Research Reports of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-92, 1993
UDC 658.513.3:614.82

安全の論理に基づく制御の構成論理
—安全制御系における安全情報のエネルギ伝達—

杉本　旭*，池田博康*

Safety Control Theory Based on the Logic of Safety
— Energy Transmition of Safety Information —

by Noboru SUGIMOTO* and Hiroyasu IKEDA*

Abstract; Safety control system, which is defined as the machine operation controled according to safety confirmation information, is explained as an interlocking model that is so funcitoned that energy output from machine is permitted only while the information (safety information) reports safety. The information transmittion properties presented in this model are applied on all devices in the interlocking system, consistent from the sensor for producing safety information to devices for transmitting/outputing energy. Small energy level of signal signifying safety is normally produced in a pickup element in the sensor. Enormous power made by amplifying the energy of the safety signal is supplyed to the machine to conduct its powerful operation.

This paper discusses on the condition of energy transmittion process in which energy is produced in safety sensor as a signal indicating safety and is amplified in the interlocking system up to the sufficient level to do machine duty. Firstly, in this paper, clarified is the characteristics of information to be provided with the information processing means in the interlocking system. Secondly, a logical fail-safe model is proposed for clarifying the production condition of the safety information. Lastly, this fail-safe transmittion of information energy can be applied on not only electrically but mechanically processed safety information.

Keywords; Mechatoronics, Robotics, Safety system, Safety control, Safety control system, Interlocking, Fail-safe.

1. 緒　言

著者らは先に，危険を伴う作業が安全の条件に基づいて行われる機械的操作を安全制御[1]として定義し，この制御系の基本構成を安全を示す情報（安全情報）の許可に基づいてエネルギが出力されるインタロックモデルで示した[2]。そして，このモデルで示される情報の伝達特性は安全の情報を抽出するセンサシステムからこの情報が直接伝達されるエネルギ伝達系まで共通して適用できることを示した[3]。

通常安全を示す情報はセンサ入力として小さなエネルギで生成される。一方，この情報に基づいて実行される危険作業に大出力エネルギ発生のための増幅が不可欠となる。本論文では，安全の情報が抽出されて，現実に危険作業が実行されるまでのインタロックシステムにおけるエネルギ増幅過程の特性を論ずる。即ち，第2章で，まず，安全情報の生成からこの情報に基づいて出力エネルギが発生するまでの処理系の有すべき特性を示し，第3章で，外部に

*機械研究部 Mechanical Safety Research Division

エネルギ源を有する簡単な作業機械における安全情報の生成条件を論理式モデルで示す。そして第4章でこのモデルを利用して具体的フェールセーフ演算系の構成原理を，また第5章ではフェールセーフな情報の伝達が電気的，機械的に共通の処理形態で行われることを明らかにする。

2. 安全確認と出力エネルギの発生過程

2.1 安全確認過程

安全 (Safety) は危険 (The Hazard) の反対の概念として把握される。即ち，安全は，まず先に危険が認識され，これを予測して回避する過程で生じる概念であって，次の2つの原則に基づいて確認される。

i. 安全（無事故）と危険（事故）とは同一の場所で同時には発生しない。

ii. 危険（事故）は予測することができるが，この予測には誤りが存在し，この誤り（即ち，不安）を危険と見なすことによって安全を確保することができる。

上の原則 i は真の安全（無事故）と危険（事故）は否定の関係にあることを意味する。しかし，我々が予測する安全は，原則 i における危険（事故）の反対としての安全（無事故）でなく，少なくとも事故に至らないための安全である。従って安全を1，危険を0として，原則 i で与えられる安全と原則 ii で予測される安全を各々2値の論理変数 $Sc(t)$, $Se(t) \in \{1,0\}$ で表せば，2つの安全 $Sc(t)$, $Se(t)$ の間には，少なくとも真に危険 $(Sc(t)=0)$ であるとき誤って安全 $(Se(t)=1)$ が予測されることだけは許されない論理的関係として次式が成立しなければならない。

$$\forall t,\ Sc(t) \geqq Se(t) \tag{1}$$

2.2 安全確認に基づく出力エネルギの発生過程

危険を伴う作業で出力される力学的エネルギは安全であるとき発生し，危険であるときこのエネルギは出力されない。従って，安全状態における出力エネルギを u, 危険な状態におけるエネルギを u'とおけば次の不等式が成立する。

$$u > u' \tag{2}$$

式 (2) で示されるエネルギ u, u'の誤り特性を現状の作業機械や輸送機械で考えると，次の通りである。

Table 1　ユネイトな関係 $(Sc(t) \geqq U)$

$Sc(t)$	U
1	1
1	0
0	0

u：通常，列車や車やロボットの可動部のように出力状態 u が u'に誤ることが許される。しかし，上空の航空機や急停止を許されない列車や，ワークを落下することの許されないロボット可動部には出力状態 u'への誤りも許されない。従って原則として出力状態 u には誤りが許されない。

u': 出力状態 u'であるべきとき出力状態 u の誤りは許されないが，通常出力 u'が発生しない側は許される。

上述の出力エネルギを論理変数 Uで表し，エネルギ u のレベルを 1, u'のレベルを 0 とおくと，この出力 $U=1$ は安全確認に基づいて出力されるエネルギであって，この場合の安全確認は式 (1) における予測された安全 $Se(t)=1$ である。従って，安全確認から出力エネルギ Uの発生までこの安全確認信号を伝達して出力エネルギを発生する手段 Fが必要となる。ここでは，この手段 Fを情報伝達手段と呼ぶことにする。この手段 Fの機能を論理変数 $F(Se)$ で表し，$F(Se)=1$ を安全を示す情報が伝達されるとき，$F(Se)=0$ を安全でないことを示す情報が伝達されているときとすれば，安全確認に基づく出力エネルギ Uの発生は次式で示される。

