

9. 安全性とライフサイクルコストの両面に配慮した
物流機械用安全制御システムの開発と評価*
—分散形安全バス制御の提案—

梅崎重夫**

9. The Development and Evaluation of Safety Control System for the
Logistic Machinery Considering Life Cycle Cost and Safety*
— The Proposal of Distributed Safety Bus Control —

by Shigeo UMEZAKI**

Abstract: This report proposes a new safety bus system for logistic machineries considering high level safety and life cycle cost. The cost reduction for safety control systems is a very important problem in the industrial engineering, especially design process, manufacturing process, maintenance or remodeling. In addition, the high level safety is required for logistic machineries because they sometimes cooperate with the human. The comprehensive solution of these problems was tried by the proposal of the “distributed and safety bus control”.

The developed system had following features:

- (1) The programming on the safety control was facilitated by changing the conventional relay system into the safety-bus controller.
- (2) The high level safety was realized by safety-bus controller with triple redundancy, diversity and the self checking mechanism, including a periodical automated inspection for the bus line.
- (3) The exclusive bus line was established between safety devices and the safety controller, and the wire saving was attempted for this system.
- (4) It would be able to install safety devices easily by using the bus line with open specification such as OSI(Open System Interconnection).

As this study is under execution at present, the quantitative evaluation method for the life cycle cost will be developed, and the safe performance under the actual environment will be examined.

Keywords; Safety control, Safety device, Safety bus, Diversity, Redundancy, Self checking, Logistic machinery

1. はじめに

最近の生産システムでは、安全システムの設計、製造、改造等に要する時間とコストの増大が実務上重要な問題となっている。このため、最近では、従来のリレー回路に代わってプログラマブル・コントローラ (PLC)

を使用し、これによって安全制御のためのプログラムの作成を容易化し、コストを削減しようとする動きも出ている。しかし、一般の PLC は対称誤り特性を持つために、PLC の故障や電磁ノイズの影響によって作業者の安全が確保できないという問題があった。

また、仮にこのような PLC を使用した場合でも、大

* 本研究の一部は、第 10 回安全工学シンポジウム (平成 12 年 7 月 13 日) で発表した。

** 機械システム安全研究グループ Mechanical and System Safety Research Group

規模で複雑な生産システムではPLCと安全手段（光線式等の安全装置や、電磁リレー、電磁弁等の安全部品）の間を接続する電気配線だけで膨大な量となる。さらに、個々の安全手段は独自のインターフェースを持っており、ちょっとした安全手段の機種変更がプログラムや電気配線の大幅な変更を招く場合もある。これらは運用時のライフサイクルコストを増大させかねない。

そこで、本研究では、複数の産業用ロボットとコンベヤを備えた模擬物流ラインを対象に、これらの問題を包括的に解決できる安全システムを開発し、その有効性を評価した。その結果、開発したシステムはリスクレベルの高い機械にも適用できる高い安全性を備えているだけでなく、ライフサイクルコストの最小化という点でも有効であることが判明した。なお、本システムは現在開発中であるため、既に完了した部分のみについて報告する。

2. 安全確認システムの基本構成

2.1 システムの制御形態

物流機械の特徴は、広大な領域内で複数の人間と機械が協調しながら作業を行うことにある。このような機械では、作業者が機械に挟まれたり、巻き込まれたりすると、重大な災害を引き起こしかねない。このた

め、実際の機械では、安全が確認できるときに限って機械の運転を許可する制御システムを設けている。以後、これを物流機械用の安全確認システムと呼ぶ。このシステムは、安全が確認できなくなったときの機械の停止方法の違いによって、Table 1 に示す3種類の制御形態に分類できる。

