつ安価である。

本研究ではこのセンサをロボットとの衝突を防止するためのセンサとして使用した実験を行ったが、人に（実験ではダミーを使って行った）衝撃を加えることなくロボットを停止させることができた。Photo 2.6-1 にその模様を示す。このほかにもロボットの周囲の柵を乗り越えて人が侵入することを防止するために、柵の上部開口部に設置することができる。またあるいは、生産ラインの非常停止の手段として、すなわち非常停止ボタンの代わりにシールドビームセンサをラインにわたって長くはり、どこでもすぐに非常停止をかけられるようにできる。また、タッチが柔らかく、接触検知範囲が長いので、生産現場だけでなく病院などに使うのに有効であるとの評価も見られる。



Photo 2.6-1 本装置のダミーによる実験

2.7 感圧センサの安全装置への適用

有接点素子は、元々非対称故障率を持っている。接点部分は適切な電流値の範囲内で使用されることが条件ではあるが、一般的に接点不良と接点溶着という2つの故障モードがあり、それらを比較すれば接点不良の方がすこぶる発生率が高い。従って接点不良に対して、例えば可動部が運転を停止する側となるように回路構成をとれば、著しく安全側に高い非対称故障率を持たせた制御回路となる。また、これはノイズに強い

などの特長もあり、安全装置に多く適用されている。

しかし近年エレクトロニクスの進展に伴い、回路素子の無接点化の要求が高く、安全装置においてもこの流れを無視できない状況にある。無接点スイッチがこのままで安全装置の中に取り入れられる場合に多に問題となるのは素子の故障によってターンオン、ターンオフのいずれが発生するかは明確に判断できないことである。例えば「安全の論理」における公理(5)に従ってターンオンを「安全情報」とみなして回路設計しても、誤ってターンオンしてしまうことがあるのである。すなわちこのことは誤って「安全情報」を発生させてしまう危険性が高いことであり、公理(6)に背くものである。

無接点回路によって「安全の論理」に従って「安全情報」を出力部まで伝達する、いわゆるフェールセーフ化を達成するには、これまでの無接点回路とは異なる回路上のテクニックが必要である。しかし、このテクニックを修得すればその達成はそれは難しいものではない。本研究にはすでにそのアプローチの実例をいくつか示した。

「安全情報」を発生させるセンサやスイッチ部においても、同様に誤って「安全情報」を発生させてはならない（誤って「危険情報」を発生させて機械を停止させてしまうことは、好ましくはないにせよ、安全の観点からはこれだけを許そうとするものである）。安全装置はフェールセーフの構成を持つことが必要条件になっているが、このことは言い換えれば、安全装置は「安全情報」を発生させるセンサまたはスイッチを持つ装置であるといえよう。

安全装置において「安全情報」を発生させるスイッチ（センサの役目をする）として有接点スイッチが多く用いられている。しかし、すでに述べたように接触不良の発生に対して「危険情報」（電気系としては危険信号）を発生するようであれば、安全装置としてフェールセーフ構造をそのまま達成できる（勿論フェールセーフ構造は安全装置としての必要条件であるが、そのまま十分条件であるわけではない）。

しかし、従来の安全マットスイッチではそれが「安全情報」の検出装置とはなっていない。そこでここではフェールセーフな安全マットスイッチの開発の経緯を述べることによって、危険検出型のセンサ（スイッチ）を安全確認型に改善する一般的方法について説明することにする。

(1) A接点式安全マットスイッチ

一般に市販されている安全マットスイッチは、Fig. 2.7-1に示すように、多接点を持つ踏圧をゴムなどで包んだ板状のものである。この方式のものは最も構造が簡単であるので、自動ドアの開閉に用いている。しかしこれをそのまま作業現場の安全装置として適用することはできない。それはセンサ部がA接点になっているので危険検出型であるからである。すなわち接点不良がそのまま「安全信号」に化けてしまうことになる。しかし、「A接点の問題点は接点不良/接点溶着の比が著しく大きな場合に成り立つのであって、この場合は接点数が非常に多いからむしろ溶着の方が発生しやすい。だからむしろ溶着側を「安全信号」とする方がよいのではないか」という、一見正しく思われる主張がある。

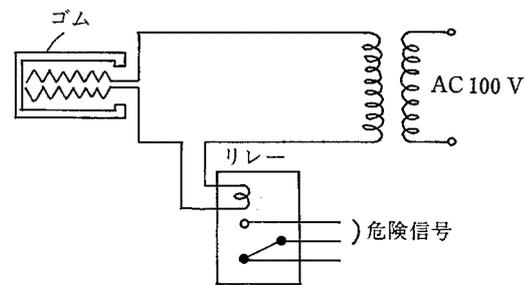


Fig. 2.7-1 Primitive mat switch
簡易なマットスイッチへの構成

それでは、仮に接点部についてはその主張を認めたとしよう。しかし、それでもなお接点部から引き出したリード線に断線でも生じたら、あるいは、コネクタに接触不良でも生じたらマットスイッチの接点の状態のいかんにかかわらず、そのまま「安全信号」を発生してしまう。すなわち、このようなちょっとしたトラブルでも安全マットスイッチの本来の機能は失われて、人間が安全マットにのっても機械を止めることはできなくなる。また、このように安全信号がOFF信号として扱われる場合は必ずNOT回路を挿入しないと、実際に機械を停止させることができないが、NOT回路はフェールセーフ化が困難である。

このような装置を人間の安全防護を目的として使用する場合は、多くの条件を満足する必要がある。それは、

- 1) 踏圧接点部をできるだけ多点にして、人間の検出の信頼性をすこぶる向上させる。
- 2) リード線の断線、リード線のハンダ取れ、コネ

クタの接触不良などが生じないような信頼性を確保する。

3) NOT 回路においては、誤動しない信頼性設計とメンテナンスを行う。

これらは、全てがメーカーの出荷時に保証できるわけではない。いや、かえってユーザで行うメンテナンス(始業点検その他の定期検査により)の方が重要になる。機械は必ずいつかは故障するわけであるが、この方式が安全上最も問題な点は、異常を生じて機械本体が危険な状態に陥ってはじめて装置の故障が発見されることである。従って、多くの条件を突き付けて、これをクリアするのを待つより、このような装置は人間の安全防護を対象とする場合は論外だと考えなければならない。

(2) 断線検出型A接点安全マットスイッチ

次に、上記の非フェールセーフマットスイッチを Fig. 2.7-2 のように改善してみた。ここでは、常時微電流を流してリレーを ON させておく、そして人がのると電流はリレーを流れず踏圧接点回路を流れて電源に戻る。このようにすれば、リレー接点は OFF になる。このようにすれば、誤って「安全信号」を発生させる心配は少なくなる。

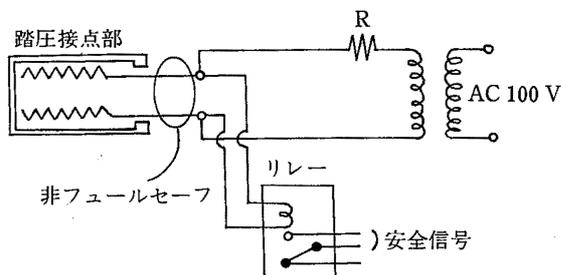


Fig. 2.7-2 Mat switch improved partly in Safety
安全を一部配慮したマットスイッチ

例えば、抵抗回路、リレー回路、電源回路のいずれも断線に対してリレーを OFF させることができる。すなわち異常に対して危険信号が発生する。しかし、踏圧接点部とそのリード線においては、まだ非フェールセーフ状態にあり問題を残している。従って、この2ヶ所においては信頼性設計をあてにせざるをえない。ここでは言うまでもなく、

1) 踏圧接点部の接点数を多くして、人が踏んだ時の踏跡にできるだけ多くの接点を用意して、危険信号の発生の信頼性をできるだけ高くする(この部品は誤ると「安全信号」が出力してしまう)。

2) 踏圧接点部からの2本のリード線は、決して断

線してはならない。メーカーにおいては断線しにくい電線とその被覆の重要性を認識し、またユーザにおいては、この個所のメンテナンスを十分にしかも継続して行い、信頼性を確保していかなければならない。

この方法はA接点安全マットのフェールセーフ化を追求しても、おのずと限界があることを示している。

(3) 感圧導電ゴムを用いた正信号型安全マットスイッチ

感圧導電ゴムを用いて無人搬送台車(AGVS)の安全バンパがすでに開発され、実用に供されている。感圧導電ゴムは、ある種のシート状ゴム材において、それを加圧すると導電性が変化する特性を持つものであり、その変化が可逆性をもつため、安全バンパの他にも多くのセンサやスイッチ類に応用されている。これを安全マットスイッチの接点部の有接点構造の代わりに適用すると、それを無接点化することができる。無接点化とは、逆に表現すれば、無限の数の接点があると見なせるので、これを利用すれば上述(2)の接点部の信頼性を大いに改善できるメリットがある。

感圧導電ゴムは一般に Fig. 2.7-3 に示すように、ON-OFF 型と抵抗値変化型に分けられる。ON-OFF 型は踏圧のない状態では、MΩのオーダにあるゴムシートの電気抵抗を加圧することによって、一挙に数Ωのオーダに下げることができる。抵抗の変化は、一般に電流として信号を取り出すので、これはA接点踏圧部の安全マットと電氣的に等価となる。従って、完全なフェールセーフとはならないことは前項で述べたとおりである。そこで、抵抗値変化型の感圧導電ゴムによる方式を検討した。

実際に安全バンパに適用されている感圧導電ゴムは、シリコンゴムとニッケル金属微粒子を組み合わせた複合材であり、Fig. 2.7-4 に示すように加圧のない場合は10 MΩ以上の高い抵抗を持ち、加圧力に応じて電気抵抗が下がってくる。

このような特性を持つセンサでは一般に、予め明確に特性の把握された小さなレベルの検出対象をセンサの能力の一部を使って検出させておき、それが検出されている間はセンサ及びその他の電気回路が正常に動作しているとして、その信号から「安全信号」を取り出すことができる。この場合、この方式を採用しようとする、例えば200gの重量をかけておき、抵抗を2~7.5 kΩのオーダであれば「安全信号」を出力するようになればよい。

