

ロボット制御セル生産システムのリスクアセスメントと最適な安全方策

岡田和也^{*1} 前田育男^{*1} 菅野祥人^{*1} 樋口伸夫^{*1} 辻義孝^{*1} 藤田俊弘^{*1}

Risk Assessment and Optimization of Safety Protective Measures on Robot-controlled Cell Production system

Kazuya Okada^{*1}, Ikuo Maeda^{*1}, Akihito Sugano^{*1}, Nobuo Higuchi^{*1},
Yoshitaka Tsuji^{*1} and Toshihiro Fujita^{*1}

Abstract - Production systems in FA industry employ more robots in recent years in order to improve the productivity and efficiency of operation, and operators are increasingly required to work in collaboration with various types of robots. Ensuring the safety for operators is a matter of great importance in today's Human Machine Interface (HMI) environments, which must be constructed with ergonomically designed control systems. Furthermore, HMI environments need to be provided with safety measures that reflect the inherent safety concepts of the international standard for safety of machinery, ISO 12100. In this paper, we report on the risk assessment on our Robot-controlled Cell Production System and also the optimum safety measures achieved by safety human machine interfaces.

Keywords: Robot-controlled Cell Production System, inherent safety, ISO12100, safety human machine interface, risk assessment

1. はじめに

近年、FA(Factory Automation)等の産業分野では、従来のように機械の生産性向上や効率化を図るだけでなく、安全性へ配慮することが人と機械が共存する HMI (Human Machine Interface) 環境における重要な要件となっている。特に経済のグローバル化に伴い、機械安全の考え方を ISO 12100「機械類の安全設計のための一般原則」に代表される国際安全規格に整合させることが必須条件になってきている。^[1-7]

国内においても、労働安全衛生法が 2006 年 4 月に改正され、「危険性・有害性等の調査及び必要な措置の実施」という項目で ISO 12100 の安全に対する思想を取り入れた「リスクアセスメントと安全方策の実施」が努力義務となり、グローバルな規格への統合化と標準化の流れが加速している。

日本は、ロボットの使用台数世界第 1 位であり、ロボットを使った生産設備が年々増加している。そのような生産設備では人とロボットが協調して作業を行う機会が増えており国際安全規格 ISO 12100 の考え方に基づいた安全方策の必要性が高まってきている。特に HMI 環境では、人に対する安全性を向上させるために人間工学に配慮した制御装置を使用し、本質安全を構築する必要があることが認識されてきている。^[8-11]

われわれは図 1 に示す「ロボット制御セル生産システム」という独自に開発した制御機器の自動組立設備に対

してリスクアセスメントに基づいた安全方策を行い、その結果「高生産性」と「安全性」の両立を実現しており、その内容について報告する。^[12-14]

2. ロボット制御セル生産システム

2.1 ロボット制御セル生産システムとは

日本における「技術立国としてのものづくり」の維持推進には技術的に進化させたセル生産を実現することが重要である。そのことに着目し開発した「ロボット制御セル生産システム」は、世界に先駆けて実用化したロボットを用いたセル生産方式の自動化システムである。図2に示すようにロボットモジュール、治具モジュール、部品供給トレイモジュール、HMIユニット、そして特殊作業モジュールから構成され、組立てる製品に応じて各種