2.2 分散形安全バス制御の提案

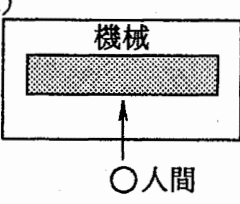
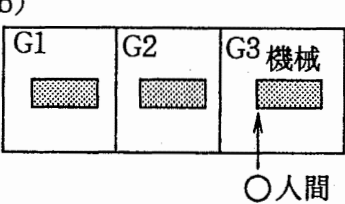
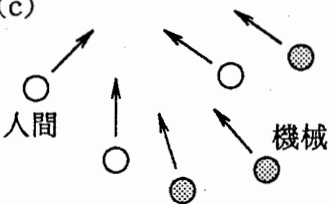
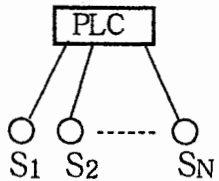
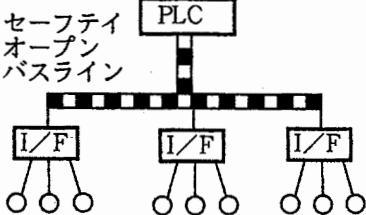
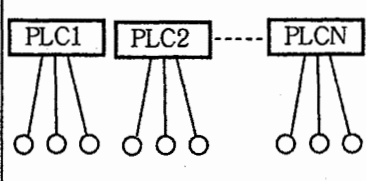
従来、これらの安全確認システムは、Table 1(d)の集中制御やTable 1(f)の自律分散制御とするのが一般的であった。しかし、交代形の安全確認システムでは、これらの制御はライフサイクルコストを最小化するという観点からは、必ずしも最適とは言えない場合もある。

いま、このことを定量的に示すために、安全確認システムを構成する $J(j = 1, 2, \dots, N)$ 番目の機械を M_J 、機械 M_J のコントローラを c_J 、機械 M_J で安全確認を行うためのセンサー群を $\{s_{J1}, s_{J2}, \dots\}$ とすると、安全確認システムの構築に要するコスト W は次式で表すことができる。

$$W = C \cdot N + K \cdot L + S \quad (1)$$

ただし、 W の単位は円であり、コントローラのコストを C 円/台、台数を N 、センサー全体のコストを S

Table 1 The safe confirmation system corresponding to the situation of the work.
作業形態に応じた安全確認システム

停止の単位	全停止	部分停止	
		交代形(小領域単位)	共存形(機械単位)
作業形態	(a) 	(b) 	(c) 
停止の状態	安全が確認できなくなったときは、すべての機械を停止させる。	安全が確認できなくなったときにすべての機械を停止させると、稼働率が低下するために、個々の小領域や機械単位で部分停止させる。	
対象機械等	コンベヤ等	自動倉庫、産業用ロボット等	移動ロボット、無人搬送車等
安全確認システムの形態	(d)集中制御 	(e)分散型安全バス制御 セーフティオープンバスライン 	(f)自律分散制御 

円、電気配線のコストを K 円/m、配線の長さを L m とする。

(1) 式では、機械台数 N と配線の長さ L が增大すると、コストアップの要因となりかねない。そこで、これを防止するために、コントローラの台数を可能な限り少なくし、配線の長さを可能な限り短くする。

Table 1(e) は、以上の点を考慮した安全確認システムの新しいモデルである。このモデルでは、コストの最小化を図るために、コントローラの台数を一台とする集中制御方式としている。また、センサー群とコントローラ間の電気配線を最小化するために、センサーと近接した位置にリモート I/O (一種の入出力インターフェースで、センサーと CPU 間の情報の授受を仲立ちする) を設け、センサーからの情報をリモート I/O で取りまとめ、PLC とリモート I/O 間の情報を単線の電気配線である専用のバスラインを介して通信する方式とした。この制御構造を Table 1(e) に示す。以後、これを便宜上、分散形安全バス (distributed safety bus, 略して DSB) 制御と呼ぶことにする。

2.3 異種冗長化と自動監視による安全性向上策

実際の分散形安全バス制御では、PLC の故障や電磁ノイズの影響によって作業者の安全が確保できなくなる場合がある。そこで、PLC 及びこれに接続された安全手段 (センサー、バスライン等) に対して第 2 編で述べた異種冗長化と自動監視を施し、第 2 編で設定した災害防止に関する目標値 (災害発生率で 10^{-11} 回/h 以下) の達成を試みた。この結果は、第 2 編の Table 2 に基づき推定できる。

この表からも明らかなように、対称誤り特性を持つプログラマブルな電子制御装置を PLC として使用する場合は、 10^{-11} 回/h 以下の災害発生率を実現するため

に PLC の異種三重化と自動監視の併用が必要である。

これに対し、バスラインはハードワイヤードな要素であるから、自動監視を備えていれば冗長系を構成しなくても目標水準は達成できる。なお、センサーの場合、ハードワイヤーか、プログラマブルかによって冗長化の必要性は分かれるが、いずれの場合も自動監視が必要である。

