

5. 産業現場への適用

梅崎重夫*, 池田博康*, 江川義之*,
清水尚憲*, 深谷 潔*, 桑川壯一*,
杉本 旭*, 田畠泰幸**, 富田 一**

5. System Applications

by Shigeo UMEZAKI*, Hiroyasu IKEDA*, Yoshiyuki EGAWA*,
Shoken SIMIZU*, Kiyoshi FUKAYA*, Soichi KUMEKAWA*,
Noboru SUGIMOTO*, Yasuyuki TABATA** and Hajime TOMITA**

Abstract: A logic-based safety system to facilitate the safety of the worker in a human-machine system is applied to several conventional working systems which have been, to some extent, problematical for safety. The safety system contains a fail-safe interlocking on the basis of a safety confirmation sensor which issues a work output permission to the machine, which predicts and confirms safety, and which samples safety confirmation. The summary of the effectiveness of safety construction is as follows:

1) Trouble-Shooting in Load Transferring Operation

The trouble-shooting manipulator has the function of mechanical adaptation so that it can correct configuration of loads without breaking them. The operator can control the manipulator manually and safely by means of the monitoring system.

2) Wire-Sling Operation

The safe system for wire-slinging, i.e. an automatic-balancer is developed. The automatic-balancer is a system which can correct the unbalance of loads caused by worker's erroneous wire-sling.

3) Safe Operation of Self-Maneuvering Transportation

Self-maneuvering transportation is a transportational means in part of the industrial field. A worker rides on the carriage and operate it for himself. The safety operation system is clarified from the view point of safety confirmation type.

4) Indicator Lamps on the Operation Panel

Light Emitted Diode (LED) have been widely used. The luminance of LED on control panels is very low compared with that of incandescent lamp. In order to increase luminance of LED, many experiments were carried out. With the result of that, the high luminance LED with competitive brightness to incandescent lamp is developed.

5) Double CPU Controller

A double CPU system is constructed to supervise the malfunction of the CPU. If either of the WDT (watch dog timer) detects the failure of a CPU, the CPU is reset and stops execution.

6) Signal Diagnosis for Noise Rejection

A signal diagnosis device on a trial basis has a function for distinguishing between a distortionless input signal and a distorted one due to an electro-magnetic interference 'EMI'. The device

*機械研究部, Mechanical Safety Research Division, **電気研究部, Electrical Safety Research Division

is confirmed by experiment to fulfil the above function and to prevent a runaway of electronic apparatuses.

7) Three Dimensional Human-Detection System

The three-dimensional human detector that has multi-infrared-sensors of pyroelectric type can detect a human approaching the robot's movable area. The detector has a self-diagnostic circuit for confirming the normal operation of sensors.

8) Safe Operation of Automatic Guided Vehicles

The safety aspects of the design of automatic guided vehicles (AGV) is considered, and the safe operation system of AGV from the view point of safety confirmation type is developed and evaluated.

Key Words: Safety, Safety Operation, Safety Control, Transportation, Self-Diagnosis, Human-Detection, Automatic Guided Vehicles

5.1 荷ずれ処理用作業システムの開発^{1,2,3)}

5.1.1 開発の経緯

自動倉庫システムは、FMS等に適用されることによって高度で大型な無人立体自動倉庫へと展開してきた。それに伴い、荷ずれ等のトラブル処理に新たな問題を抱えるようになった。ある事業場統計によると、設備の不具合はスタックークレーンが最も多く、またそのトラブル内容は、制御エラーであるオーバータイムを除くと荷ずれのトラブルが32%もあり、自動化ラインの停止の大きな原因となっている。このトラブル復旧は人間の作業によって対処せざるをえないのが現状であり、それ故人間の高所からの墜落や、スタックークレーンに挟まれるという災害が発生している。しかし、無人化したにもかかわらず、荷ずれ処理のため人間が倉庫内に立ち入るためには、人間の安全を確保する安全システムを別に構築しなければならず現実的ではない。

本研究では、まず、運搬荷物を損傷することなく荷ずれを処理できる順応性を有するマニピュレータを開発する。次に、このマニピュレータを人間がマニュアルで遠隔操縦することにより、人間が従来行ってきた荷ずれ処理作業を安全に遂行することができる作業システムの構築を目指す。

5.1.2 マニピュレータの設計方針

さまざまな荷ずれの形態に対応すべく、修正作業は人間による判断を必要とし、また人間の技能がマニピュレータで発揮されなければならない。さらにマニ

ピュレータに要求される順応性は、マニピュレータ固有の受動的なコンプライアンスではなく、能動的コンプライアンスであり、これを調節できなければ作業に適応的に遂行できない。そこで、4.5節の空気圧式マニピュレータの基本構成に基づき、新たに荷ずれ処理用のマニピュレータを構成し、順応型マニピュレータへの適用を図るものとした。

本マニピュレータはスタックークレーンの移動機構部に設置され、人間がTVカメラを通した画像を見ながらマニュアルで操作して、高所の棚からずれている荷物を正しい荷姿に修正するためのものである。したがって、荷物を壊すことなく柔らかく棚に押し込めなければならず、また人間の操作ミスに対して周囲の構造物に損傷を与えてはならない。そこで、前章のゴム人工筋を用いて空気圧駆動方式とし、コンプライアンスを調節することにより誤操作による過大な接触力を吸収できるものとする。対象とする作業内容は荷物を棚に正しく押し込めることであるため、推力は10 kgf程度で十分と考えられる。また、荷ずれを修正するという作業内容から、2自由度（伸縮、旋回）のみ順応性を有する構成とした。

5.1.3 マニピュレータの構成

実際のマニピュレータの構成は、スタックークレーン上に取り付けられることを想定して Fig. 5.1-1(a)に示すような昇降(Z)軸を有し、Z一定の水平面上で伸縮(R軸)、旋回(θ 軸)の荷姿修正動作を行うものである。なお、 β 軸にはエンドエフェクタが取り付けられ、簡単な作業にも対応できる。R軸駆動

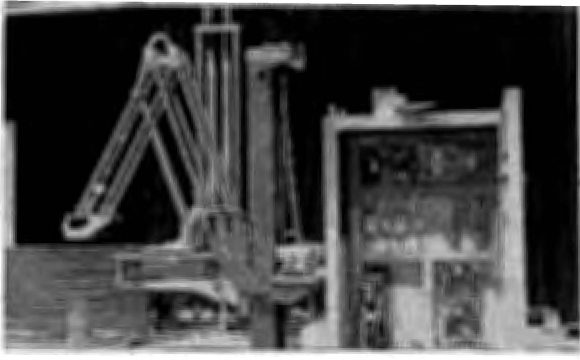


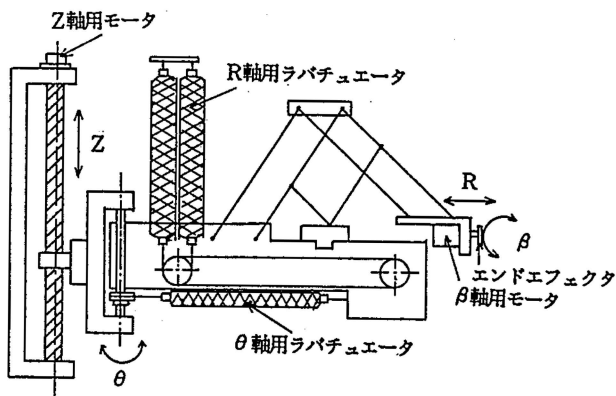
Photo 5.1-1 Trouble-shooting manipulator.
荷ずれ処理用マニピュレータ

機構は変位拡大機構として、パンタグラフリンクを構成し、伸縮ストローク 800 mm を得ている。 θ 軸は $\pm 15^\circ$ の可動範囲を持つ。R 軸駆動には有効長 900 mm のゴム人工筋を 2 本用いる。これらは、収縮力 95 kgf を発生する。 θ 軸駆動には有効長 400 mm のゴム人工筋を 2 本用いる。これらのアクチュエータは空気圧力 6 kgf/cm² が供給される空気絞り弁（前章の 0.4 m³/min 用）により圧力制御され、きつ抗的に駆動される。Z 軸は DC サーボモータでボールネジを駆動し、昇降ストローク 1000 mm を得ている。このモータにはブレーキが装備されており、荷姿修正作業中はブレーキロックにより Z 位置は固定される。

マニピュレータの外観を Photo 5.1-1 に、全体寸法図を Fig. 5.1-1(b) に示す。

5.1.4 システム構成と制御

各軸の位置指令はすべてホストコンピュータ側で行い、R、 θ 軸は特にコンプライアンス指令も行う。ただ

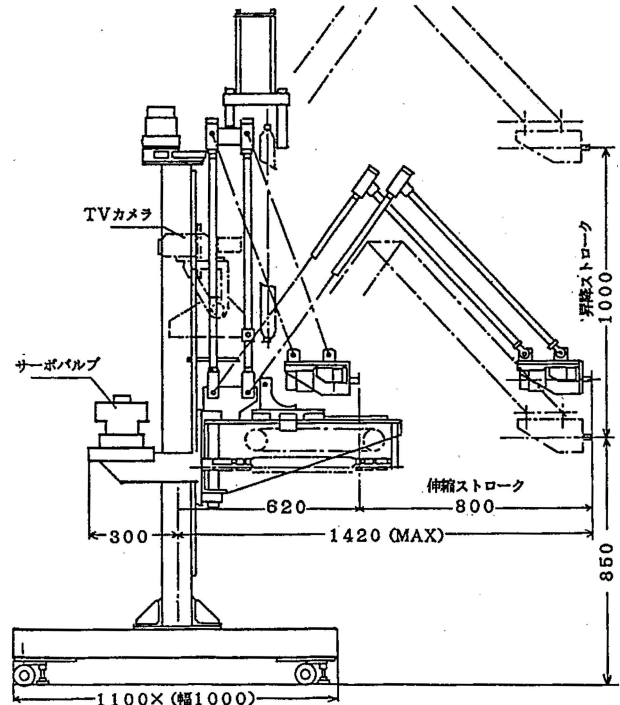


(a) 機構図

し、各軸とも位置制御系はコンピュータを介さずに構成されており、コンピュータの負担を軽くしている。R、 θ 軸のコンプライアンスは、位置制御系ゲインをコンピュータ側から変更することで設定される。これにより、動作位置にかかわらずコンプライアンスは常に設定値に保持される。TV カメラより取り込まれた画像は、操作のため視覚情報となると共に、座標計算処理されコンピュータ側に転送される。Fig. 5.1-2(a) に全体のシステムの制御構成を示す。

人間は、各軸の位置、コンプライアンス、力を指令装置（マニュアルコントローラ）より調整でき、全体のシステムとしてユニラテラル制御系を構成する。なお、位置指令装置は Fig. 5.1-2(b) に示すが、特に人間の腕の動作をマニピュレータの伸縮と旋回動作が模倣できるような腕指示型のマスターアームを用意した。また、ゴムセンサは Fig. 4.11 で述べたコンプライアンス指示装置である。

マニピュレータのコンプライアンスは、4.5 節と同様に、制御系のループゲインをゴムセンサの指令信号により変化させて調節される。なお、伸縮、旋回軸のコンプライアンス可変範囲はおおの、3.5 ~ 14