図 1 ロボット制御セル生産システム

Fig.1 Robot-controlled Cell Production System

*1: IDEC 株式会社

*1: IDEC Corporation

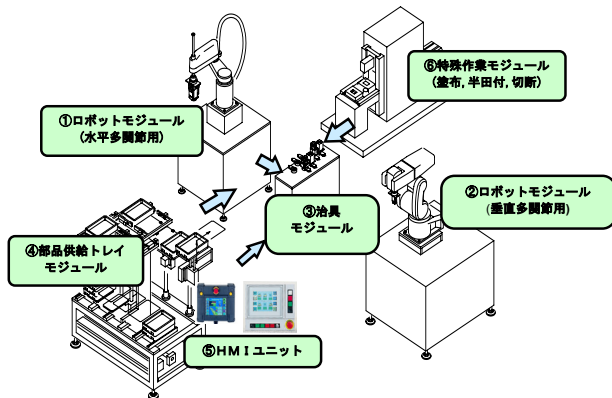


図2 ロボット制御セル生産システム構成
Fig.2 Construction of Robot-controlled Cell

Production System

モジュールを組合せて最適配置する。基本的な構成では2台のロボットが人間の右手と左手のように最適協調制御しながら組立作業を行う。本システムは、多品種変量生産をロボットによるセル生産方式にて実現した組立設備であり、また消費電力60%削減（当社従来比）という省電力化を図るとともに、リサイクルなど環境問題にも対応している。平成12年から兵庫県滝野事業所で実生産システムとして稼働しており、現在に至るまでの製品の累計生産台数は、2,000万台以上である。[12-14]

2.2 開発の目的

ロボット制御セル生産システムは以下の4点を目的に開発されている。

- I. 日本国内生産を持続的に進展できる多品種・変量生産に適したシステム
- II. 生産機種・生産規模に合わせて変更できる柔軟なシステム
- III. 汎用化・標準化を可能とし、設備導入コストを大幅に低減できるシステム
- IV. 国際安全規格に整合し、最新制御安全技術によりグローバル化したシステム

図3は、現在の生産システムを生産品目数と生産設備の面から4つに分類したものである。この図に示すように、本システムは、少品種大量生産から多品種変量生産への流れの中で、労働集約型から生産自動化への対応を

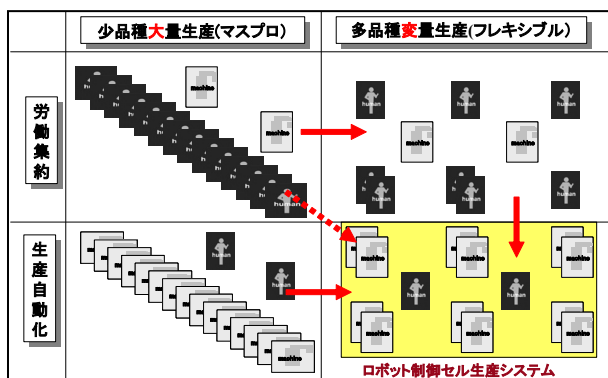


図3 生産システムの形態比較

Fig.3 Comparison of Production system forms

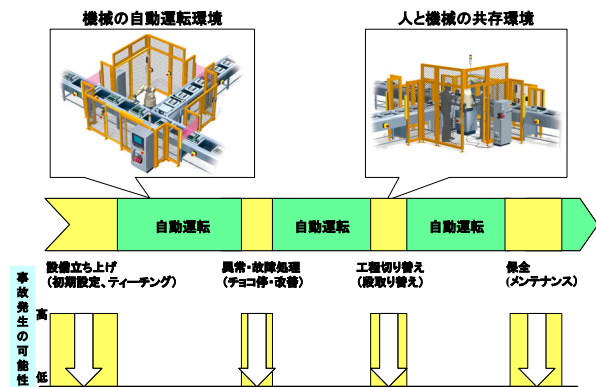


図4 ロボットの使用フローにおける本質安全の重要性

Fig.4 Importance of inherent safety in robot

追求し、「高生産性」と国際安全規格に準拠した「安全性」の両立を目指し開発された。[12]

3. ロボット制御セル生産システムのリスクアセスメントと危険源・危険事象

3.1 リスクアセスメントの目的

まず、事故はどのように発生するのかを考えるために、図4に示すロボットを用いた設備を例にする。

人と危険源（本論ではロボット）が同一領域に存在することで危険な状態（危険事象）が発生し、この危険事象に対して適切な安全方策が行われなかった場合に事故が起きる。リスクアセスメントは、適切な安全方策を行えるように、危険源の同定と危険源のリスクを見積もり、評価することである。ここで、リスクとは「傷害及び健康障害の発生確率とそのひどさの組み合わせ」のことである。

