人-機械共存環境における安全性と生産性の両立を実現する協調安全システム

福井　秀利[*1]　藤谷　繁年[*2]　清水　隆義[*1]
前田　育男[*1]　土肥　正男[*1]　藤田　俊弘[*3]

Collaboration safety system realizing compatibility between safety and productivity in human-machine coexistence environment

Hidetoshi Fukui[*1], Shigetoshi Fujitani[*2], Takayoshi Shimizu[*1], Ikuo Maeda[*1], Masao Dohi[*1] and Toshihiro Fujita[*3]

Abstract - The collaborative field of human and machines is one of the next generation manufacturing sites that achieves flexibility and high productivity. In such a manufacturing site, in order to secure operator's safety and gain trust of workers for safety, it is necessary to construct an optimum system by utilizing mutual information of human and machines. In this research, in order to realize a high level of productivity and safety in a collaborative field of human and machines we propose the concept and system of collaboration safety and state the consideration based on it.

Keywords: Safety, Factory Automation, Connected Industries

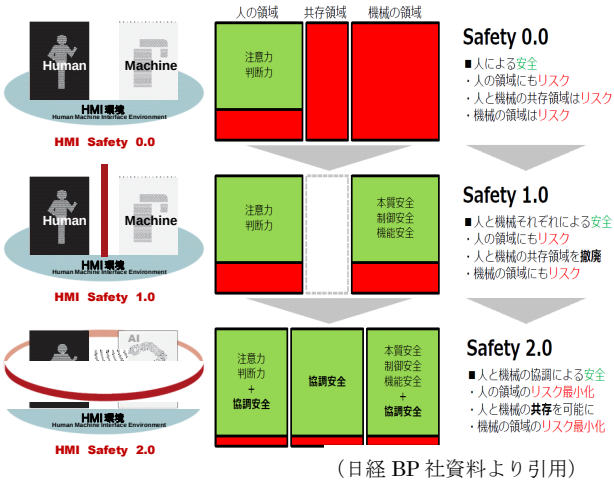
1.　はじめに

わが国では、IoT（Internet of Things）を使って、全ての人とモノがつながり、様々な知識や情報が共有化され、今までにない新たな価値を生み出すことで、少子高齢化、地方の過疎化、貧富の格差などのさまざまな社会課題の解決と経済発展を両立するSociety5.0の実現を目指している。また、ものづくり分野においても経済産業省から発信されている”Connected Industries“ として、IoT産業を拡大し、ロボット、AI（人工知能）などの新しい技術を活用し、人と機械が協調する社会を構築していこうとする第四次産業革命が急速に進んでいる。それに伴って、顧客の要求も多様化しており、フレキシブルでかつ安全性と生産性を確保したものづくりが求められてきているが、人と機械が共存し協調するものづくりの現場を実現するためには、これまでの安全の考え方だけではその実現が難しくなってきている。

本稿では、ものづくり現場の進化に伴い、変革する安全の考え方を紹介するとともに、人 - 機械共存環境における生産性と安全性を確保するために最適な協調安全の考え方を述べるとともに、その実現に必要な技術とその実現方法について提案する。

2.　安全の考え方変遷

図１に示すように、安全の考え方はものづくり現場の変革とともに変遷してきている。日本古来の考え方では、人の注意力や判断力のみに依存し安全を確保する「Safety0.0」であるが、人は間違えるものであり、この考え方だけで安全を確保することは難しい。そのため、ものづくり現場では、機械（危険源）を柵で囲い、人が



（日経 BP 社資料より引用）

図１ Safety2.0 人と機械の協調安全

Fig.1 Safety 2.0 Collaboration Safety Concept

*1: IDEC㈱技術戦略本部国際標準化・Safety2.0推進部
*2: IDEC㈱技術戦略本部技術戦略・知財推進部
*3: IDEC㈱常務執行役員技術戦略本部長IDECｸﾞﾙｰﾌﾟ C.T.O.
*1: International Standardization and Safety 2.0, R&D Strategy HQ, IDEC Corporation Technical Strategy and Intellectual Property Promotion Division, R&D Strategy HQ, IDEC Corporation
*2: Technical Strategy and Intellectual Property Promotion Division, R&D Strategy HQ, IDEC Corporation
*3: Senior Executive Officer, Chief Technology Officer, IDEC Corporation, C.T.O. of IDEC Group

