

Research Reports of the National Institute
of Industrial Safety, NIIS-RR-94 (1995)
UDC 658.513.3:614.82

回転停止確認に基づく安全作業システムの一構成法

杉本 旭*

A Construction Method of Safety Work System Based on Confirming Rotation Stop

by Noboru SUGIMOTO*

Abstract : From a viewpoint of safety, such an operation for machine-care as trouble-shooting and maintenance may be referred as a man-machine work system in which machines and human workers work together in a common work area. In such a man-machine work system, an interlocking is usually constructed so that workers are permitted to work freely in the work area and safety must be assured only on the hazardous machine-side in such a way that while machines are working sudden intervention of the work area by human workers must force any machine operation to stop. However, in case that they have long run-down time after triggering stop control, it may be impossible to assure safety only on the machine-side.

This paper presents a safety interlocking system as an example for assuring safety in working together in hazardous area. The interlocking system is based on confirming the stop condition of a machine after run-down time and permitting human to enter into the work area. A rotation-stop sensor for detecting the stop condition of a driving motor is proposed. This sensor issues a work permission signal to a door switch to unlock the door-gate after confirming machine stop. And the method of constructing this sensor on fail-safe is presented. The signal indicating the rotation-stop-state confirmation is produced in a fail-safe manner, i.e. by a logical product of the confirmation signal reporting that the sensor monitoring rotation of the motor is in a normal condition and the output of NOT operation which never erroneously judges to be in a rotation-stop-state and never permits human workers to enter to the dangerous space.

The safety system proposed in this paper meets the requirement of Section 9.7 of British Standard Cord of practice for safety of machinery.

Keywords ; Safety engineering, Industrial machine, Safety control, Fail-safe, Motion monitor, Interlock, Stop confirmation, Door switch

1. 緒 言

機械可動部のメンテナンスを人が行うような作業は、機械可動部と人が共通の領域で作業を行う人間機械作業システムと捉えることができる。本報告では、このようなシステムにおいて、作業者の安全を強制的に確保するためのインターロックシステムの具体的構成例として、モータの回転停止確認に基づくインターロック

システムとモータ回転停止確認の方法を示す。

自動化された人間機械作業システム（例えばプレス機械運転システム）では、作業場への作業者の自由な進入を許し、危険な状況が生じたときは機械側で作業者の安全を確保するための、インターロックが備えられている¹⁾。しかし、機械可動部の停止遅れが安全に係わる場合、機械側だけで安全を確保することは困難である。このため、本報告で示すインターロックシステムでは、機械可動部は柵で囲われ、作業者には可動部の停止確認に基づいて作業許可が与えられる。

*機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety Research Division

本報告では、第2章で安全作業システムの構成論理を述べ、第3章で対象とするモータ回転停止確認に基づくインターロックシステムの構成を示す。回転停止確認では、回転しているにもかかわらず故障で誤って停止の判断がなされてはならない。このため第4章ではタコジェネレータやロータリーエンコーダを用いて回転停止を検出する従来の方法ではこの構成が本質的に得られないことをまず示し、次にモータ停止確認の論理的条件を示す。第5章では、モータ励磁巻き線をトランスジューサとして用いた回転停止確認センサの構成を示し、そのフェールセーフ機能について述べる。回転停止確認に危険側誤りを生じないためには、センサが回転を必ず検出できる状態にあることを監視する必要がある。本報告で示す回転停止センサにおいては、フェールセーフな2入力ウィンドウ・コンパレータが重要な役割を果たす。第6章では、この2入力ウィンドウ・コンパレータによって上述の監視機能が実現されることを示す。第7章では、その応用例を示す。

本報告で示すインターロックシステムは、イギリス規格 BS5304:1988 (機械の安全規準) *1 の9.7節を満たすように配慮している。このため、機械的インターロックの構成にはソレノイド施錠型のドアスイッチが用いられる。なお、同規格ではドアスイッチを解錠するためにセンサを用いることが言及されているが、現実はこのためのセンサの開発例は報告されていない。

2. 安全作業システムの基本論理構成

Fig. 1において、機械の可動部が機械的出力(エネルギー)を発生して作業を行うような領域を S_z とし、これを危険領域と定め、それ以外の領域を安全領域 S_z^c とする。作業領域 S_z 内に位置 X をとり、 X における作業者の存在/不在を H_x 、 X における機械可動部の作業状況を M_x で表す。ただし、 H_x と M_x は、作業者が X に存在するとき、および機械可動部が X で作業を行っているときを論理値1、作業者が存在していないとき、および機械可動部が作業を行っていないときを論理値0とする2値変数とする。事故は両方の事象が論理値1として同時に成立したとき発生するから、事故は $H_x \cdot M_x = 1$ と表せる(ここに、記号 \cdot は論理積を表す)。両方の事象を時間の関数として $H_x(t)$ 、 $M_x(t)$ で表すと、作業の安全を確保するには人間側と機械可動部側が交互に作業すること、すなわち、すべての時刻 t について次式が常に成立していなければならない(安全作業の原理)²⁾。