(b) 全体寸法図

Fig. 5.1-1 Structure of trouble-shooting manipulator.
荷ずれ処理用マニピュレータの構造

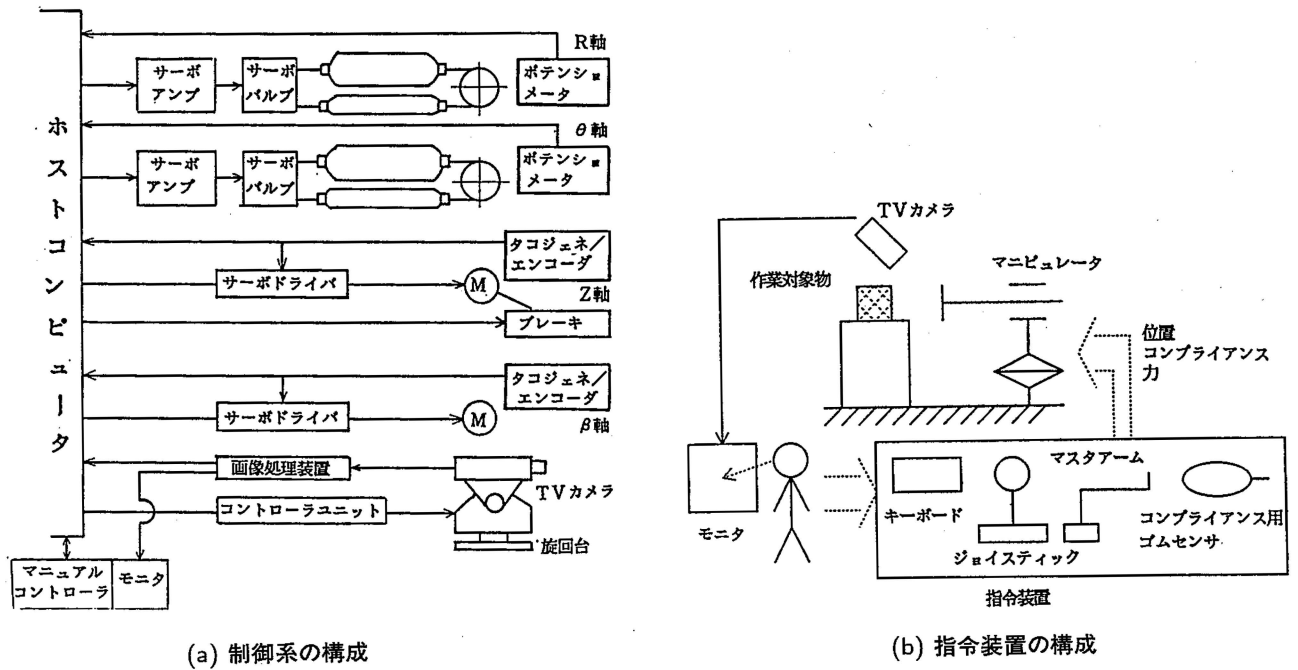
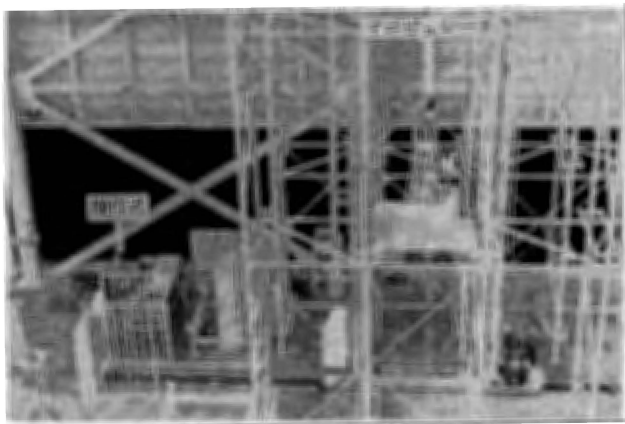


Fig. 5.1-2 System construction.
システム構成



(a) マニピュレータの作業



(b) 人間の操作

Photo 5.1-2 Situation of model operation.
モデル作業形態

mm/kgf, 0.007 ~ 0.028 rad/kgfm, (ただし, 空気圧力 6 kgf/cm², ストローク中央における値) である。

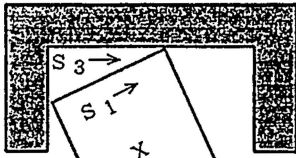
5.1.5 マニュアル操作による模擬作業

実際にマニュアルでマニピュレータを操作して, 所定の位置に荷物を正しく納める作業プロセスを想定した。Fig. 5.1-3(a) は作業プロセスの一例である。これは壁の凹部に荷物を押し込む作業で, 伸縮, 旋回を同時に動作させるものである。実際の作業シーケンスは, Fig. 4.10 に従い, 高コンプライアンス状態で

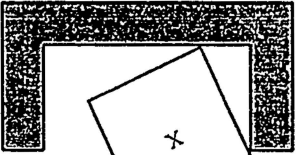
マニピュレータを荷物へ接触させ, モニタで接触確認後, 一定のコンプライアンスで荷物を押し込むものとした。また, Photo 5.1-2(a) はマニピュレータの作業状況を, Photo 5.1-2(b) は人間の操作状況を示す。

コンプライアンスが作業遂行時間と作業エラー頻度におよぼす影響を調べた結果, 同一作業の繰り返しのシーケンスでは徐々に作業遂行時間が短縮されて, ほぼ一定値に収斂し, またマニピュレータの軌跡が荷物の移動に追従してスムーズになることが分かった。

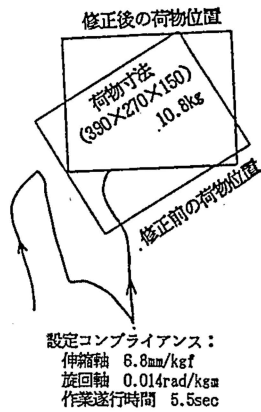
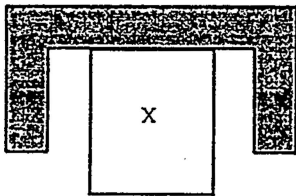
ステップ 1



ステップ 2



ステップ 3



(a) 作業プロセス例 (b) マニピュレータの軌跡

Fig. 5.1-3 Model operation.
モデル作業例

この傾向は荷物の重量を変えても同じであった。また、設定コンプライアンスを高くすると、作業遂行時間が若干長くなる傾向がみられた。また、最適なコンプライアンスを設定された場合と低コンプライアンスを設定された場合とを比較すると、後者が3倍エラーを多く発生した。Fig. 5.1-3(b)は模擬作業実行時のマニピュレータ軌跡の一例である。

さらに、制御系の位置偏差の監視により、マニピュレータの荷物接触検知と、荷物を押し込むための適正な力設定を実現することが可能となる。これは、マニピュレータのコンプライアンスが一定ならば、位置偏差の大きさにより荷物のコンプライアンスを推定できるからであり、さらに適応的にコンプライアンスを変化させて効率のよい作業が自動的に遂行できる。

5.2 玉掛け作業用安全システムの開発

5.2.1 はじめに

玉掛け作業は作業員自身の経験によって得られる判断や動作(コツ)を伴うため、高齢者も多く作業に従

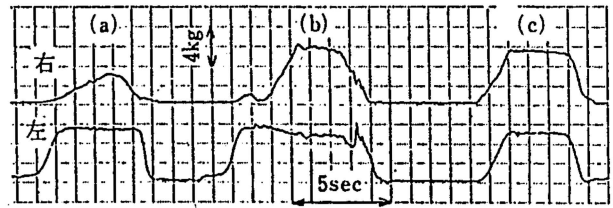


Fig. 5.2-1 Change of wire-loading.
ワイヤにかかる荷重変化



Photo 5.2-1 Automatic balancer.
自動バランスシステム

事している。しかし、重量物を扱うことから、簡単なミスで大きな災害を生ずるおそれがあり、特に高齢者では、視力や筋肉、平衡感覚などの低下によりミスを生じやすく、また苦汁作業であるため、安全な支援装置が必要となる。

そこで、本研究では、ワイヤ2本吊りによる玉掛け作業を想定し、作業員(特に高齢者)の判断のミスによって吊り荷のアンバランスを生じた時、これを自動的に修正して、地切り作業を安全に完了できる自動バランスシステムの開発を行った。

5.2.2 実験モデルにおける測定結果

自動バランスシステムの開発にあたり、まず実験モデルを用いて荷重の測定を行った。Fig. 5.2-1は天井走行クレーンのフックに2本のワイヤを掛けて、作業員がマニュアルでワイヤを掛け、位置を修正する過程をワイヤに掛かる張力で測定したものである。1回目(a)、および2回目(b)の状態では荷物の重心がずれているため、左右のワイヤに掛かる張力がアンバランスであるが、3回目(c)では荷物の重心がフックの位置に一致し、バランスしていることが分かる。

5.2.3 自動バランスシステムの構成

本システムでは、通常は作業員によって行われるワ

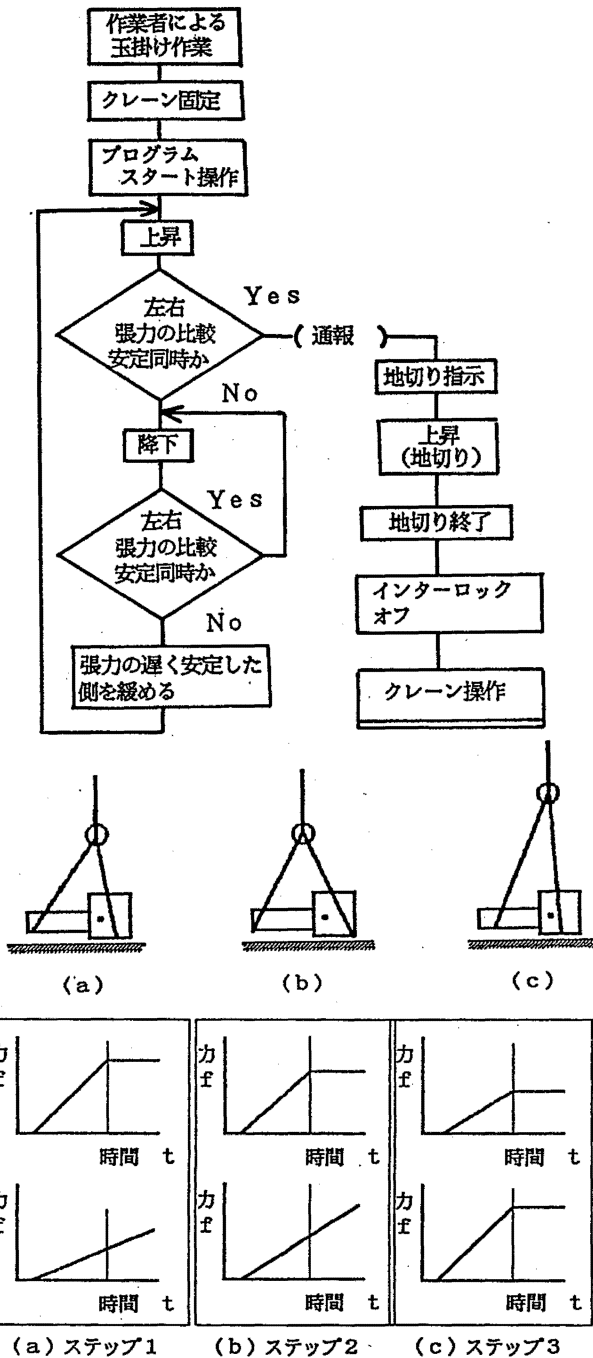


Fig. 5.2-2 A process of load lifting.
地切り作業の手順

イヤ掛け位置の修正を自動的に行うため、左右のワイヤの長さを自動的に調整できるバランス調整方式とした。Fig. 5.2-2 はその一連の作業をフローチャートに表したものである。

作業の手順は、まず、作業者が吊り荷にワイヤを掛けた後、緩んだワイヤを張るために荷物をわずかに

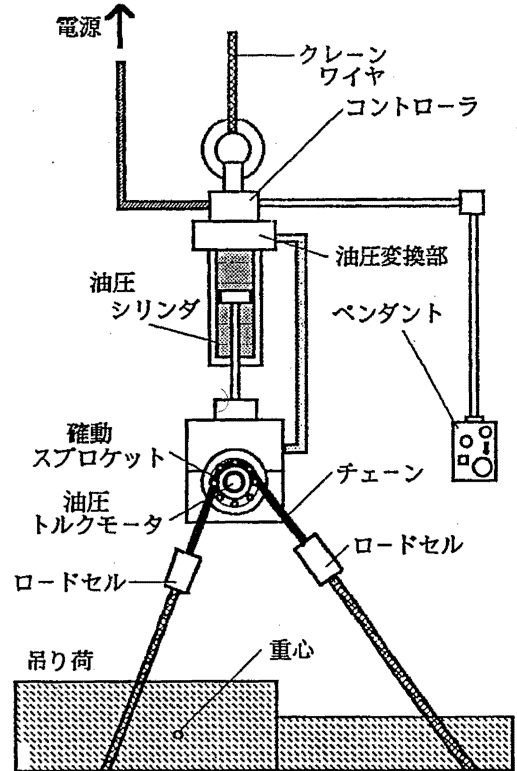


Fig. 5.2-3 Structure of automatic balancer.
自動バランスシステムの構成

Table 5.2-1 Specification of automatic balancer.
自動バランスシステムの基本仕様

駆動方式	油圧式
定格荷重	3ton
揚程	50mm
昇降速度	33mm/s
バランス速度	60mm/s
電源	AC200V3 相 50/60Hz
外形寸法 (W×D×H)	1,080×470×797mm
重量	378kg