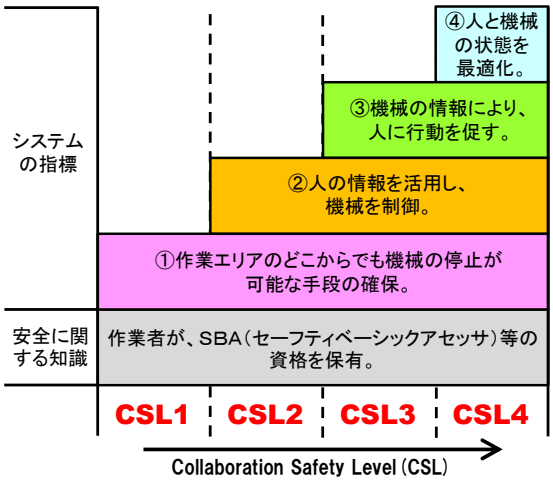
図２　人と機械を情報で繋げることで協調安全を実現

Fig. 2 Realization of collaboration safety by connecting human and machine

近づく際には機械を停止させるといった「隔離と停止」の原則に基づいた機械システムの設計により安全を確保する「Safety1.0」の考え方が基本となっている。それに伴いものづくり分野では機械および機械類の安全に関するさまざまな国際安全規格が存在しており、それらの規格に適合させることでフェールセーフやフールプルーフに配慮された機械が設計できるように整備されている。

しかしながら、近年、よりフレキシブルで高い生産性を実現するために、機械をできるだけ止めることなく人と機械が協働できる環境が求められており、「隔離と停止」の原則のみならず、新たな安全方策を構築することが必要となってきている。そこで、人と機械が協働する現場での安全を確保する協調安全である「Safety2.0」という新しい安全の考え方が日本発の考えとしてグローバルに向けて提案されている。

図 2 に示すとおり、Safety2.0 は人・モノ（機械）・環境が協調して安全を構築するものである。つまり、人の情報により機械を制御し、機械の情報により人に行動を促す。そして、人と機械の環境を、ICT 技術等を用いて最適化する。人の情報としては、例えばセーフティアセッサなどの機械安全に関する資格情報や、保全員/管理者といった役割に関する情報、職務経験にもとづく作業者の安全に関する力量等の静的情報や、作業者の位置情報などの動的情報、脈拍や体温等の健康状態についての情