事故を防ぐためには人と機械の隔離などが必要であるが、図4に示すように高度に自動化されたシステムであっても、プログラムされた自動運転以外で人が直接機械とやりとりする場面は多数存在する。設備立ち上げ（初期設定）、ティーチング（教示）、工程切り替え（段取り替え）、異常／故障処理（チョコ停）、保全（メンテナンス）などで多くの危険な作業が発生する。危険区域で行われる作業、たとえば、危険区域内で機械を稼働しながら行う作業では、事故発生の確率は飛躍的に増大する。従って、機械の安全方策を行う上では、図4の下段の矢印で示すように、人と機械の共存環境（共同作業時）におけるリスクを低減させることが極めて重要となる。[7],[12-14]

3.2 リスクアセスメントの手順

リスクアセスメントは、国際安全規格の ISO 14121「機械類の安全性-リスクアセスメントの原則」の中で、「リスク分析とリスク評価の両方を含むすべてのプロセス」とされている。ここで詳細説明は省略するが、図5に示すようにリスクアセスメントは、機械運転の全ライフサイクルのなかで危険源を同定し、その危険源が人に

表1に、われわれが自社設備であるロボット制御セル生産システムに実施したリスクアセスメントの結果の一部を示している。^{[13],[14]}リスクアセスメントシートは、リスクアセスメントの結果（危険源の同定とリスク評価）

と関連する安全方策を情報としてシートにまとめたものである。表中の本システムの主な危険源、危険事象の代表例を次に示す。

- ・ロボットと作業員の衝突
- ・メンテナンス対象とは別のロボットとの衝突
- ・エンドエフェクタへの挟まれ
- ・タッチパネルに操作加重がないため、なぞり押し操作ができずロボットを見ながら作業ができない。
- ・部品供給トレイモジュールの搬送部への挟まれ

これらの危険源・危険事象は、ロボットと作業員が完全に「隔離」する、もしくは作業員が接近する前にロボットをエネルギーゼロ状態で「停止」させる安全対策をとることで危険事象の発生を防止できる。しかし、人と機械が共存する環境下での作業では、ロボットを動かしながら危険区域で作業する場合が多く、非常時に作業員

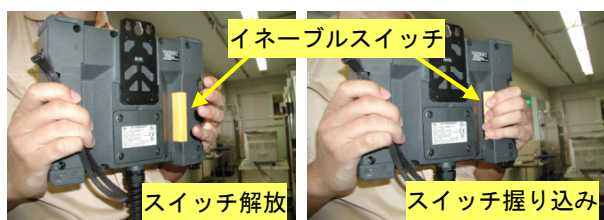


図 6 3-ポジションイネーブルスイッチの使用状況

Fig.6 Operation of 3-position enabling switch

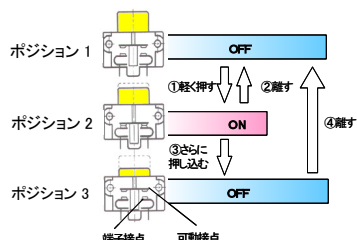


図 7 3-ポジションイネーブルスイッチの動作

Fig.7 Position of 3-position Enabling Switches

イネーブル装置操作状態		人と機械の関係	
(A) 手の握り方 (グリップ形)	(B) 手の握り方 (ペンダント形)	(C) 2ポジションスイッチ(D) 3ポジションスイッチの場合	
(1) ロボット起動前			human machine 安全
(2) ロボット起動中			安全
(3) 危険状態発生			危険状態
(4) びっくりして手を離す			安全
(5) びっくりして手を握り込む			DAMAGE STOP けが・死亡 安全

図 8 緊急時の機械停止に対する 3-ポジションイネーブルスイッチの有用性

Fig.8 Advantages of 3-position Enabling Switches at Emergency Situations

がロボットを「停止」させるための安全方策が必要となる。

4. ロボット制御セル生産システムの安全方策事例

ISO 12100 では、安全方策を保護方策と呼び、本質的安全設計方策、安全防護、付加保護方策、使用上の情報の順に保護方策を行うことを要求している。^[1]