吊り上げる。この時、左右のワイヤの張力を比較し左右の張力が釣り合ったところで地切り作業を行い、クレーンによる荷の搬送へと続く。

実際の自動バランスシステムの概要図を Fig. 5.2-3 に、また基本仕様を Table 5.2-1 に示す。このシステムは、荷を最大 50 mm 吊り上げるための油圧シリンダ (最大出力 5200 kg)、ワイヤの長さを変化させるためのチェーン、確動型のスプロケット、油圧トルクモータ (最大許容応力 210 kgf/cm²)、2 本のワイヤに掛かる張力を検出するロードセル、および操作用ペンダント等により構成される。なお、バランス自動調

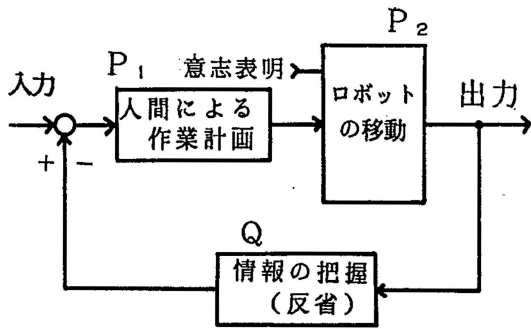


Fig. 5.3-1 Operation model of man-robot system.
人間ロボット系の作業モデル

整中は、クレーンによる荷の搬送を無効とするインターロック機構が働くため、クレーンによる荷の搬送は地切り作業終了後でないと作業者に委ねられることはない。本システムを用いることにより、高齢者や経験の浅い作業者であっても、安全に効率よく玉掛け作業を遂行できる。

5.3 搭乗型移動ロボットの安全作業システムの開発^{4,5)}

5.3.1 はじめに

自動生産システムの主たる目的は、作業の省力化と自動化である。しかし、現状では、作業のすべてが自動化できる訳ではなく、監視・保安作業や段取り作業、トラブル処理等は、多くの場合、人間側が担わざ



Photo 5.3-1 Self-maneuvering transportation.
搭乗型移動ロボット

るをえない。特に、近年、物流システムやFMS等により大型化した自動生産システムが産業現場に導入されているが、これらのシステムでは、機械側の広大な作業空間内での人間による作業（特に高所作業）が必要となる。

そこで、本研究では、このような自動生産システム内での高所作業を安全かつ容易に行うための搭乗

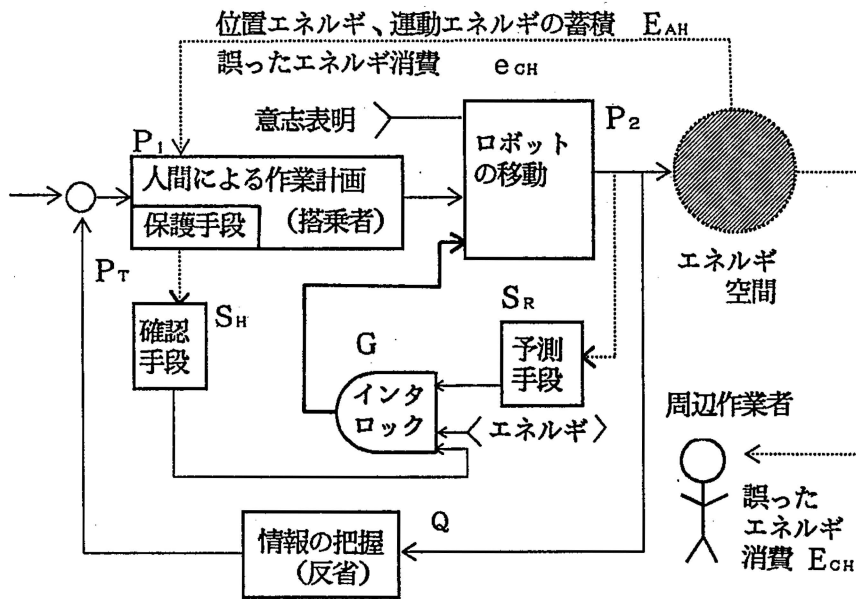


Fig. 5.3-2 Basic structure of safety operation system.
安全作業システムの基本構成

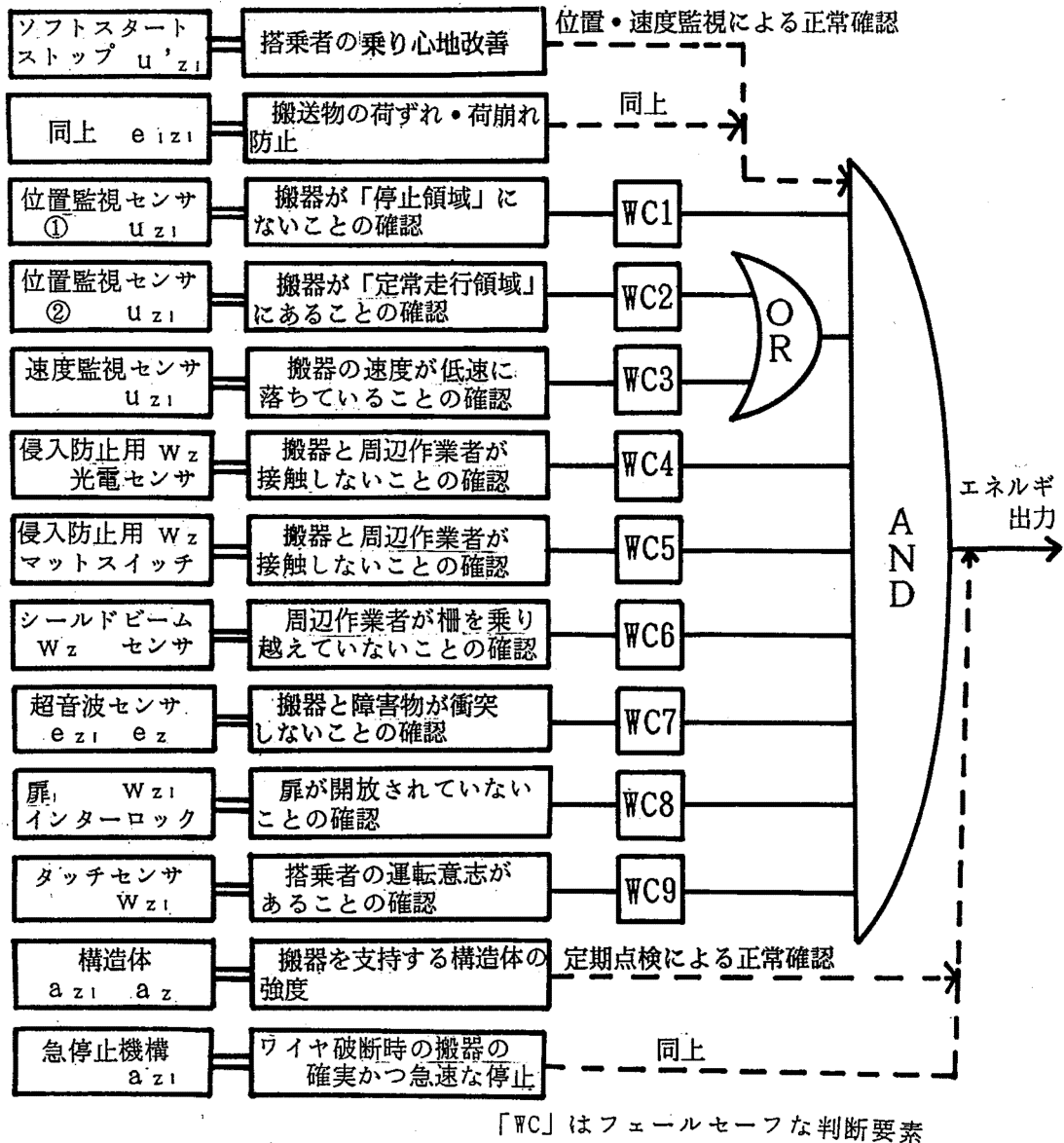


Fig. 5.3-3 Safety operation system of self-manuevering transportation.
搭乗型ロボットの安全作業システム

型移動ロボットのモデルを開発した。これは、人間がロボットの搬器に搭乗して、自らの操作によりロボットの運転を制御する装置であり、高所作業用ロボットや搭乗型スタッククレーン等に類似するものである。次に、このモデルを基に安全作業システムの基本構成に関する検討を行い、搭乗型ロボットの安全作業システムを開発した。

5.3.2 搭乗型移動ロボットの作業モデル

いま、移動を「人間または物体を、空間内の任意の位置から目標位置に向けて、最も適切な方法で到達させること」と定義すれば、実際の移動は次の各過程の

繰り返しによって遂行される。

- (a) 移動の遂行に必要な情報（現在位置、目標位置、周辺環境等）の把握。
 - (b) (a) を基にした移動計画（移動経路、移動速度等）の決定。
 - (c) 人間による移動の実行意志の表明。
 - (d) (a) ~ (c) のすべてが揃った時点での、実際の移動の実行。
 - (e) 実行後、目標位置との差を補正するための (a) ~ (d) の再実行。
- (a) ~ (e) の過程は、次の 2 つの基本的過程から構

Table 5.3-1 Constructive elements of safety operation system.
安全作業システムの構成要素

No.	装置	装置の説明
1	安全確認型 インタロック制御系	自動機械等に汎用的に使用できる 8 入力 AND/2 入力 OR のインタロック制御系。フェールセーフな構造のもの。
2	ソフトスタート/ ストップ機構	搭乗者の転倒や搬送物の荷ずれ・荷崩れが生じないように、搬器の加・減速度の適正化を図る機構。
3	侵入防止用 マットスイッチ 光線式センサ	搬器との接触が生じ得る危険空間内に人間がいないときに限り、搬器の運転を許可するフェールセーフな装置。x, y 方向をマットスイッチで、z 方向を光線式センサで監視。
4	乗り越え防止用 シールドビーム センサ	自動機械周囲の棚を人間が乗り越えていないときに限り、搬器の運転を許可するフェールセーフな装置。透過型光線式センサの投・受光器間をゴム・チューブでつないだもの。
5	位置・速度 監視センサ	搬器の位置と速度が正規の状態にあるときに限り、運転を許可するフェールセーフな装置。位置検出センサとしてはフェールセーフなりミットスイッチを、速度検出センサとしてはフェールセーフなパルスジェネレータを試作中。
6	超音波センサ	搬器の進行方向に障害物が存在しないときに限り、搬器の運転を許可するフェールセーフな装置。
7	扉インタロック	扉が閉じているときに限り搬器の運転を許可するフェールセーフな装置。
8	タッチセンサ	搭乗者の搬器内の存在と運転意志を確認するフェールセーフな装置。
9	急停止機構	搬器のワイヤが破断したときに搬器を急停止させる装置。

成される。第一は、人間が持っている情報（知識や経験）に基づいて、出力（移動）を得る過程 P であり、主に (b) ~ (d) の過程が関与する。この過程は、さらに、人間が情報に基づいて移動計画を決定する過程 P_1 と、この計画を基にロボットによって実際の移動を実行する過程 P_2 に分けられる。第二は、作業の結果（移動）に基づいて人間が情報（知識や経験）を得る過程であり、これには主に (e) や (a) の過程が関与する。

以上の過程は、工学的には、Fig. 5.3-1 のようなサーボ系としてモデル化できる。図は、このサーボ系が、人間による情報の把握(Q) → 情報に基づく移動計画の決定(P_1) → ロボットによる実際の移動(P_2) → 新たな情報の把握(Q)... という「トライ&エラー」の繰り返しによって、最終的には「目標位置への到達」という目的を達成することを示している。

5.3.3 安全作業とエネルギー

(1) ロボット側のエネルギー条件

Fig. 5.3-1 のモデルにおける重要な情報は、サーボ偏差（| 目標位置 - 実際の搬器の位置 |）である。こ

れは、ロボットのようなエネルギー出力を伴う系では、エネルギー空間（ロボットがエネルギー出力する可能性のある空間）として出力される。

この場合、災害はこのエネルギー空間（サーボ偏差）で生じるから、このサーボ偏差が許容されるものか否かは、あらかじめ予測されなければならない。そして、万一、災害が予測される時は、例えサーボ偏差が当初の目的を達成する範囲にあると判断されても、その行為を停止すると共に、災害の直接的な原因であるエネルギー空間を消散する必要がある。

Fig. 5.3-2 のセンサ S_R は、このための予測手段である。ここでは、「人間とエネルギー空間が接触しない」ことが予測手段 S_R によって確認されているときに限り、AND ゲート G によって移動ロボット P_2 にエネルギーが供給され、作業の実行が許可される。他方、これが確認できない時は、ロボットへのエネルギー供給を停止し、エネルギー空間を消散させて、人間とエネルギー空間の接触を確実に防止する。