*1 British Standard Code of Practice for Safety of Machinery (機械の使用によって生じる事故防止の方法に関する基準を述べている)

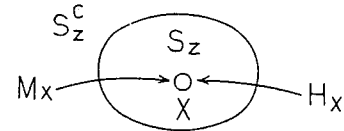


Fig. 1 Safety space and hazard space in man-machine operation system.
人間機械作業システムにおける安全空間と危険空間

$$H_x(t) \cdot M_x(t) = 0 \quad (1)$$

空間の状況を、安全状態0、事故状態1による2値の論理変数 $D_x(t)$ で表せば、空間の状態 $D_x(t)$ は次式で表すことができる。

$$D_x(t) = H_x(t) \cdot M_x(t) \quad (2)$$

少なくとも式(1)の条件を満たしつつ作業が行われるためには、機械側の作業は人間が存在しないこと $[\overline{H_x(t)} = 1]$ を、また人間の側の作業は機械の可動部が作業していないこと $[\overline{M_x(t)} = 1]$ を安全条件とすればよい。安全な作業の条件は次の2つの式で示される。

$$\overline{H_x(t)} \cdot M_x(t) = 1 \quad (3)$$

$$H_x(t) \cdot \overline{M_x(t)} = 1 \quad (4)$$

ここに、記号 $\overline{\quad}$ は否定を表す。

式(2)で示される空間の状態を安全 $[D_x(t) = 0]$ に保つために、機械可動部の制御が式(3)の成立に基づいて行われると同時に、作業者は式(4)の成立に基づいて作業を行わねばならない。

Fig. 2に前述の条件(3)、(4)を満足する人間機械系のモデルを示す。同図で $\hat{H}_x(t)$ は人間の作業意志を、 $\hat{M}_x(t)$ は機械側の作業命令を示す ($\hat{H}_x(t)$ 、 $\hat{M}_x(t)$ は共に2値の論理変数で、作業意志あるいは作業命令があるとき論理値1をとり、ないとき論理値0をとるものとする)。 G_H は、機械の可動部が S_z で作業しないこと $[\overline{M_x(t)} = 1]$ をセンサ I_H (例えば目)で検出し、このセンサ出力と作業意志 $\hat{H}_x(t)$ に対して式(4)に基づくインターロック機能を担う。同様に、 G_M は機械側インターロックの論理積演算要素を表し、人間が S_z にいないこと $[\overline{H_x(t)} = 1]$ をセンサ I_M で検出し、センサ出力と作業命令 $\hat{M}_x(t)$ に対して式(3)に基づくインターロック機能を担う。すなわち、 G_M と G_H は、各々 $\overline{H_x(t)} \cdot \hat{M}_x(t) = M_x(t)$ 、 $\hat{H}_x(t) \cdot \overline{M_x(t)} = H_x(t)$ で示される論理処理を行っている。すなわち、機械側出力 $M_x(t)$ によって、機械側可動部が領域 S_z で作業を行い、人間側出力 $H_x(t)$ によって、作業者が領域 S_z に進入することになる。

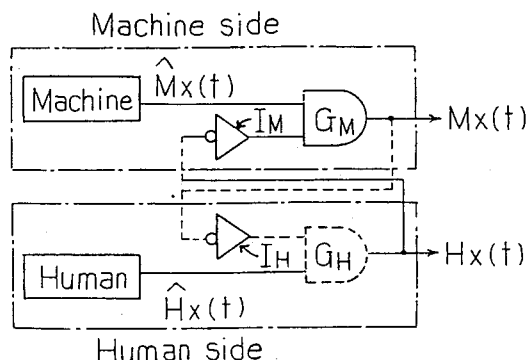


Fig. 2 Safety operation model in man-machine operation system.

人間機械作業系における作業安全モデル

3. 対象とする安全作業システム

Fig. 3 に本報告で対象とする人間機械作業システムの構成モデルを示す。機械系はモータとその出力部（回転部）で、作業者は機械系のメンテナンスを行う。同図では、ドア施錠スイッチを備えた安全柵とスイッチ用アクチュエータを備えたドアによってモータおよび可動部を囲っている。安全柵内は、Fig. 1 で示した危険領域 S_z に対応する。

人間機械作業システムに Fig. 2 のモデルを適用する場合、次の 2 つの方法が考えられる。

(1) 作業者に自由な行動を許し、作業者が可動部に接近する（安全柵内に相当する領域に進入すると、機械側がセンサ I_M を用いてこれを検知して自動的に停止する方法。この場合、安全柵は不要となる。

(2) 作業者を機械可動部から隔離し、作業領域 S_z における作業は、相互に異なる時間で行われるように物理的に両者を分離する方法。この場合、Fig. 3 に示すように可動部を柵で囲み、可動部停止時のみ作業者が柵内に入進して、可動部に接近できる。