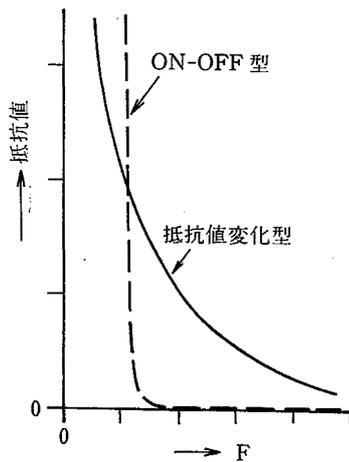


Fig. 2.7-3 Two types of Pressure Conduction Rubar (P.C.R)
感圧導電ゴムのタイプ

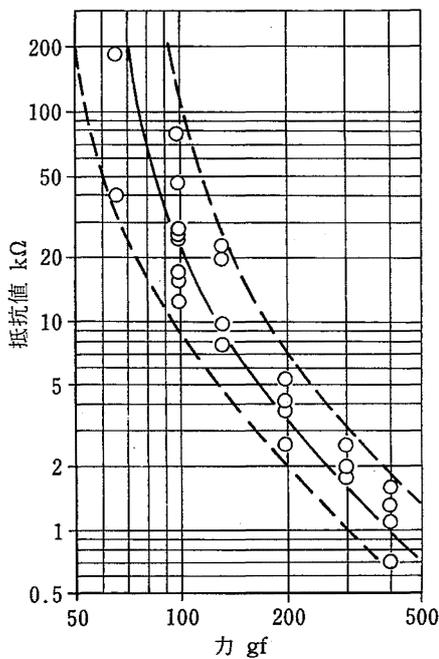


Fig. 2.7-4 PCR used in AGVS as safety bumper
無人搬送台車のバンパに用いられている感圧導電ゴム

しかし、フェールセーフ化を検討する前にこの方法を断念せざるを得なかったのは、安全マットの全体の面積にわたって一定の負荷をまんべんなくかけて抵抗値にオフセットを与えることはまず不可能だからである。これまで安全バンパに用いられたきた感圧導電ゴムでは、この方法の達成が困難であることからA接点方式の安全バンパとなっており、フェールセーフ構造となっていないといえる。

(4) 感圧導電ゴムの正信号II型による安全マットス

イッチ

本研究は、最終的には Fig. 2.7-5 に示す特性の感圧導電ゴムを採用して、安全マットスイッチを構成した。これは、無負荷において他の導電性ゴムとは異なり、10~100 kΩ という低抵抗値を有している。これは、絶縁体によって表面をコーティングしたカーボンブラックとシリコンゴムの複合体となっており、しかも、粉体が微粒子なので極めて電流密度が均一であり、ゴムとしての構造も大変安定している。何よりも無負荷においては、電流の値が容易に検出できる範囲にあり、しかもその値は、素材の調整によっていくらでも設定・変更が可能である。

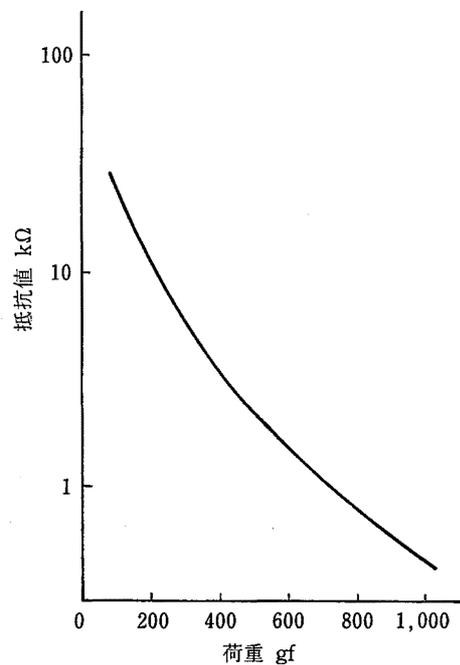


Fig. 2.7-5 P-R Property of PCR, complex of Silicorn and complex Rubber and processed carbonblack
処理されたカーボンブラックを含むPCRの特性

ゴムの特性実験を行ったが、Fig. 2.7-6~Fig. 2.7-10 のように、加圧状態では温度特性、一定荷重特性など特性の変化がみられる。これらの結果から、その特性は抵抗上昇側と抵抗下降側の両方の特性変化を考慮しなければならないことがわかる。

この感圧導電ゴムが大変有効なのは、加圧状態に比べて無負荷の状態における抵抗値がすこぶる安定していることである。それは、耐久試験結果 Fig. 2.7-10 (a) と Fig. 2.7-10 (b) を比較すれば、容易にわかる。すなわち、これによれば無負荷の状態にて抵抗が5~14 kΩ の

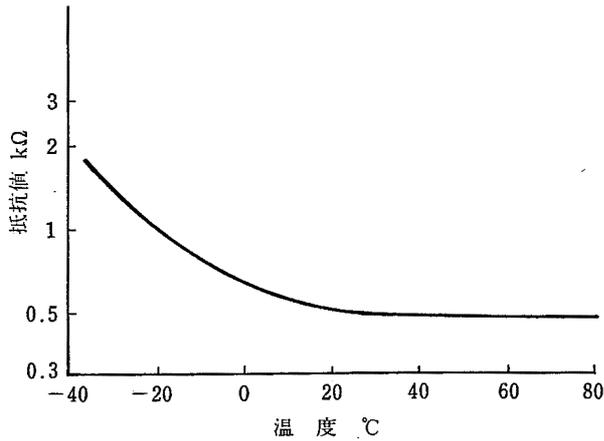


Fig. 2.7-6 Temperature dependency of electric resistance PCR
温度依存性

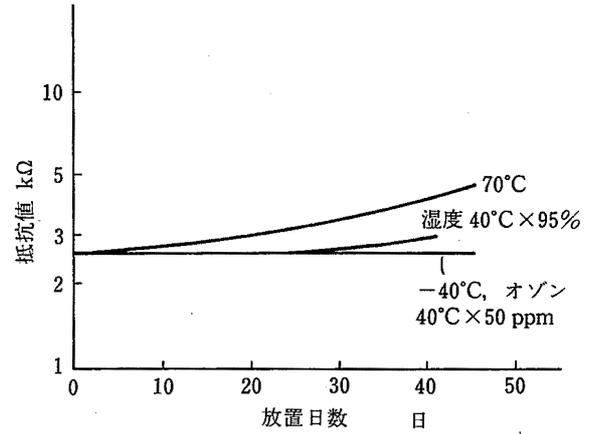


Fig. 2.7-9 Gradual change of the Property of PCR exposed in bad condition
耐環境特性

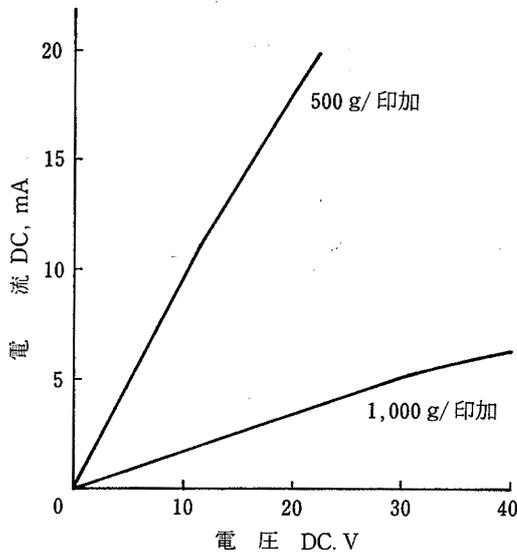
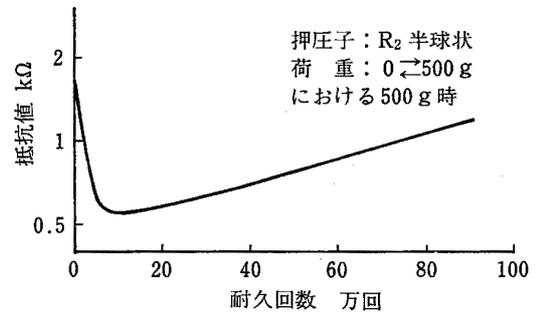
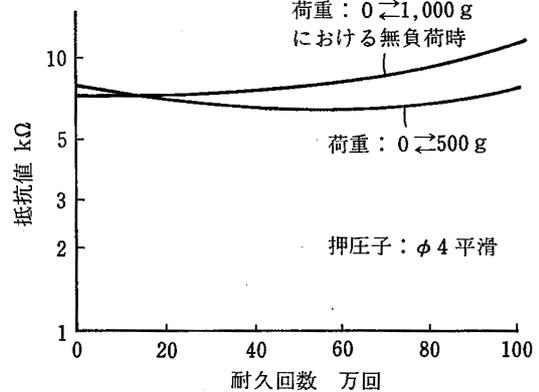


Fig. 2.7-7 Relationship between electric voltage and current
電圧—電流特性



(a) 耐久試験(1)



(b) 耐久試験(2)

Fig. 2.7-10 Endurance property by repeated load tests
耐久試験

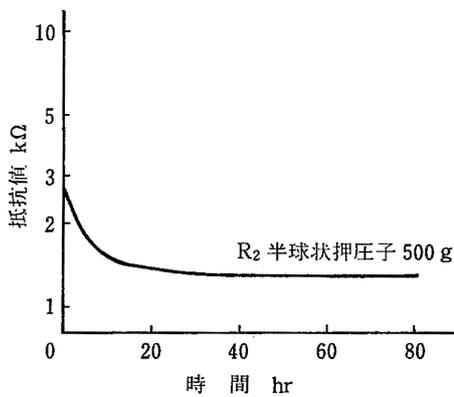


Fig. 2.7-8 Decrease of Electric resistance depending on time
経時特性

間にあることをウィンドウ・コンパレータを用いて検定すれば「安全信号」として出力できることを示している。

これらの結果から、目下フェールセーフな安全マットスイッチを試作中であるが、このように「安全信号」が取り出せればあとの信号処理回路は3章の光線式安全装置の場合と同様の方法で容易に構成が可能である。これによって達成された安全マットスイッチはもはや

メンテナンスは安全確保の必須の条件でなくなる。いずれの個所で異常を生じて、また経時特性の変化が見られても、それが「安全信号」の範囲を少しでも越えたら「危険信号」を発生して機械本体を停止させることができる。

なお、本感圧導電ゴムの提供を興国ゴム㈱から受けた。その開発担当者によれば、その感圧導電ゴムは他社と較べて無負荷における電気抵抗が十分に高くできなかった。これは複合素材の相違により本質的に電気抵抗の上限があるためであるが、高抵抗に成功した他社製ではフェールセーフがかえって不可能となり、それが達成されなかったことがむしろ幸してフェールセーフな安全マットが達成されたというのは皮肉な話である。ここで、安全の論理に従って論議を進めると、安全を目的とする装置の開発の目標が論理的に明らかになってくるのがわかる。

2.8 非対称アクチュエータ

2.8.1 開発の経緯

昭和59年11月に起こったロボット災害は、ロボットアーム（オートローダ）が非常作業中の人間の頭蓋骨を貫通するという悲惨な事故であった。

本事例はシリンダのピストンが上下してワークを搬

送するオートローダとワークを置く台との間に作業者が頭を入れて作業中、数百キログラムという力で挟圧されたものであり、アクチュエータの強烈な破壊力の前には安全帽も全く役に立たなかった。

そこで、本事例に基づいて、オートローダにおけるアクチュエータの本質的な安全化を目標にして検討を重ねた結果、本質的に安全（ここでは、安全側に著しく非対称性を持つと抽象化して表現される）なアクチュエータを開発するに至った。これは、構造的には差動シリンダの類であり、技術的にはさほど新しいものではないが、安全の面からこれを見ると、大変高い評価が得られる。ここではこれを「非対称アクチュエータ」と呼び、安全性の具体的評価を行った。

2.8.2 アクチュエータにおける安全制御の基本

安全制御の基本についてはすでに多く述べたところであるが、システムにおいて、確率的、経時的に発生する障害そのものを減らすこと以上に、障害の発生のいかに拘らず、安全確認された状態に対してのみ運転の許可を与えるという方式を採用することによって安全対策を講ずることが強く求められる。これを「安全確認型」手段と呼ぶことはすでに述べた。これに対して、危険を検出して制御を停止する方式は「危険検出型」手段といえるが、これは危険検出の失敗に対して安全確保できないので、安全制御の基本を満たすことはできない。