3. 安全確認システムの具体的構成

3.1 生産システムの配置と構成

Fig. 1 と Photo 1 に、分散形安全バス制御を適用する機械類の配置と構成を示す。ここで、機械類として想定したのは、ハンドリング用ロボット 2 台 (安川電機製モトマン, K10, L10W), プレス機械 2 台, パターン認識による検査装置 1 台及びコンベヤ 1 台である。

また、想定作業としては、品種の異なる短尺材を作業者が Fig. 1 の作業台 A 上に置き、これをロボット NO.1 → プレス機械 P1 → ロボット NO.2 → プレス機械 P2 → コンベヤ N → パターン認識装置 M → ロボット NO.1 と搬送し、最終的には加工が終了した製品をロボット NO.1 が作業台 B 上の品種毎の箱に納めるという作業を設定した。ただし、モデルラインという性質上、プレス機械の設置を省略しコンベヤや作業台で代替している。また、パターン認識装置については別途報告する。

具体的な作業手順は次のようになる。

- ① 作業者が短尺材を Fig. 1 の作業台 A 上に置く。
- ② ロボット NO.1 を使って短尺材をプレス機械 P1 に自動供給する。
- ③ P1 で加工された製品は、シューターによって自動的に排出された後にロボット NO.2 によって搬送され、プレス機械 P2 に自動供給される。