(1) の方法は、Fig. 2 のモデルで人間側インターロックを示す式 (4) が必ずしも満たされないことを前提としている。すなわち、Fig. 2 のモデルでセンサ I_M, I_H および判断要素 G_M, G_H に危険側誤り（論理値 1 の側の誤り）出力が許されないが、人間側の持つ目や判断の機能は必ずしも安全側誤り（論理値 0 の側の誤り）だけを保証することができない。このため、作業には、少なくとも自殺行為を行わない、という条件に基づいて自由な行動を許し、機械側は作業者の進入を検知して可動部を停止するようなインターロックシステムとしている。著者らはこのシステムをすでに動力プレス制御に適用してきている^{3),4)}。

しかし、(1) の方法は、作業者の接近時に可動部停止

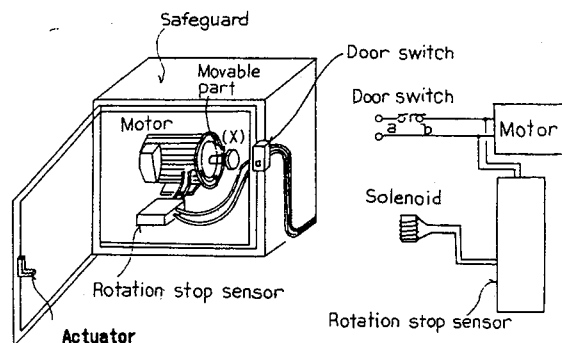


Fig. 3 Interlock system for sensing rotation stop of driving motor.

モータの回転停止確認に基づくインターロックシステム

の時間遅れが大きい場合、必ずしも安全を確保できない欠点を持つ。このため本報告では (2) の方法を採用した。(2) の方法では、作業者は可動部が停止したとき柵内進入の許可が与えられ、可動部は作業者が柵内から出てドアを閉じたとき作業を開始することができる（可動部駆動用の電源を投入できる）。このような作業システムは、英国工業規格*¹ (1 節) においても提案がなされているが、具体的な作業システムは提案されていない。

Fig. 3 で、回転停止センサは可動部の停止 $[\overline{Mx}(t) = 1]$ を検知して、ドアスイッチにドア解錠の許可を与える。これによってドアは開けることができ、作業者は柵内に入進して作業できる $[Hx(t) = 1]$ に相当)。回転停止センサは、Fig. 2 のセンサ I_H に対応する。

モータ駆動の電源は接点を介してモータに供給される。ドアに設けたアクチュエータはドア開のときこの接点を OFF し、ドア閉のときこの接点を ON する機能を持つ。このため、作業者が柵内にいる $[\overline{Hx}(t) = 0]$ 間はモータに電源は供給されず、ドアを閉じて $[\overline{Hx}(t) = 1]$ はじめて電源が供給されてモータが回転する $[Mx(t) = 1]$ 。すなわち、アクチュエータは Fig. 2 におけるセンサ I_M の機能を持つ。

Fig. 4 に、ソレノイドによる施錠構造を持つドアスイッチの構造を示す（例えば英国 EJA 社の商品名 ATLAS）。Fig. 4(a) は、ドア開のときのドアスイッチの状態を、Fig. 4(b) はドア閉のときの状態を示す。

ドア開のとき、ドアに取付けられたアクチュエータはクランクの切り欠きに挿入されていない $[Hx(t) = 0]$ を示す。また、モータ電流を遮断する接点 a, b はピンジャケットの端子がクランクの溝の中にあって開の状態にある $[Mx(t) = 0]$ が保証される。ドア閉のとき、アクチュエータはクランクの切り欠きに挿入され、クランクは閉状態となる $[\overline{Hx}(t) = 1]$ が確認され

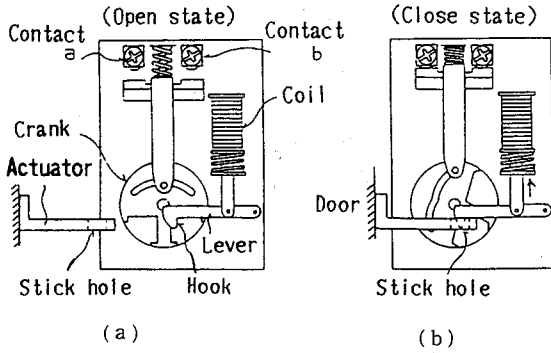


Fig. 4 Door switch with a key by solenoid.
ソレノイドによる施錠構造のドアスイッチ

$Mx(t) = 1$ が許可される]。このときアクチュエータに備えられた施錠穴にコイル鉄心で上昇するレバーのフックが入る。アクチュエータを引き抜くには回転停止センサから許可信号が出力され [$Mx(t) = 1$]、コイルが励磁されてフックがこの穴から離れなければならない。

