機械安全—支援的保護システム (Supportive protective system, SPS) (統合的生産システム (IMS) における SPS のリスク低減効果)

清水 尚憲^{*1}, 大塚 裕^{*2}, 濱島 京子^{*1}, 土屋 政雄^{*3}
梅崎 重夫^{*1}, 福田 隆文^{*4}, 北條 理恵子^{*1}

Safety of machinery—Supportive Protective System (SPS) (Part 1: Risk reduction of the SPS in an Integrated Manufacturing System (IMS))

Shoken SHIMIZU^{*1}, Hiroshi OHTSUKA^{*2}, Kyoko HAMAJIMA^{*1}, Masao TSUCHIYA^{*3},
Shigeo UMEZAKI^{*1}, Takabumi FUKUDA^{*4} and Rieko HOJO^{*1}

^{*1} Mechanical System Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health (JNIOSH)
1-4-6 Umezono, Kiyose-shi, Tokyo 204-0024, Japan

^{*2} Planning Group, Automation Center, Sales & Marketing Division HQ, Industrial Automation Company, OMRON Corporation
Shinagawa Front Building 7F, 2-3-13 Konan Minato-ku, Tokyo 108-0075, Japan

^{*3} ADVANTAGE Risk Management Co., Ltd., Nakameguro GT tower 17F, 2-1-1 Kamimeguro, Meguro-ku, Tokyo 153-0051, Japan

^{*4} Department of System Safety, Nagaoka University of Technology
1603-1 Kami-Tomioka machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

Received: 24 September 2017; Revised: 24 January 2018; Accepted: 16 April 2018

Abstract

Based on the worldwide situation, it is necessary for the Japanese mechanical industry to consider risk-reduction strategies that match real production site. We have established a new risk-reduction method named supportive protective system (SPS), which targets integrated manufacturing system (IMS). The aim of the SPS is to provide effective residual risk-reduction using a combination of appropriate information and communication technology (ICT) equipment without depending on workers' attentiveness. Workers' qualifications and rights, the target machine, the work content, the place of the work and the operation time would become clear by introducing SPS. Under the SPS, work will only be allowed when ID information and the target machine of the tag held by a worker are matched with information from the control machine located in the work area. It is possible to prevent dangerous side errors caused by human. The SPS should be used in parallel with the "protection plan"—the education and training management. The SPS was developed with a combination of a time of flight 3D (TOF3D) camera and radio frequency identification (RFID) equipment in the present study. The SPS was experimentally introduced into an IMS site of company A, which produces large motors. The qualifications and rights to perform non-routine work tasks, such as cleaning or maintenance work at this site, were examined using the SPS. In addition, we examined the accuracy of the SPS in counting workers' access to the workspaces. When using appropriate ICT, the SPS is an effective risk-reduction method that decreases the probability of errors derived from human error and intended unsafe behavior. The results of the present study demonstrated that the SPS might reduce risk when applying a TOF3D camera and RFID equipment. The SPS is an effective risk reduction method that does not depend on workers' experience and ability.

Keywords : Information and communication technology (ICT), Integrated manufacturing system (IMS), Human error, Residual risk, Supportive protection system (SPS)

No.17-00425 [DOI:10.1299/transjsme.17-00425], J-STAGE Advance Publication date : 20 April, 2018

^{*1} 正員, 労働安全衛生総合研究所 機械システム安全研究グループ (〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

^{*2} (株) オムロン営業本部オートメーションセンタ 計画課 (〒106-0075 東京都港区港南 2-3-13 品川フロントビル 7F)

^{*3} (株) アドバンテッジ リスク マネジメント (〒153-0051 東京都目黒区上目黒 2-1-1 中目黒 GT タワー17F)

^{*4} 正員, 長岡技術科学大学 システム安全専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-3)

E-mail of corresponding author: hojo@h.jniosh.johas.go.jp

1. 緒 言

機械安全は、European Union (EU) における CE マーキング制度の発足 (Massimi and Van Gheluwe, 1994)、欧州整合規格 (European Norm, EN) の制定 (EN, 2003) や国際規格化等が推進されるなど、世界的にも重要性が認知されている。日本でも 2014 年の労働安全衛生法関連の改正 (厚生労働省, 2014a) に伴い、設計技術者及び生産技術管理者に対する機械安全教育カリキュラム (厚生労働省, 2014b) の提示、産業用ロボットと人との協働作業が可能となる安全基準の提案 (厚生労働省, 2015) が行われた。また、作業現場でも国際規格に準じた“機械の包括的な安全基準に関する指針 (厚生労働省, 2007)” が浸透しつつある。

近年、作業現場では非正規雇用者や短期労働者の割合が増え、長年働きながら現場の安全を支えてきたベテランの作業者が減少している。したがって、今までのように「人に頼る安全確保」の方法には限界が来ている。特に、複数の機械を複合的に組み合わせた統合生産システム (Integrated Manufacturing System, IMS) を導入した現場ではロボットの清掃等の非正常作業において経験の少ない作業による労災が依然として発生している (労働新聞社, 2017)。