$$Sc(t) \geqq F(Se) \geqq U \tag{3}$$

式 (3) は安全 $Sc(t)$ の予測とこれに基づく出力エネルギ Uの発生の間には機能 $F(Se)$ が存在することを意味し，$Sc(t) \geqq U$は，Table 1 で示すように，安全でない $(Sc(t)=0)$ のに危険作業実行のエネルギ $U=1$ が発生してはならないこと（ユネイト）を示す。

式 (3) において，情報伝達機能 $F(Se)$ には情報 $Sc(t)$ が伝達されないときが物理的に必ず存在する。例えば，安全を示す情報 $Sc(t)=1$ として物理的センサによって抽出されるエネルギは通常微小であって，一方危険を伴う出力エネルギ Uは大きい。したがって機械 $F(Se)$ は増幅機能を伴い，この増幅には

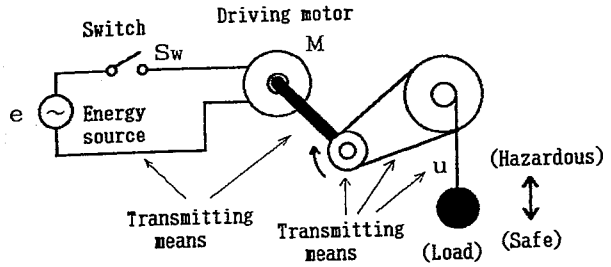


Fig. 1 Control model of load lifting machine
荷揚げ機械の制御モデル

後述するように別途電気的あるいは機械的外部エネルギを必要とし，もしこの外部エネルギが供給されないとき出力エネルギ Uは発生しない。即ち，情報伝達機能 $F(Se)$ には誤りが存在し，手段 $F(Se)$ の動作状態を論理変数 F^*で表し，正常なときを 1，故障時を 0 とおくと，式 (3) の論理式で示される機能 $F(Se)$ は次式で表されねばならない（以降，動作状態を表す論理変数に＊印を付し，正常状態を 1，故障状態を 0 とする)。

$$U = F(Se) \cdot F^* \tag{4}$$

式 (4) は機能 $F(Se)$ が正常である $(F^* = 1)$ とき $U = F(Se)$ の出力が発生し，故障時は $U = 0$ であることを意味する。ここに，式 (3) で示されるエネルギ伝達手段をフェールセーフなエネルギ伝達手段と呼ぶことにする。

式 (3) で示される情報伝達手段は安全を示す情報 $Sc(t)$ を抽出する手段と，抽出された情報を伝達する手段と，式 (4) に基づいて出力エネルギを生成する手段（出力エネルギ生成手段）の外に現実には，危険 $(Sc(t) = 0)$ 時，すでに出力されたエネルギ u $(U = 1)$ が慣性を持つために強制的にこれを遮断する手段（強制的遮断手段）を必要とする場合が存在する。出力エネルギ生成手段は，式 (4) に基づく出力エネルギ $U = 1$ が入力エネルギ遮断によって $U = 0$ となったとき，生成手段に蓄積されたエネルギが消費される，即ち，エントロピ増大側にしたがって熱消散される過程を持つ。一方，強制的遮断手段は上の過程（応答）では不十分な（間に合わない）ためにもつ機構例えばブレーキ機構である。本論文で対象とするエネルギ伝達手段は抽出される安全情報を伝達し，これを出力エネルギとして生成する手段であるとし，この出力エネルギ生成手段は危険時出力エネルギを強制的に遮断する手段を含む場合もあるものとする。そして，このエネルギ伝達手段は出力エネルギに $U = 0$ の誤りを含むものとする。

3. 安全確認形エネルギ伝達系の論理モデル

3.1 簡単な作業機械におけるエネルギ伝達の論理構成

危険を伴う操作が安全の条件に基づいて加えられる制御を安全制御と定義し，安全の条件に基づいて外部から供給されるエネルギによって伝達されるエネルギ伝達系について簡単な作業機械を用いて考察する。

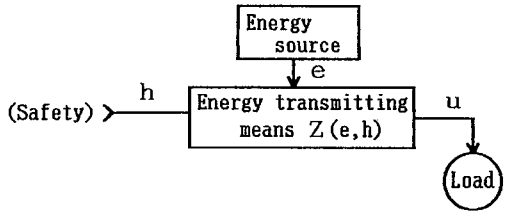
Fig. 1 はスイッチ Sw を投入すると電源からモータにエネルギ e が供給され，この回転出力がプーリに伝達されて荷が上昇する簡単な荷揚げ機械の制御系である。この操作は当然上昇した荷の下に人が来ないという安全の条件（エネルギ h で表す）に基づいてスイッチ Sw が投入されるべきであり，スイッチや電線，モータ，軸，ベルト，ワイヤ等で構成されるエネルギ伝達手段を $Z(e,h)$ で表せば，荷揚げ機械の出力エネルギ u の発生は Fig. 2(a) のブロック図で表すことができる。Fig. 2(a) のエネルギ伝達手段は構成する電線やモータ，軸，ベルト，ワイヤ等の要素は故障した（切断された）ときエネルギが伝達されない特性を持つ。従って，入出力エネルギ e, u を 2 値の論理変数 E, $U \in \{1,0\}$ で表し，エネルギが発生しているときを 1，発生してないときを 0 とし，エネルギ伝達手段 $Z(e,h)$ の動作状態を 2 値の論理変数（状態変数）$Z^* \in \{1,0\}$ で表すものとすれば，入力エネルギ e と出力エネルギ u の間には次の論理式が成立する。