すなわち、Fig.3 のシステムは、モータの停止確認 [$\overline{Mx}(t) = 1$] がセンサからドアスイッチのコイルに与えられてはじめて人の作業開始 [$Hx(t) = 1$] が許可される式 (4) に基づくインタロックと、ドアの閉と人の不在確認 [$Hx(t) = 1$] がアクチュエータよりドアスイッチに与えられてはじめて機械の作業開始 [$Mx(t) = 1$] が許可される式 (3) に基づくインタロックとで構成されている。

4. モータの回転停止確認の条件

現状のエンコーダやジェネレータを用いてモータの回転を検出してその否定演算によって回転停止を判断する方法では、必ずしも回転停止確認をフェールセーフに行うことができないことをまず示す。

Fig. 5(a) はモータ M によって駆動される回転体 Rot に翼 Y1, Y2 を設けて投受光器 PT, PR 間の光ビーム PB をスイッチして回転を検出する場合を示す (エンコーダの例)。回転停止は受信される光ビームのスイッチング (ON/OFF の連続信号) が停止したことによって確認される。すなわち、このセンサを用いて Fig. 4 のドアスイッチを制御するには、光センサの出力信号を整流平滑し、Fig. 4(b) で示すように、この出力信号が 0 になったとき (否定演算によって) Fig. 4 のコイルを駆動せざるを得ない。しかし、Fig. 5(b) で否定演算回路 N の前段の要素 (センサおよび整流回路) のいずれかが故障して出力信号を生成しなくなったり、極端な故障状態として投受光器 PT, PR のいずれかが外れたり、破壊してしまった場合、否定演算回路 N の出力信号は (実は円板は回転しているにもかかわらず)

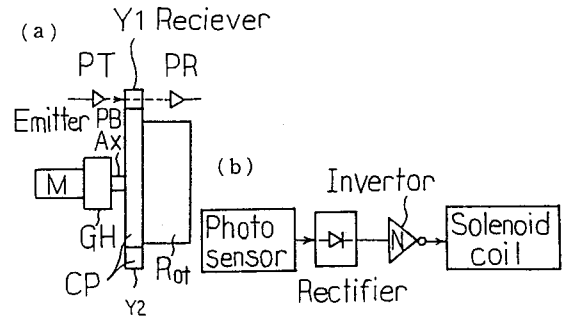


Fig. 5 Safety confirmation by detecting rotation-stop.
回転検出に基づく停止確認

回転停止を示してしまう (投受光器が回転を監視していない状況に等しい)。タコジェネレータの出力信号を整流して Fig. 5 と同様な方法をとっても、例えばタコジェネレータの巻き線に断線故障が起こると上述と同様の誤りが生じ得る。よって、Fig. 5 に示すように回転を検出して (その否定によって) 回転停止を必ずしも確認できない。

次に、作業者進入の許可 ($\overline{Mx}(t) = 1$) を与えるための回転停止確認の条件 (フェールセーフ条件) を示す。回転状態 (機械的出力あり) を 1, 停止を 0 とし、Fig. 4 のソレノイドコイルの駆動電流ありを 1, なしを 0 としておのおの 2 値の論理変数 Mx, Z で表せば、両者の論理的関係は次式を満たさねばならない^{2),5)}。

$$\overline{Mx} \geq Z \quad (5)$$

式 (5) は、Table 1 に示すように、 $\overline{Mx} = 0$ (回転) が誤って $Z = 1$ (ソレノイドコイルの駆動) となることだけは許されない論理的関係 (単調な関係) を意味している。

5. モータの励磁巻き線による回転停止センサ

5.1 センサの構成

Fig. 6 に回転停止をモータの励磁巻き線の端子間で検出するセンサをブロック図で示す。スイッチ回路はモータ M を ON/OFF する。

Fig. 6 で回転信号発生部は以下に示すように機能する。トランジスタ T2 の二次巻き線 N2 はスナバー回路 (C, R で形成される火花消去回路) に直列に挿入されてモータ M のインピーダンス変化を抽出する。高周波信号発生回路 SG1 と抵抗 R1, R2, R3 とトランジスタ T2 は交流ブリッジ回路を構成し、トランス T3 の出力側に交流の不均衡出力信号 $a(\omega_1)$ を生成する。 $a(\omega_1)$ は増幅器 AMP1 で増幅されて整流回路 REC1

Table 1 True value table.
 $\overline{M}_x \geq Z$ の真値表

\overline{M}_x	Z
1	1
1	0
0	0

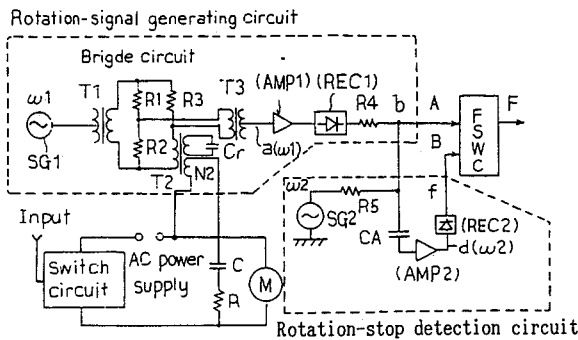


Fig. 6 The rotation-stop sensor with magnetized coil of motor as a transducer.
 モータ励磁巻線をトランスデューサとして用いた回転停止センサ