4.1 本質的安全設計方策 - イネーブル装置

危険事象：ティーチング時にロボットへ接近して作業する場合、ロボットと作業員の衝突。

図 6 のようにメンテナンスモードでのロボット・治具モジュールの起動許可を危険発生時に無意識の動作でロボットを停止させることができる 3-ポジションイネーブルスイッチで行うことにより危険区域で作業する作業員の安全確保が可能となる。^{[7],[9],[13],[14]}

図 7、図 8 をもとに 3-ポジションイネーブルスイッチの有用性の説明をする。図 7 に示すように 3-ポジションイネーブルスイッチは、スイッチを定められた位置（ポジション 2）まで押し込んで保持している間に限りロボットの運転を許可する(ON)。そのため、運転中予期しないロボットの動作の際に作業員がびっくりしてイネーブルスイッチを手から離す（ポジション 1）、もしくは握り込む（ポジション 3）という無意識の操作で、図 8 に示すように危険源（本論ではロボット）を停止させることができる(OFF)。つまり、作業員が危険区域内でロボットを動かしながら作業を行うような人と機械の共存環境下での安全確保に最適といえる。^{[7],[9],[13],[14]}

4.2 本質的安全設計方策 - CC スイッチ

危険事象：タッチスイッチに操作荷重がなく、なぞり押し操作ができないためロボットを注視したままの作業ができないため、不意に動作したロボットと作業員との衝突。

図 9 のようにクリック感を持たせた CC-スイッチを使用することで操作感が得られ「なぞり押し」が可能となる。「なぞり押し」をすることで、作業員はロボットを注視したまま作業を行うことが可能となり、ロボットの不意の動きに対応することが可能となる。^{[8],[13],[14]}



図 9 CC スイッチ搭載ペンダント

Fig.9 CC switch on pendant

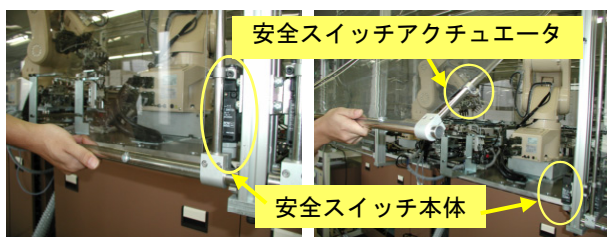


図 10 安全スイッチの使用状況
Fig.10 Installation example of Safety switches

4.3 安全防護 - 安全スイッチ

危険事象：自動運転中に可動式ガードを解放して危険区域へ侵入した作業員とロボットの衝突。

図 10 のように可動式ガードに安全スイッチを取り付けインタロック付きガードとすることでガード解放によってロボットを停止させる事が可能となる。

安全スイッチは、危険源（本論ではロボット）をカバーするガードが閉じているときに限り、機械の起動を許可するインタロックの用途に使用するスイッチである。可動式ガード（扉）に取り付けられた安全スイッチ専用のアクチュエータが、可動式ガードを閉じてスイッチ本体に挿入されることによってのみロボットが操作可能な構成となっている。つまり、作業員の安全を確保するために「ロボットからの隔離（可動式ガードを閉鎖してロボットと作業員を隔離した場合にのみ運転を許可）」と「ロボットの停止（可動式ガードを開放した場合は運転できない）」を行うインタロック装置として最適といえる。[7],[13],[14]

4.4 安全防護 - セーフティライトカーテン

危険事象：自動運転中に部品供給、部品取りだしを行う際、部品供給トレイ駆動用のチェーンへの作業員の巻き込まれ。

部品供給や取り出しを行う部分は、頻繁に部品搬入を行うために安全柵が無く開放状態であるため図 11 のようにライトカーテンを設置した。作業員が部品供給トレイモジュール内に侵入した場合には部品供給トレイモジュールを停止させる事が可能となる。