$$U = Z^* \cdot E \tag{5}$$

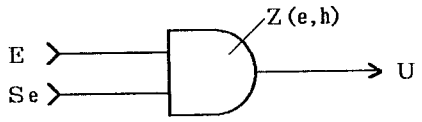
式 (5) は入力エネルギが供給されて $(E = 1)$，エネルギ伝達手段が正常であるとき $(Z^* = 1)$ のみ，出力エネルギが発生することを意味する。ここに，$E \in \{1,0\}$ はエネルギ供給源の故障状態に 1 対 1 で対応すると考えてよいから，エネルギ供給源の動作状態を E^*で表せば，式 (5) は次式で表せる。

$$U = Z^* \cdot E^* \tag{6}$$

式 (6) はエネルギ u の供給が供給源 (E^*) と伝達手段 (Z^*) に依存することを意味し，このエネルギ供給



(a) Energy-tansmitting system for load lifting machine of Fig. 1
荷揚げ制御（図１）のエネルギー伝達系



(b) Logic representation of energy transmission
安全制御系におけるエネルギ伝達

Fig. 2　Energy-transimission in safety control
安全制御系におけるエネルギ伝達

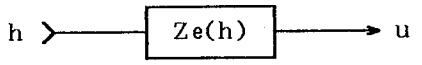


Fig. 3　Energy-tansmitting system with internal energy source
エネルギ供給源を装置内に持つエネルギ伝達系

は，安全の条件が満たされているときのみ行われて，安全でないとき出力エネルギ供給されない。従って，出力エネルギ u の発生する環境が安全な状況と危険な状況の 2 つに分けることができるものとし，この環境の状態を 2 値の論理変数 $Se \in \{1,0\}$ で表し，安全状態を 1，危険状態を 0 とおくと，式 (6) は次式で表現されねばならない。

$$U = Se \cdot E^* \cdot Z^* \tag{7}$$

式 (7) は安全な状況 $(Se = 1)$ であって，エネルギ伝達系と供給系が正常な状態 $(Z^* = 1,\ E^* = 1)$ であるときのみ，出力エネルギ $(U = 1)$ が生成されることを意味し，出力エネルギ u の発生が安全情報 Se を伴っていることを示す。

式 (7) は Fig. 2(a) のエネルギ伝達手段 $Z(e,h)$ が論理積 $Se \cdot E^*$ を行う論理積要素であることを示し，Fig. 2(b) で表されることを意味する（論理値として $E^* = E$ であるから，$Se \cdot E$ で表現している）。

いまここで，Fig. 2(a) のエネルギ伝達系は動力源を内部に持つものとし，Fig. 3 で示すように，安全の条件 h に対して出力 u を発生する機能 $(Ze(h))$ で表す）をもつ装置であるとする。この時，この装置の動作状態を $Ze^* \in \{1,0\}$ で表すと，この装置は動力源が故障したときと，このエネルギを伝達する系が故障したときに関して，例えば $Z^* = E^* \cdot Z_e^* = 0$ (装置は故障時自ら内部にもつエネルギを出力 u として発生しない）が保証されねばならない。論理的には次式で表されねばならない。

$$U = Se \cdot Ze^* \tag{8}$$

式 (8) は，一般的装置に拡大して考える場合，エネルギ供給の形態が明確でなく，極めて煩雑となる（特に装置に電子回路が含まれる場合，この電源の供給形態は極めて多様である）。また，安全条件を Se とエネルギ供給 E の論理的関係が明確に表現されていない。このため，ここではエネルギ供給源とエネルギ伝達手段 $Z(e,h)$ は別系として式 (7) を定めている。

3.2　外部にエネルギ供給源を持つエネルギ伝達系

式 (7) は Fig. 2(b) で示したように，外部からのエネルギ供給を論理変数 E(即ち情報）として扱っている。出力の発生をとくに次のように論理積で表すものとする。

$$U = Se \odot E \tag{9}$$

このとき，条件 Se と E の間には次の 2 つの論理的関係が成立しなければならない。

$$\text{条件 (1)}: Se \geqq U, \qquad E \geqq U \tag{10}$$

即ち，$Se = 0$, 又は $E = 0$ であるとき $U = 1$ を生じてはならない。

条件 (2)：式 (9) で示される論理積演算は，たとえこの演算を行う要素が故障状態にあっても，いずれか一方の論理値 1 の条件だけで出力 $U = 1$ を生じてはならない。この特性を持つ論理積をフェールセーフな論理積と呼ぶことにし，式 (9) で示すように論理積記号⊙で表現するものとする。

ここで⊙印で表される論理積 $A \odot B$ の意味を明確にしておく。

式 (4) で定義されるフェールセーフなエネルギ伝達は，エネルギ伝達手段 $F(Se)$ が故障した $(F^* = 0)$ とき $U = 0$ を生じる特性を求めている。論理積 $A \odot B$