機械の安全規格である International Organization for Standardization (ISO 12100) / Japanese Industrial Standards (JIS) B 9700 (機械類の安全性—設計のための一般原則) による安全確保のためのリスク低減方策は、本質安全設計方策、安全防護及び付加保護方策、使用上の情報提供の 3 ステップメソッドが原則である (日本工業規格, 2004)。しかしながら、実際の作業現場では、危険点近接作業 (作業者が機械の可動部を停止させずに可動部に近接した状態で行う運転確認、調整、加工、トラブル処理、保守・点検、修理、清掃、除去などの作業) があるため、機械の安全規格の原則のみでは十分にリスクが低減できない場合がある。さらに IMS では、機械設備を組み合わせる事による新たなリスクも発生している。ISO11161「統合生産システムにおける安全性」(2007) においては、危険点近接作業における有効的な安全確保の手段を提供していない。また、ユーザが現場で実施しているリスク低減方策の中には、人の注意力に大きく依存しているものが見受けられるため、不確実性が大きく、作業者にヒューマンエラーが発生すると期待しているリスク低減効果が得られずに重篤な災害が発生する結果となっている。

我が国の機械産業が世界の情勢に対応するため、生産現場の実情に合わせた具体的なリスク低減戦略を検討する必要がある。現在、IMS は多くの生産現場に導入されている。我々は、この IMS を対象とする新たなリスク低減方策として“支援的保護システム (Sportive Protective System: SPS)”を構築した (日本機械工業連合会, 2014, 2015, 2016)。

SPS は、設計・製造者が ISO 12100/JIS B 9700 の 3 ステップメソッドで低減した後の残留リスクを対象とする。SPS は、適切な Information and Communication Technology (ICT) 機器を組み合わせることで、人の注意力に依存することなしに、確定性の高いリスク低減効果を得ることを目的とする。これにより、いつ、どんな資格 (ライセンス) と権限 (能力, スキル) を持った人が、どの機械を対象にどんな作業を行うのが明確になり、作業 ID と作業内容 (対象機械) が合致した時のみ作業の実行が許可される。そのため、ヒューマンエラー発生に対する危険側エラーを防止することができる。但し、SPS は、すでに実施している教育・訓練・管理等の“保護方策”が存在していることが前提であり、これらの代替手段ではない。

我々は今回、Time of Flight-3D (TOF3D) カメラと Radio Frequency Identification (RFID) 機器を組み合わせた SPS を開発し、大型モータを製造する A 社の IMS 現場に実験的に導入した。この現場における清掃・メンテナンス等の非正常作業を行う作業者の資格と作業権限の確認、また、作業者が作業スペースに入退出する時の人数確認の正確さを検証するため、実証実験を行った。

2. 主部

2・1 実験装置・方法

Fig. 1 An appearance of press line at company A (A) and Schematic picture of virtual zones in the press line (B). Workspace was divided into four zones. Area of zone 0 is enclosed light blue. Zone 1, 2 and 3 are located with verge, green and yellow squares, respectively.

A社のプレス生産ライン（図1A）を作業スペースとして4日間実証実験を行った。この作業スペースには、生産ラインセンターのエリアに操作盤と本体からなる1台のプレス機があり、プレス作業の前にアンコイルを含みコイル状の材料を生産ラインに供給するエリアと、プレスした製品を次の過程に運ぶロードを含むエリアがあった（図1B）。この作業スペースを、仮想的にゾーン0から3に分割した。ゾーン0（図1B、水色の部分）は、作業スペースへの入退場時に必ず通過する共通ゾーンであり、各ゾーンへの移動の起点として設定した。プレスされる材料を供給するエリアをゾーン1（図1B、ベージュの部分）、プレス機があるエリアをゾーン2（図1B、緑色の部分）、そしてプレスされた部品を移動するエリアをゾーン3（図1B、黄色の部分）とした。本実験では、作業者の作業スペースへの進入を記録するために使用したゲートは1か所で、入退場ゲートとした（図1B、赤の太線で囲った部分）。SPSにおいて作業スペースを分割することは、安全性と生産性の向上に寄与することを意味していた。例えば、アンコイルの清掃等の非定常作業が生じた場合、通常はゾーンに分割していないため、すべての作業スペースの電源を遮断する必要があった。しかしながら、SPSではゾーン1で作業を行う場合にはゾーン1内の機械の電源は遮断する必要があるが、ゾーン2と3は作業領域ではないので電源は遮断する必要がなく通

Fig. 2 Main control panel (A). Terminals for main gate (B) and zone (C). Each terminal contained a signal tower, a touch panel, an RFID reader/writer and a key hole for an operation key. In the present study, four RF tags and an operation key (D) were used. Though two sensors were equipped inside and outside of the main gate (E), only the sensor outside was used.

Fig. 3 Main gate detect sensors. Two detect sensors were installed for the main gate with L-shaped mounting brackets. One sensor was equipped outside the main gate, and another was located inside of the main gate. The main gate contained an A3001S detect sensor and a control box (Optex, A3001CB). A time-of-flight (TOF) system was adopted as the detect sensor for the main gate. The TOF sensor projected near-infrared light with an 850 nm wavelength into an object and then measured the distance using reflected light from the objects with a special image sensor. Therefore, the TOF sensor was hardly affected by extraneous light. Both sensors, which were equipped inside and outside of the main gate, were placed at the upper side of the main gate and facing the bottom. A worker detection area (the slanted line area) was set using software for an accessory of the TOF sensor.