(2) 人間側のエネルギー条件

(1) では、エネルギー空間と人間の接触によって、人

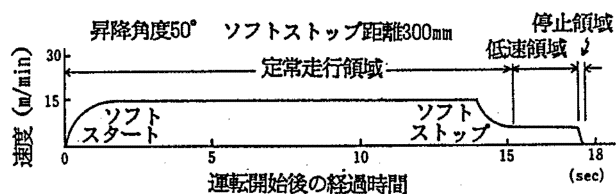


Fig. 5.3-4 Soft-start/soft-stop
ソフトスタート/ストップ

間に対し誤って「消費」されるエネルギーが問題となる。しかし、搭乗型移動ロボットから人間に伝達されるエネルギー E_H には、人間に対し誤って「消費」されるエネルギー E_{CH} の他に、人間に「蓄積」されるエネルギー E_{AH} もある。

ここで、 E_{AH} は、Fig. 5.3-2のように、搭乗型移動ロボットの搬器から伝達されることによって、人間に蓄積される位置エネルギーや運動エネルギーである。しかし、この蓄積の過程で、搬器の加速があまりに急激であると、人間は伝達されたエネルギーのすべてを E_{AH} として蓄積できずに、残余のエネルギー e_{CH} を人体内で「消費」することとなる。したがって、この「消費」を人間の許容能力の範囲内に抑えることが、作業を安全に行う上での重要な条件となる（同様な議論は減速時にもあてはまる）。

(3) 搭乗者の保護手段

Fig. 5.3-2 の搭乗者保護手段 P_T （以後、単に「保護手段」と略す）は、加減速時における人間への誤ったエネルギー「消費」 e_{CH} を、人間の許容能力（エネルギー消散能力）の範囲内に抑えるための手段である。ただし、ここで「搭乗者」とは搬器内の人間をいう。この手段には、次のような形態が考えられる。

- [A] 人間のエネルギー消散能力は、その姿勢の状態によって異なる。そこで、人間が与えられたエネルギーを消散しうる姿勢を保持していることを確認するための手段を設ける。
- [B] 人間に代わってエネルギーを消散しうる手段を設ける。
- [C] 人間へのエネルギーの蓄積または消散過程の時間的平滑化を図る手段を設ける。
- [D] 人間の持つエネルギーを、他のエネルギー形態（例えば回転体の持つエネルギー等）に変換した後、時間をかけて消散する手段を設ける。

Fig. 5.3-2 のセンサ S_H は、人間が保護手段 P_T によって確実に保護されていることを確認する手段である。これが確認できる時に限り、インタロック G に

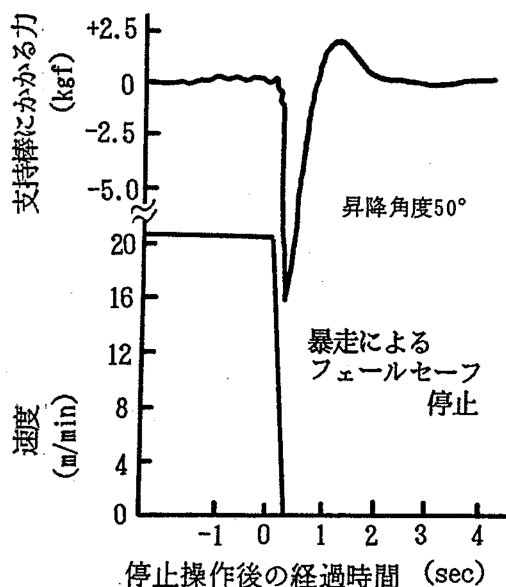


Fig. 5.3-5 Emergency stop by fail-safe mechanism.
フェールセーフ操作による非常停止

よってロボット P_2 にエネルギーが供給され、作業の実行が許可される。

5.3.4 ロボット側の安全作業システム

本研究で開発した搭乗型移動ロボットのモデルは、Photo 5.3-1のように人間が乗った搬器がフレーム上を昇降するものである。常時の搭乗者は一人とし、保全等に必要の道具、測定器等も人間と共に移動させる。また、本装置は、移動だけでなく、高所での作業足場ともなる。

Fig. 5.3-3は、以上の議論を基に構成した搭乗型移動ロボットの安全作業システムである。Table 5.3-1は、安全作業システムの構成要素である。

この装置では、搬器の加速時と停止時の乗り心地を改善するために、起動時は搬器を徐々に加速し、停止時は徐々に減速させる加減速度適正化のための機構（ソフトスタート/ストップ制御）を設けた。この効果を示したのが Fig. 5.3-4である。

この機構を適用するにあたっては、安全作業システムの故障や劣化、外乱、内部雑音、電源異常等により、誤ってロボットの運転出力を生じてはならない。このためには、システムがフェールセーフな構造であることを要する。

Fig. 5.3-3の位置・速度監視機構は、この要件を満足させるために設けた機構である。この機構では、搬器の運転領域を Fig. 5.3-4のように「定常走行領域」、「低速領域」、「停止領域」の3つに区分し、定常走行

Table 5.4-1 Comparison of light sources.
各種光源の特性値比較

白熱ランプ	ネオンランプ	発光ダイオード
5,14,28V 直流	100,200V 交流	電流制御 5 ~ 20mA
2 ~ 3 年耐久性あり	2 年程度耐久性あり	5 ~ 10 年耐久性あり 米粒大であるのでひとつのピースに複数個投入
ランプは発色せず	ランプ発色 橙・緑	ランプ発色 赤緑黄
色光はキャップ色 フィルター色で表示	色光はランプ色とキャップ フィルター色との組み合わせ	色光はランプ色とキャップ ・フィルター色との組合せ

領域では搬器の走行速度が定格速度（本機の場合 15 m/min）を越えていない時、低速領域では搬器の走行速度が十分減速されている（本機の場合 5 m/min 以下）時に限り搬器の運転を許可する。また、停止領域では搬器の運転を許可しない。このような構成とすれば、搬器の運転出力が正常である時に限り移動を許可し、搬器の運転出力が異常である時は移動を停止するフェールセーフな作業システムが実現できる。

5.3.5 人間側の安全作業システム

Fig. 5.3-3 のタッチセンサは、[A]の形態を満足させるために設けた装置である。

Fig. 5.3-5 は、ソフトストップ無効時（すなわち、暴走の結果フェールセーフ機構が作動して、搬器が急停止する場合）のタッチセンサの効果を確認するための実測データである。ここで、支持棒にかかる力とは、搭乗者が移動の際に運転命令を与えるための棒（Fig. 5.3-3 のタッチセンサが併設されたもの）にかかる力である。図からも明らかなように、この程度の減速度であれば、搭乗者は姿勢を保持する能力を有していることが確認できる。

なお、人間のエネルギー消散能力の限界に関しては、これまで必ずしも十分なデータが得られていない（例えば、人間が姿勢を保持するための条件は、国鉄の列車乗り心地基準³⁾や全身暴露に関する指針（ISO-2631）等が参考になる。しかし、これらは必ずしも e_{CH} に対する人間の許容限界を示したものではない）。そこで、新たに人間を対象とした姿勢保持実験を実施して、上記条件の追求を試みた。これは、文献¹⁰⁾を参考にされたい。

5.4 操作パネル盤の表示ランプの適正化

5.4.1 はじめに

ME 機器等で用いられる操作パネル盤は、人間と機械のインタ・フェースの役割を果たしており、これらパネル盤上においては、表示ランプの色光の相違を利用して機器の正常・異常等いくつかの安全に関する情報を人間側に伝達している。しかしこれら表示ランプに関しては、白熱ランプ・ネオンランプ・発光ダイオード (LED) 等多くの種類が出回っており、さらに同種類のランプでも赤・黄・緑等のフィルタを装着することにより、かなり多くの色光表現が可能になってきている。

そこで本節においては、ME 機器の産業現場への適用を図る際、操作パネル盤の表示ランプの選定を検討

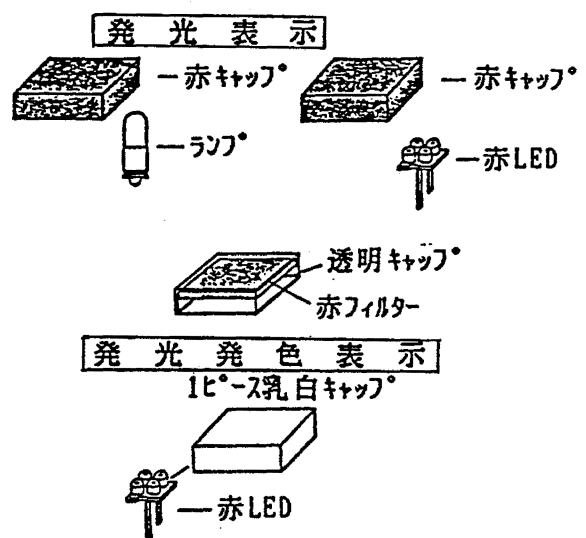


Fig. 5.4-1 Light sources and caps.
発光および発光発色表示の比較

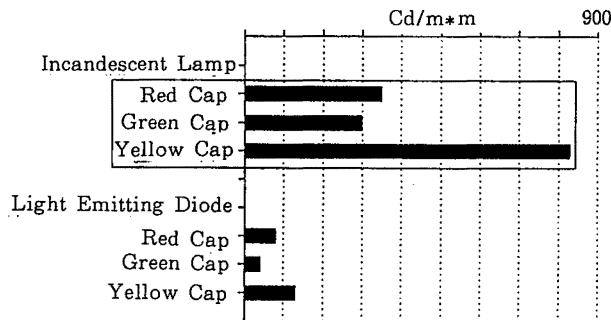


Fig. 5.4-2 Comparison of incandescent lamp and light emitting diode (LED).
白熱ランプと発光ダイオードの比較

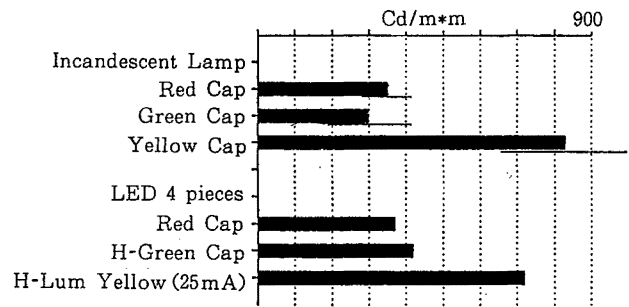


Fig. 5.4-3 Comparison of incandescent lamp and light emitting diode (High luminance).
白熱ランプと高輝度ダイオードの比較

するための要件について述べることにする。

5.4.2 目的

- [I] 現在市販されている表示ランプとフィルタに関して市場調査を行い、それらを使用目的に合わせて整理した。
- [II] LED は白熱ランプに比較して輝度が低く、特に明るい照明環境下においては点灯が分かりにくいという欠点を持つ。そこで白熱ランプと同等の輝度が得られる LED とフィルタの選定に関して実験を行い検討した。

5.4.3 結果

まず、目的[I]についての結果を述べる。Table 5.4-1 に各種ランプの特性比較を掲載した。消費電力に関しては LED が最も少なく、白熱ランプに比較して約 1/1000 の電力で点灯可能である。耐久性に関しては LED の耐久性が長く、白熱ランプに比較して約 3 倍長持ちする。近年 LED が多用化されているが、このような特性値に裏付けされている。

一方、LED は目的[II]で述べた欠点も有している。Fig. 5.4-1 に発光表示と発光発色表示の相違が示してある。発光表示とは、例えば白熱ランプに赤フィルタを装着した場合の表示法であり、消灯時はフィルタ色の赤であり、点灯時その赤が白熱ランプにより発光する。

これに対し、発光発色表示とは光源自体が色光を持つ（ネオンランプ・LED）場合にのみ可能になる。例えば、赤の LED に乳白色のフィルタを装着した場合の表示法であり、消灯時は乳白色であり、点灯時は LED により赤で発光、発色する。

次に、これらランプの使用目的からみた検討を行う。機械側の情報を一方的に人間に伝達する場合、パイロットランプが用いられる。このランプは消灯時

より点灯時において色光の識別を必要とする。その使用法は 2 通りあり、機器の正常状態を常時点灯で人間側に伝達するものと、異常・危険状態を消灯から点灯への変化で伝達するものがある。