で定義されるフェールセーフ演算は，この演算要素の動作状態を $F^* \in \{1,0\}$ で表し，演算出力 $F(A,B)$ を $F(A,B) = (A \odot B) \cdot F^*$ で表すとき，単に演算要素が故障 $(F^* = 0)$ したとき演算出力 $F(A,B) = 0$ を生じるだけでなく，さらに，故障があっても論理積 $A \cdot B$ が成立しないのに出力 $F(A,B) = 1$ を生じない（即ち，演算入力 A,B のいずれか一方だけで出力が発生しない）特性を持つことが要請されることを意味する。

上の条件 (1) の $Se \geqq U$ は Fig. 2(b) で安全情報 $Se = 0$ であるとき誤って Fig. 1 のスイッチ Sw を閉じてしまうことがないこと（ユネイト）を意味している。また，条件 (2) は「スイッチ Sw の電極間が溶着して，$Se = 0$ であるにもかかわらず，$E = 1$ 時 (エネルギ供給源が正常 $(E^* = 1)$ であれば) $U = 1$ が生じてしまう」か，あるいは，「$E = 0$ のと（エネルギ供給源が故障している $(E^* = 0)$）であるとき $Se = 0$ であるにもかかわらず人が別途エネルギ供給源を持ってきて $U = 1$ を生ぜしめる」という事象が起こってはならないということを意味している。

外部のエネルギを用いて安全情報に基づく制御が行われるエネルギ伝達系において，上の条件 (1)(2) が満たされるときフェールセーフであると呼び，上の条件 (1) または (2) のいずれかが満たされないときフェールセーフでないと呼ぶことにする。

Fig. 2(a) では，実際には安全の予測即ち安全情報の抽出は人によって行われる。この場合，人はたとえば目で小さなエネルギとして抽出される安全情報 Se をスイッチを開閉できるエネルギに増幅していることになる。本来，抽出される安全情報 Se と人の持つエネルギ発生源（これを E_m とおけば）との間には，式 (7) に対応するスイッチ開閉の出力エネルギが発生しなければならない。しかし，人は，誤りを含む。エネルギ発生源を含む人の機能を Fig. 3 に対応して $Z_m(h)$ とおき，人が正常であるときを 1，正常でないときを 0 とする論理変数 Z_m^* で表し，正常でないときの人の行動はスイッチを閉じる場合と閉じない場合が存在し，これをエネルギ供給あり (1)，なし (0) として論理変数 $E_m \in \{1,0\}$（人は 1 人とする）で表せば，人のスイッチ作業 H_m は次式で表される。

$$H_m = Se \cdot Z_m^* \vee E_m \cdot \overline{Z}_m^* \tag{11}$$

式 (11) は人が正常 $(Z_m^* = 1,\ \overline{Z}_m^* = 0)$ であるとき，$H_m = Se$ であり，人が正常でない $(Z_m^* = 0,\ \overline{Z}_m^* = 1)$ 時，$H_m = E$ であることを示す。

安全情報を外部エネルギを用いてフェールセーフに伝達する系は式 (7) (Fig. 2(b)) で表すことができ，これを外部エネルギ (E) をもつ増幅器として次式で表現するものとする。

$$U = E^*(Se) \tag{12}$$

式 (12) は外部エネルギ E をもつエネルギ伝達系によって安全情報 Se が伝達されることを意味する。

4. 外部エネルギを用いる安全情報の伝達（演算）系

4.1 フェールセーフ論理演算

ここで，n 個の安全情報 $Sei(i = 1,2,\cdots,n)$ を伝達する n 個の出力 $Ui = Ei^*(Sei)(i = 1,2,\cdots,n)$ を生ずる要素からなるエネルギ伝達系に関し，論理積および論理和による出力 U_0 を次式で定義する。

$$U_0 = E_1^*(Se_1) \odot E_2^*(Se_2) \odot \cdots \odot E_n^*(Se_n) \tag{13}$$

$$U_0 = E_1^*(Se_1) \Vee E_2^*(Se_2) \Vee \cdots \Vee E_n^*(Se_n) \tag{14}$$

式 (13) は式 (9) の条件 (1)(2) と同様に定義される n 個のフェールセーフな論理積を表し，式 (14) の記号 $\Vee$ は論理和を表し，この論理和は n 個の出力の内で，$Ui = Ei^*(Sei),\ i = 1,2,\cdots,n$ を出力する要素が故障するか又は $Sei = 0$（安全でない）によって $Ui = 0$ となっていない出力のみが伝達されることを意味する。

一般的エネルギ伝達系では複数のエネルギ供給源が利用される。たとえば各々異なる電源を有する複数の電磁リレーによって，複数の安全情報が伝達される場合である。この場合，電磁リレーはコイルを励磁する小さな電流を大きな接点電流に変換する増幅機能を含む。

式 (13) は，たとえば電磁リレーを使ったエネルギ伝達系 $(n = 4)$ として Fig. 4 で示すことができる。Fig. 4 で Se_1, Se_2 は外部より接点で与えられる安全情報，E_1, E_2, E_3 は外部より与えられるエネルギとしての電源，CR_1, CR_2, は電磁コイルと機械的接点で構成される電磁リレー，M はリレー接点による論理演算の結果 U で駆動されるモータである。Fig. 4