常運転が可能となった。加えて、ゾーンの境界にはゾーン入退場確認センサであるセーフティライトカーテン（OMRON, 光電管型式名 E3FS）を設置したため、作業者が誤って、あるいは意図的にゾーン 1 以外に侵入した場合、侵入したゾーンに設置している機械は非常停止となった。実際には、ゾーン 0 と 1 の間のライトカーテンはミュート状態とした。作業者に侵入可能か否かを認識させるための合図として、各ゾーン側面と床面に LED ラ

イトテープを張り付け、例えば通常運転は青、条件付き運転は黄、停止状態は赤、非常停止状態は赤の点滅にするなど各ゾーンの状態表示を行った。これによりタスクゾーンの状態の確認を容易にした。

SPS は、メイン操作盤 1 台 (図 2A)、入退場端末 1 台 (図 2B)、ゾーン端末 3 台 (図 2C)、RF タグ 4 個 (OMRON, 型式名 V680-D1KP66T, 43x34x35mm)、操作キー (図 2D)、入退場確認センサ 2 台 (図 2E)、ゾーン入退場確認センサ 3 台の構成とした。SPS の機器すべてを装置コントローラ (OMRON, 型式名 NJ series) が制御した。実験の全容確認用にカメラ 1 台 (オプテックス, 型式名 UWC-1) を使用した。SPS を構成する機器のスペックと機能の詳細は以下のとおりであった。

メイン操作盤:SPS の中枢となる。この装置が定常運転モードである時に作業スペースへの入場を可能とした。メイン操作盤は、操作用のタッチパネル (OMRON, 型式名 NS8-TV)、操作コントローラを搭載していた。さらに、各保護装置から入力信号を取り込み、シグナルタワー及びその他の機器に本システムの判断結果を出力する安全 PLC (OMRON, 型式名 NX-SL, NX-SI/SO) も搭載していた。入退場端末: 作業者が所持する RF タグの情報を読み書きできる RFID のリーダライタ (OMRON, 型式名 V680S-HMD66-EIP)、作業開始登録と終了登録をするためのタッチパネル (OMRON, 型式名 NS5-TV)、操作キー及びラインの状態が把握できるシグナルタワー (パトライト, 型式名 LE-101W) を搭載した。あらかじめ入退場端末内のメモリにマトリクス状のデータ形式で、作業者の資格及び作業能力を登録した。作業スペースへ入退場する際に、操作キーを入退場端末のホルダーに差し込むことで作業者の所持する RF タグが有効になった。RF タグ内のデータと入退場端末内の情報を照合し、作業者の資格及び作業能力が一致するかを入退場端末で判断した。タッチパネルの操作終了後に操作キーを入退場端末のホルダーから外すと、タグ及びタッチパネルの操作ができなくなるため、第三者による端末の誤操作を防止することが可能となった。RF タグ: 入退場及びゾーン端末における作業者の資格及び作業権限確認に用いた。本実験では、タグ A~D のメモリに、作業者識別情報を格納し、それぞれ異なる資格情報や作業権限情報を搭載

Fig. 4 Connections between terminals and main control panel. Main control panel was the main switch of the SPS. After the main control panel was turned on, all experimental procedures started, and all equipment units were shifted to working mode. An operation touch panel (OMRON, NS8-TV model) and the operation controller were equipped onto the main control panel. In addition, the safety PLC (OMRON, NX-SL&NX-SI/SO model), which took the output signal from each protective device into the main controller and sent the safety PLC's judgment to a signal tower and other external units, was also contained on the main controller. The main control panel, main gate terminal, zone terminals and detect sensors for zone access were connected by Ethernet/IP and EtherCAT, which are based on a global standard of Open DeviceNet Vendors Association, Inc.