で整流され、直流の不均衡出力信号 b として出力される。モータ M の回転に伴う励磁巻線インピーダンスの変化は出力信号 b の振幅変化となって現われる。この振幅の変化はコンデンサ CA を介して回転停止検出部に伝達される。

回転停止検出部は以下に示すように機能する。回転信号発生部の出力信号 b に振幅変化がない場合、高周波信号発生器 $SG2$ の出力信号 ω_2 が増幅器 $AMP2$ で増幅され、整流回路 $REC2$ で整流されて直流の出力信号 f を生じる。信号 b に振幅変化が起ると、これに重畳する高周波信号 ω_2 は $AMP2$ の飽和によって間欠的に増幅されることになるため (後述の Fig. 7 の信号 d)、出力信号 f は著しく低レベルとなる (後述の Fig. 7 の信号 f)。

Fig. 6 に示す FSWC は 2 入力故障時出力信号が 0 となるウィンドウ・コンパレータ^{6),7)} (以下 FSWC と記す。) で、入力端子 A, B と共に特定の入力信号レベルの範囲だけで出力信号 (論理値 1) を生成する。すなわち、FSWC はおのこの入力端子 A, B の入力信号 b, f に対して次の演算を行って 2 値の出力信号 F を生成する。出力信号 F は Fig. 3 のソレノイドを励磁するための電流 Z に対応する ($F = Z$)

$$F = F_A \cdot F_B \quad (6)$$

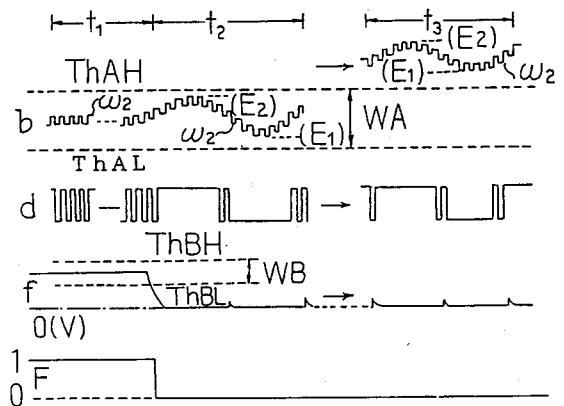


Fig. 7 Time chart of sensor output.
 センサ出力のタイムチャート

ただし、

$$F_A = 1 \dots ThAH \geq b \geq ThAL$$

$$0 \dots b > ThAH, \text{ or } b < ThAL$$

$$F_B = 1 \dots ThBH \geq f \geq ThBL$$

$$0 \dots f > ThBH, \text{ or } f < ThBL$$

ここに、 $ThAH$ と $ThAL$ とはおのこの入力端子 A の上限と下限のしきい値、 $ThBH$ と $ThBL$ はおのこの入力端子 B の上限と下限のしきい値を示し、上限と下限のしきい値間を窓と呼ぶ。

Fig. 7 は Fig. 6 のセンサの動作を示すタイムチャートである。Fig. 7 で、 WA, WB はそれぞれ式 (6) で定まる入力 A, B の窓を示す。区間 $t1$ はスイッチ回路が OFF してモータ M の回転が停止しており、回転信号発生部の出力信号 b はモータの停止状態に対応する一定 (直流) の信号レベルを示す (ただし、高周波数信号発生器 $SG2$ の出力信号 ω_2 が重畳している)。この信号レベルは入力端子 A の窓 WA の範囲内にあり、式 (6) の $F_A = 1$ が成立する。また、回転停止検出部では、高周波信号 ω_2 が増幅されて入力端子 B の窓 WB の範囲内のレベル f が出力されて、式 (6) で $F_B = 1$ が成立する。よって FSWC に出力 $F = 1$ が生成される。区間 $t2$ はスイッチ回路が OFF していながら (惰性で) モータ M が回転している状態を示している。信号 B は回転子の回転に伴うインピーダンス変化によって $E_1 - E_2$ の幅で変化し、この振幅変化 (脈流) によって $AMP2$ の出力信号は飽和する。このため、高周波数信号 ω_2 は Fig. 7 のタイムチャート d で示すように間欠的にしか伝達されず、整流回路 $REC2$ の出力信号 f はほぼ零となって FSWC の入力信号 B のしきい値 $ThBL$ 以下となる [式 (6) で $F_B = 1$ が成立しな