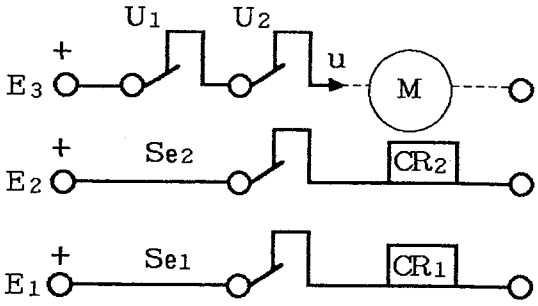


Fig. 4　Energy transmission by logic product
論理積によるエネルギ伝達

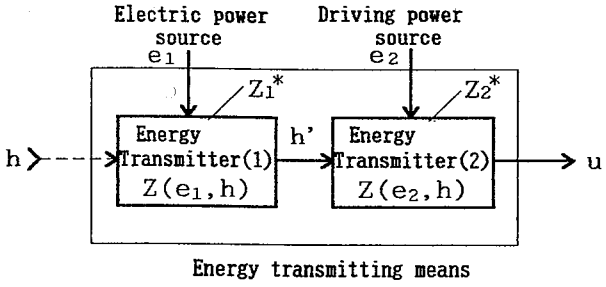


Fig. 5　Safety control system using sensor
センサを用いた安全制御系

は，接点入力 Se_1と Se_2に対するリレー出力 U_1, U_2 の論理積出力 $U_1 \cdot U_2$で，モータ Mの駆動エネルギ(電流) Uが出力される。ここに，Se_1, Se_2, E_1, E_2, E_3, U_1, U_2は 2 値の論理変数として扱えるものとする。電磁リレーは後述するようなフェールセーフな構成であるとし，また接点は溶着しないものとすると Fig. 4 は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} U &= \{(Se_1 \odot E_1 \cdot Z_1^*) \odot (Se_2 \odot E_2 \cdot Z_2^*)\} \\ &\quad \odot E_3 \cdot Z_3^* \quad \therefore U = U_0 \odot E_3 \end{aligned} \tag{15}$$

但し，

$$\begin{aligned} U_0 &= (Se_1 \odot E_1 \cdot Z_1^*) \odot (Se_2 \odot Z_2 \cdot Z_2^*) \\ &= E_1^*(Se_1) \odot E_2^*(Se_2) \end{aligned} \tag{16}$$

ここに Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*は電線コイルと機械的接点（即ちリレー）で構成されるエネルギ伝達手段の動作状態，Z_3^*は出力 Uの発生する電線の動作状態を表す 2 値の論理変数である。

いま，Fig. 4 で，電源 E_1, E_2が共通 $(E_1 = E_2)$ であるものとすると，式 (16) は次の式 (17) で表現できる。

$$\begin{aligned} U_0 &= (Se_1 \cdot Z_1^*) \odot (Se_1 \cdot Z_2^*) \odot E_1 \cdot Z_3^* \\ &= Se_1 \odot Se_2 \odot E_1 \cdot Z_1^* \cdot Z_2^* \cdot Z_3^* \\ &= Se_1 \odot Se_2 \odot E_1 \cdot Z_{12}^* \cdot Z_3^* \\ &= E_1^*(Se_1 \odot Se_2) \end{aligned} \tag{17}$$

ここに，$Z_{12}^* = Z_1 \cdot Z_2^*$で，リレー CR_1と CR_2で構成されるエネルギ伝達系全体の動作状態を示し，CR_1 系と CR_2系のいずれかが故障しても出力 U_0が生じないことを意味する。また，$(Se_1 \cdot Z_1^*) \odot (Se_2 \cdot Z_2^*) \odot E_1$ において，たとえば $(Se_1 \cdot Z_2^*) \odot E_1$は $Z_2^* = 1$, $Z_2^* = 0$が情報として生成され，$Z_2^* \odot E_1$としてフェールセーフな論理積演算でなければならないことを意味する。

式 (17) は共通のエネルギ源をもつ複数のエネルギ伝達系において，各々が式 (17) を満たすならば，入力 Sei に対するフェールセーフな論理演算を $f(Sei)$ とおき，この演算装置の動作状態を $f^* \in \{1,0\}$, 電源を Eとすれば，この時の出力は次式で与えられることになることを意味する。

$$\begin{aligned} U_0 &= f(Se_i) \odot E \cdot f^* \\ &= E^*(f(Se_i)) \end{aligned} \tag{18}$$

4.2　外部エネルギーを用いるフェールセーフ論理演算の具体例

次に，異なる供給源を用いて，安全情報 Se が順次伝達されるエネルギ伝達系について考察する。

Fig. 5 は安全を示す情報（エネルギ）h を物理的に抽出して増幅出力 h'を生成するセンサ（エネルギ伝達手段 $Z(e_1,h)$）と，この出力エネルギ h'が発生しているときのみ機械的出力エネルギ u を生成する手段 $Z(e_1,h')$）とから構成される一般的処理装置を示す。図で e_1はセンサ $Z(e_1,h)$ の電源，e_2はエネルギ伝達手段 $Z(e_2,h')$ の動力源である。h_1, e_1, e_2, u を前述と同様に論理変数 Se, E_1, E_2, $U \in \{1,0\}$ で表し，伝達手段 $Z(e_1,h)$, $Z(e_2,h')$ の動作状態を Z_1^*, $Z_2^* \in \{1,0\}$ で表せば，出力は次の論理式で定まる。

$$\begin{aligned} U &= (Se \odot E_1 \cdot Z_1^*) \odot E_2 \cdot Z_2^* \\ &= E_2^*\{E_1^*(Se)\} \end{aligned} \tag{19}$$