した。作業可能ゾーン情報を、入退場端末側に搭載した。実験時には RF タグを必ず各作業者が個別に所持することとした。入退場検出センサ：入退場用ゲート外側及び内側に専用治具で各 1 台設置した（図 3）。入退場検出センサは、検出センサ型式名 A3001S（オプテックス）とコントロールボックス（オプテックス、型式名 A3001CB）から構成されていた。検出センサは、赤外線（850 nm）を投光し、対象物から反射光を特殊イメージセンサで受光して距離を測定するため、外乱光の影響を受けにくいという特徴を持つ Time of Flight (TOF) 方式を採用した。入退場ゲート内側と外側の上部にそれぞれセンサを下向きに取り付け、画角内に TOF に付属のソフトウェアで作業検出エリアを設定した（図 3 中の四角の枠で囲んだ斜線の領域）。各作業検出エリアにおいて、入退場ゲートに最も近い境界と最も遠い境界に作業検出ラインを設け作業者の入退場を記録し、カウントした。入退場ゲートの内側に設定した作業検出エリアにおいては、はじめに入退場ゲートに近い作業検出ライン（入退場端末近傍境界線）を通過し、次に遠い作業検出ライン（入退場端末遠方境界線）を通過した場合を進入、また、その逆を退出と定義した。入退場ゲートの外側に設置した作業検出エリアにおいては、はじめに入退場ゲートに遠い作業検出ラインを通過し、次に近い作業検出ラインを通過した場合を進入、また、その逆を退出と定義した。本実験では、入退場ゲートの外側に設定した作業検出エリアの入退場記録を実験データとして使用した。また、TOF センサは、作業検出エリアに入ったものをその形状によって人であるか否かを判断し、さらに人であれば 1 人（共連れなし）なのか 2 人以上（共連れ発生）なのかを判定した。ゾーン入退場検出センサ：プレスライン内のゾーン 1、2 及び 3 への進入口に、それぞれ透過型のセーフティ（光電）センサを設置した。ゾーン端末：ゾーン 1～3 にそれぞれゾーン端末を設置した。ゾーン端末には、シグナルタワー、タッチパネル、RFID リーダライタ及び操作キー用鍵穴を構成していた。ゾーンに進入した後、ゾーン端末に操作キーを差し込むと、ゾーン端末が登録受付状態になった。ゾーン端末のタッチパネルの表示に従い、RF タグをリーダライタにかざして作業認識を行い、あらかじめ入退場操作端末において登録した作業を選択すると作業が開始可能となった。メイン操作盤、入退場端末、ゾーン端末及びゾーン入退場センサ等は、お互いに Open DeviceNet Vendors Association, inc. の国際標準に準拠した EtherNet/IP 及び EtherCAT で接続した（図 4）。メイン制御版は、IMS の一部である、SPS からの入力を受けて判断出力を行う安全 PLC（OMRON、型式名 NX-SL, NX-SI/SO）と操作コントローラの構成とした。入退場及びゾーン端末内部には、RFID リーダライタ等から構成される SPS 部分と、IMS の一部である操作キー、シグナルタワー及びゾーン入退場検出センサという構成とした。記録用カメラ：入退場確認センサの近辺に設置した。この映像を元にして人の動きや操作を確認し、各端末やセンサのデータと照合した。映像は、液晶モニタ付き 4ch デジタルレコーダ（オプテックス、型式名 WT-3000J）に保存した。また装置コントローラで SPS 機器すべての一括制御を行った。

SPS の操作手順は以下のとおりであった。実験開始時にメイン操作盤を起動すると、入退場端末に図 5A の画面が表示された。作業者は RF タグを RFID リーダライタにかざし ID を登録した。画面は作業対象の機械選択に変わり、対象機械を選択するとそのアイコンが黄色に点灯する。さらに、横にある“決定”ボタンを選択すると作業選択ウインドが表示された（図 5B）。作業選択ウインドでは、選択可能な作業のみが黒色で表示され、選択できないものは白色表示となった。作業選択後、“抽出”ボタンを選択すると機械及び作業の種類が決定し、“モニタ”画面に移動した。モニタ画面では、選択された機械及び作業の種類に伴う機械の制御モードを色で表示した（例えば機械 PRESS で教示作業が選択された場合は、PRESS アイコンは、青色となる）。次に、選択したゾーン内に設置したゾーン端末の“作業 ID 確認”画面でタグをかざす。登録されている ID 以外の ID を登録した場合は、“作業 ID が一致しません”ウインドが表示されるので、その場合は“close”ボタンを押し前画面に戻り、正しい作業 ID を登録する必要がある。ゾーンでの作業が完了した場合は、ゾーン端末でタグをかざして作業終了を登録した後、入退場ゲートの入退場端末にて“完了”スイッチを選択し押すと、作業全工程が終了する（図 5C）。本実験では、1) 実験記録用カメラ映像、2) 入退場確認センサ（TOF3D）処理データ、3) RFID ログ、4) 入退場操作端末の操作ログデータ、5) ゾーン 1～3 端末の操作ログデータを収集し、有効データを抽出し、計数した。

本来であれば、SPS は、作業者がタグを携帯せずに作業スペースに侵入した場合、設備は非常停止状態となりすべての機械が停止するが、本研究は実際の生産ラインに SPS を実験的に導入したため、非常停止させることができずに、シグナルタワーで「仮の非常停止状態」として、赤点滅のシグナルを表示することとした。

B

Fig. 5 Operation of touch panel for working in the target zone. At the beginning of the experiment, the main operation panel was activated by the operation key. Worker's registration (A). A screen image appeared on the touch panel of the main gate terminal. Each worker held his or her RF tag over the RFID reader/writer for ID registration. Then, the screen changed to the machine selection. If the target machine was chosen, its icon was lighted up in yellow. Choosing the "Select" button on the side opened up the work choice window. In the work select window, workable and unworkable machines were shown in black and white text, respectively. If the worker pushed the "Pick" button after selecting the machine and work, the screen image was changed to "Monitor". Work edit mode (B). The operation mode of the selected machine and the selected work were indicated with colors on the monitor screen. The machine "Press" and the work "Teaching" were selected, so the icon "Press" became blue. If the worker selected an ID that was not consistent with his/her ID registered in advance, an "Invalid ID" window would come up. In this case, the worker had to return to the previous screen by pushing the "Close" button and then select the correct ID. Work completion (C). When a worker completed the task at the target zone, the worker would register the task's end by holding an RF tag to the zone terminal. After that, the worker moved to the main gate. The work process ended once the worker chose the "Work completion" button in the main gate terminal.