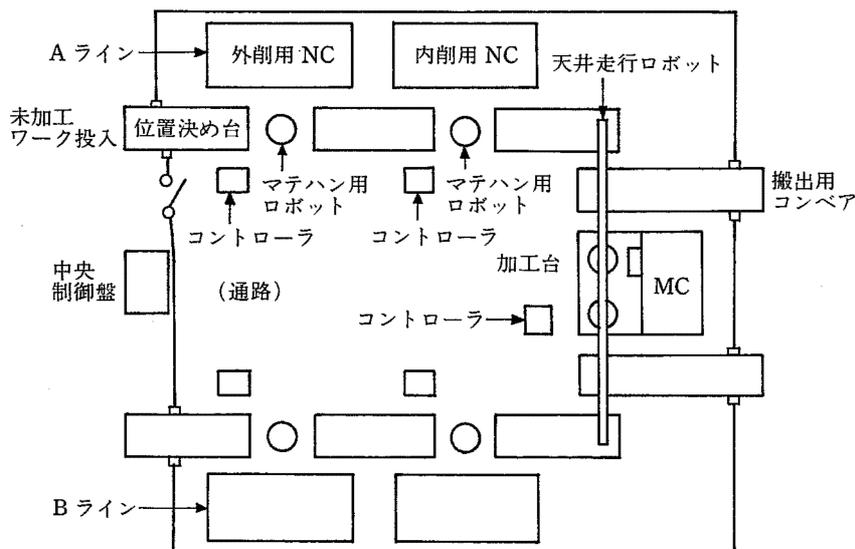


Fig. 2.8-1 An Example of Robot-accident
ロボット災害事例

従って、確認すべき安全の状態とはどのような状態であるのかを追及し、把握することから開始しなければならない。更に、障害の発生に対して著しく安全側に非対称性をとることにより、安全な状態を確保して、はじめて安全制御の基本に適った対策といえることができる。

2.8.3 オートローダにおける安全な状態

Fig. 2.8-1 の事例は非定常作業中の事故であったが、作業者がオートローダの可動範囲に介在して作業を行うことは一般に珍しいことではない。柵などのように強制的に安全領域を確保できない場合も考慮して、安全な状態を検討すると次の2つが考えられる。

- a) 人間が挟圧部（アクチュエータと治具間）の近傍にいない状態
- b) 人間に障害を与える力（挟圧力）が許容力を越えない状態

安全制御の基本に基づいて、以上の安全の状態が確認された場合に、アクチュエータの運転に許可が与えられる。

a) の状態の確認はリアルタイムに行うものであり、柵等に設けた扉スイッチや光線式センサ等の信号によるが、これらの検出器は、すでに詳しく論じたように当然「安全確認型」であり、一貫してフェールセーフな構成が採られていなければならない（安全プラグ、シールドビームセンサ等も同様である）。このような安全化手段をインターロックという。これに対して、b) の状態はシステム設計の際に確保されるべきもので、本事例のように、万一人間が挟圧部に挟まれた場合でも、自力で脱出可能となる。b) の状態の確保はまさしく本事例の解答を導くものであり、システムを本質的に安全化する手段を与えるものといえる。

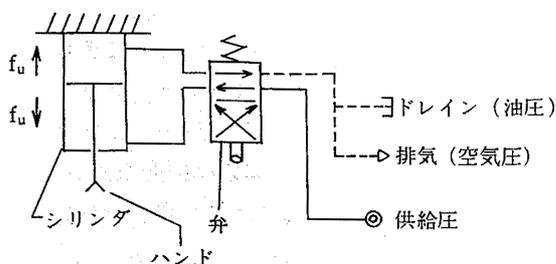


Fig. 2.8-2 Conventional operation method of Auto-loading machine
従来のオートローダ用アクチュエータ

2.8.4 従来のアクチュエータ

オートローダにおいては、ワークのロード・アンロードは空気圧シリンダが使用されている。これは、比較的重量物の搬送が多いことと、正確な位置決めが必要ないからであり、制御方式も Fig. 2.8-2 のような4方弁による流体の流れの切替えにより上下（往復）運動を行う方式が一般に採られている。すなわち、ワークを持ち上げるときは、ロッド側（ピストンロッドの出ている側）に流体を送り込み、同時にヘッド側（ピストンロッドのない側）から流体を放出することになり、下げるときは逆の流れとなる。

このような構成を採る場合、ワーク重量及び目標搬送速度に対して、シリンダへの供給圧力を選定してゆくことになる。この場合、持ち上げる方向に対して設計仕様を満足するように選定すれば下げる方向も同様にその仕様を満たす。

シリンダ推力は、理論的には、

$$\text{上方向力} : f_u = P_s (A - A_d)$$

$$\text{下方向力} : f_d = P_s A$$

となる。ただし、 P_s ：供給圧力、 A ：ピストンヘッド断面積、 A_d ：ピストンロッド断面積とし、摩擦抵抗、ピストン重量は考慮していない。

いま、上方向力 f_u を設計仕様を満足するような値に選定したとすると、下方向力 f_d が f_u より $P_s A_d$ 分大きくなることになる。本来アクチュエータが仕事を行う方向は上方向であり、下方向はワーク重量が f_d に加算されることを考慮すれば小さな力で十分なことが分かる。しかも下方向は挟圧側の危険な力であるから、前述した b) の安全な状態を確保するためには、下方向力はかなり抑えなければならない。ところが、従来の方法では下方向を抑えると、そのまま上方向力も抑えられてしまうため作業能力は著しく低下することになる。この意味で、従来の方式によるアクチュエータは対称アクチュエータといえることができる。

2.8.5 非対称アクチュエータの原理と構造

従来の方式において、作業能力を維持したまま、下方向力を小さくするためには、力（圧力）を検出して流体の流れを抑える方法や、減圧弁、圧力調整弁をロッド側に設ける方法なども考えられるが、いずれも機

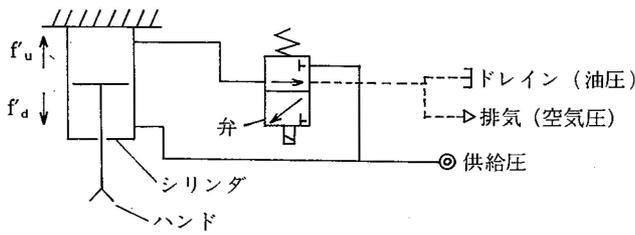


Fig. 2.8-3 Construction of asymmetrical actuator
非対称アクチュエータによる構成

能的に安全な状態を確保しようとするものであり、当然それらのシステム自体が安全確認型を踏襲できるかについての安全性の検討が必要となる。また、簡単なON/OFF弁の代替とするにはコストが高くなり、現実的ではない。

そこで、簡単な3方弁を用いることにより、本質的に安全化を図ったものがFig. 2.8-3に示すシステムである。Fig. 2.8-2との要素の相違は弁だけであるが、ロッド側に常に供給圧力を加えておき、ヘッド側への流路の方向だけ切替えるわけである。つまり、上方向動作は従来の方式と同様であるが、下方向動作の場合、弁を切替えるとシリンダのヘッド側ロッド側共に供給圧力 P_s に等しくなり、結局ピストンロッドの断面に掛かる力だけ下方向に働くことになる。

すなわち、シリンダ推力は、

$$\text{上方向力} : f_u' = P_s(A - A_d)$$

$$\text{下方向力} : f_d' = P_s A_d$$

となり、従来の方式に比べて下方向は、 $f_d'/f_d = A_d/A$ だ

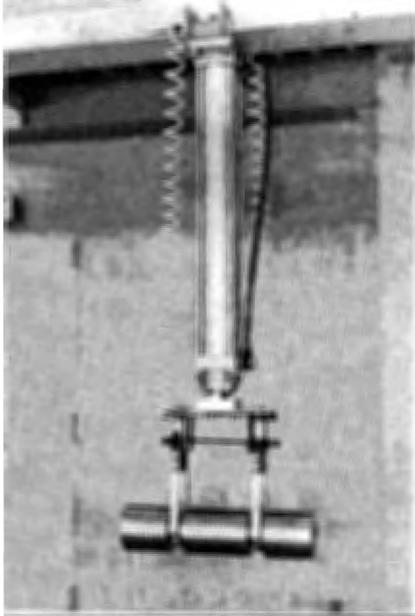


Photo 2.8-1 The asymmetrical actuator
非対称アクチュエータ外観

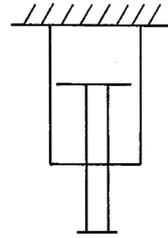


Fig. 2.8-4 The double acting pneumatic cylinder with two rods
2つのロッドを持つ複動型空気圧シリンダの構造

Table 2.8-1 Specification of the system
システム仕様

エレメント	仕様
○電磁弁	バネ復帰型3方弁 オリフィス径 $\phi 10.5$ mm
○スピードコントローラ	オリフィス径 $\phi 11$ mm
○空気圧シリンダ	ピストンヘッド径 $\phi 80$ mm ピストンロッド径 $\phi 20$ mm ストローク 500 mm
○供給圧力	5 kgf/cm ² , abs.

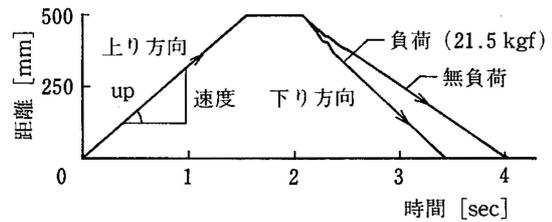


Fig. 2.8-5 Motion pattern
動作特性

け抑えることができる。このように上方向と下方向の力に非対称性をもたせているのでこのシステムを非対称アクチュエータと呼んでいる。

2.8.6 実機モデル

Fig. 2.8-3に基づき、実際に試作したモデルはPhoto 2.8-1に示すようなシステムで、回転防止のためのピストンロッドを2本持つ空気圧シリンダ (Fig. 2.8-4) を使い、ロッド先端には、2本の小型空気圧シリンダによるハンドを設けてある。システムの詳細な仕様はTable 2.8-1に掲げる。

このシステムのシリンダ推力を従来の方式による場合と比較すると、以下ようになる。

- a. 非対称アクチュエータ

上方向力： $f_u' = 176 \text{ kgf}$

下方向力： $f_d' = 25 \text{ kgf}$

b. 従来のアクチュエータ

上方向力： $f_u = 176 \text{ kgf}$

下方向力： $f_d = 201 \text{ kgf}$

このように下方向は従来の方式と比べて約 1/8 になり、この程度の力では可搬能力という点ではなんら問題とはならないが、搬送速度に関しては影響を与える程度を評価しておく必要がある。

そこで、上下方向の最大速度を測定したところ、Fig. 2.8-5 のようになった。無負荷のときの下降速度は、上昇速度の 1.25 倍の程度であり、また、負荷をつけることにより速度は大きくなる傾向があることから、実際の使用上のデメリットはほとんどないと考えられる。速度を低くするには、シリンダの空気供給口の手前にスピードコントローラ（可変絞りを）を挿入することにより、上下方向独立に調整することができる。