これに比較して、人間側が機械に情報を伝達し、機械側ではその確認情報を人間に伝達するという、相互情報交換に用いられるランプがある。これは照光押しボタンスイッチと呼ばれており、ボタンの内側に光源を組み込んだスイッチである。（JIS C4521）。これはランプがスイッチの役目も果たすため、消灯時における色の識別と点灯時における色の識別、消灯と点灯の輝度差等、それが使用される時の必要条件は、前述したパイロットランプより厳しくなる。しかし市場調査結果によると、パイロットランプの製造メーカーが照光押しボタンスイッチの製造も手掛けている経緯があるため、これら 2 つの光源とフィルタには同じ材質が用いられているのが現状であった。

次に目的[II]についての結果を述べる。LED は消費電力・耐久性の両面において従来のランプより優れているが、輝度が低く特に明るい照明環境下においては白熱ランプに比較し点灯が識別しにくい欠点を有する。Fig. 5.4-2 は白熱ランプにフィルタを装着し発色させたものと LED の輝度を比較したグラフである。LED の輝度は白熱ランプに比較して約 1/10 の輝度でしかない。

そこで LED の輝度を高めるための改善策を検討した。1 ピース内に 4 個の発光ダイオードを組み込んだ LED を計測し白熱ランプと比較した。赤については白熱ランプと LED の輝度は等しくなる（Fig. 5.4-3 中 LED 4 pieces Red Cap）が、緑、黄については白熱ランプと比較しておのおの約 45%、60% の輝度しか得られなかった。

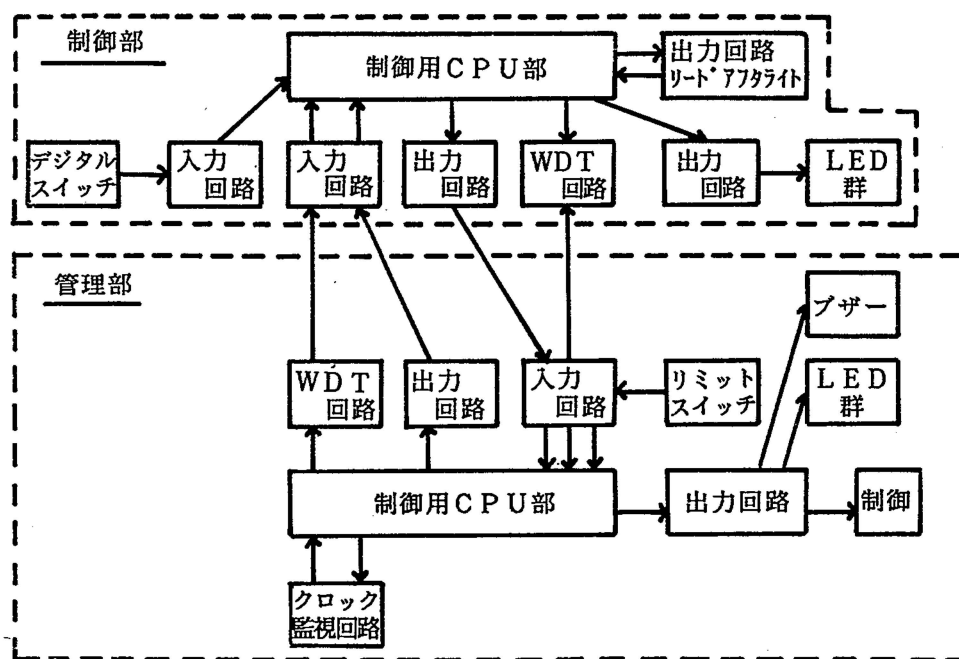


Fig. 5.5-1 Block-diagram of double CPU system.
二重 CPU のブロック・ダイアグラム

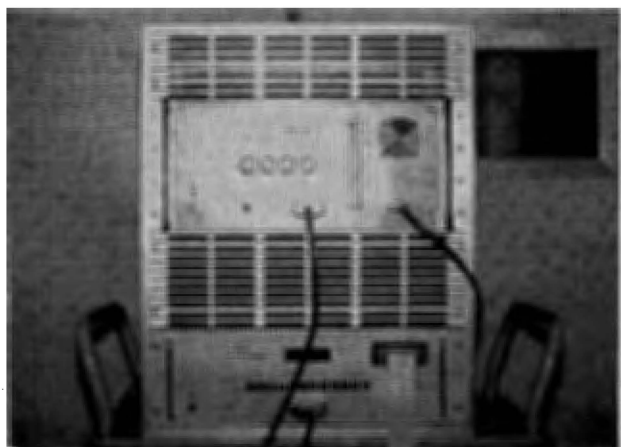


Photo 5.5-1 Double CPU system.
二重 CPU

そこで、緑と黄の LED については、従来のフィルタに比較して光の拡散・透過性の高いハイ・カーボネイト素材を使用したフィルタを装着し輝度を測定した。緑については白熱ランプの輝度より約 40% 高い結果が得られた (Fig. 5.4-3 中 H-Green Cap) が、黄については白熱ランプに比較して約 60% の輝度しか得られなかった。

そこで黄の LED については、最近開発された高輝度 LED の使用を試みた。高輝度 LED とは 1 つの発光ダイオードの大きさが米粒の 1/10 程度であるた

め、1 ピース内に 8 ~ 10 個のダイオードを組み込むことが可能な LED である。計測の結果、白熱ランプに比較して約 90% の輝度が得られた (Fig. 5.4-3 中 H-Lum Yellow (25 mA))。

LED は白熱ランプに比較して消費電力が低く耐久性が長い利点を持つが、併せて輝度が低く明るい照明環境下では点灯がわかりにくい欠点を持つ。

しかし、この実験の結果、赤の LED は 1 ピース内に 4 個の発光ダイオードを組み込んだものを使用し、緑はそれにハイ・カーボネイトのフィルタを装着して使用し、さらに黄は高輝度 LED にハイ・カーボネイトのフィルタを装着して使用すれば白熱ランプと同程度の輝度が得られ、LED の欠点を改善できることがわかった。

5.5 二重 CPU 制御方式

5.5.1 はじめに

マイクロエレクトロニクス (ME) 機器の普及と共に、今や電磁ノイズが ME 機器におよぼす影響の問題は、電磁ノイズが機器の誤動作のみならず労働災害の原因となるため社会問題となっている。また、高年齢労働者の増大の状況に対して、より信頼性の高い機器が求められている現状にある。ここでは、故障や電磁ノイズ等による機器の誤動作防止のための信

Table 5.5-1 Voltage of noise which is transmitted from power source to CPU.
ノイズシミュレータによって CPU に伝導したノイズレベル

ノイズシミュレータ の出力電圧	各 CPU 基板内でのノイズ電圧					
	制御用 CPU 部			管理用 CPU 部		
	Vcc	NMI	RESET	Vcc	NMI	RESET
300V	0.8V	1.2V	0.9 ~ 1.0	0.3V	0.7V	0.6 ~ 0.7
400V	1.3 ~ 1.4	1.7V	1.2 ~ 1.3	0.6V	1.1 ~ 1.2	1.1 ~ 1.2
450V	1.6V	2.0 ~ 2.1	1.5 ~ 1.7	0.8V	1.3 ~ 1.4	1.3 ~ 1.4
500V	—	2.3 ~ 2.5	1.7 ~ 1.8	—	1.5 ~ 1.6	1.4 ~ 1.6

表中のノイズ電圧は、それぞれの信号線の上にプラスで乗ったノイズ分の電圧で、それ自身の電圧 5V は含まない。

Table 5.5-2 Detection rate of malfunction.
機器暴走検出の割合

ノイズシミュレータ の出力電圧	35ms			17ms			10ms		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
200V	100%	0%	0%	83%	0%	17%	100%	0%	0%
300V	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%
400V	100%	0%	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%
450V	100%	0%	0%	43%	71%	14%	—	—	—
500V	17%	50%	33%	—	—	—	—	—	—

A は管理用 CPU による誤動作検出, B は制御用 CPU, C は両 CPU 暴走。35ms, 17ms, 10ms のノイズ発生周期でノイズは注入する。

信頼性向上の手法として二重 CPU を考案した。以下、その機能、動作特性等について紹介する。

5.5.2 二重 CPU の概念

通常の ME 機器は CPU (中央処理装置), 入出力回路, WDT (ウォッチドックタイマ) より構成される。入力回路は機器の動作条件などを外部から指示するもので、出力回路は ME 機器の被制御部に指示を与えたり、機器内の動作状況をプリンタなどに出力するものである。また、CPU は機器内の動作を制御するもので、WDT は CPU から一定時間毎に信号を受信し CPU が正常に動作しているか否かを監視するものである。

本報告で提案する二重 CPU は、Fig. 5.5-1 に示すように基本的には前述の ME 機器を二重系とすることにより信頼性を向上させたものである。すなわち、一方の CPU (制御部) が機器の動作を制御しており、他方の CPU (管理部) が制御部の動作を監視しているものである。

具体的には、制御部の WDT が異常を検知した場合

に、この WDT の動作を監視している管理部が WDT の異常信号を受けて、制御部に対してリセットを掛け、ME 機器の暴走を抑えるものである。その他の信頼性向上手法として、クロックの波形監視、および簡単な演算などを行わせることによるセルフチェックの機能を有している。

5.5.3 開発した二重 CPU

前述の概念に基づいてモータを制御する二重 CPU を用いた ME 機器を開発した (Photo 5.5-1)。同機器において、WDT 監視回路と付随した WDT 監視回路用ソフトウェアについては、制御部、管理部の両 CPU の相互監視となっており、CPU より一定時間内に書き込みを行わないと、自動的に消去される回路構成となっている。これを制御部、管理部 CPU の両者に取り付け、両 CPU からのおおの WDT 回路に一定時間内に書き込みを行うようにし、この出力を他方の CPU に読み込み、一定時間内に書き込みが行われているか否かをチェックするものである。すなわち、管理部を動作させ、このドックタイマを監視して

いる時にドックタイマが暴走すれば、それを検出し、その時間（日付，時分秒）をプリンタに出力する。また，LED にも表示する。同時に制御部 CPU を初期状態に戻してリセットを掛け，制御部を正常動作に復帰させる。

その他，管理部は制御 CPU に対し，リセット，ダンプ，クリアの各コマンドを送信することも可能である。なお，管理部は電磁ノイズなどによる誤動作を防止するために遮蔽を十分実施すると共に，制御部とは異なる電源を用い，アースをとる必要がある。

次に本機器の性能評価を行った。性能評価法としては，電源ラインにノイズシミュレータを用いてノイズを注入し，機器の暴走の状況を調査した。まず電源ラインを伝導したノイズが ME 機器内にどの程度侵入するかを実験したところ，Table 5.5-1 に示す結果が得られた。通常 TTL（トランジスタ・トランジスタ・ロジック）IC の許容電圧は + 2.4 ~ - 0.4V 程度であるため，ノイズシミュレータより 300V 程度のノイズを発生させた場合でも，そのノイズは十分誤動作の原因となりうるということがわかる。さらに，本機器の誤動作の発生，検出状況を実験したところ，Table 5.5-2 に示す結果が得られ，ノイズシミュレータの出力電圧が 400V 以下の場合，主に CPU の暴走は管理部で検出された。したがって，二重 CPU によるシステムはノイズ電圧が低い範囲から ME 機器の暴走を検出することができ，信頼性の向上が示された。

なお，今回は制御部，管理部双方にノイズを注入したため両者が暴走を起こしたが，管理部 CPU の電源にはノイズカットトランスを使用するなどの対策を施すことにより，より信頼性の高い ME 機器が製作可能である。ただし，信頼性の追求により暴走の可能性はゼロとはならないため，実際の運用に当たってはフェールセーフなインタロックが必須である。

5.6 ノイズ診断装置

5.6.1 はじめに

近年産業用ロボットを始めとしたマイクロエレクトロニクス (ME) 機器が生産現場等で生産性の向上，労働者の負荷の軽減等のために普及している。これらの機器は動作制御のために IC 等の電子回路を用いているが，性能の向上と共にデジタル信号は周波数が数 + MHz，電圧が数ボルトと高周波，低電圧となっている。したがって，リレー，モーター，遮断器，静電気放電等の電磁ノイズが伝送路に重畳すると，こ