2・2 結果

作業スペースに侵入する際、入退場確認センサがどの程度正確に進入回数を記録しているかを確認するため、入退場確認センサから抽出した進入回数と、実験記録用カメラ映像から実験者二人が目視で数えた回数を比較した(表 1)。

Table 1 Comparison of the number of access from the worker detect sensor at the main gate and the number of access counted manually from picture of the recording camera.

Experiment date	Number of Access from the worker detect sensor at the main gate (times)	Number of Access from the recording camera (times)	Concordance rate (%)
Day 1	31	31	100
Day 2	29	29	100
Day 3	37	37	100
Day 4	15	15	100

その結果、入退場確認センサによる進入・退場回数は目視によるものとすべての実験日において完全に一致しており、入退場確認センサが正確に進入・退出を計測できることが明らかになった。

入退場端末でそれぞれの実験日に作業者が選択した作業を操作コントローラから抽出し、その抽出したデータと実験記録用カメラ映像から目視で実際の作業を確認したものと照合し、入退場端末での作業選択の正しさを検証した(表 2)。結果、選択した作業と実際に行った作業が全実験日において完全に一致した。入退場端末が正しく作動していることが明らかとなった。また、作業者は選択した以外の作業を行うことはなく、選択どおりの作業を行ったことを示唆した。

Table 2 Accesses of Work on Each Experimental Day

Date	Number of access	Work contents																	
		Press teaching		Press dai change		Press preparation		Press adjustment		Repair		Cleaning		Manufacuring		Transportation preparation		Transportation adjustment	
		Sensor	Manual	Sensor	Manual	Sensor	Manual	Sensor	Manual	Sensor	Manual	Sensor	Manual	Sensor	Manual	Sensor	Manual	Sensor	Manual
Day 1	31	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	5	5	3	3	10	10	5	5
Day 2	29	0	0	2	2	1	1	0	0	4	4	8	8	3	3	11	11	0	0
Day 3	37	0	0	2	2	3	3	1	1	3	3	10	10	5	5	11	11	2	2
Day 4	15	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	7	7	1	1	5	5	1	1
Total	112	1	1	6	6	5	5	3	3	10	10	30	30	12	12	37	37	8	8

次に、各実験日のタグごとの入退場操作端末の進入回数と、ゾーン 1～3 の端末の進入回数のログデータの合計が一致するかどうかを調べることで、RFID リーダライタが正しく入退場を検知していたかを確認した（表 3）。結果、タグによる入退場端末のアクセス数及びゾーン 1～3 アクセス数の合計がすべての実験日において完全に

Table 3 The number of access in each zone by RF tag on experiment day 1-4.

		Experiment days															
		Day 1				Day 2				Day 3				Day 4			
RF tag	ID	Total number of access	Number of zone access			Total number of access	Number of zone access			Total number of access	Number of zone access			Total number of access	Number of zone access		
			Zones				Zones				Zones				Zones		
					1	2	3		1	2	3		1	2	3		1
A	Manager	11	3	4	4	6	2	2	2	8	5	2	1	3	2	0	1
B	Press operator	5	0	5	0	7	0	7	0	8	0	8	0	1	0	1	0
C	Transportation machine operator	12	3	0	9	9	5	0	4	14	7	0	7	5	2	0	3
D	Cleaning staff	3	1	1	1	7	4	2	1	7	3	3	1	6	3	3	0
	Total	31	7	10	14	29	11	11	7	37	15	13	9	15	7	4	4

一致していたことが明らかになった。さらに、入退場ゲートで選ばれた機械と作業についての情報が、RF タグによって、選ばれたゾーンに正しく送られるのかもチェックした。作業者が間違いなく選択したゾーンに進入し、選択した機械と作業を行うことができたので、RF タグが正しく情報を運んでいることを確認した。

人及び機具・治具を正しく TOF3D カメラが検出していたかどうかを記録カメラの映像と比較することで確認した。その結果、作業者が大きな荷物や道具・治具を携えて入退場すると、それらを人間として誤認識してしまう場合があった。また、複数で大きな荷物や治具を抱えて入場する場合なども、人の認識が困難になる可能性があることがわかった。しかしながら、床上運転式天井走行クレーンの操作ペンダントを持って入退場した際には、操作ペンダントのケーブルの太さや持ち方等がカメラの認識に影響を及ぼすことはなく、人認識を正確に行うことが確認できた。また、TOF3D カメラにおける作業者の検出は入退場ゲートの外側検出エリアで行い、その検出エリアの外側の境界と内側の境界を使って、作業者の入退場を判断していたが、作業者によっては斜めにゲートに接近する場合があります。二つの境界を通過せずに入退場ゲートに接近したことがあった。その場合は、TOF3D カメラが人認識はできたものの、入退場カウントができなかった場合もあった。

人の特定も含め、全ての機械と作業の選択が入退場端末とゾーン端末の両方で正しい順番で行えたかを確認した。具体的には、a) 入退場操作端末の操作（対象となる機械・作業登録）、b) 入場（選択した機械への移動）、c) 各ゾーン端末操作（選択した機械の作業開始登録）、d) 選択機械での作業の実施、e) 各ゾーン端末操作（作業終了登録）、f) 退場、g) 入退場操作端末操作（機械・作業完了）の選択の順序で操作が正しく実施されているかで判定した。結果として、非常停止状態を示すシグナルタワーの赤点滅表示がなかったため、順番が正しく行われたことが明確となった。

各実験日においてタグを携帯した作業者とタグなしで作業スペースに進入した回数を表 4 に示した。実証実験の 4 日間（計 15 時間 30 分）のべ入場者数は 308 人であった。入場者のうち RF タグを携行し機械の操作と作業を実施した人数は 112 人であった。うち、タグを有して作業スペースに侵入した作業者は 4 日間とも半数であった。

Table 4 Workers entering workspace with and without RF tags.