2.8.7 安全制御の基本に基づく 安全性の評価

非対称アクチュエータ単体では、前述の b) の挟圧力が許容力を越えない状態を確保したことになるが、弁も含めたシステムを考えた場合、異常に対して全て安全側に機能することを確認しなければならない。

そこで、まず安全側の定義であるが、オートローダの一般的な使用を考慮して、アクチュエータ間の挟圧部をつくらない方向を安全側とする。すなわち、異常に対して、ピストン動作方向に上昇側、速度は低下側、シリンダ推力については下降時に低下側を安全側と定義する。ただし、異常の発生は、上昇・下降、拡大・縮退、前方・後方、ON・OFF に対して両側に等しく起こりえるものとする。

以下の異常に対する機能を評価する。

(1) ホース亀裂・コネクタ破損等、空気配管系の異常

○ ヘッド側配管の欠損・・・ピストン上昇

○ ロッド側配管の欠損・・・ピストン自重により徐々に下降

(2) 弁のコイル断線、停電等電源系の異常

Fig.2.8-3 のようなバネ復帰型（通常、ヘッド側の流体を排除側）の弁を用いることにより、ピストン上昇。

これらの安全側の機能は全て設計の時点に具備する

ことができるものであり、使用段階で調整を伴って確保するものではない。従って、システムの構成要素の部品が必ず伴う経時的劣化に対しても必ず安全側に機能するものである。ただし、弁の復帰用バネの欠損に対しては、非対称アクチュエータの下方向力の設計に委ねることになるが、この場合は、弁の故障に対して、下方向力が許容力以上に決して出力されないことで安全が確保される。

2.8.8 速度の本質的フィードバック

次に、異常に対して速度が減少側にあるかをチェック

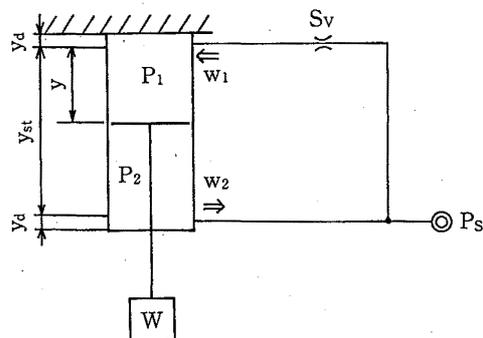


Fig. 2.8-6 Model for analysis of the actuator
非対称アクチュエータの解析モデル

Table 2.8-2 Definition of symbols
記号の意味

記号	意味
A	ピストンヘッド断面積
A_d	ピストンロッド断面積
B	粘性摩擦係数
f_{ds}	動摩擦力
f_s	静摩擦力
P_1	ピストンヘッド側圧力 (abs.)
P_2	ピストンロッド側圧力 (abs.)
P_a	大気圧 (abs.)
P_s	供給圧力 (abs.)
R	ガス定数
s	ラプラス演算子
S_v	弁の有効断面積
T	室温
w_1	ヘッド側流入重量流量
w_2	ロッド側流出重量流量
y	ピストンヘッド変位
y_d	死容積となるヘッド変位
y_{st}	ストローク
κ	断熱指数
W	負荷重量

クすることにする。

Fig. 2.8-6 のようなモデルを考える。ただし、記号は Table 2.8-2 にまとめる。また、流量は弁の有効断面積 S_v によって抑えられるものとし、ロッド側から排出される流量 w_2 はすべてヘッド側に流れ込むものとする。

運動方程式：

$$(W/g)d^2y/dt^2 + Bdy/dt = (P_1 - P_a)A - (P_2 - P_a)(A - A_d) - f_{ds} + W \quad \dots(1)$$

弁の絞り部を流れる重量流量：

$$w_1 = S_v P_2 \sqrt{2g/RT} \sqrt{\kappa / (\kappa - 1) (f(Z)^{2/\kappa} - f(Z)^{(\kappa+1)/\kappa})} \quad \dots(2)$$

ただし、 $Z = P_1/P_2$ であり、

ここに、 $f(Z) = Z : 0.528 \leq Z$

$$f(Z) = (2/(\kappa+1))^{\kappa/(\kappa-1)} : 0 \leq Z < 0.528$$

シリンダにおけるエネルギー平衡より、

$$w_1 = 1/RT \cdot (P_1 A dy/dt + A(y_d + y)/\kappa \cdot dP_1/dt) \quad \dots(3)$$

$$w_2 = 1/RT \cdot (P_2 (A - A_d) dy/dt + (A - A_d)(y_{st} + y_d - y)/\kappa \cdot dP_2/dt) \quad \dots(4)$$

ただし、初期条件 $t=0$ のとき、 $y=0$ 、 $P_{10}=P_a$ 、 $P_{20}=P_s$ である。

始動条件：

$$(P_1 - P_a)A + W > (P_2 - P_a)(A - A_d) + f_s \quad \dots(5)$$

いま、供給圧力 P_s 側の定圧能力が十分大きいものとし、ピストン動作に伴う P_2 の圧力上昇（背圧）を無視して、 $P_2 = P_s$ （一定）とし、 w_2 は供給圧力 P_s 側で吸収されるとすると、式(2)は、

$$w_1 = S_v P_s \sqrt{2g/RT} \sqrt{\kappa / (\kappa - 1) \cdot (f(Z)^{2/\kappa} - f(Z)^{(\kappa+1)/\kappa})} \quad \dots(6)$$

ただし、 $Z = P_1/P_2$ となる。従って、 $f(Z) = Z$ だとすると

w_1 は P_2 に無関係となる。

以上により、始動後の平衡状態からの微小区間において変数分離して線形化すると、式(3)と(6)は、

$$C_s P_s - C_p P_1 = \tau P_1 s + \rho Y s \quad \dots(7)$$

とおける。ここに、 C_s, C_p, τ は流量の圧力変換係数、 ρ は流量の変位変換係数である。

また、式(1)により、

$$W/g \cdot Y s^2 + B T s = (P_1 - P_a)A - (P_s - P_a)(A - A_d) - f_{ds} + W \quad \dots(8)$$

式(7)、(8)をブロック線図にまとめると Fig. 2.8-7 のようになる。これより、速度 dy/dt の負のフィードバックが入っており、スティックなどによる原因で急加速をうけた場合でも P_1 が減少して減速することがわかる。すなわち、Fig. 2.8-5 でも確認できるように下降速度を一定に保とうとするわけであり、ワークの搬送も安定した状態で行うことができる。

一般に、サーボ系はフィードバック信号のミスによって発散する。モータの回転制御系にみられる速度フィードバックも回転数を検出するセンサ（タコジェネ、エンコーダ等）を用いたり、モータの電流を検出する）が必要であるが、これらのミスは安全側・危険側のいずれの現象を表わすかは常に明確ではない。これまでに機能的なフィードバック系におけるフェールセーフが達成された例は殆どないといってもよい。しかし、このシステムのように物理系として本質的に速度のフィードバックが備わっていれば、これを故意に取り除くことすら不可能であり、従って、設計の段階で本質的な安全が確保されたと見ることができる。この本質的な速度フィードバックは流体駆動特有のものであり、複雑な機能を必要としないため、オートロードなどの簡単なシステムには最適な駆動源といえる。

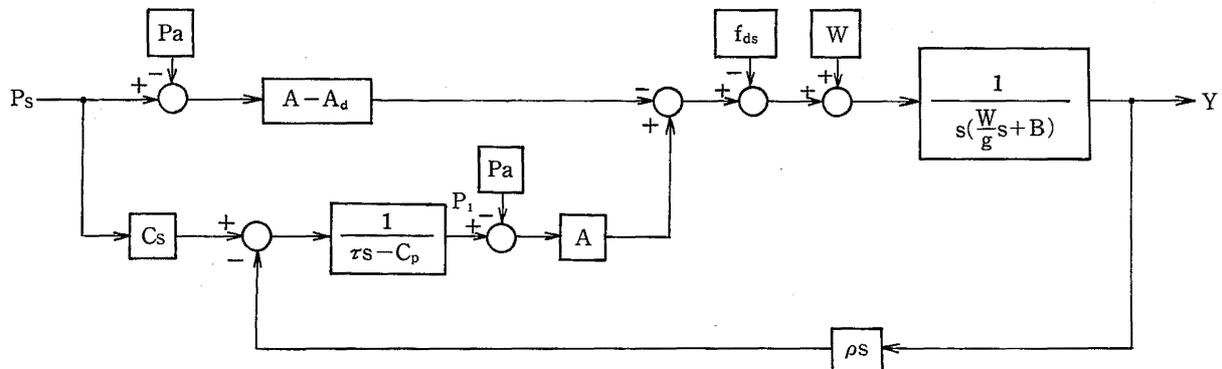


Fig. 2.8-7 Block diagram in case of downwards motion
非対称アクチュエータの下降動作時におけるブロック線図

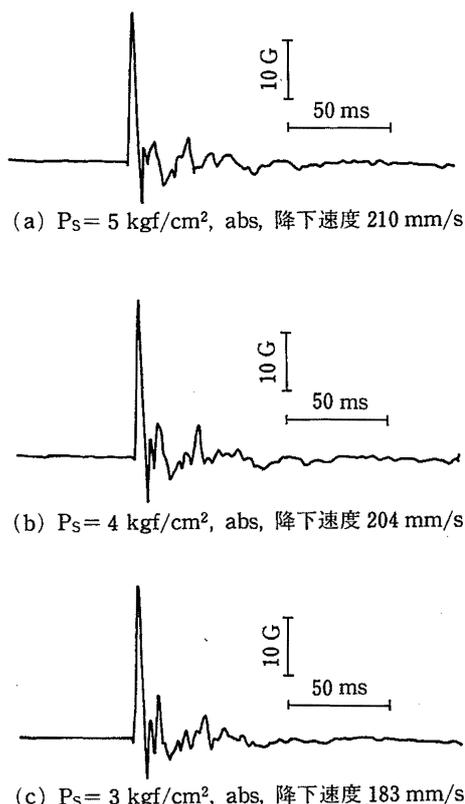


Fig. 2.8-8 Shock-acceleration in the time of maximum downwards motion
最大降下速度における衝撃力

2.8.9 挟圧力評価

前述したように、この非対称アクチュエータの下方力 F_d は、人間が十分対抗できるような値 (25 kgf) としたが、これは、青年男子が両腕で支えることができる力 (約 60 kgf) から類推して安全な力とみてよい。この値は当然、作業者の年齢、性別、負荷の重量や形状を考慮したものでなければならない。

ところで万一、作業者が挟圧部で挟まれた場合、下方向力の検討もさることながら、搬送速度も衝撃力に係わるため、この危険性を考慮しておかなければならない。

いま、動作中のピストンの運動エネルギーのみ考えるとする。重量 W の負荷が速度 v で動いているとすると、運動エネルギー E_v は、

$$E_v = Wv^2/2g$$

となる。人間が挟撃された場合、このエネルギーを吸収あるいは逃す手段を講じなければならない。頭部への挟撃については安全帽である程度吸収できるが許容限界内であることを確認しておく必要がある。