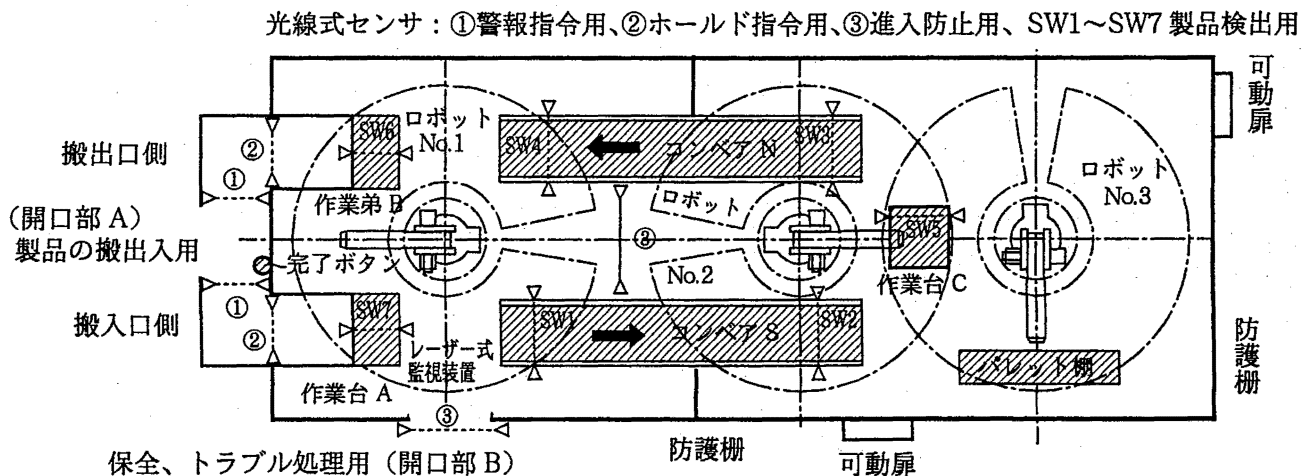


Fig. 1 Configuration and composition of the machinery. 機械類の配置と構成



Photo 1 The appearance of developed system.
開発したシステムの外観

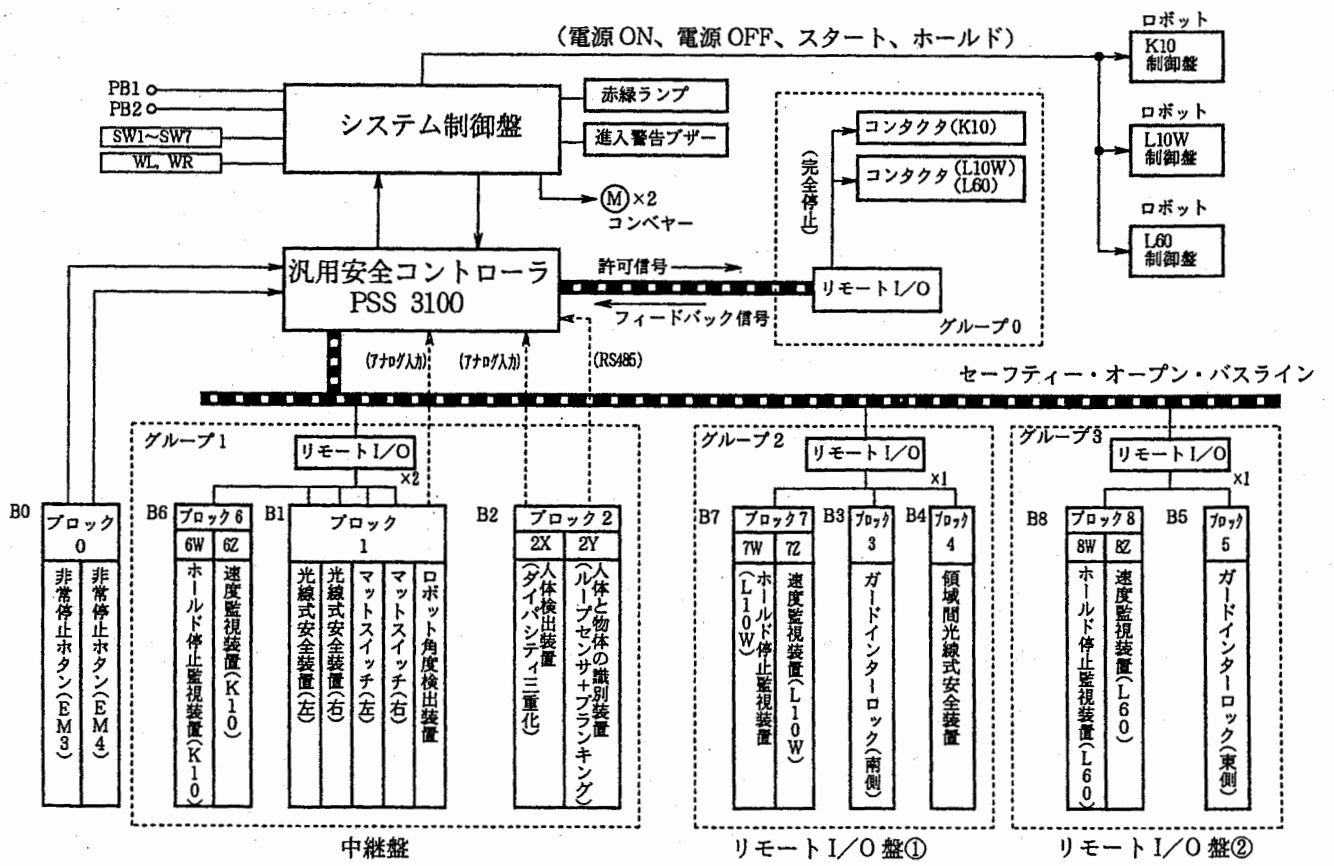


Fig. 2 The block diagram of the safe confirmation system.
安全確認システムのブロック図

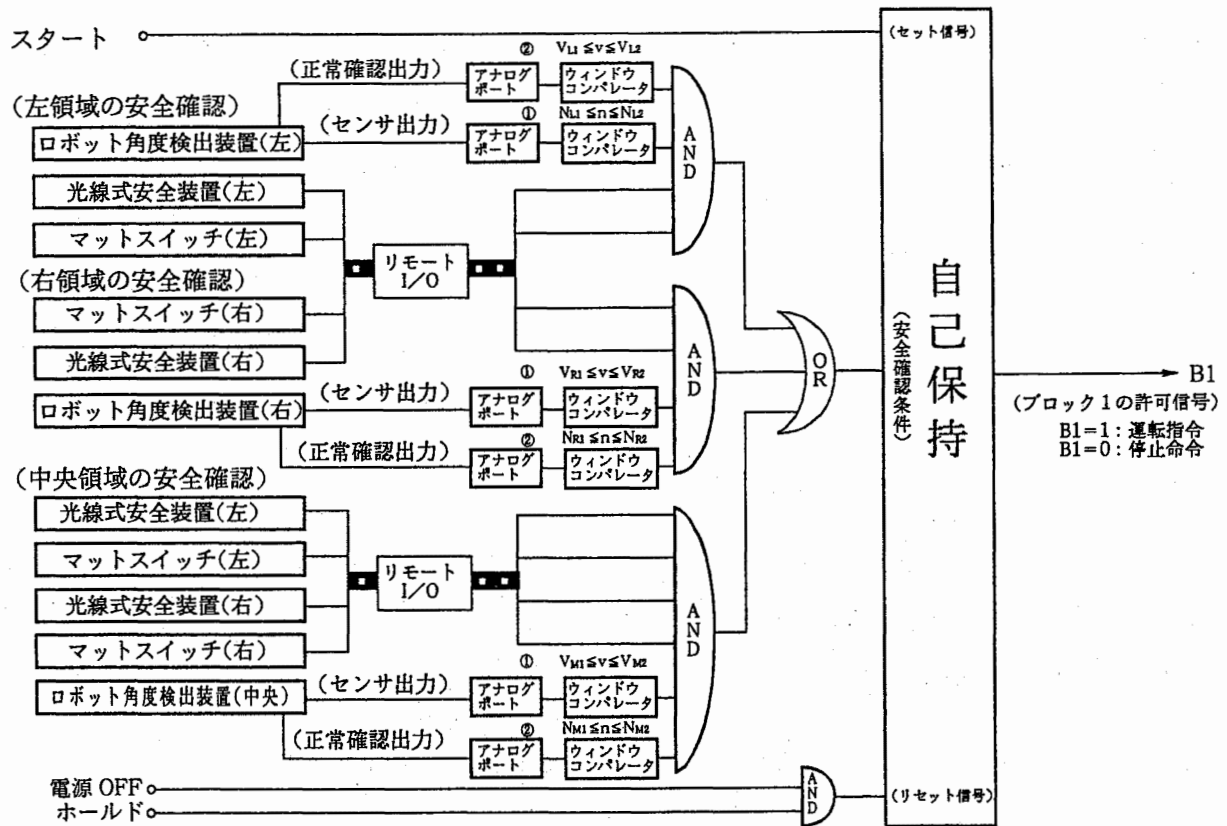


Fig. 3 Control logic of the safe confirmation system.
安全確認システムの制御ロジック

- ④ P2で加工された製品は、シューターによって自動的に排出された後にロボット NO.2 によってコンベヤ N に自動供給される。
- ⑤ 製品はコンベヤ N による搬送中に、パターン認識装置 M で自動的に検査される。
- ⑥ コンベヤ N の終端に到達した製品は、ロボット NO.1 によって搬送されて作業台 B の上に置かれた品種毎の箱及び不良品の箱に納められる。

3.2 ブロック図と制御ロジック