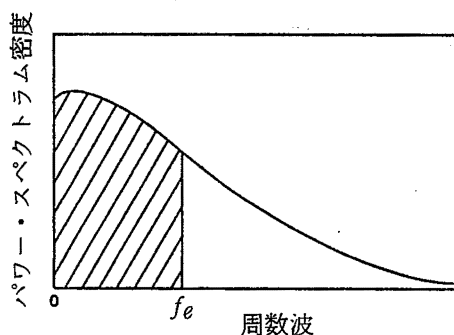


Fig. 5.6-1 Power spectrum density.
パワースペクトラム密度

れがデジタル信号に揺らぎをもたらし，時として伝送信号の誤りを誘引する。信号の伝送誤りは機器の誤動作につながり，機器周辺で作業する労働者の災害を招来することとなる。労働者の中で高齢者の占める割合も増加しており，以前にもまして安全な機器が求められる状況となっている。そこで，より機器の信頼性を向上させるための手法として，機器がノイズを受けた時にはこれを判断し，機器の暴走を遮断するノイズ診断装置を開発したので以下装置の動作特性等について紹介する。

5.6.2 ノイズ診断手法

ノイズの診断手法としては，診断精度の点で，従来からも提案されている主として波形に着眼したパワースペクトラムエッジ法と，規則性に着眼した相互相関法，また伝送路を通過した信号の面積を正常信号（ノイズをまったく含まない信号）のそれと比較する方法（以下面積法という）がある。以下これらの手法の得失等について比較し，本研究で採用する手法を検討する。

1) パワースペクトラムエッジ法

パワースペクトラムエッジ法とは，スペクトラムエッジというパラメータを用いた手法で， $P(f)$ をパワースペクトラム， E を周波数領域の全エネルギーとすると， α (%) のスペクトラムエッジ f_e は

$$E \cdot \alpha = 100 \int_0^{f_e} P(f) \cdot df \dots\dots\dots (5.6-1)$$

で定義される。例えば，Fig. 5.6-1 に示すように 50 (%) のスペクトラムエッジの時，直流成分からスペクトラムエッジ f_e までのエネルギーは全エネルギーの 50 (%) となっている。通常，伝送路へ侵入するノイズは信号の有するスペクトラムより高周波である。したがって，信号のスペクトラムエッジがあらかじめ

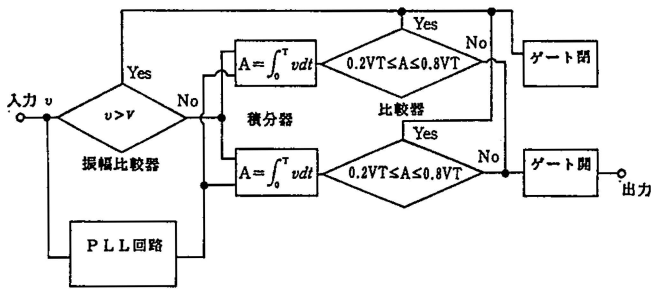


Fig. 5.6-2 Construction of self-diagnosis for reporting malfunctions.

ノイズ診断装置の基本構成

分かっている場合、これを越えたスペクトラムエッジが現れた時には伝送路に電磁ノイズが侵入したと判断できる。このスペクトラムエッジの値によって電磁ノイズ侵入の有無を判断するものである。

本手法は、精度という点では優れているものの、計算過程にフーリエ変換があり、その計算には現在の技術力においてはms オーダであるが、デジタル信号のパルス間隔はμs 以下であり、すべてのパルスについてノイズの侵入の有無を診断することは不可能である。

2) 相互相関法

本手法は、ノイズの重畳した信号について、信号に同期した正常信号との相互相関によりノイズの影響を排除してデジタル信号の 0, 1 を判断するものである。

まず周期 T_0 の伝送信号 $S(t)$ と同じ周期の正常信号 $y(t)$ との相互相関関数 $R_{xy}(\tau)$ は

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \{S(t) + n(t)\} \cdot y(t - \tau) dt \dots \dots \dots (5.6-2)$$

となる。上式において、通常、信号とノイズは無相関と考えられ、また、上式の第2項は零となるため、(5.6-2)式は次のように書き換えられる。

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} S(t) \cdot y(t - \tau) dt \dots \dots \dots (5.6-3)$$

上式について、伝送信号と正常信号とが同期している、すなわち $\tau = 0$ の時、相互相関係数は最大となる。この性質を利用して、伝送信号の 0, 1 を診断しようとするのが相互相関法である。乗算、積分の二つの演算を必要とするため、高速の処理は現在のところ

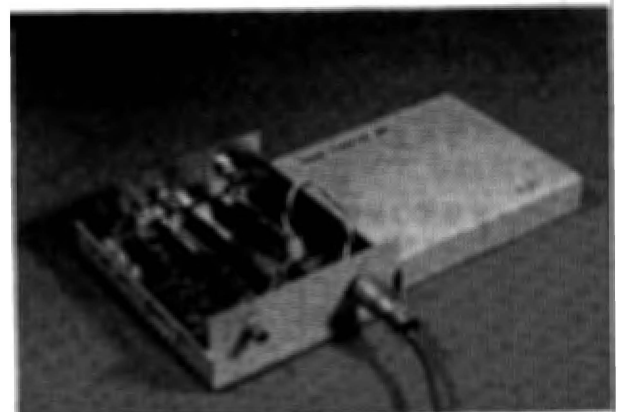


Photo 5.6-1 Self-diagnosis for reporting malfunctions. ノイズ診断装置

困難である。

3) 面積法

これは、診断の対象を、信号は1つの方形波パルス(振幅 V 、パルス幅 T)を1ビットに対応させたもの、ノイズはこの条件を満たさない波とし、波の振幅の時間積分値によって診断する手法である。すなわち、次の積分値

$$A = \int_0^T v(t) \cdot dt \dots \dots \dots (5.6-4)$$

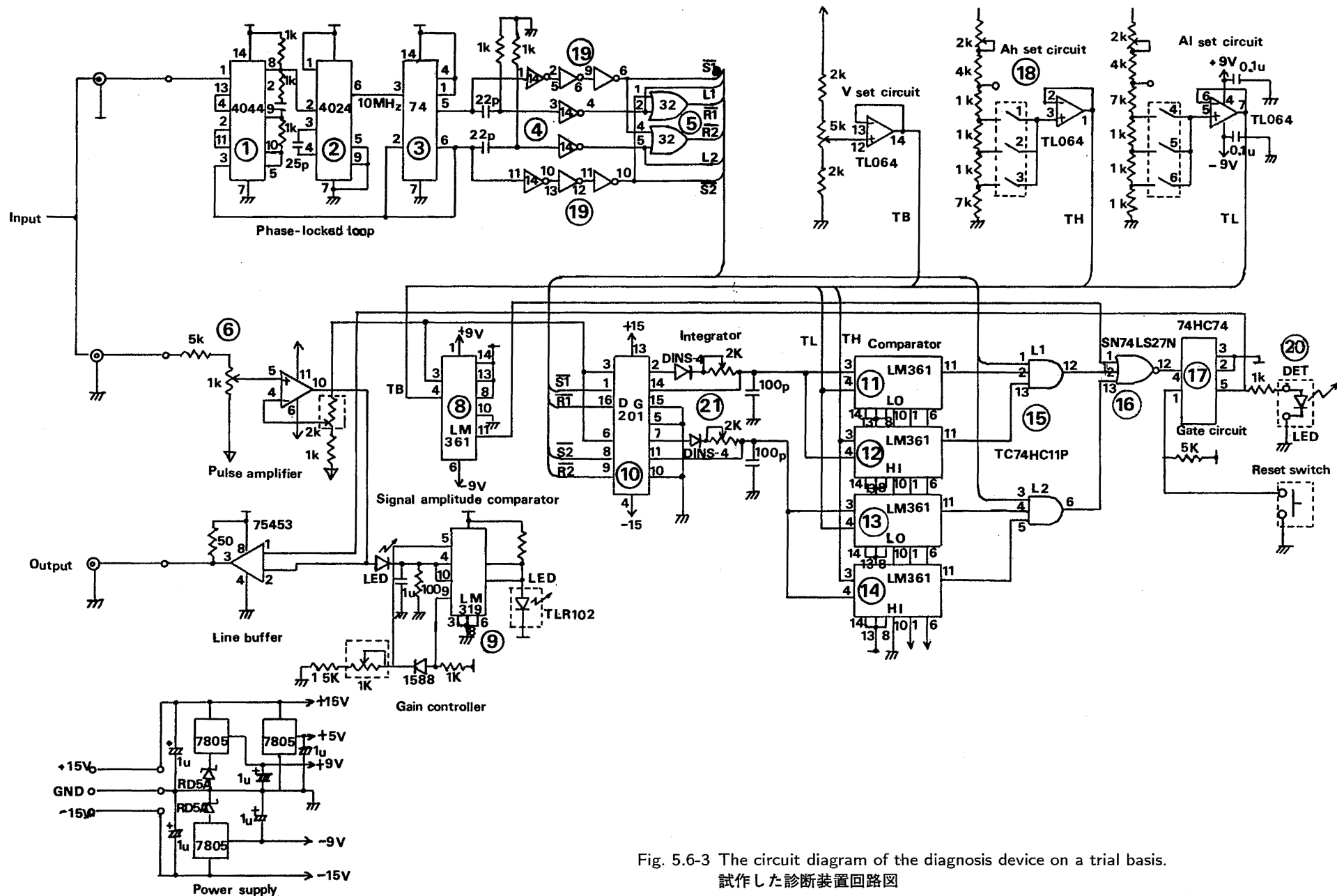
$v(t)$: 伝送路に入力された任意の波の振幅……

に着眼し、その値が、 $A \neq VT$ ならばノイズであると判別する診断法である。

上述したノイズ診断手法について、診断に要する時間を比較すると、スペクトラムエッジ法、相互相関法は、面積法に比べて長時間を要することが判明したが、前二者は後者に比べて精度の点では優れている。現在、ME機器の制御部に使用されるデジタル信号は数+ MHzと高周波であり、今後もより高速化することが予想されることから判断すると、精度の点では劣るものの高速で処理可能な面積法が実用的であると判断されることから、本研究では面積法を採用することとした。

5.6.3 面積法による診断装置の構成

Fig. 5.6-2は、ノイズ診断装置の基本構成で、振幅のレベルを判断する振幅レベル比較回路、伝送信号を時間積分する積分回路、積分値を比較する比較回路、伝送路を伝送するノイズを遮断し正常信号のみを通過させるゲート回路、および伝送信号のクロック周波数に同期して診断装置を動作させるためのクロック同期PLL回路より成っている。



産業現場への適用

Fig. 5.6-3 The circuit diagram of the diagnosis device on a trial basis.
試作した診断装置回路図

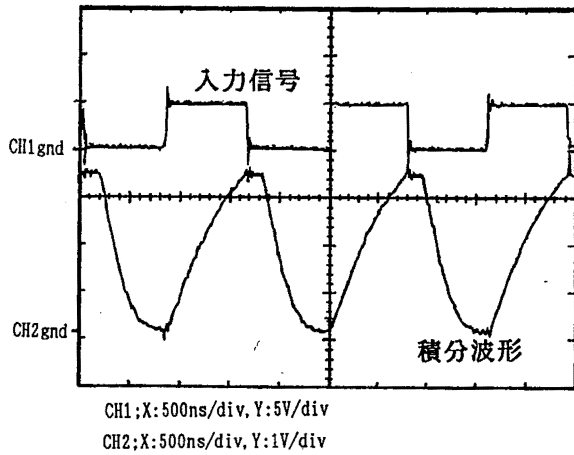


Fig. 5.6-4 A distortionless input signal and its integrated wave form.
正常入力波形と積分波形

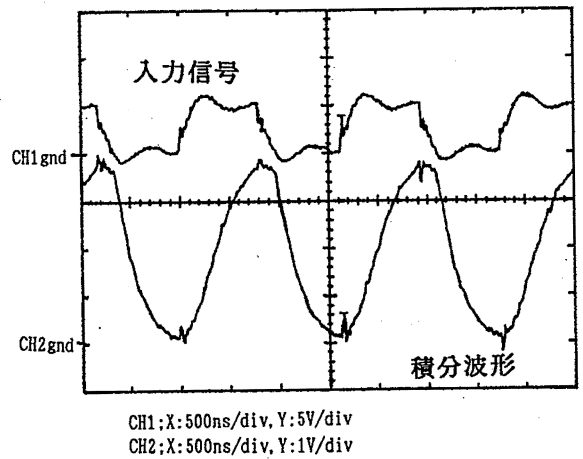


Fig. 5.6-5 A distorted input and its integrated wave form (I).
歪入力波形と積分波形 (I)