い]。一方、入力端子 A の上下限しきい値 Th_{AH} と Th_{AL} は、回転子がどこで停止しても停止信号 $F = 1$ が生成できるように、Fig. 7 に示すように振幅変化の最大値 $E_1 - E_2$ の外に設定される。したがって、式 (6) で $F_A = 1$ が成立している。しかし、回転子が回転すれば、 $F_B = 0$ であるから、 $F = F_A \cdot F_B = 0$ となる。区間 t_3 はスイッチ回路が ON してモータ M の二次巻き線に並列に挿入されるので、トランス T2 から見たインピーダンスは著しく低下し、回転信号発生部の出力 b は入力端子 A の窓 WA の外のレベルにシフトする。このとき、式 (6) の $F_A = 1$ が成立しないので、FSWC の出力信号 F は論理値 0 となる。

Fig. 8 に実測した回転信号発生部の出力信号 b のパターン例を示す。Fig. 8 で、30 kHz の信号は信号 b に重畳する信号 ω_2 である。区間 t_1 はモータ (回転子) が停止している区間を示し、モータの駆動前後で直流レベル (b) が異なることが解る (前述したように回転子の停止位置によって励磁巻き線のインピーダンスは少し異なる)。区間 t_3 はスイッチ回路が ON された状態を示し、前述のようにスイッチ回路の投入でインピーダンスが低下し、回転信号発生部の出力 b は上昇する (実は、AMP1 の飽和レベルに達している)。区間 t_2 は、スイッチ回路が OFF されて回転子が惰性で回転している状態を示し、回転子の回転の周期で信号 b が変化している (最大 $E_2 = 4.1V$, 最小 $E_1 = 2.4V$ である)。

5.2 フェールセーフ機能

Fig. 6 に示すセンサは、以下の 3 通りの状態を監視する機能を持つ必要がある。

- (I) モータ電源スイッチの OFF の状態
- (II) モータ電源スイッチの ON の状態
- (III) センサが回転子を監視していない状態

ここに (I) は、回転子が停止している状態 (Fig. 7, Fig. 8 の区間 t_1) と回転子が惰性で回転している状態 (Fig. 7, Fig. 8 の区間 t_2) とが存在する。この状態を示す信号はブリッジ回路の不均衡出力信号 b として回転信号発生部から生成される。信号 b は停止状態では一定レベルの直流信号であり、回転状態では回転の速度に対応する周期でレベルが変化する。前述したように、回転の有無によらずスイッチ OFF の状態は、FSWC の入力端子 A により式 (6) に基づいて $F_A = 1$ として監視される。さらに、回転の有無は FSWC の入力端子 B により式 (6) に基づいて、回転ありが $F_B = 0$ 、回転なしが $F_B = 1$ として抽出される。

(II) も、モータが駆動されて回転子が回転している状態と、極端な場合過負荷状態で回転していない状態

とが存在する。この二つの状態を示す信号は、Fig. 7, Fig. 8 の区間 t_3 で示すように回転子回転の有無によらずブリッジ回路に大きな不平衡出力 b として回転信号発生部から生成される (回転の有無によらず $F = 0$ である)。過負荷状態で回転子が停止していても回転子はいつ動き出すか分からない。そのため、このセンサではスイッチ ON を回転ありとして抽出しないで電源スイッチ ON の状態を抽出して FSWC の入力端子 A により $F_A = 0$ として監視している。

(III) の状態は、(a) FSWC が故障した状態、(b) 回転停止検出部が故障した状態、(c) 回転信号発生部が故障した状態、(d) センサの入力線がモータの励磁巻き線の端子から外れた状態 (スナバー回路の抵抗 R, コンデンサ C またはトランス T2 の二次巻き線 N2 に断線故障が生じた場合も同様の状態となる) を示す。

Fig. 6 のセンサ自身が回転子の回転を監視していない状態にあるとき、式 (5) に基づいて Table 1 の $Mx = 1, Z = 0$ の組み合わせ (回転していないのにソレノイド駆動の電流が流れないこと) を許している (ただし、 $Mx = 0, Z = 1$ の組み合わせは許されない)。よって、上の 4 通りの故障状態に対して出力信号 F は 0 となればよい。FSWC は故障時出力信号が 0 となる特性を持つ。また、増幅器と整流回路も故障時出力信号が発生しない特性で実現できる^{5),8),9)}。よって、上の (a) の故障では出力信号 F は直接 0 となって出力信号 F も 0 となる [式 (6) で $F_B = 0$]。

ここで、検出部における信号発生器 SG2 (すなわち、高周波信号 ω_2 の重畳) の意味について述べる。

回転停止検出部が回転信号発生部の出力信号 b から回転を示す信号 ($E_2 - E_1$) を抽出してその否定によって回転停止を検出するならば、論理的に Fig. 5 の構成に戻ってしまう。このため、Fig. 6 では、信号 b に低レベルの高周波信号 ω_2 を重畳させ、 ω_2 が増幅