Date	Access with RF tag (times)	Access without RF tag (times)	Rate of worker with RF tag (%)
Day 1	31	38	44.9
Day 2	29	60	32.6
Day 3	37	73	33.6
Day 4	15	25	37.5
Total	112	196	

2・3 結果の解釈および考察

今回の開発では、労働者保護という観点から、人の注意力のみに依存しない支援的保護システムという新しいリスク低減方策の提案とそのリスク低減効果に関する検証実験を行った。

一般のIMSでは、全作業スペース内のどの機械に対しても作業が可能であり、適切な作業のみを行うことは作業者自身の管理に任されている。万が一権限のない作業を実行した作業者には、技能不足が原因となる労働災害が発生するリスクは大きい。一方SPSでは、作業者にあらかじめ実行可能な作業のみを登録したが、登録及び作業実行が正しく行われたことが本実験によって確認された。また、現在のIMSでは入退出ゲートに可動式ドアを設置し、安全プラグによる入退出管理の対策が採用されているが、どの作業者でも安全プラグを抜き作業スペースに進入することが可能であるため、機械へのアクセスに制限がない。その際、不適切な侵入による挟まれ・巻き込まれ等の労働災害が発生するリスクが大きい。SPSでは、あらかじめRFタグに入力された資格と権限により立ち入り可能な場所が登録されているので、対象となる場所でのみ機械を稼働させるシステムとなっている。本実験によってRF及び各端末が正常に立ち入り情報について作動し、作業者の資格と権限が両者において完全に一致したことが確認された。

今回の実験においてRFIDタグの利用率は半分に満たなかったが、提案したSPSでは、作業の対象となる機械に対して作業者の資格と権限が確認されない限り当該作業を行うことができないため、作業者はRFIDタグを携帯し、事前の作業灯籠を行う必要がある。しかし、今回の実証実験では、SPS出力信号（作業者のID確認結果の出力信号）を直接生産ラインの機械設備の可動受験信号としておらず、パトライトの表示によりその有効性を確認した。したがって実際の生産ラインにSPSを導入した場合には、作業によるRFIDタグの利用率は100%になり、今回の作業者のRFIDタグの利用率の低さは有効性に関しては問題が無いと考えている。しかしながら、実際にRFIDタグを使用する際にスムーズに導入する方法等を今後の課題として考えていく必要がある。

既存のシステムでは、死角にいる作業者を検知することが困難な場合があるため、死角となる箇所に安全マットを設置することでリスク低減を行う事がある。しかし、死角となる箇所全てに安全マットを設置することは現実的には難しいこと、また、安全マットの断線や接触不良等の危険側故障を考慮した断線検出機能付きの安全マットを採用する必要があるという二つの問題がある。さらに、死角以外の作業スペースについては、目視で作業者がいないことを確認したうえで再起動操作を行い機械を稼働するが、作業スペースに作業者がいるにもかかわらず不注意で発見できず、再起動してしまうリスクが高い。一方SPSは、進入した作業者の入退場人数を完全に把握しており、入退場する作業者の人数が一致しない限り再起動できないシステムとなっている。本実験でそれが正しく制御されていることが確認された。

本実験で使用したカメラは、人を認識して、その人数を数えるアルゴリズムとした。人を認識する方法として外側の検知エリアで3次元立体認識（Time-Of-Flight方式）を行っているが、本実験の結果、作業者が大きな荷物や道具・治具を持って入退場する場合は、事前にそれらの大きさ等を考慮して、カメラのキャリブレーションを行う、持ち物を分離して入場するなど3次元立体画像処理に合った調整が必要となることが示唆された。本実験では、カメラの検出条件を入退場ゲートの外側検出エリアの内側と外側の境界を跨ぐこととしていたが、入退場管理において、作業者が斜めに入退場ゲートに侵入したため二つの境界線を通過しないなどの想定外の状況が生

じた。今後は、このような入場の仕方の多様性を考慮し、入退場ゲート内側の検出エリアも使用するなどの設定変更を行うことにより、多様な入退場をカバーし、より正確に入退場を把握することができると思われる。

今回は、入力した情報の漏洩や作業履歴等の書き換えの問題を考慮し、RF タグには作業者 ID のみを格納し、作業者の資格と作業権限データは上位の操作コントローラ側に持たせた。この場合、作業者の資格と作業権限データのマトリックステーブルを操作コントローラへ入力する時には、登録ミスが生じるというリスクがあった。本来、本実験で使用した RF タグには最大 1K バイトのデータ格納が可能であるため、RF タグ内に ID だけではなく作業者の資格及び作業権限データを予め書き込むことも可能であり、作業履歴も格納することが可能であった。その情報を RFID リーダライタで読み取り、各ゾーン端末で照合を行うことによって上位機器との通信が簡便となり、作業履歴の出力も RF タグをかざすだけで出力可能となる。しかしながら、前述の情報漏洩や書き換えといった問題が生じるため、今後は、現場の実情に合わせて RF タグの情報設定および情報管理を慎重に行い、対策する必要があると思われる。対策の一案として、運用時に RF タグに入力されたデータが操作ミス等によって書き換えられることのないように、ライトプロテクトをかけることが有効と思われる。実際の運用においては、入力データの書き換えは特定の権限がある人に限定し、その人以外の作業者には入力データ管理を任せてはならない。さらに事前の教育で RF タグの貸し借の禁止を徹底することが必要となる。