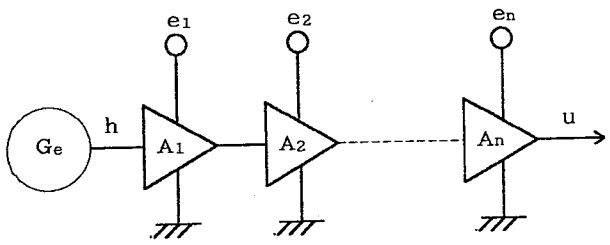


Fig. 6 Fail-safe AND circuit
フェールセーフ論理積回路

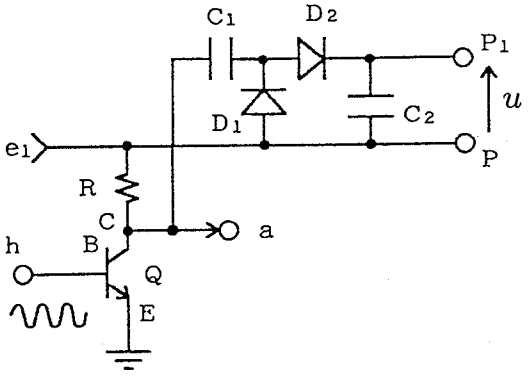


Fig. 7 Realization of $V = Se \odot E_1 \cdot Z^*$ in electronic circuit
電子回路における$V = Se \odot E_1 \cdot Z^*$の実現

即ち，Fig. 5 に示す安全装置は手段 $Z(e_1, h)$, $Z(e_2, h')$ のいずれが故障しても出力 $U = 1$ を生じてはならないばかりでなく，故障によって，$Se = 0$ であるにもかかわらず，外部エネルギ $E_1 = 1, E_2 = 1$ のいずれも $U = 1$ として生成されてはならないことを示している。

著者らは増幅器（光結合増幅器を含む）を従属接続し，この増幅器が正常であることを検査して出力を発生するフェールセーフな論理積回路を開発している（演算発信器と呼ばれる[4,5]）。Fig. 6 はこの構成原理を示し，$A_1, A_2, \cdots, A_n$は増幅器，Ge は増幅器 $A_1, A_2, \cdots, A_n$の動作状態 $A_1^*, A_2^*, \cdots, A_n^* \in \{1, 0\}$ を検査する検査信号発生器（交流信号発生器），$e_1, e_2, \cdots, e_n$は増幅器 $A_1, A_2, \cdots, A_n$の電源で，ここでは論理演算の入力信号である。即ち，入力信号 $e_1, e_2, \cdots, e_n$のすべてがあるときのみ出力 u が生成される。検査信号 h が出力 u として生成されるとき増幅器 $A_1, A_2, \cdots, A_n$は正常であることを意味し，増幅器のいずれか 1 つでも故障して出力エネルギ u を発生することがないので，この信号 h に対する出力 u の発生は（入力信号 $e_1, e_2, \cdots, e_n$が安全を示す情報であれば，この論理積出力として）安全を意味する。ここで，検査信号 h 及び入力信号 $e_1, e_2, \cdots, e_n$と出力 u を各々論理変数 Se, E_1, E_2, $\cdots$, E_n, $U \in \{1, 0\}$ とおくと，

$$U = (Se \odot E_1 \cdot A_1^*) \odot E_2 \cdot A_2^* \odot \cdots \odot E_n \cdot A_n^* \tag{20}$$

である。即ち，検査信号発生器 Ge が故障したとき検査信号 h は生成されないから，検査信号発生器の動作状態を $Ge^* \in \{1, 0\}$ とおけば，$Ge^* = Se$ であり，電源入力 $E_1, E_2, \cdots, E_n$を論理入力とすると，Fig. 6 の増幅器はフェールセーフな論理回路として次式で表される。

$$U = E_1 \odot E_2 \odot \cdots \odot E_n \cdot A_z^* \tag{21}$$

但し，

$$A_z^* = Ge^* \cdot A_1^* \cdot A_2^* \cdots A_n^*$$

ここに A_z^*は検査信号発生器 Ge, 及び増幅器のいずれが故障しても $A_z^* = 0$ となることを示す。

5. 出力生成要素

式 (7) で示される安全情報 Se に対応する出力エネルギ Uは，$Se = 0$ のとき外部エネルギ Eが $U = 1$ として生成されない構成が要求される。通常，情報 Se は物理的にはセンサ入力として小さなエネルギで発生するので，Fig. 4, 5 で示すように，増幅によるエネルギ伝達過程が存在し，このエネルギ伝達には電磁リレーや電子回路が利用される。

5.1 電子回路によるユネイトなエネルギ伝達

通常，電子回路による出力は，故障時増幅のための電源が直接出力されるか，又は出力零となる特性（対称誤り特性）を持つ。Fig. 7 の抵抗 Rとトランジスタ Q で構成される増幅回路は，トランジスタ Q のコレクタ C が断線すると，たとえベース (B) 側に入力電圧 ($h = 1$) が印加されていなくても電源 e_1が端子 a に出力され，また，コレクタ C とエミッタ Eが短絡すると出力は零レベルとなる（即ち，対称誤り特性を示す）。このため，例えば Fig. 6 における出力信号（エネルギ）u のように，トランジスタのベース側に入力される信号 h は交流信号安全情報には交流信号があるときを 1, ないときを 0 とする），この増幅