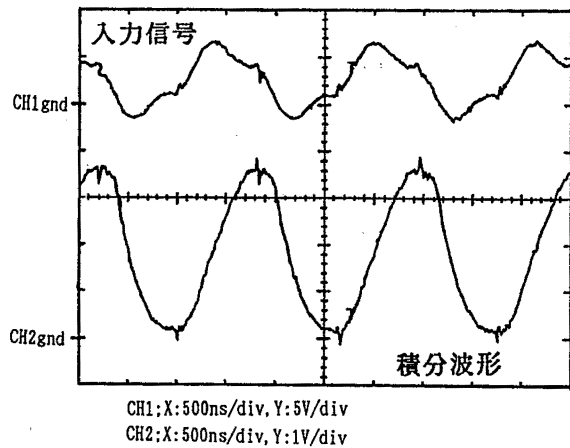


Fig. 5.6-6 A distorted input and its integrated wave form (II).
歪入力波形と積分波形 (II)

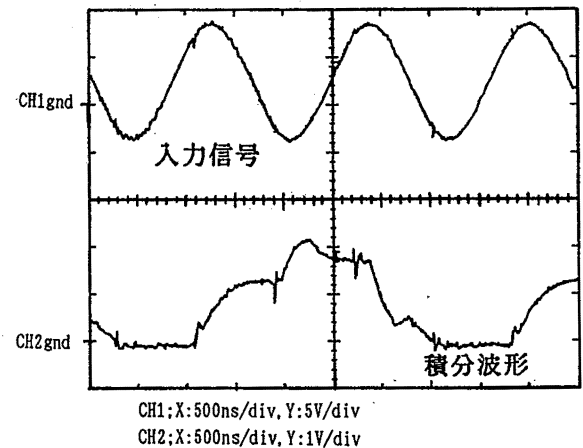


Fig. 5.6-7 A distorted input and its integrated wave form (III).
歪入力波形と積分波形 (III)

本装置は伝送信号が伝送路に侵入すると次のように動作する。いま、ノイズ診断装置に入力された伝送信号の振幅が正常信号のそれ V を超過していると、初段の振幅レベル比較回路でノイズと判断されてゲートが閉じる。また、振幅が V 以下であると、伝送信号の時間積分がなされ、積分値 A が $At \leq A \leq Ah$ の時、比較回転によってノイズと判定され、ゲートが閉じる。

ここで、ノイズと判定する積分値の上限 Ah については、伝送路に侵入する多くのノイズがスパイク状の波であるため、これと正常信号（方形波パルス）との区別ができればよく、Photo 5.6-1 に示す試作装置では $Ah = 0.8VT$ と設計した。また、下限は論理反転が起こらないノイズであればゲートを通過してもよい

ということから $At = 0.2VT$ と設計した。なお、試作装置では、上述の積分を時間的に連続して実施するため、および積分に要する動作時間の遅れを考慮して、Fig. 5.6-2 に示すように二つの積分回路を設け、クロックパルスのトリガによって交互に動作するように設計した。設計した具体的回路を Fig. 5.6-3 に示す。動作は前述の通りであるが、主な回路部についてその概略を述べる。試作装置に入力された信号は、入力信号に同期して試作装置を動作させるためにクロック同期 PLL 回路に印加され、同時に入力パルスアンプに送られる。入力パルスアンプが用いられているのは、比較回路が入力信号の振幅が $5V$ の時に正常に動作するように設計されているために、比較回路に送られる信号の振幅を $5V$ に調整するためである。こ

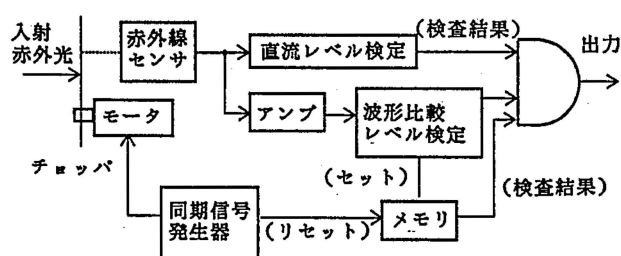


Fig. 5.7-1 Structure of three dimensional human detector.
三次元人体検出装置の基本構成

のあと振幅比較回路(⑧)で、IC-TL064で発生させた比較レベルと比較され、ノイズと判定された場合には⑩のLEDが点灯し、同時にIC-74HC74(⑰)のゲートが閉じられる。また、振幅比較回路を通過した信号は、⑫の受動素子(R, C)を用いた積分回路で積分を行い、⑬で発生させた積分値比較レベル信号との比較を⑪～⑭のコンパレータで行う。なお、本試作装置はクロックが5 MHzまでのデジタル信号の診断が可能なのである。

5.6.4 診断装置の動作特性

開発した診断試作装置の実用性等の検討を行うため、同試作装置の性能評価試験を行った。まず正常信号(クロック周波数1.22 MHz)を入力した場合の動作であるが、Fig. 5.6-4に示すような入力波形、積分波形が得られ、比較回路も正常に動作し、この時は問題なく動作した。これに対し、Fig. 5.6-5～7のようにノイズが重畳した伝送信号が試作装置に入力された場合、試作装置はすべてノイズと診断し、信号伝送は遮断された。したがって、すべての形態のノイズ信号について検討した訳ではないが、多くノイズ信号のノイズ診断が可能なが分かり、ノイズ診断に有用なことが確認された。

5.7 三次元人体検出装置

5.7.1 はじめに

産業用ロボットは、産業現場における生産性の向上、省力化等に貢献しているが、その一方でロボットの可動領域に作業者が不意に侵入したことによる新たな労働災害も発生している。ここでは、前述の労働災害防止対策として、ロボット側で空間的な広がりを持つ危険作業領域を監視し、ここに侵入した作業者を検知し、ロボットを停止させるシステムを構成した。これは、非常停止を担う安全確認形のセンサがカバーしきれない領域を補完し、あるいはその外側の領域をカバーして早期に危険状態を検知するものである。

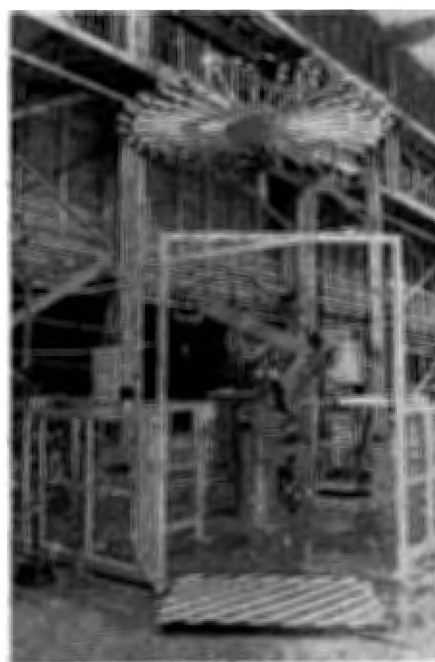


Photo 5.7-1 Three dimensional human detector.
三次元人体検出装置

以下、そのシステムの概要を述べる。

5.7.2 三次元人体検出装置の構成

人体から放射する赤外線は、体温を 36°C とすると $9.36\ \mu\text{m}$ をピーク波長とする赤外線である。今回はこの波長領域で高感度な熱型センサである焦電センサを三次元人体検出装置として用いた。

焦電センサは $7\sim 14\ \mu\text{m}$ 波長の赤外線のみ透過させる光学フィルタ、PZTセラミックの焦電素子、電圧増幅用FET(電界効果形トランジスタ)から構成される。また、人体から放射される赤外線エネルギーは $0.05\ \text{W}/\text{cm}^2$ と微弱なため、光学レンズでそれを集束し、さらにアンプにより帯域増幅する。帯域アンプは人間の移動速度に合わせたバンドパスフィルタを構成しており、不要な雑音を除去すると共に人間の速度に依存しない検出感度特性を持たせている。なお、焦電素子は人体温度と背景温度(室温)との温度差を捕えて微分出力するものであるが、これを2個逆極性となるように接続して用いることにより、緩やかな室温変動や振動の影響は除去している。

三次元人体検出装置は、この焦電センサを対象システム(産業用ロボット)の真上に26個円周状に取り付け、ロボットの可動範囲を考慮して、ロボットの中心から半径 $1.5\sim 4.0\ \text{m}$ の円環状(300°)に検知領域を設定した。この検知領域は、光学ミラーにより半径方向に3分割される。そのためロボットの中心へ

人間が近づくほど焦電素子への有効エネルギー入射面積が増すことになり、センサの検出感度は上昇する。

5.7.3 自己診断回路の構成

焦電センサは人間の接近という危険状態を検出するものであるから、人間がいないときのみロボットが作動できるインタロックに対応するためには否定演算が必要となるが、センサの故障で危険状態が検知できなくなるおそれがある。そこで焦電センサの電氣的な故障モードを調べたところ、焦電素子の故障では赤外線を入射しても微分出力は発生せず、FETの故障では定常直流バイアス電圧がゼロか電源電圧に推移することが確認された。そこで、直流バイアスの定常レベルに微分（交流）出力信号が重畳している時のみ、焦電センサの正常動作が確認できる回路を構成した。

Fig. 5.7-1 は自己診断処理回路であり、焦電センサ受光面の前にモータと羽根により構成されるチョッパを設けている。背景と放射率の異なる羽根を用いることにより、背景（室温）と羽根が同温度であっても入射エネルギー変化は生じて交流出力信号が得られる。すなわち、チョッパは焦電センサに動作確認を行うための疑似入力を与えていることになり、そのチョッピング周波数は同期信号発生器で管理される。

センサの出力信号は交流と直流成分に分けられ、直流成分（正常確認信号）はウインドウコンパレータによりレベル検定される。一方交流成分（検知信号）は、チョッピングの1周期毎に前後の波形を比較してレベル検定される。すなわち、1周期前の波形と同じ波形ならばON信号を出力し、人間を検知してレベルが上昇しても、故障で交流波形を生成しなくなってもOFF信号を出力する否定演算を行うことになる。この出力信号の一部は自己保持機能を持つメモリに入力され記憶（セット）されて、1周期毎に同期信号発生器によりリセットされる。したがって、このメモリ出力信号は人間による赤外線入力がない時、焦電素子の正常信号を常時出力する。実際の検知出力はANDゲート出力（交流）の包絡線として発生する。

なお、本装置で得られる人間の放射エネルギーは微弱なため常に雑音の問題を呈する。実際、表面温度 36°C の被検知体（表面積 45 cm^2 ）をセンサから 4 m 離れた地点で計測した例では、室温が 35.5°C で信号と雑音の弁別が不可能となった。工場等の環境下では検知性能はかなり劣ると考えられ、その評価には検討を要する。

したがって、本装置は安全確認形安全装置のバック

アップが必要であり、その上で人間の早期検出によるロボットの速度を低下、あるいは警報発生等の安全システムの高機能化・階層化が実現される。

5.8 無人搬送車の安全システムの開発⁶⁻⁹⁾

5.8.1 はじめに

コンピュータ制御によって運転される無人搬送車（AGV）システムが工場内の加工ラインや倉庫等における加工物や製品等の搬送装置として急速に普及してきている。

従来の自動機械が定置式であったのに対して、AGVは自動走行することから新しい安全の問題を生じてきている。自動的に発進・走行・停止を行うAGVが走行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接触することによる危険が大きな問題である。

走行中のAGVが人や物と接触することにより生ずる危険性を防止するため、従来から2通りの安全手段が主に用いられてきている。その1つは、人や物と接触したことを検出して、その信号によりAGVを停止させる接触式検出器を組み込んだ安全バンパ方式であり、他の1つはレーダ方式の反射式光線検出器や反射式超音波検出器を用いて非接触的に走行方向の人や物体の存在を検出して、その信号によりAGVを低速走行とさせたり、停止させたりする方式である。

従来のこれらの安全手段は、危険な状態を接触式あるいは、非接触式の方法で検出して、その信号によってAGVをいわゆる安全状態（停止または低速走行）にさせる方式であり、これは、“危険検出型”の安全手段ということができる。ところで、この安全手段の場合には、万一、検出器が故障したり、信号線に断線などが生ずると、もはやAGVを安全状態にすることができなくなるが、“人間の安全”を確保すべき安全手段がこのような危険側の故障を起こすことは、決して許されるべきものではない。著者らは最近、新しい安全の考え方として“安全確認型安全”を提唱している。これは、機械やシステムは、それが故障したり、操作する人間にミスがあっても安全側に遷移させるために、機械やシステムあるいは安全管理の採るべき正しい構造（体制）を論ずるものである。

上記に述べた危険検出型の安全手段の例のように、安全に関して、これまで正しいと思われてきた事柄のなかには、間違った思い込みが少なくない。それは人間の安全が不良品を少なくするという考え方の機械