本実験に採用した RFID 機器は、HF 帯 (13.56 MHz 帯) の ISO/IEC 18000-3 モード 1 に準拠した製品である。HF 帯の RFID 機器は電子乗車券やパスポートをはじめとする多くの非接触 IC カードにも採用されている。発信距離は数センチ〜20 センチメートルレベルと長いとはいえないが、安定した発信が可能である。しかしながら、発信距離が短いために、作業者には「かざす」というひと手間が必要となる。手に工具やその他の必要品を持っていた場合にはこの「かざす」という行為のため利便性が低下するという今後の課題がある。今後、HF 帯の RFID を使う際には、ヘルメットや安全靴への RF タグの装着などで課題の解決に臨みたい。なお、HF 帯の代わりに UHF 帯 (920 MHz 帯) の RFID 機器を採用すれば、発信距離が数メートルと長いので、RFID リーダライタに RF タグをかざさなくてもデータの読み取りが可能となり、利便性が向上すると思われる。しかし、UHF 帯の RFID 機器は、金属面や壁等の周囲の環境の影響を受けて電波の反射や干渉が多くなるため、特定したい RF タグ以外のデータも読んでしまう可能性があることが課題である。その対策として、電波吸収体の設置、アンテナの向きの調整、あるいは電波の出力を抑えて読み取り範囲を絞る等が挙げられるが、現場での事前の実験が必須となる。それ以外には、アクティブタイプの RFID 機器の採用が考えられる。昨年度の予備実験では、LF 帯 (125 KHz 帯) の受信のみを行うパッシブタイプと 300 MHz 帯の送信のみを行うアクティブタイプの両方を兼ね備えたセミアクティブ RFID 機器を採用した。アクティブタイプは RF タグに電池を有し、自ら電波を発して RFID リーダにデータを送る仕組みである。このアクティブタイプの RFID リーダは周辺の数十メートルの範囲に存在する RF タグを認識できる。ただし、アクティブタイプの RFID 機器では入退場ゲート (作業スペース) の外側と内側の区別ができないという課題がある。そのため、LF 帯のパッシブ機能を内蔵し、入退場ゲートで入場したかあるいは退場したかの区別を行い、それ以降はアクティブの機能で各エリア内での存在検知をするというやり方になる。この方式は、RF タグを RFID リーダライタにかざすという行為は不要となるが、LF 帯の RFID リーダの形状が非常に大きくなるので設置上の課題が発生する。このように作業者の検知に用いる RFID リーダライタに関しては幾つかの種類や方式があるが、いずれもメリット、デメリットがあるため、現場の状況に合わせたタイプを選定し、事前の現場テストで設置場所、設置方法等を十分に検証しておくことが重要と思われる。

現場のリスクアセスメントの結果では、人の注意力に大きく依存したリスク低減方策となっているが、本実験で使用の SPS は、適切な ICT 技術を活用することにより、リスク低減効果の数値に含まれる人の注意量に依存するという不確定性を限りなく小さくすることが期待できる。結果、評価結果の妥当性と信頼性を向上させることも可能である。今回の SPS は、RFID システムと入退場確認センサ (TOF3D カメラ) を組み合わせた入退出管理システムとしたが、このシステムにより、危険状態すなわち「危険発生の可能性」と「危険源への接近頻度」を下げる事ができ、リスク評価点を総合的に下げることができると思われる。例えば、RFID と入退場確認センサを組み合わせたシステムは、予め入力された対象設備に対する作業者の資格と権限の照合ができない限り目的の作業が実行できないので、不用意に第三者が作業をすることができず、作業領域から全ての作業者が退場しないかぎり再起動が出来ないシステムを構築している。これは、一般の IMS での安全プラグによる入退出管理だけでは適切に管理できなかった「第三者による不用意な作業」と「死角位置での作業中の誤再起動」に対して確実な

リスク低減を行うことが期待できる。一方、SPS においては、タスクゾーンに対するゾーンの分割を行っているため、タスクゾーン以外のゾーンでの機械稼働が通常どおりとなるため、一般の IMS のような全作業スペースに設置している機械を停止させずに異なって、生産性が確保できる。

以上のことから、SPS の導入により作業現場における安全性と生産性の向上が期待できる結果となった。今後は今回の実証実験結果を踏まえた上で、さらなる安全性と利便性を両立させることとする。

3. 結 言

3・1 結論

適切な ICT 機器 (Information and Communication Technology) を単体または組み合わせて使用した本 SPS は、作業者のヒューマンエラーや意図的な不安全行動に起因する危険側のエラーの発生確率を下げ、リスク低減効果の数値に含まれる確定性を高める有効なリスク低減方策といえる。