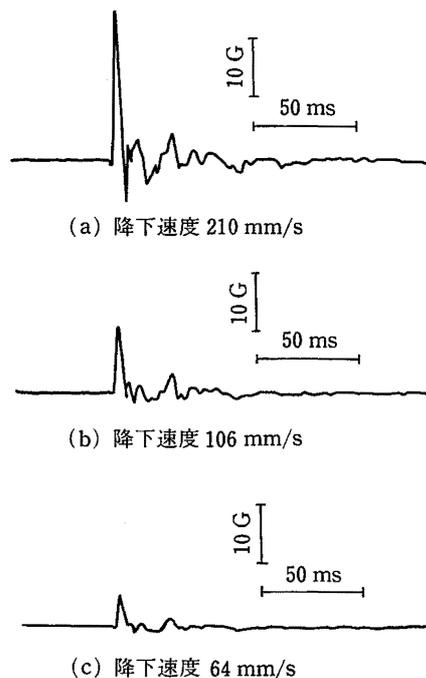


Fig. 2.8-9 Throttle regulation effective to shock-acceleration
絞り調節による衝撃力の変化 ($P_s=5 \text{ kgf/cm}^2$, abs)

そこで、ピストンロッド先端が衝突する際にかかる衝撃度を測定した、衝撃物は、衝撃が吸収されない最悪の場合を想定して金属のブロックとし、ストロークエンド手前約 50 mm の位置で衝突させた。Fig.2.8-8 は供給圧力 P_s を変えた場合の衝撃の度合いを調べたものであるが、 P_s によらず同様な波形がえられた。これは、最大下降速度があまり変わっていないためであり、供給圧力の 1 kgf/cm^2 の差に対して 10 % 程度の差しか生じていない。同図(a)のピーク値は、25.1 G であり、規則上問題はないものと言える。また、Fig.2.8-9 は、絞りを挿入して速度を下げた場合、供給圧力の変動よりも絞りによる速度調節の方が衝撃力の減少には有効であることがわかる。つまり、供給圧力は、力の作業能力と挟圧力の検討より決定すればよいことになる。

以上の考察は、メンテナンス等の非定常作業を想定したものであり、負荷重量を考察していない。状況によっては、負荷を含めた検討を行うべきである。

2.8.10 結論

このシステム構成は、市販のシリンダと弁を使用し、配管の接続方法を変更しただけで達成できるものであ

り、設計段階で全ての「安全確認」を行うことができる。これが機能的にはなく、本質的になされていることは、まさに安全制御の基本に適ったものである。ただし、どちらが「安全側」か、という見極めが重要であり、本システムのようなオートロードの場合でも、状況によってはピストン上昇時にロッド先端とロッドカバー間に手を挟まれないようにジャバラ等で覆う必

要性が検討されよう。

「安全制御の基本」にのっとり、本質的安全化を図ることは本実例に限らず、従来の他の技術も「安全」の観点から再度アプローチすれば、これまでの問題点が明白となる。そして、その解答を容易に見出すことができるものも少なくないのではなかろうか。

2.9 シャトル作業方式の改善と安全性評価

2.9.1 シャトル作業方式の安全問題

ここでシャトル作業方式と呼ばれるロボット・人間作業システムでは、例えば Fig. 2.9-1 に示すように産業用ロボットの可動範囲内にワークの置台を2つ用意し、一方で産業用ロボットにより溶接、組み立てなどの作業を行わせている間、人がもう一方でワークの取り付け・取りはずしなどを行い、双方の作業が終了すると作業位置を入れ替わりながら作業をすすめるという作業形態をとる。この作業形態では、定常作業においても産業用ロボットを人から確実に隔離することができないため、産業用ロボットの誤動作や人の不安全行動によって人と産業用ロボットが接触する危険性が生ずることになる。

本来、この作業形態は労働安全衛生規則の150の4(運転中の産業用ロボットの可動範囲内立ち入り禁止の

処置)に抵触するものである(可動範囲内に立ち入るのに電源をダウンさせなければならない)。しかし、何よりもこの方法が生産現場で定着している理由は、作業に必要な治具等の設置が簡単かつ安価であること、しかも産業用ロボットと人の待ち時間を最小にできるので、極めて効率的に作業を遂行できることである。実際に昭和57年7月に労働省が行った調査によれば、産業用ロボットによるアーク溶接作業の調査対象75事例のうち29事例(39%)はシャトル作業方式を採用していた。中には、自動運転中の産業用ロボットの可動範囲内に長時間にわたって人の体の一部がさらされる事例もある。

塗装、機械加工、スポット溶接などをロボットに行わせる場合も、この形態をとるものも多く、特に、中小企業においてはこの形態をとる割合が極めて高い。そのため現実に即した安全対策を早急に講ずる必要がある。

2.9.2 シャトル作業方式のモデルの構成

これまで一般にとられているシャトル作業方式では、人間のミスやロボットのコントローラの故障など、確率的に発生しうる障害に対して人間とマニピュレータと接触する危険性が高い。それは、安全の論理を基調とする表現を借りれば、この危険性に対して、これらの確率論的な障害の発生に対して安全側の結果へと導く方策がシステム構成の際に十分とられていない(危険側移行率を下げるための改善がなされていない)ということである。すなわち危険性は人間のミスやロボット故障に対して無防備なままシステムの構成がなされているからに他ならない。

このようなシャトル作業方式に対する安全対策の方

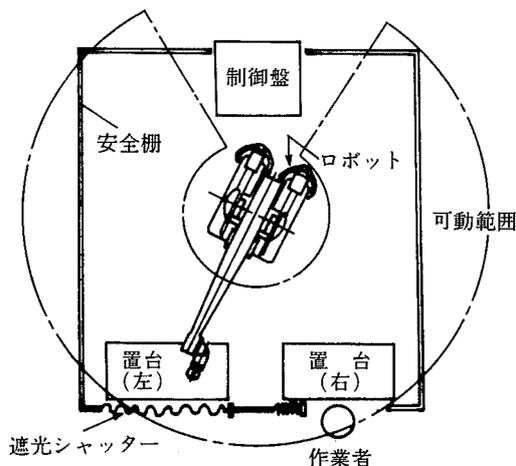


Fig. 2.9-1 An example of disposition of machine and tools in shuttle-work
シャトル作業方式例

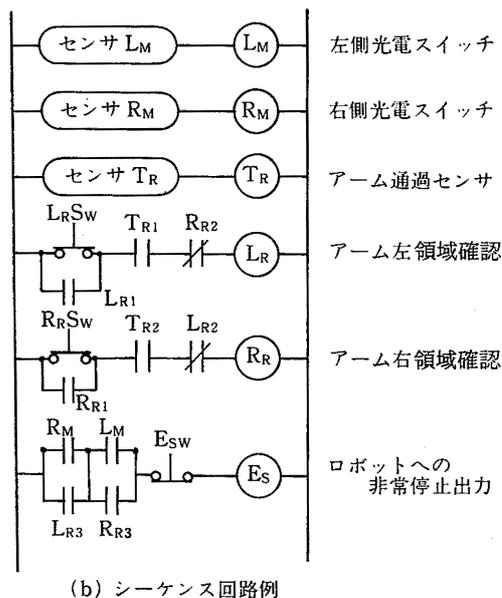
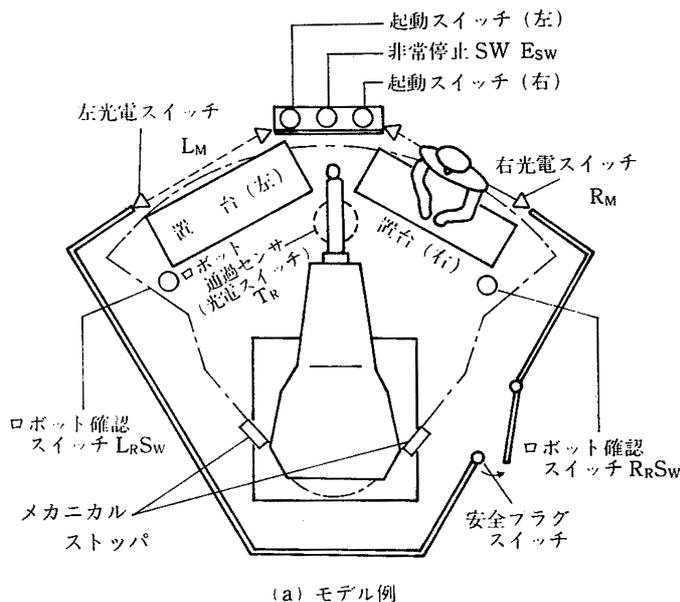


Fig. 2.9-2 System construction
システム構成

法はいくつか考えられるが、本研究では Fig. 2.9-2 に示すように実際に近い機械と治具の構成をまず行い、それに基づいて安全化への検討を行った。

Fig. 2.9-3 はロボットの運転の許可を与えられる条件が成立するための安全確認信号を検討するための信号流れ図である。検討の結果「安全の状態」とは——ロボットが作動中においては、作業域を2つ（左右）に分け、

○ロボットが左領域で動作中は同領域に人が存在しない。

○及びロボットが右領域で動作中は同領域に人が存在しない。——

ということになる。そして、一旦「安全の状態」とは何かが明確にされれば、作業のあらゆる時点において、あらゆるシステムの挙動に対してその「安全の状態」を確保するための決定論的アプローチを行う論理が「安全の論理」ということができる。

次に、実作業における必要機能を考慮して、ロボットと人間、及び安全装置の連動の状態を Fig. 2.9-4 に示す。そこでは、安全装置として、左側作業位置、右側作業位置にそれぞれ独立の透過型光線式安全装置、左右領域の境界に、ロボットアームの通過を検出するための透過型安全装置、左右それぞれのアーム領域確認用押しボタンを設けている。また、左右それぞれの領域におけるロボット動作を開始させるための2つの起動ボタンおよび非常停止ボタンを設置している。