セーフティライトカーテンは、赤外線で侵入検知を行うため安全柵のような遮蔽物なしで、作業員の進入時に

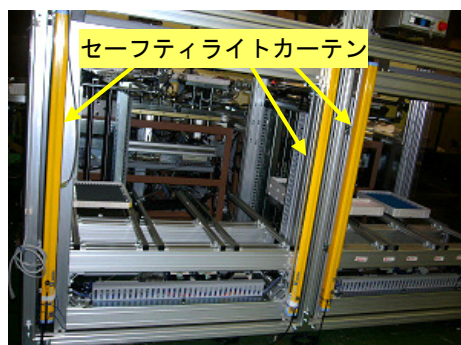


図 11 セーフティライトカーテンの設置状況
Fig.11 Installation example of Safety light curtains

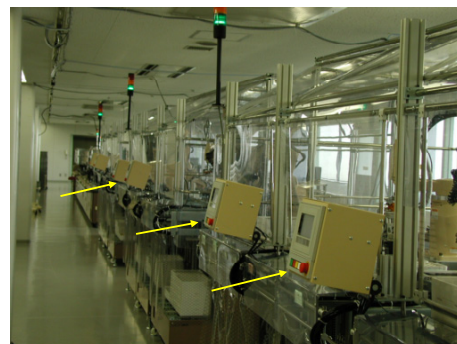


図 12 非常停止用押ボタンスイッチの設置状況
Fig.12 Installation example of Emergency Stop Switches

部品供給トレイモジュールを停止させることが可能である。つまり、作業工程上安全柵を設置できない場所などでの作業員の侵入検知に最適といえる。[7],[13],[14]

4.5 付加保護方策 - 非常停止用押ボタンスイッチ

危険事象：すべての危険事象に対して作業員の意志で設備を非常時に停止できない。

図 12 のように非常停止用押ボタンスイッチを作業員がすぐに押すことができる場所に設置する事で非常時に、作業員の意志で装置を停止させることが可能となる。

機械設備における非常停止用押ボタンスイッチは、「発生している、または今にも発生しようとしている」緊急事態を回避するために作業員の意志で操作するためのスイッチで作業員がスイッチを容易に見つけることができるように、国際安全規格で色や形状が決められている。[4],[5],[7]

5. ロボット制御セル生産システムの安全関連システム

5.1 安全関連システムの構成

以上のような安全方策の結果、図 13 に示すように各種の安全機器が必要であり、これらの安全機器を接続する安全関連システムを構築する必要がある。われわれは、開発の目的であるシステムの柔軟性を実現するためにハードワイヤリングでなくシステム変更に対する柔軟性とメンテナンス性に優れた安全オープンネットワークであ

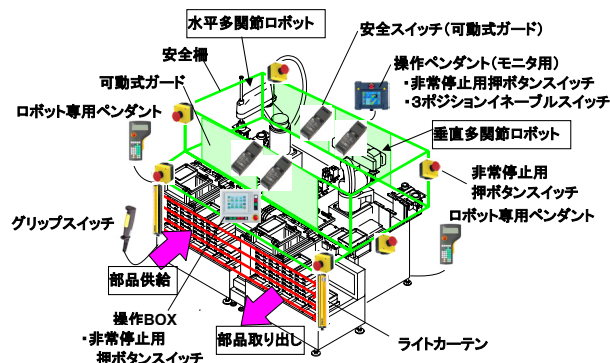


図 13 ロボット制御セル生産システムの安全システム
Fig.13 Safety system of Robot-controlled Cell
Production System

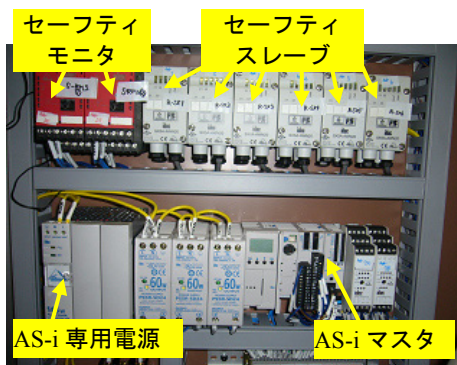


図 14 制御パネル内の AS-Interface Safety at Work

Fig.14 AS-Interface Safety at Work in Control panel

る AS-Interface Safety at Work を採用している。

5.2 安全オープンネットワーク

AS-Interface Safety at Work (SAW)は、オープンネットワークである AS-Interface に安全機器を接続するために開発された通信仕様で、安全機器の配線をネットワーク化し、制御系と安全系の統合を可能にした安全オープンネットワークである。また、SAW は安全規格 EN954-1 カテゴリ 4 および機能安全規格 IEC61508 SIL3 に適合しており、通信仕様について TÜV Nord (ドイツ技術試験協会) ならびに BGIA (ドイツ法令労災保険協会) から認証されている。