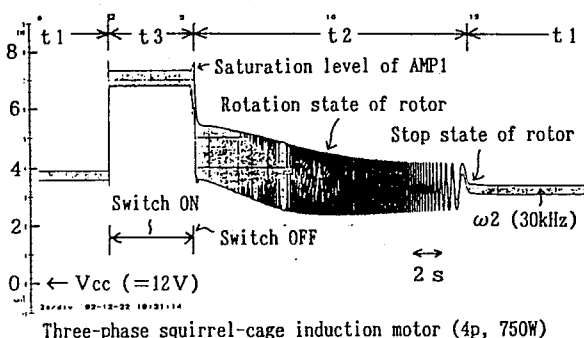


Fig. 8 An example of experimental pattern of unbalanced output signals.
不平衡出力信号 (b) のパターン例

されて初めて整流出力信号 f が生成される構成をとる。これにより、信号 b に $E_2 - E_1$ の脈流がない場合は ω_2 が常時増幅されて高レベルの出力信号 f が生成される。信号 b に脈流があると、この変化も増幅されて増幅器出力が飽和レベルに達するために、これに重畳する信号 ω_2 は Fig. 7 の信号 b に示すように間欠的にしか増幅されず、出力信号 f は低レベルとなる（信号 ω_2 は脈流 $E_2 - E_1$ に比べて Fig. 8 に示すように低レベルである）。信号発生器 SG2 や増幅器 AMP2 に故障が生じた場合は、信号 ω_2 を増幅できないため出力信号 f が 0 となる側に誤るようになる。換言すると、信号 ω_2 を信号 b に重畳し ω_2 と b の変化を一緒に増幅することによって、否定演算機能を得るとともに、増幅回路（否定演算機能）が故障したとき出力が零となるようにしている。

上記 (III) の状態で (c) と (d) の故障状態は 6 章で述べるように FSWC の機能を用いて出力信号を $F = 0$ としている。

上述の通り、上に示した 3 つの監視機能を用いて、電源スイッチ ON のときは回転子の回転の有無によらず FSWC の出力信号を $F = 0$ とし、スイッチ OFF のときは故障時出力信号が 0 となるような否定演算によって式 (6) に基づいて回転子回転時の FSWC の出力信号を $F = 0$ とし、センサを構成する回路に故障を生じた場合も FSWC の出力信号を $F = 0$ としていることになる。よって、モータの電源スイッチが ON しているとき及び電源スイッチ OFF において回転子が回転しているときは、ソレノイド駆動の電流は発生せず ($Z = 0$)、センサ故障時やセンサの入力線に断線や短絡が生じた場合もこの電流は発生しないことになる。すなわち、式 (5) が満たされる。

6. 回転停止センサにおける 2 入力ウィンドウ・コンパレータのもつ意味

式 (6) は Fig. 6 で示すセンサの機能上の基本特性を与えている。Fig. 6 で、回転信号発生部（ブリッジ回路）はモータ励磁巻線のインピーダンス変化を抽出して拡大するトランスデューサの役目を担っている。このため、ブリッジ回路の一辺に断線もしくは短絡の故障が生じたり、電源スイッチ ON による巻線間のインピーダンスに大幅な変化が起こった場合、Fig. 8 の区間 t_3 のような大きな出力信号 b の変化が生じる。この変化は式 (6) における上限のしきい値 Th_{AH} を越えて FSWC に出力信号 $F = 0$ を生じる。前述の回転停止検出部では、回転信号発生部で回転に伴う信号の変化が起こらなければ、回転を検出することができない。回転に伴う信号の変化が不平衡出力信号 $a(\omega_1)$

に起こらない事象は、例えば高周波信号発生回路 SG1 が故障して信号 ω_1 が発生しない場合や、巻線 N2 に断線故障が生じた場合に発生する。また、不平衡出力信号 b に回転に伴う信号変化が起こらない事象は、ブリッジ回路の一辺に故障が生じて AMP1 が飽和したり、AMP1 自身が故障した場合に発生する（このような故障では信号 b は変化しないから、回転停止検出部が正常に動作しておればその出力信号 f は高レベルとなり、式 (6) で $F_B = 1$ である。）。このような事象は、トランスデューサとしてのブリッジ回路がモータ M の励磁巻線をすでに監視していない状態、すなわち、5.2 節の (III) の (c), (d) の状態に相当する。FSWC の入力端子 A が式 (6) の $F_A = 1$ を与えるしきい値 Th_{AH} と Th_{AL} （窓 WA）でレベル検定を行っていることの意味は、上述の非監視状態にブリッジ回路がなっていないことを保証することにある。すなわち、ブリッジ回路に故障が生じて増幅器 AMP1 が飽和するようなレベルに達した場合（巻線 N2 の端子間短絡や断線を含む）は、信号 b が FSWC の入力端子 A の上限のしきい値 Th_{AH} を超えることになり、信号発生器 SG1、増幅器 AMP1 あるいは整流回路 REC1 が故障した場合は信号 b が FSWC の入力端子 A の下限しきい値 Th_{AL} 以下となる。よって、上述の事象が回転信号発生部に起これば、式 (6) で $F_A = 0$ を生じる。