Fig. 2 に、本研究で開発した安全確認システムのブロック図を示す。Fig. 3 は、本研究で開発した安全確認システムの制御ロジックである。

このシステムでは、安全制御用の PLC を異種冗長化とともに自動監視構成として安全性の向上を図っている。

また、センサーと近接した位置にリモート I/O を設け、センサーからの情報をリモート I/O で取りまとめ、PLC とリモート I/O 間の情報を単線の電気配線である専用のバスラインを介して通信する DSB 制御として省線化を図っている。

さらに、本システムでは、センサーや安全部品に対す

るインターフェースを国際標準化された通信規約 OSI (Open Systems Interconnection) の第 1 層 (物理層)、第 2 層 (データリンク層) 及び第 7 層 (アプリケーション層) で行っているために、各種の安全手段に容易に接続できるオープンなシステムとしている。

以上のような機能と構造を備えたものを、以後セーフティ・オープン・バスラインを備えた汎用安全コントローラ¹⁾と呼ぶことにする。これにより、次のような制御を可能としている。

1) 自律分散制御

本システムでは、機械の停止の単位を Table 1 のグループ 1 (G1) とグループ 2 (G2) に分割している。これにより、一方の領域で安全が確認できなくなって機械が停止したときでも、他方の領域では機械の運転を継続させて稼働率の低下を防いでいる。