図 14 のようなシステム構成で図 13 に示される安全機器すべてを EN954-1 カテゴリ 3 で制御することが可能である。AS-Interface Safety at Work は、ソフトウェアを用いたより高度な安全システムを構築可能であり、複数の安全機器の分散制御を行うには最適といえる^{[7], [10], [11]}

6. ロボット制御セル生産システムの安全方策の効果

今までに述べてきた事例のように設備の安全化を図ることによって、多くの効果を達成している。平成 12 年稼働開始以来無事故を継続しており、当初の構想通り安全化が実現されているといえる。また、生産量も増大し続けており、「安全性」と「生産効率の向上」が同時に実現できることを事例として実証できた。

また、自社の安全機器の効果の実証にとどまらず特に、人間工学面にまで踏み込んだ「安全」の考え方や、ユーザビリティへの配慮など、リスクアセスメントを有効に活用した取り組みを進めることができた。

おわりに

本稿は、国際安全規格の考え方を実際の設備へ適用した例を示し、本質安全の構築に安全機器が有効であり「高生産性」と「安全性」の両立が可能であることを報告した。ロボット制御セル生産システムは、革新性、生産性、安全性、環境対応性などが認められ、2005 年夏に第 1 回ものづくり日本大賞の優秀賞を受賞しており、今後とも機械の本質安全を構築し、本システムを進化させてゆく

ことで安全な人と機械の最適環境の構築に努力してゆく所存である。

参考文献

- [1] ISO12100-1, -2: 2003, Safety of Machinery - Basic concepts, general principles for design - Part 1: Basic terminology, methodology, -Part 2: Technical principles
- [2] ISO14121: 1998, Safety of Machinery – Principles of risk assessment.
- [3] ISO13849-1: 1999, Safety of machinery -- Safety-related parts of control systems -- Part 1: General principles for design
- [4] IEC60204-1:2005, Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements
- [5] ISO13850: 1996, Safety of Machinery – Emergency Stop –Principles for design
- [6] 向殿：国際化時代の機械システム安全技術，安全技術応用研究会，日刊工業新聞社(2000)
- [7] IDEC 編：安全コンセプトブック，2005 年版
- [8] 前田 他：操作表示器への C C スイッチ導入による安全性向上への検討，ヒューマンインタフェース学会，ヒューマンインタフェースシンポジウム’ 99 論文集，p363-368 (1997)．
- [9] 延廣 他：非常停止スイッチとイネーブルスイッチにおけるヒューマンインタフェースとしての安全機能の役割，ヒューマンインタフェース学会，ヒューマンインタフェースシンポジウム 2003，pp455-458(2003)
- [10] 清水 他：機械安全機器に必要な安全機器のネットワーク化によるユーザビリティの向上，ヒューマンインタフェース学会，ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004，pp735-758(2004)
- [11] T.Shimizu, M.Dohi, H.Iwakura, N.Tadashi, M.Kawakami, J.Hashiyama, M.Suzuki, A.Shimaji, A.Ito, T.Fujita, “Usability improvement with safety network and application to semiconductor manufacturing equipment”, 4th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems, SIAS2005, Chicago, Sept.26-28 (2005)
- [12] 藤田 他：“ロボットを用いた次世代生産システム =アセンブルショップにおける生産性と安全性の向上=”，ロボット，No. 144 p. 46-57，2002 年 1 月
- [13] 厚生労働省・中央災害防止協会：機械設備の安全化に係わるリスクアセスメントデータ集—機械使用事業場の取り組み— “III-8. ロボットセル生産システム「アセンブルショップ」におけるリスクアセスメント”，p. 115-126，平成 17 年 3 月
- [14] 中央災害防止協会：機械設備のリスクアセスメント事例集，2006 年発行予定