された出力信号（改めて u とおく）はコンデンサ C_1, C_2 とダイオード D_1, D_2 で構成される倍電圧電流回路を用いて外部から供給される電源 e_1 に重畳して出力される。端子 P_1, P_2 の出力 u は，安全情報 h（交流）があるとき発生し，ないとき発生しない。このように，増幅された出力エネルギを増幅のために供給された電源 e_1 に重畳して出力することによって，電源を含む外部環境の出力レベルより高いレベルで出力 u が発生し，出力端子 P_1 には図の回路を構成する要素にいかなる故障があっても，入力 h がないのに電源 e_1 より高レベルの出力が生成され得ない構成としている（電源枠外処理と呼ぶ[6]）。即ち，入力 h（交流）$\in \{1,0\}$ を論理変数 Se で表し，図の回路の動作状態と電源 e_1 と出力 u を論理変数 $Z^*, E^*, U \in \{1,0\}$ に置き換えれば，出力 U は式 (7) で表せる。

Table 2　Logic relation for output interruption
出力遮断の論理的関係

X	Y	Z
0	0	0
1	0	0
0	1	1
1	1	0

Table 3　Condition Z of machine operation
機械の運転Zの条件 ($Z = Se \cdot Y$)

$Se \backslash Y$	1	0
1	1	0
0	0	0

5.2　出力遮断の論理（ブレーキ系）

Fig. 2(a) あるいは Fig. 4, Fig. 7 で示したエネルギ伝達系は，入力情報 h 又は外部から供給されるエネルギが消滅したとき，出力 u がエントロピ増大則にしたがって（即ち，熱となって）消費される系である。しかし，現実の出力エネルギの遮断では，この熱消散では間に合わない場合が存在し，強制的遮断を伴う。

いま，機械の駆動エネルギを ψ, この駆動エネルギによって実際に出力される機械出力を ω, 機械出力 ω を強制的に停止するためのエネルギを χ とおく。ここに，$\chi > \psi$ であるが，ω と χ の大小関係は運転時の蓄積エネルギを含む出力エネルギ ω と強制停止時のエネルギ消散を配慮した停止エネルギ χ を考えねばならず，ここでは単純に $\chi > \omega$ とおく。また，運転 — 停止の間の過渡状態が存在するが，ここでは運転，停止の論理的条件を考察するので無視する。出力エネルギ ω の投入及び遮断を論理的に考察するために，上の夫々のエネルギの有無を 1 と 0 とする 2 値の論理変数で表すものとし，上のエネルギ ψ, ω, χ に対応する論理変数を夫々 Y, Z, X とおく。$Z = 1$ は運転中，$Z = 0$ は停止状態である。この時，Y, X, Z の間には少なくとも Table 2 で示す論理的関係が成立しうる。Table 2 で $X = 1, Y = 1$ は停止エネルギと駆動エネルギが同時に印加された状態でこの時の $Z = 0$ は制動エネルギあり ($X = 1$) を優先させて停止状態とすべきことを意味している。通常 $\chi > \psi$ を与えるエネルギ χ は大きなエネルギとなる（たとえば非常停止手段として）ので，通常このとき駆動エネルギを遮断 ($\psi = 0$) とする。この場合 $X = 1, Y = 1$ は誤り状態と解釈される。$X = 0, Y = 0$ の状態は俗に言うブラの状態であり，何らかの誤りによって外部エネルギ（一種のノイズ）が印加されると $Z = 1$ を生じやすい。このため，$X = 0, Y = 0$ の状態を避けて停止時は $X = 1, Y = 0$ の状態に保たれる。したがって，機械の運転は通常 Table 3 に点線を囲った部分の論理構成となる。

$X = 1, Y = 0$ の停止状態から，$X = 0, Y = 1$ の運転状態に入る，あるいは運転状態 $X = 0, Y = 1$ から停止状態 $X = 1, Y = 0$ に戻るには，$(X = 1, Y = 0) \rightarrow (X = 0, Y = 0) \rightarrow (X = 0, Y = 1)$ の過程を経なければならない。停止状態 $X = 1, Y = 0$ と運転状態 $X = 0, Y = 1$ の間には $X = 1 \rightarrow X = 0$ と $Y = 0 \rightarrow Y = 1$ の相互に論理的否定のエネルギ伝達を必要とし，$Y \geqq Z$ であるが $X \geqq Z$ でない[7]。表で常に $X = 0$ とする条件で駆動側 Y を許可 (Se) に基づく出力 (U) とすれば熱消散系となる。ブレーキ系として駆動側 Y を別途与えるものとし，停止側 X を許可 Se に基づいて供給すれば，ノーマル・オープンのブレーキ系となる。この場合，入力許可 Se と停止のためのエネルギ χ の間には論理的否定が必要で (即ち $X = \overline{Se}$), ユネイトなエネルギ伝達とならない (フェールセーフとならない)。このため，たとえば Fig. 7 に示すようなノーマル・クローズタイプのブレーキ構造とする。