2) 人間とロボットの交代制御

本システムでは、ロボットの運用効率を上げるために、作業者とロボットが Fig. 1 の作業台 A と B で交互に作業を行うようにしている。

従来、このような制御を実現する場合は、リミットスイッチ等を使ってロボット角度検出装置を構成していたこともあった。しかし、この方式ではロボットの

現在の角度を正確に検出できないという問題があった。そこで、本システムでは、第7編で述べた旋回角度監視装置を開発し、これによって旋回角度の監視を行っている。

3) ホールド停止監視制御

ロボットなどの機械設備では、作業者がロボットをホールド停止状態（ロボットの動力源等を遮断しないまま、プログラム側からの命令によってロボットが一時停止している状態）としたまま、ロボットに近接してトラブル処理、保全等の作業を行うことがある。

このような場合に、ホールド停止中のロボットが暴走を起すすと、直ちに重大な災害となることがある。そこで、第8編で述べたホールド停止監視装置を開発し、万一ロボットが暴走を始めたときは直ちに駆動源を遮断して、ロボットを緊急停止させる構成とした。

4. システムの総合評価と今後の課題

本研究では、システムの開発と平行して安全技術の専門家による評価を行った。この評価では、我が国でセーフティ・バスの開発研究を目的として設立されたセーフティ・バス・クラブの構成員、筆者が指導を受けている機械部門の技術士、及び見学や打ち合わせのために当所を訪問した国内外の専門家の協力を得た。

この評価では、セーフティ・バス・ラインを使ったシステムが欧州などで本格的に実用化する以前から「分散形安全バス制御」の重要性を提案し、欧州で開発中の汎用安全コントローラに反映させてきたこと、及び「従来のリレー制御を中心とする伝統的な安全制御技術」から「コンピュータを利用した最新の安全制御技術」への移行を我が国で最も先行する形で進めたことに対して、高い評価を得た。

一方、構築した物流ラインに対しては、「どのような製品を製造するラインなのか、ラインの基本的性格が、いま一つ明確に伝わってこない」、「構築するモデルラインにおける製造品目、工場規模、生産速度などの基本仕様を明確に定めるべきである」との指摘があった。これは佐藤 R&D 社長の佐藤国仁技術士によるもので、具体的には次のような提案があった。

- 1) ラインを、受け入れ→保管→物流（長距離、短距離、加工機搭載）→加工→物流（加工機取り出し、短距離、長距離）→（この間、加工、物流を繰り返す）→保管→出庫の一連の構成とする。
- 2) 加工機は簡単なもので良いが、実際の加工を行う。

そのため、ワーク等はできる限り簡素、低価格なものとして運転費用を低減する。タクトタイムは実加工タイムを維持する。

- 3) 電気設備は、完全に IEC60204 対応として再構築することが必要である。
- 4) ラインのブロック分け（Table 1(b) の G1, G2, G3 に対応）をしているが、コンベヤの上部、側面、下面等に開口部があるので、完全とは言えない。

これらの点に関しては、予算上の制約や機械安全に限定したモデルラインという性格上やむを得ないとの意見もあったが、今後はこれらの点も考慮した上で最適なシステムの構築に努めていきたいと考えている。

5. おわりに

物流機械では、安全確認システムの設計、製造、改造等に要する時間とコストの増大が実務上重要な問題となっている。また、人間と機械が協調して作業を行う物流機械では、リスクレベルの高い機械にも適用できる高い安全性が要求される。そこで、本研究では、「分散形安全バス制御」の提案によって、これらの問題の包括的な解決を試みた。このときの具体的方策は次の通りである。

- 1) 従来のリレー制御に代わって汎用安全コントローラを用いた制御とし、安全制御に関するプログラム作成を容易化する。
- 2) コントローラは異種冗長化構成とし、バスラインに対して定期的な自動監視（セルフチェック）を行い、安全性を高める。
- 3) 安全手段とコントローラの間で専用のバスラインを設け、電気配線の省線化を図る。
- 4) バスラインをオープンな仕様とし、安全手段を容易に増設できるようにする。

今後は、開発したシステムに対して安全性とライフサイクルコストに関する定量的評価を行うとともに、総合評価で指摘された事項の改善を図り、実用的なモデルシステムの構築に努めていく予定である。

参考文献

- 1) ピルツジャパン（株）、プログラマブル・安全コントローラ PSS3000 に関する技術資料。

（平成 14 年 1 月 10 日受理）