7. 回転停止確認センサの応用例

Fig. 6 における FSWC の入力端子 A による入力の監視機能と監視の限界を明確にするために、Fig. 9 に、Fig. 6 のセンサの応用例を示す。Fig. 9 のセンサは Fig. 5(a) の回転体 Rot に回転体とは異なる磁性材料（例えばフェライト）S1, S2, ..., S5 を挿入し、磁気センサコイル C_0 を配置した磁気センサである（コイル C_0 は Fig. 6 の巻線 N2 に接続される）。コイル C_0 には金属製回転体の表面 U の接近によるインダクタンスと磁性材料 Si ($i = 1 \sim 5$) の接近によるインダクタンスの変化が回転体の回転に伴って生じ、この変化は回転信号発生部出力 b の変化 $E_2 - E_1$ となって現れる。この場合、式 (6) における $F_A = 0$ を与える変化（すなわち、しきい値 Th_{AH} と Th_{AL} の範囲外レベルの変化）はコイル C_0 に断線故障が生じた場合（ブリッジ回路の故障含む）のほかに、コイル C_0 が回転体表面に著しく接近したり、コイル C_0 が逆に離れた場合（例えば落下したとき）に起る。すなわちセンサコイル C_0 の正常な取り付けの保証を $F_A = 1$ の成立条件の中に含むことになる。この機能は、Fig. 6 でトランス T2 の巻線 N2 からみたモータ側の電気的環境を FSWC の入力端子 A が監視していることと同一の

機能である。ただし、Fig. 9の方法では、モータ電源スイッチ ON の状態で万一回転体が回転しない状況が生じている場合（いつ動き出すか分からない状態）であっても、ドア開の許可 $Z = 1$ を生じてしまう。したがって、一度ドアを開いたら、駆動源遮断状態を維持するため、Fig. 4のドアスイッチと併用することが重要である。

8. 結 言

機械可動部を柵で囲って、人間側は柵の外に出てドアを閉めることによって機械可動部の作業を許可し、機械可動部側は可動部が停止したことによって人間側の作業を許可する安全作業システムを提案し、その具体的構成方法としてモータ回転停止に基づくインターロックシステムを示した。

このシステムでは、機械側可動部に対する作業許可はドアに設けたドアスイッチのアクチュエータによって与えられるが、人間側に対する作業許可は可動部停止を通報するセンサによって機械的に与えられる。このセンサには、少なくとも、可動部が停止していないにもかかわらず人間側に作業許可を与えるような誤りは許されない。本報告では、このような誤りを生じな

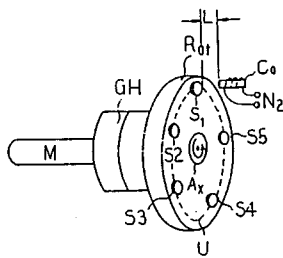


Fig. 9 An example of application of rotation-stop detection.
回転停止検出回路の応用例

いセンサの監視機能として三つの機能を示し、これらの機能が満足されるようなセンサシステムの構成方法を具体的回路ブロックを用いて示し、各ブロックの出力誤り特性を述べた。これにより、人間側と機械側が相互に許可を与えつつ、作業を行うことのできる安全作業システムを実現できることが示された。

7章で述べたように、Fig. 6の方法がFig. 9に示されるような他の物理的手段に適用される場合、式(5)（回転停止確認のフェールセーフ条件）が満たされるためには、別途例えばモータ電流を監視するような処置をとらねばならないことになる。ただし、このような処置（論理演算を含む）を行って式(5)が必ず満足されるか否かは今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 蓬原・杉本・向殿, 電気論 D, 107-9(1987-9), 1099~1106.
- 2) 蓬原・杉本, 機論, 56-529, C(1990), 2378~2385.
- 3) 坂井・蓬原・杉本・桑川・向殿, 機論, 58-545, C(1992), 112~119.
- 4) Sakai, M., Kato, M., Futsuhara, K., and Mukaidono, M., IEICE TRANCE., Vol.E76-D, No.5(1993), 577~585.
- 5) 杉本・蓬原, 機論, 56-530, C(1990), 2658~2665.
- 6) 蓬原・向殿, 電気論 C, 109-9(1989), 676~683.
- 7) Kato, M., Sakai, M., Jinkawa, K., Futsuhara, K. and Mukaidono, M., IEICE TRANCE., Vol.E76-C, No.3(1993), 419~427.
- 8) 浅田・神谷・成田, 第 20 回安全工学シンポジウム講演予稿集, No.117(1990-6), 181~184, 日本学会会議.
- 9) 蓬原, トランジスタ技術, (1985), 425~434, CQ 出版社.

(平成 7 年 5 月 30 日受理)