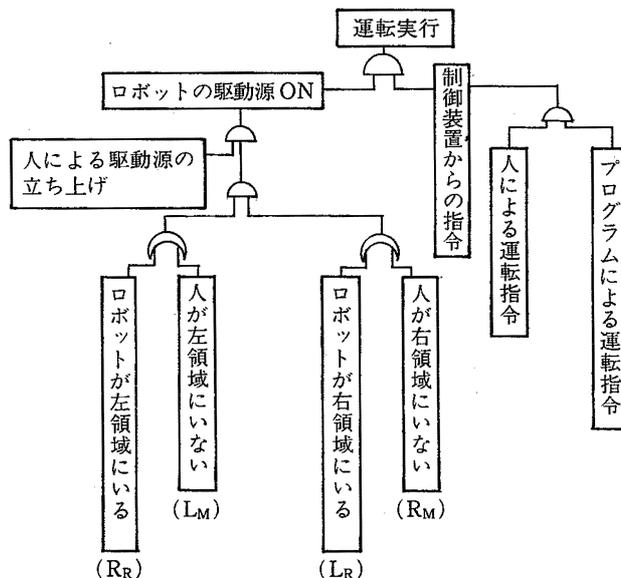


Fig. 2.9-3 Signal flow up to operation Command
運転実行に至る信号の流れ

本システムモデルの人間・ロボット・安全装置の関連動作の流れは次の順序となる。

(1) ロボットは原点にいて、人が外で右起動ボタンを押す（このとき、左右の光电スイッチは有効になっている）。

(2) ロボットが右領域にきてアーム右領域確認スイッチを押すと左側光电スイッチが無効になり、人は左領域で仕事をしロボットは右領域で仕事をする。

(3) 双方とも仕事が終わると、人は外で左起動ボタ

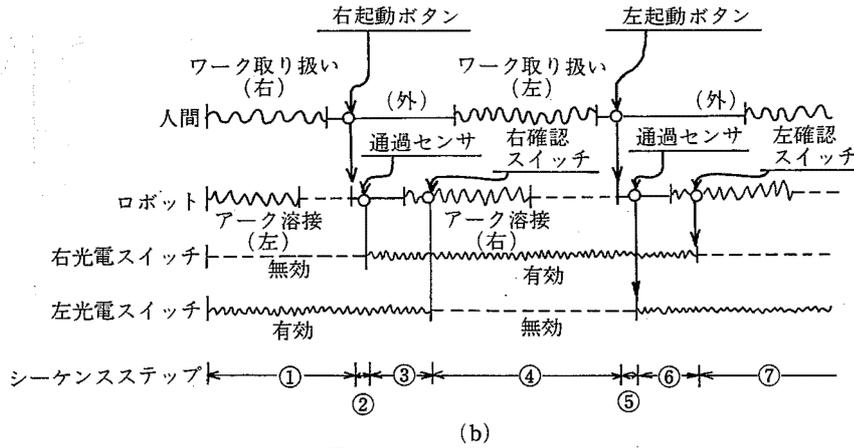


Fig. 2.9-4 Time-chart of the cooperative work
作業の連動のタイムチャート

ンを押す。ロボットが左領域に移動し、途中アーム通過センサを通ると左右光電スイッチが有効になる。

(4) ロボットが左領域にきてアーム左領域確認スイッチを押すと右側光電スイッチが無効になり、人は右領域で仕事をし、ロボットは左領域で仕事をする。

(5) 双方とも仕事を終わると人は外で右起動ボタンを押す。ロボットは右領域に移動し、途中アーム通過センサを通ると左右光電スイッチが有効になる。そして(2)に戻る。

2.9.3 作業シーケンスにおける異常(故障)評価

ここでは、非対称故障率、すなわち異常の発生に対して、それが安全側に誤る確率に対する危険側に誤る確率の比率によって評価するがこれは言い換えれば、いかに「安全制御の論理」を踏襲していることを評価していることになる。またこの場合、特に非対称故障率の最大値を具体的評価指標としている。ただし、光電スイッチ(光線安全装置)において、研究で開発してここで使用しているものは、非対称故障率 $A_d = 10^{-4} \sim 10^{-6}$ 、接点の非対称故障率 $A_p = 10^{-4}$ (リレーの接点は適切な電流値で使用されるような設計がなさねばならない)とし、システムのいずれかが 10^{-4} 以下の非対称故障率となるかをチェックしている。

次に、作業シーケンスを Fig. 2.9-4 に従って6つのステップに分け、それぞれについてシステム異常に対する挙動を見て、安全性の観点から考察してみよう。

○ステップ1 (ロボットは、左領域で作業、人は右領域で作業)

確認信号は、 $L_R : ON, R_R : OFF, R_M : OFF, L_M :$

ONとなり、この時は、ロボットの駆動源はONされる。この時にロボットが暴走して、 $L_R : OFF$ となったり、人が左領域に立入って、 $L_M : OFF$ となったりすると、直ちに駆動源がOFFとなる。非対称故障率による評価については Table 2.9-1 にまとめる。

Table 2.9-1 Asymmetrical error rate (sequence step 1) ステップ1 (ロボットは左領域で作業、人は右領域で作業)における非対称故障率

エラー事項	危険側/安全側	A_s
E_B	$P_c/P_o \rightarrow E_s : \times/O$	A_p
L_M, L_M センサ	$P_c/P_o \rightarrow E_s : \times/O$	$\text{Max}(A_p, A_d)$
$R_{R1}, R_{R2}, R_{R3}, R_{RSW}$	$P_c/P_o \rightarrow L_M$ センサ, R_M センサ: \times/O	A_p
$L_{R1}, L_{R2}, L_{R3}, L_{RSW}$		
T_R, T_R センサ	$P_c/P_o \rightarrow L_M$ センサ, R_M センサ: \times/O	$\text{Max}(A_p, A_d)$
MがLに侵入	L_M センサ, $E_s : \times/O$	$\text{Max}(A_p, A_d)$
R_o がRに誤動作	T_R センサ, $\rightarrow R_M$ センサ: \times/O	$\text{Max}(A_p, A_d)$
Mが R_{RSW} を押す	$\rightarrow R_M$ センサ: \times/O	$\text{Max}(A_p, A_d)$

E_B : 非常停止ボタン P_c : 溶着 P_o : 接点不良
 E_s : 非常停止 R : 右領域、 L : 左領域 M : 人
 R_o : ロボット \times : 無効 O : 有効
 A_s : 非対称誤り率 A_p : 接点の非対称故障率
 A_d : 光電スイッチの非対称故障率

○ステップ2 (双方とも作業を終えて、人は作業領域を交替するため起動スイッチ(右用)を押す)

確認信号は、 $L_R : ON, R_M : ON, R_R : OFF, L_M : ON$ となり、この時は、ロボットの駆動源はONされる。この時に人が左領域に立ち入って、 $L_M : OFF$ となると、直ちに駆動源がOFFとなる。非対称故障率による評価については Table 2.9-2 にまとめる。

○ステップ3 (ロボットは、左領域から右領域に移動中、人は右領域にも、左領域にも立ち入らない)

Table 2.9-2 Asymmetrical error rate (sequence step 2)
ステップ2 (双方とも作業を終えて人は作業域を交替するため起動スイッチを押す)における非対称故障率

エラー事項	危険側/安全側	A _s
E _R	P _c /P _o →E _s :×/○	A _p
L _M , L _M センサ	P _c /P _o →E _s :×/○	Max(A _p , A _d)
R _{R1} , R _{R2} , R _{R3} , R _{RSW} L _{R1} , L _{R2} , L _{R3} , L _{RSW}	P _c /P _o →L _M センサ, R _M センサ:×/○	A _p
T _R , T _R センサ	P _c /P _o →L _M センサ, R _M センサ:×/○	Max(A _p , A _d)
MがLに侵入	L _M センサ→E _s :×/○	Max(A _p , A _d)
MがR _{RSW} を押す	→L _M センサ:×/○	Max(A _p , A _d)

ロボットは右領域から、右領への過渡動作中で、R_R: OFF, L_R: OFFとなる。そこで、ひとが右領域にもいない時(R_M, L_M: ON)のみ駆動源がONになり、人がどちらかの領域に入ると駆動源はOFFとなる。非対称故障率による評価についてはTable 2.9-3にまとめる。

この後また、ステップ1にもどり、一連のシーケンスを繰り返す。

○ステップ4 (ロボットは右領域で作業, 人は左領域で作業)

Table 2.9-3 Asymmetrical error rate (sequence step 3)
ステップ3 (ロボットは左領域から右領域へ移動中, 人は右領域へも左領域にも立入らない)における非対称故障率

エラー事項	危険側/安全側	A _s
E _B	P _c /P _o →E _s :×/○	A _p
R _M , R _M センサ, L _M , L _M センサ	P _c /P _o →E _s :×/○	Max(A _p , A _d)
R _{R1} , R _{R2} , R _{R3} , R _{RSW} L _{R1} , L _{R2} , L _{R3} , L _{RSW}	P _c /P _o →L _M センサ, R _M センサ:×/○	A _p
T _R , T _R センサ	P _c /P _o →L _M センサ, R _M センサ:×/○	Max(A _p , A _d)
MがLに侵入	L _M センサ→E _s :×/○	Max(A _p , A _d)
MがRに侵入	R _M センサ→E _s :×/○	Max(A _p , A _d)

確認信号は、R_R: ON, L_M: OFF, L_R: OFF, R_M: ONとなり、このときはロボットの駆動源はONされる。この時にロボットが暴走してR_R: OFFとなったり、人が右領域に立ち入ってR_M: OFFとなったりすると、ただちに駆動源がOFFとなる。非対称故障率による評価についてはTable 2.9-4にまとめる。

○ステップ5 (双方とも作業を終了して, 人は作業領域を交替するため起動スイッチ(左用)を押す)

確認信号は、R_R: ON, L_M: ON, L_R: OFF, R_M:

Table 2.9-4 Asymmetrical error rate (sequence step 4)
ステップ4 (ロボットは右領域で作業, 人は左領域で作業)における非対称故障率

エラー事項	危険側/安全側	A _s
E _B	P _c /P _o →E _s :×/○	A _p
R _M , R _M センサ	P _c /P _o →E _s :×/○	Max(A _p , A _d)
R _{R1} , R _{R2} , R _{R3} , R _{RSW} L _{R1} , L _{R2} , L _{R3} , L _{RSW}	P _c /P _o →L _M センサ, R _M センサ:×/○	A _p
T _R , T _R センサ	P _c /P _o →L _M センサ, R _M センサ:×/○	Max(A _p , A _d)
MがRに侵入	R _M センサ, E _s :×/○	Max(A _p , A _d)
R _o がLに誤動作	T _R センサ→L _M センサ:×/○	Max(A _p , A _d)
MがL _{RSW} を押す	→L _M センサ:×/○	Max(A _p , A _d)

ONとなり、この時はロボットの駆動源はONされる。この時に人が右領域に立ち入って、R_M: OFFとなると、直ちに駆動源がOFFとなる。非対称故障率による評価についてはTable 2.9-5にまとめる。

○ステップ6 (ロボットは右領域でから、左領域に移動中, 人は右領域にも左領域にも立ち入らない)

Table 2.9-5 Asymmetrical error rate (sequence step 5)
ステップ5 (双方とも作業を終えて人は作業域を交替するために左起動スイッチを押す)における非対称故障率

エラー事項	危険側/安全側	A _s
E _B	P _c /P _o →E _s :×/○	A _p
R _M , R _M センサ	P _c /P _o →E _s :×/○	Max(A _p , A _d)
R _{R1} , R _{R2} , R _{R3} , R _{RSW} L _{R1} , L _{R2} , L _{R3} , L _{RSW}	P _c /P _o →L _M センサ, R _M センサ:×/○	A _p
T _R , T _R センサ	P _c /P _o →R _M センサ:×/○	Max(A _p , A _d)
MがRに侵入	L _M センサ→E _s :×/○	Max(A _p , A _d)
MがR _{RSW} を押す	→L _M センサ:×/○	Max(A _p , A _d)

ロボットは右領域から、左領域へ過渡的動作を行う。このときR_R: OFF, L_R: OFFとなる。そこで人は、右領域にも左領域にもいないとき(R_M, L_M: ON)のみ、駆動源がONとなり、ひとがどちらかの領域に入ると駆動源はOFFされる。非対称故障率による評価についてはTable 2.9-6にまとめる。