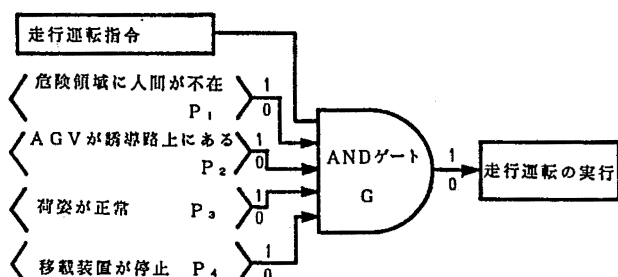


Fig. 5.8-1 Interlock configuration for safety operations during AGV traveling.
走行運転中の安全作業のインタロック構造

の安全と混同されてきたためである。

そこで、本節では、安全手段としての検出器が正常でない場合においても AGV が安全側の状態になるための“安全確認型”の安全手段の構成を具体的に示し、かつ著者らが開発したフェールセーフタイプの反射式超音波センサを適用することによって、安全な状態であることが確認された場合のみ AGV が走行することのできる安全な走行システムの提案を行う。

5.8.2 安全作業の条件

機械を使用する作業における安全性を検討する場合、何が安全であるかを明確にするための安全作業の条件と、それを達成するためのシステムの構造上の条件の両方からの追求がなされることが必要である。

AGV に関する作業状態としては、発進・走行・停止を行う走行運転や積載物の自動移載を含めて、それらにかかわるすべての作業が含まれるが、ここでは走行運転中における安全について検討することとする。

走行運転中における安全作業の条件については“AGV (積載物も含む) が走行する同一床面上に存在する人間と接触しないこと”であると考え、次の確認必要事項があげられる。

- (a) 走行方向の危険領域内に人間が存在しない
- (b) AGV が誘導路上にある (脱線していない)
- (c) 積載物の荷姿が正常である
- (d) 走行中に自動移載装置が不意の作動をしない (停止している)

すなわち、以上の4つの条件を打破することによって、AGV の“走行運転中の安全”確保 (作業目的のための安全という意味からこれを“合目的安全”と呼ぶ) ができることになり、もし、これらの1つでも確認されない場合には、もう1つの安全な状態である“無条件安全 (完全な停止)” にすみやかに遷移させることになる。

このことは、以上の4つの安全作業の条件が打破

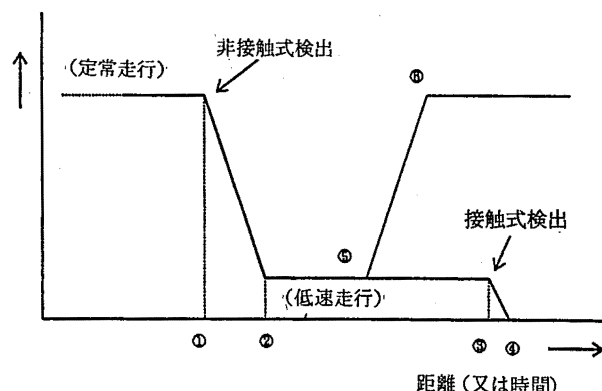


Fig. 5.8-2 Traveling pattern of AGV.
AGV の走行パターン

(確認) された場合のみ AGV の走行運転の実行が許可されるという安全確認型の作業形態が構成されることであり、 P_i を“安全”を表す2値の論理変数

- $P_1 = 1$: 安全 (進行方向の危険領域内に人間がない)
- $P_1 = 0$: 安全でない (進行方向の危険領域内に人間がないことが確認できない)
- $P_2 = 1$: 安全 (AGV が誘導路上にある)
- $P_2 = 0$: 安全でない (AGV が誘導路上にあることが確認できない)
- $P_3 = 1$: 安全 (積載物の荷姿が正常である)
- $P_3 = 0$: 安全でない (積載物の荷姿が正常であることが確認できない)
- $P_4 = 1$: 安全 (走行中に自動移載装置が不意作動しない)
- $P_4 = 0$: 安全でない (走行中に自動移載装置が不意作動しないことが確認できない)

とし、 W を作業の実行 (走行運転の実行) を示す論理変数

- $W = 1$: 実行
- $W = 0$: 実行せず

とすると

$$(P_1 \wedge P_2 \wedge P_3 \wedge P_4) \geq W \dots\dots\dots (5.8-1)$$

でなければならない。

(5.8-1) 式は、安全である時作業が実行されるとは限らないが、作業が実行される時には必ず安全でなければならないことを規定しており、Fig. 5.8-1 の安全確認型の安全作業のインタロック構造として表現することができる。ただし、AND ゲート G はフェールセーフなものであるとする。

5.8.3 安全システムの構造上の条件

一般に、AGV の走行パターンとして Fig. 5.8-2 に示す方式が採用されている。すなわち、定常走行中に非接触式検出器により、人間が進行方向の危険領域内に存在することを①検出して、低速走行速度まで減速させて、②低速走行し、(人間が危険領域内に不在となると⑤定常走行へ復帰し⑥走行する)、次には危険領域内に存在している人間を接触式検出器によって③検出して、非常停止をさせ④完全に停止させることになる。

この走行パターンにおいては、低速走行速度は、接触式検出器を組み込んだ安全バンパが作動して非常停止した時に安全バンパの作動ストローク内で止まることのできる速度であることが必須の条件である。すなわち、バンパの作動ストロークを L_B とし、低速走行速度 S_1 の時の AGV の完全停止までの制動距離を L_S とすると、低速走行速度は、

$$L_S \leq L_B$$

を満足する S_1 でなければならない。また非接触式検出器が人間の接近を検出することによって定常走行速度 S_h から低速走行速度 S_1 へ減速させることが必要になる。

従来から AGV に適用されている非接触式検出器としては、反射式超音波センサと反射式光線センサとがあるが、これらはいずれも AGV の進行方向の危険領域に人間が接近したことを検出し、その出力信号によって AGV を減速して低速走行にする方式のものである。したがって、故障や断線などにより検出ができないこととなり、高速の定常走行のまま人間と衝撃的に接触するという危険な状態となる。

前述の 4 つの安全の条件のうち“(a) 進行方向の危険領域内に人間が存在しないこと”を達成するためのシステムの構造上の条件を考えると、AGV の進行方向に人間がいないことを検出・確認し、その安全情報がある時のみ定常速度 S_h で走行することができ、それ以外の場合(人間の存在や故障の時)には、低速走行速度 S_1 となるシステムの構造が必要となる。

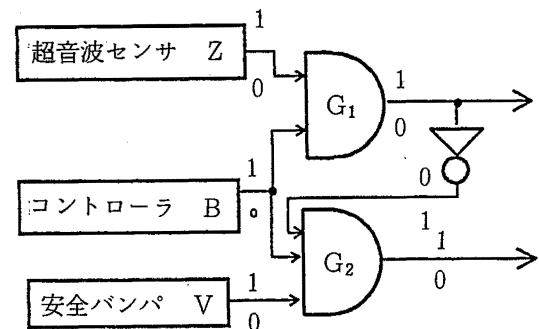


Fig. 5.8-3 Interlock configuration for safety confirmation type travel control.
安全確認型の走行制御インタロック

そこで AGV の走行運転に関する安全システムの構造上の条件を達成するものとして、著者らが開発したフェールセーフ化した反射式超音波センサ(3.2節参照)を非接触式検出器として適用することを提案するものである。

5.8.4 安全確認型の走行システム

このフェールセーフタイプ反射式超音波センサを非接触式検出装置として適用し、従来から使われているフェールセーフタイプの接触式検出器を組み込んだ安全バンパを接触式検出装置として適用することによって、Fig. 5.8-2 に示した走行パターンを安全確認型の走行運転システムとして構成できる。それは、フェールセーフな AND ゲート G_1 および G_2 を備えることにより Fig. 5.8-3 に示す走行運転制御のインタロック構造によって達成されることになる。

すなわち、Fig. 5.8-3 において非接触式検出器としてのフェールセーフ超音波センサの出力を Z 、接触式検出器としてのフェールセーフ安全バンパの出力を V 、AND ゲート G_1 の出力を f_1 、 f_1 の否定出力を K 、AND ゲート G_2 の出力を f_2 、運転指令コントローラの出力を B とし、それぞれの 2 値の論理変数を次のようにする。

$Z = 1$: 安全

(AGV の進行方向の危険領域に人間がいない)

$Z = 0$: 安全でない

(AGV の進行方向の危険領域に人間がいないことが確認できない)

$V = 1$: 安全

(安全バンパに人間が接触していない)

$V = 0$: 安全でない

(安全バンパに人間が接触していないことが)

確認できない)

$f_1 = 1$: 定常走行運転の実行 ($K = 0$)

$f_1 = 0$: 定常走行運転を実行せず ($K = 1$)

$f_2 = 1$: 低速走行運転の実行

$f_2 = 0$: 低速走行運転を実行せず完全停止

$B = 1$: 運転指令

$B = 0$: 運転停止

ここで、センサとゲートがフェールセーフな構造であれば、 Z, V, f_1 および f_2 は誤って “1” を出力することはない。したがって、

$$f_1 \leq (B \wedge Z) \dots\dots\dots (5.8-2)$$

$$f_2 \leq (B \wedge K \wedge V) = (B \wedge \overline{f_1} \wedge V) \dots\dots (5.8-3)$$

が成立する。

(5.8-2) 式から分かるように、 $f_1 = 1$ で定常走行運転が実行されるのは、運転指令 ($B = 1$) があり、AGV の進行方向の危険領域内に人間がない ($Z = 1$) 場合のみである。また、AGV の進行方向の危険領域内に人間がないことが確認できない時は、 $Z = 0$ となり、 $f_1 = 0$ となる。この状態において (5.8-3) 式から分かるように、 $f_2 = 1$ で低速走行運転が実行されるのは、運転指令 ($B = 1$) があり、かつ定常走行の実行が許可されない ($f_1 = 0$) 場合であって、安全パンパに人間が接触していない ($V = 1$) 場合のみである。また安全パンパに人間が接触していないことが確認できない時には、 $V = 0$ となり、 $f_2 = 0$ となるので完全停止へ遷移することになる。

このようにして、AGV の進行方向の危険領域内に人間が存在しないことが確認された場合のみ AGV が定常走行速度で走行することが可能となり、人間が危険領域内に入ったり、非接触式センサが故障した場合には確実に低速走行速度へ移行し、安全パンパに人間が接触していないことが確認された場合のみ低速走行運転が可能となり、安全パンパに人間が接触したり、接触式センサが故障した場合には、低速走行から

完全停止状態へ移行する走行運転制御が達成される。

(平成 2 年 11 月 30 日受理)

参考文献

- 1) 杉本, 池田他 1 名: 荷崩れ処理のためのマニピュレータの開発について, 第 6 回日本ロボット学会学術講演会, pp.587-588 (昭 63)
- 2) 杉本, 池田他 1 名: 荷ずれ処理用マニピュレータの操作性, 第 7 回日本ロボット学会学術講演会, pp.337-340 (平元)
- 3) 杉本, 池田, 向殿他 1 名: コンプライアンス機能を持つロボットへのファジィ制御の適用, 第 8 回日本ロボット学会学術講演会, pp.87-90 (平 2)
- 4) 梅崎, 糸川: 搭乗型移動ロボットの安全作業システムの開発, 第 8 回日本ロボット学会学術講演会, pp.347-350 (平 2)
- 5) 梅崎, 清水: 監視・保安全作業用移動機構における安全作業システムの開発, 第 20 回安全工学シンポジウム, pp.185-188 (平 2)
- 6) 糸川, 杉本: AGV の接触危険に対する安全確認型対策の適用, 第 5 回日本ロボット学会学術講演会, pp.343-346 (昭 62)
- 7) 糸川, 杉本他 1 名: 無人搬送車における安全システムの構成, 第 6 回日本ロボット学会学術講演会, pp.167-174 (昭 63)
- 8) 糸川, 梅崎, 蓬原: 無人搬送車に適用した超音波パルスレーダ型センサの性能評価, 第 7 回日本ロボット学会学術講演会, pp.125-128 (平元)
- 9) 杉本, 蓬原他: パルスレーダセンサの開発と安全制御の論理, 第 4 回日本ロボット学会学術講演会, pp.493-494 (昭 61)
- 10) 杉本, 深谷他: 人間の姿勢保持能力にみる筋肉の粘弾性特性, 第 8 回日本ロボット学会学術講演会, pp.367-370 (平 2)