今回の実証実験で得られた結果から、TOF3D カメラ (Time of Flight-3D カメラ) と RFID (Radio Frequency Identification) 機器を組み合わせた SPS を将来現場に適用することにより、確定性の高いリスク低減効果を得ることが期待される。

SPS は、作業者の経験や能力に依存しない有効なリスク低減方策といえる。

謝 辞

本稿は、一般社団法人日本機械工業連合会の調査研究の補助金による成果を踏まえて作成したものである。本補助金の提供にご尽力いただいた関係各位に深い謝意を表する。

文 献

- EN, 一般設計原則-リスクアセスメントとリスク低減, ISO12100-2010 (2003) .
International Organization for Standardization, Safety of machinery – Safety of integrated manufacturing systems – Basic requirements, ISO11161 (2007) .
日本工業規格, 機械類の安全性.設計のための基本概念, 一般原則.第 2 部: 技術原則, JIS B 9700-2 (2004), pp.4-15.
Massimi, P. and Van Gheluwe, JP., 機械の CE マーキング, 日経メカニカル別冊, 日経 BP 社 (1994) .
厚生労働省, 改正労働安全衛生規則第 24 条の 13 および指針の概要 (2014a), available from <http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei14/dl/120521_01.pdf>, (参照日 2017 年 9 月 20 日) .
厚生労働省, 設計技術者, 生産技術管理者に対する機械安全に係わる教育に関し留意すべき事項について (2014b), available from <<https://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-55/hor1-55-32-1-0.htm>>, (参照日 2017 年 9 月 20 日) .
厚生労働省, 産業用ロボットに係わる労働安全衛生規則第 150 条 4 の施工通達の一部改正について (2015), 基安発 1224 第 2 号通達, available from <<http://www.japaneselawtranslation.go.jp/law/detail/?id=1984&vm=04&re=01>>, (参照日 2017 年 9 月 20 日) .
厚生労働省, 基発第 0731001 号 機械の包括的安全基準に関する指針 (改正) (2007), available from <<https://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-48/hor1-48-36-1-0.htm>>, (参照日 2017 年 9 月 20 日) .
一般社団法人日本監督士協会, ヒューマンエラー対策ハンドブック (2011) .
労働新聞社, 製造ラインで産業用ロボットに挟まれ死亡 (2017), available from <<https://www.rodco.jp/column/10133>>, (参照日 2017 年 9 月 21 日) .
日本機械工業連合会, 平成 26 年度報告書 複合的作業空間における安全確保システム開発部会報告書 (2014) .
日本機械工業連合会, 平成 27 年度報告書 複合的作業空間における安全確保システム開発部会報告書 (2015) .
日本機械工業連合会, 平成 28 年度報告書 複合的作業空間における安全確保システム開発部会報告書 (2016) .

References

- EN, Safety of machinery –Basic concepts of general principles for design, ISO12100-2010 (2003), (in Japanese).
- International Organization for Standardization, Safety of machinery – Safety of integrated manufacturing systems – Basic requirements, ISO11161 (2007).
- Japanese Industrial Standard, Safety of machinery-General principles for design-Risk assessment and risk reduction –Part 2, JIS B 9700-2 (2004), pp.4-15, (in Japanese).
- Massimi, P. and Van Gheluwe, JP., Community legislation on machinery comments on directive 89/392/EEC and directive 91/368/EEC, Nikkei Mechanical, Nikkei Business Publication Inc. (1994).
- Ministry of Health, Labor and Welfare, Ordinance of Industrial Safety and Health (Revision), Article24-3 (2014a), available from <http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei14/dl/120521_01.pdf>, (accessed on 20 September, 2017).
- Ministry of Health, Labor and Welfare, Sekkei Gijutsusha, Seisan Gijutsukanrisha ni taisuru Kikainzen ni kakawaru kyoiiku ni kannshi chuisubeki jikou ni tsuite (2014b), available from <<https://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-55/hor1-55-32-1-0.htm>>, (accessed on 20 September, 2017), (in Japanese).
- Ministry of Health, Labor and Welfare, Section 9 Industrial Robot (Articles 150-3 to 151) (2015), available from <<http://www.japaneselawtranslation.go.jp/law/detail/?id=1984&vm=04&re=01>>, (accessed on 20 September 2017).
- Ministry of Health, Labor and Welfare, Guidelines for comprehensive safety standards of machinery (Overview), revision (2007), available from <<https://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-48/hor1-48-36-1-0.htm>>, (accessed on 20 September, 2017).
- NihonKantokushiKyokai, Human Error Taisaku Book (2011).
- Rodo Shinbun Sha, A worker had been dead by being caught in an industrial robot in a manufacturing line (2017), available from <<https://www.rodco.jp/column/10133/>>, (accessed on 21 September, 2017), (in Japanese).
- The Japan Machinery Federation, Subcommittee report 2014, Supporting Protective System under Integrated Manufacturing System (2014), (in Japanese).
- The Japan Machinery Federation, Subcommittee report 2015, Supporting Protective System under Integrated Manufacturing System (2015), (in Japanese).
- The Japan Machinery Federation, Subcommittee report 2016, Supporting Protective System under Integrated Manufacturing System (2016), (in Japanese).