大企業においては、Fig.2.9-5に示すようなシュータを用いてシャトル作業の安全化を図っている場合がある。ここで、シュータというのは、作業シーケンスに従ってロボットの可動範囲に入ったり、出たりする置台を示すものであるが、これにより Fig.2.9-6に示すように、作業者はロボットの可動範囲の外で左右交互にワークの取付・取外しを行えばよいことになる。し

Table 2.9-6 Asymmetrical error rate (sequence step 6)
 ステップ6 (ロボットは右領域から左領域へ移動中, 人は右領域にも左領域にも立入らない)における非対称故障率

エラー事項	危険側/安全側	A_s
E_s	$P_c/P_o \rightarrow E_s : \times/O$	A_p
R_M, L_M, R_M センサ, L_M センサ	$P_c/P_o \rightarrow E_s : \times/O$	$\text{Max}(A_p, A_d)$
$R_{R1}, R_{R2}, R_{R3}, R_{RSW}$ $L_{R1}, L_{R2}, L_{R3}, L_{RSW}$	$P_c/P_o \rightarrow L_M$ センサ, R_M センサ: \times/O	A_p
T_R, T_L センサ	$P_c/P_o \rightarrow R_M$ センサ, L_M センサ: \times/O	$\text{Max}(A_p, A_d)$
MがLに侵入	L_M センサ $\rightarrow E_s : \times/O$	$\text{Max}(A_p, A_d)$
MがRに侵入	R_M センサ $\rightarrow E_s : \times/O$	$\text{Max}(A_p, A_d)$

かし、シュータは、大変高価であり、中小企業を含めた全てのこれまでのシャトル作業方式に、シュータの設置による対策を適用しようとしても限界がある、しかし、人間がロボットの危険領域に入る必要性を極力少なくできる方法をとるような配慮が常に必要である。

ここで示したシャトル作業方式モデルは、複数の作業ステーションをもつ一般のロボット使用法の最適なものを示したわけではない。あくまでもこれは、やむをえない理由からシャトル作業方式を取らざるをえない場合の安全の観点からの一つの答えにすぎないことを忘れてはならない。

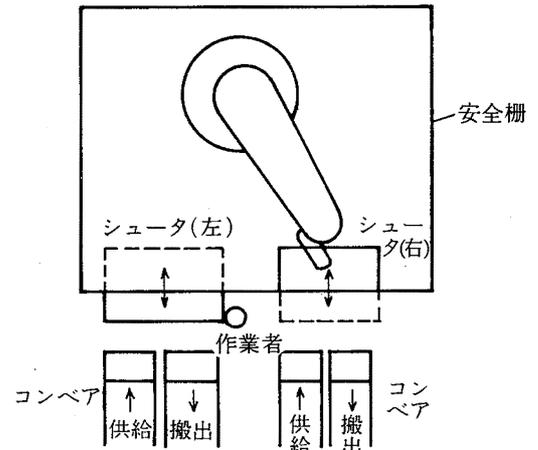


Fig. 2.9-5 Safety measure by means of Shooting machines
 シュータによる安全対策

人	左シュータのワークの取りつけ取りはずし	右シュータのワークの取りつけ取りはずし
左シュータ	柵外	柵内
右シュータ	柵内	柵外
ロボット	右領域で作業	左領域で作業

Fig. 2.9-6 Man-machine cooperative work in use of shooting machines
 シュータ使用における作業シーケンス

2.10 空気グラインダの回転数制御機構

2.10.1 はじめに

空気グラインダ等の空気式回転工具は、その回転数を所定の速度に保持することにより、その性能を発揮するものである。

例えば、空気グラインダの場合、装着されている研削砥石の回転速度が低下すれば、所定の研削性能を維持できず、研削性能は低下してしまう。

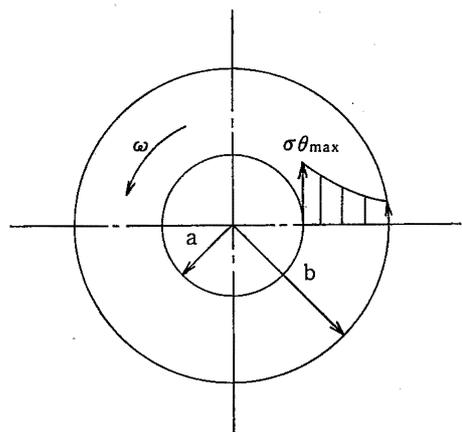
また逆に、回転速度が定格速度(無負荷回転数)より高くなると、装着されている研削砥石には速度の上昇率の2乗の割合で遠心応力が増大することになり、非常に危険な状態となる(Fig. 2.10-1 および式(1)参照)。

事実、研削砥石の破壊事故の内70%以上は、研削砥石の最高使用周速度を超えた回転速度のグラインダに研削砥石が装着されていたという状況である。

従って、グラインダの研削性能保持のためには勿論のこと、グラインダ作業の安全化のためにも回転数を所定の回転に制御保持する必要が極めて高いことである。

上記の必要性に対し、現状の空気式回転工具のうち、空気グラインダの場合には、研削盤等構造規格(昭和46年労働省告示第8号)で、調速機(ガバナ)を備えることを義務づけられているが、他の工具等では何も調速機構を持たないものが多い状況である。

ところで、空気グラインダに現在装備されている調速機は、「遠心力式」と「トルク式」との2つのタイプの調速機があるが、いずれのものも、研削作業によって生ずる負荷のいかにかわらず回転数を一定に保持するために自動的に空気量を調整する機能をもつものであるが、供給される圧搾空気の元圧が変化した場合においては、回転数を一定に保持する制御機能を持



$$\sigma_{\max} = \frac{3+\nu}{4} \frac{r}{g} \omega^2 \left(b^2 + \frac{1-\nu}{3+\nu} a^2 \right) \dots\dots\dots(1)$$

- a, b : 回転体の内, 外半径
- w : 回転体の回転角速度
- r : 回転体 (砥石) の単位体積重量
- ν : 回転体 (砥石) のポアソン比
- g : 重力の加速度

Fig. 2.10-1 Stress distribution of grinding wheel in turning
平形砥石の回転中における応力分布

つものではない。

そこで、本研究では回転数制御用空気流量調節機構の開発を目指しており、その妥当性を検討した。

2.10.2 理論

2.10.2.1 回転数制御用空気流量調節機構の作動原理

ある流量 (この流量設定については、後で述べる) までは、アイドリング状態とし、調整弁(c)では制御せず、空気供給源(d)からのエアの流入により空気グラインダ(a)の軸の回転を行う。その時の回転数を速度発電機(b)で検出して出力 (アナログ信号) を出して、調整弁(c)を開いて空気流量を増加させる。速度発電機(b)の設定出力 (空気グラインダ(a)の定格回転数に相当する出力) まで空気流量が増大して、空気グラインダ(a)は、定格回転数に到達する。負荷の変動により、空気グラインダ(a)の回転数が変化しようとした場合にも速度発電機(b)の設定出力により、調整弁(c)が制御され空気グラインダ(a)は、定格回転数を保持することができる。

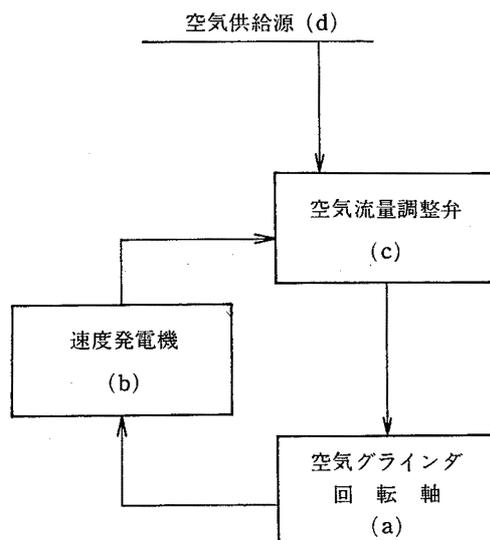


Fig. 2.10-2 The fundamentals of the revolution number control structure
回転数制御機構の原理

2.10.2.2 小型アナログ流量調整弁の作動原理と構造

小型アナログ流量調整弁の概略は Fig. 2.10-3 に示したとおりで、ボールポペットはカーボンボールを使用している。

まず、弁座とボールポペットにプランジャ型電磁石の鉄心の部分を押しつけ、圧力 P_s とバランスして弁の空気流量が零になるまでバネを圧縮する。この状態から電磁コイルに電流を流すと、プランジャの右方向に力が発生して、弁座とボールポペットの間に力のアンバランスによる隙間が生じて空気が流入する。この空気の流量は電磁コイルに供給される電流の大きさに応じて変化する。

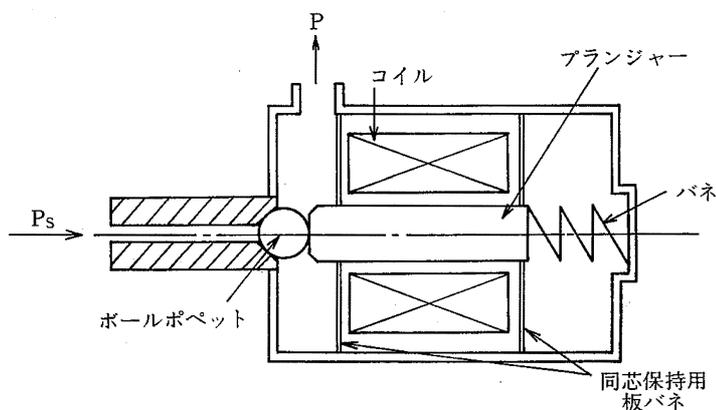


Fig. 2.10-3 A summary of analog-airflow-control valve
アナログ流量調整弁の概略

構造はいたって簡単であるが、電磁コイルの内側円筒とプランジャとの同芯をとるために同芯保持用板バネを用いている。これによりしゅう動部をなくしたためプランジャの受ける機械的摩擦は極めて小さいものとなった。

2.10.2.3 流量解析と運動方程式

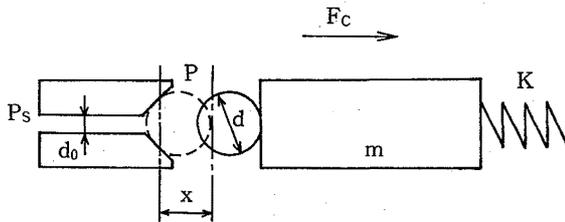


Fig. 2.10-4 The movement fundamentals of analog-airflow-control valve
アナログ流量調整弁の動作原理

空気など圧縮性流体が通路を流れるとき、通路の途中の断面積が絞られているとき、その絞り部の前後の圧力差がある限界を越えると、その絞り部を流れる流速は一定（音速）となることを利用して、流量を次式より求める。