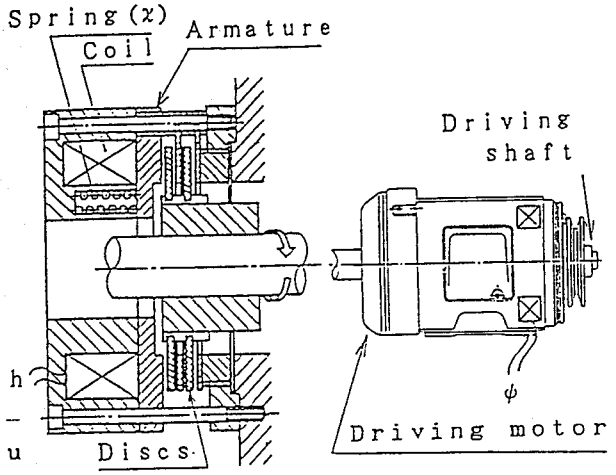


Fig. 8　Electromagnetic brake (normally closed)
電磁ブレーキ（ノーマル・クローズ形）

Fig. 8 は常時バネ（このエネルギをχとおく）によってブレーキが閉成され，モータはブレーキ開放のためのエネルギ u が供給されているときのみ，駆動エネルギψによって回転出力ωを発生する構成である。論理値 $X=0$ の状態はブレーキ開放エネルギ u が停止時バネの持つエネルギχに重畳することによって実現し，論理的に $Y \geqq Z$であると共に，ブレーキ開放エネルギの有無を 1 と 0 とする論理変数 Se で表せば，$Se \geqq Z$となる。ここにバネエネルギχはエネルギ出力として消滅しない ($\chi \neq 0$) 構造が要求される。Table 3 は停止入力 Sec と駆動入力 Yの論理的関係を示す真理値表で，$Se = Y = 1$ の時のみ出力 Zを生じ次式となる。

$$Z = Se \cdot Y \tag{22}$$

ここに，停止入力 Se は運転許可の情報に基づき，Y は運転命令に基づくから，Fig. 8 はインタロックを構成していることになる。

5.3　電磁リレー

エネルギ遮断のために大きなエネルギを得るためには，増幅機能をもつ要素が不可欠となる。Fig. 9 は小さな入力によって大出力（電流）u を遮断するための電磁リレーを示す。入力エネルギ h と出力エネルギ u の間には論理的に $Se \geqq U$の関係が維持されねばならない。Fig. 8 と同様に接点を確実に OFF 状態に保つためのバネエネルギχ (Table 3 における $X=1$ に相当) が必要で，このバネは故障しない

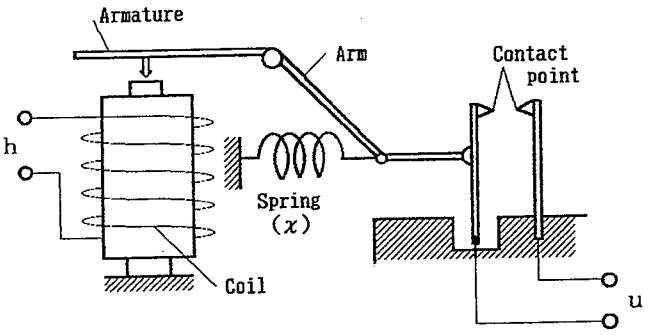


Fig. 9　Electromagnetic relay
電磁リレー

($X \neq 0$) ことを条件とする。このため，出力電流 (u) はバネを流れる構成とすれば，バネが折れたとき出力電流 u は発生しない構成となる。そして，バネのエネルギに重畳して電磁コイルから接点を ON 状態にするためのエネルギが供給される。

6.　結　　言

安全確認過程としての安全の原理を示し，ここで必然的に不可欠となる安全情報伝達のユネイト性を機械系を含む増幅過程の論理として明らかにした。即ち，センサによって抽出される安全情報（安全を示す情報）は，安全であるときのみ出力されるエネルギとして増幅される必要があり，この増幅には外部からエネルギが別途供給されねばならず，このためのエネルギと抽出される安全情報の論理的関係を論理積モデルで示した。そして，このモデルは具体的フェールセーフ演算処理に適用できることを示した。また，フェールセーフな出力エネルギ発生手段は，外部から供給されるエネルギに安全情報が重畳されることによって，上述の論理積モデルが実現されることを示した。

謝　辞
本論文では，すでに日本機械学会論文集（C 編）56 巻 530 号（1990 年 10 月）及び JSME International Journal に掲載した「安全制御系における安全情報のエネルギー伝達 (Enerugy for Safety Information Transmitted in Safety Control Sysmtem)」基本とし，新しい知見を加えて当研究所報告としてまとめたものである。なお，まとめるに当り，共著者であ

る日本信号の蓬原弘一氏から快く承諾をいただいた。心からの謝意を表する。

(平成 5 年 6 月 1 日受理)

参考文献

1) 杉本，蓬原，向殿，制御としての安全（安全制御）に関する一考察，日本ロボット学会第 5 回学術講演会予稿集 2601 (昭 63–10), pp. 359–362.
2) 蓬原，杉本，向殿，フェールセーフ技術，日本ロボット学会第 6 回学術講演会予稿集 1301 (昭 62–11).
3) 蓬原，杉本，安全確認作業システムの論理的考察，機構論投稿中（平元–10）.
4) 土屋，フェイルセイフ論理方式の研究，電気試験所研究報告 No. 695 (昭 41–1), pp. 19.
5) 蓬原，杉本，向殿，事故防止の考え方と安全装置の試作，電子情報通信学会報告 EMCJ89–55 (平元–11).
6) 蓬原，向殿，レール短絡を使った列車検知用フェールセーフセンサの特性と構造，電学論 C, Vol. 7, No. 10 (昭 63), pp. 995.
7) 杉本，蓬原他，安全確認型安全の基本構造，機論 505-C (昭 63–6).