制御オリフィスの流入側圧力を P_s 、流出側圧力を P とすると空気の重量流量 W は、

$$W = \mu \cdot A_s \cdot n (P_s / \sqrt{T_s}) \cdot f (P/P_s)$$

$P/P_s \leq 0.53$ の時、 $f=1$ より

$$W = \mu \cdot n \cdot A_s \cdot P_s / \sqrt{T_s} = \Phi \cdot A_s \cdot P_s$$

$$(\Phi = \mu \cdot n / \sqrt{T_s}) \dots\dots\dots(2)$$

$0.53 < P/P_s \leq 1$ の時、

$$f = 3.87 (P/P_s)^{1/\kappa} \cdot \sqrt{1 - (P/P_s)^{(\kappa-1)/\kappa}}$$

$$n = 0.346 \sqrt{\kappa/S}$$

ボールポペット、弁間のオリフィス断面積 A_s は次式により求まる。

$$A_s = (\pi/2 \sqrt{2}) (X^2 + \sqrt{2} d \cdot X)$$

$$\doteq (\pi/2) d \cdot X \dots\dots\dots(3)$$

弁座開口角を 90° とし、また $X \ll d$ とする。

電磁コイル電流に対する空気流量のブロック図 (Fig. 2.10-5) を参照し、運動方程式は次のように求まる。

$$m d^2 X / dt^2 = F_c + (P_s/P) \cdot A - \kappa \cdot (X_0 + X) \dots\dots\dots(4)$$

なお、ここではプランジャの粘性係数は無視している。

スプリングの初期設定は $P_s - P = \kappa X_0$ としている。

コイルの電磁力 F_c は次のように近似する。

$$F_c = \Psi \cdot i - \lambda (X_{Max} - X) \dots\dots\dots(5)$$

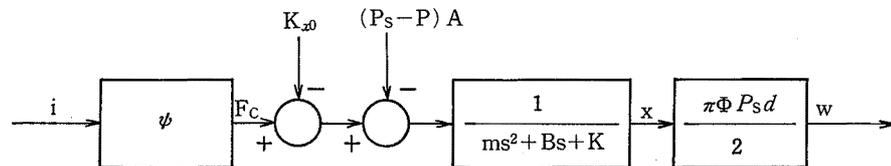


Fig. 2.10-5 Block chart of current on air flow
電流の空気流量に対するブロック図

不定数を $K = F_{cMax} / X_{Max}$ と決めれば、電流に対する力がバランスする位置が対応づけられる。

2.10.2.4 空気流量調整弁の設計

空気最大流量 W_{Max} が与えられた時のオリフィス断面積 A_{sMax} は次のように求める。

$$A_{sMax} = W_{Max} / (\Phi P_s) \dots\dots\dots(6)$$

A_{sMax} 時のプランジャの最大変位 X_{Max} はボールポペットの外径を d とすると、次のように求める。

$$X_{Max} = 2 \cdot A_{sMax} / (\pi d) \dots\dots\dots(7)$$

ここでは弁座とボールポペットの構造上の制約により $d > \sqrt{2} \cdot d_0$ 、 $(\pi/4) \cdot d_0^2 > A_{sMax}$ とすべきである。

電磁コイルは、電流の最大値 i_{Max} より設計する（詳細については参考文献に譲る）。

スプリングのバネ定数決定については、最大電流 i_{Max} によって発生するコイルの最大電磁力 F_{cMax} の位置に最大変位である X_{Max} がくるように設定する。この時のバ

2.10.3 実験結果及び考察

10.3.1 空気グライダのアイドル設定

まず、元圧変化の保障内である最大流量（元圧 7.2 kgf/cm^2 ）を出して、調整弁をプランジャの最大変位 X_{Max} まで開く、そして固定しほりを開いていき空気グライダの回転数が 14600 rpm をこえないように設定する。そして調整弁への出力を 0 にして調整弁を閉めた状態の空気グライダの回転数を、アイドル回転数とする。（なお、このアイドルによる出力は、調整弁を開き始めるのに十分なものでなくてはならな

い)。

これで、調整弁のフェールセーフ化はもとより、もしバルブのバネが折れて制御がきかなくなっても空気グライндаは最高回転数である 14600 rpm を超えることはない。

2.10.3.2 空気グライндаの特性実験

まず、現在一般に使用されている调速機 的特性を知るために、システムとして使用した空気グライнда(日本ニューマチック工業株式会社製 NHG-65 DS)の元圧の変化に対する回転数の関係を调速機付きの状態と调速機をはずした状態とで測定を行った。これにより現在の调速機機構のもつ重要性と我々の開発した機構との相違が明確になるはずである。Fig. 2.10-6 が実験結果であり、调速機付きの状態では、元圧 7 kgf/cm² の空気グライндаの回転数は 14400 rpm であるのに対し、调速機をはずした状態ではわずかな元圧 1 kgf/cm² の時すでに空気グライндаの回転数は 15000 rpm を超えていることがわかる。ガバナを安全装置として取り付けることは非常に重要な事ではあるが、元圧の変化に対しては、空気グライндаの回転数を一定に保つような制御機構はもたないといえる。

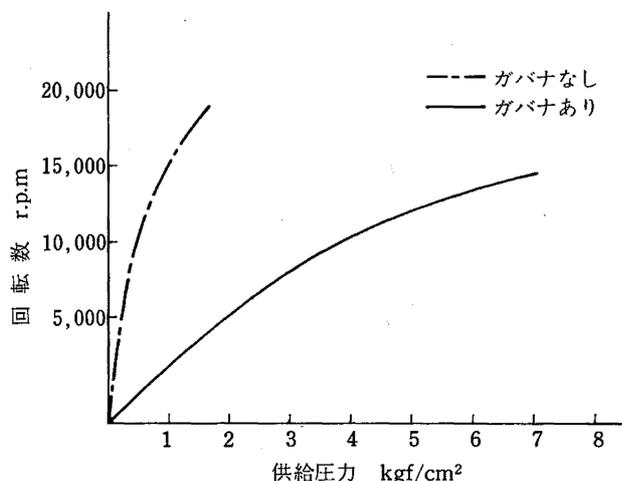


Fig. 2.10-6 Characteristic of air grinder
グライндаーの特性

2.10.3.3 回転数制御機構の調整弁への供給電圧とグライнда回転数との関係

グライнда回転数の制御機構をブロック線図に表わすと Fig. 2.10-7 になる。W₀ はしほりによる流量、km は流量から回転数への変換係数である。

フィードバック回路によるバルブの能力を知るため、

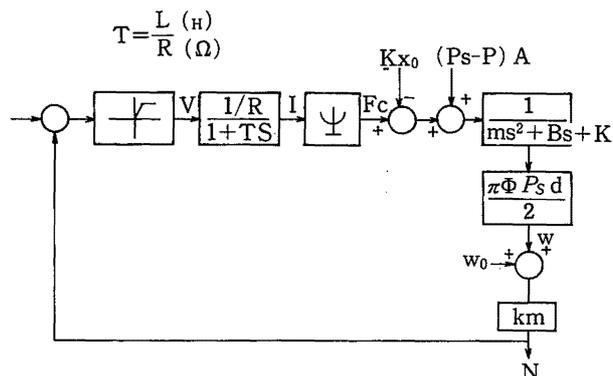


Fig. 2.10-7 Blockchart of control mechanism on revolution number (air grinder)
グライнда回転数の制御機構のブロック図

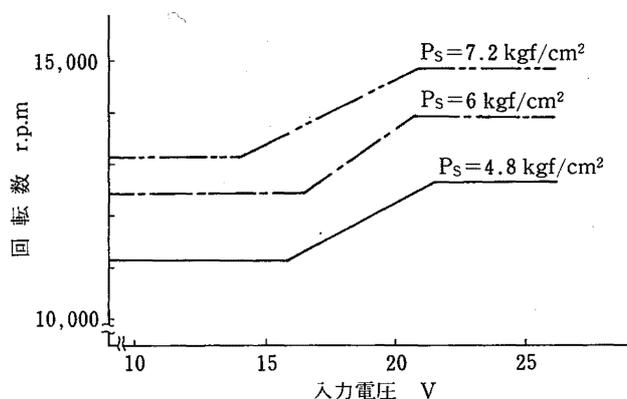


Fig. 2.10-8 Characteristic of flow-control-valve
流量調整弁の特性

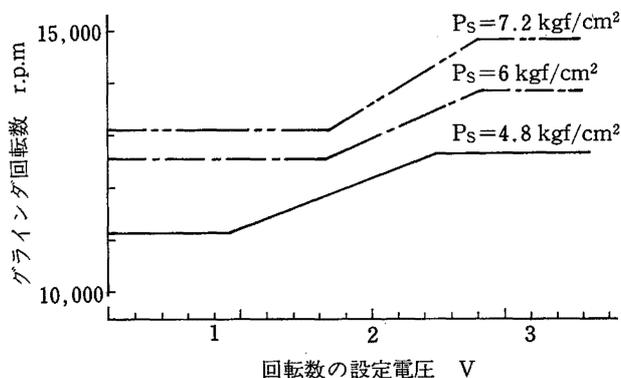


Fig. 2.10-9 Characteristic of flow-control-valves (feedback control)
流量調整弁のフィードバック特性

まず開ループにおいて定格圧力 6 kgf/cm² の ±20% の圧力をかけて、バルブに電圧を与えた時のグライндаの回転数を示したのが Fig. 2.10-8 である。±20% の空気圧力変動に対し、グライндаの回転数は約 17% 変動していることがわかる。これは実験に使用したガバナによる回転数変動 (約 17%) とほぼ等しい値である。

そこで今回開発したグラインダの回転数フィードバック回路による制御特性を示したのが Fig. 2.10-9 である。±20%の空気圧力変動に対し、回転数は約11%の変動におさえられていることがわかる。流量変換係数及び、しぼりによる流量は入力圧力に対してほぼ比例関係にあると考えると、制御系のゲインが高ければ±20%の圧力変動があっても回転数にはあまり影響しないことになる。

2.10.4 あとがき

無負荷状態の実験条件においては、制御範囲での回転数変動が17%から11%に改善されることが確認された。

今後の研究課題としては、実際の空気グラインダでの研削作業においても同じ制御保障がえられるのかどうかの検討、また、バルブ、速度発電機などのコンパ

Table 2.10-1 Characteristics of analog airflow control-valves
アナログ流量制御弁の仕様

W_{max} (m ³)	550 NI/min
$A_{S max}$ (cm ²)	0.088
X_{max} (cm)	0.088
d_0 (cm)	0.4
d (cm)	0.635
A (cm)	0.158
$F_{C max}$ (kgf)	1.32
K (kgf/cm)	13.7

Table 2.10-2 Means of symbols
記号の意味

A	: 弁座のしきり有効断面積
A_S	: ポペット, 弁間のオリフィス断面積
d	: ボールポペット外径
d_0	: 弁の穴径
F_C	: 電磁力
i	: 電流
K	: バネ定数
m	: プランジャ慣性
P_S	: 一次側圧力
P	: 二次側圧力
T_S	: 絶対温度
V	: 入力電圧
W	: 重量流量
X	: プランジャの変位
X_0	: バネの初期変位
K	: バネ定数
Ψ	: 電磁力ゲイン

クト化、制御する圧力変動の範囲の改大、各種空気グラインダによる異なる制御目標の回転数の設定などが残されているため、これからの研究の中で確認してていきたい。

参考文献

- 1) 八嶋清 “Q & A 空気圧技術の要点” 日刊工業新聞社, 1980
- 2) 石黒敏郎, 坪島茂彦, 宮川澄夫 “交直マグネットの設計と応用” オーム社, 1970