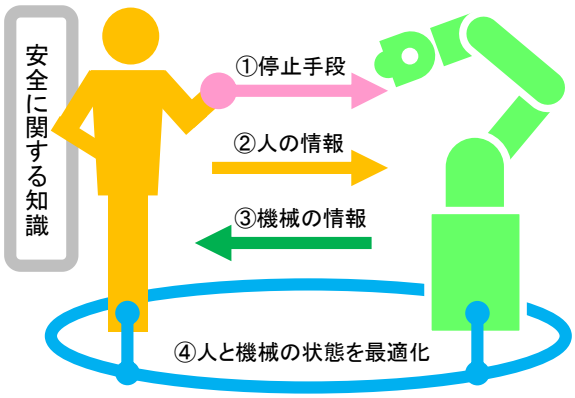


図３　Collaboration Safety Level

Fig. 3 Collaboration Safety Level

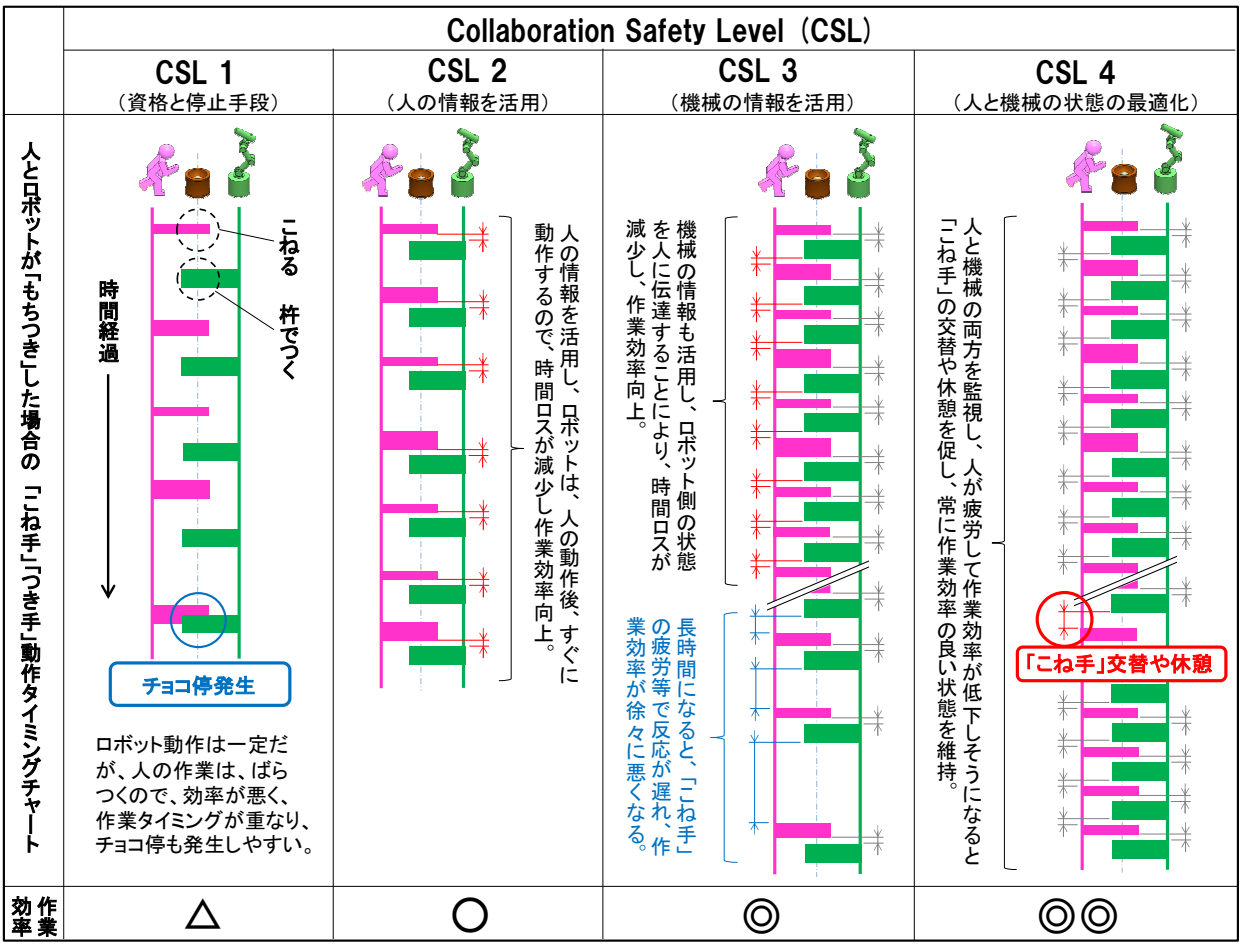


図 4 “もちつき“における CSL と作業効率

Fig. 4 CSL and Productivity in the ”MOCHITSUKI”

報、とっさの反応等の動作情報、操作に関する情報などがあり、これらの情報を機械に与えることにより機械の速度制御などを最適化することができる。

3. Safety2.0 と協調安全レベル CSL

これらの考え方をもとにした協調安全の水準を Collaboration Safety Level（CSL）と呼称し、図 3 に示すように、CSL1～4 の 4 段階のレベルに分け、協調安全の性能水準として、われわれは提案してきた。

CSL1 は最もベーシックなレベルであり、作業者がセーフティベーシックアセッサ等の資格を有していること（基本的な機械安全に関する知識を有していること）と、人の安心感を確保する観点から作業エリアのどこからでも機械の停止が可能な手段を確保していることの 2 つの要件を満たすことが求められる。

CSL2 は CSL1 の要件に加えて、人の情報を活用し機械を適切に制御することが求められる。

CSL3 では CSL2 の要件に加えて、機械の情報を人に伝え、人に適切な行動を促すことが求められる。

CSL4 では CSL3 の要件に加えて、人と機械の状態を最適化することが求められる。

この我々が提案する CSL のコンセプトは従来の欧米発祥の安全の考え方とは全く異なるが、それを否定するものでは無く、補完するものである。図 3 に示すように、従来安全のレベルを示す指標としては、前述したパフォーマンスレベル（PL）や安全度水準（SIL）が用いられている。これらは機械システムの安全関連部の安全度を危険側故障率等で定めたものである。一方、協調安全レベル（CSL：Collaboration Safety Level）は、人と機械が共存する環境全体を評価対象としており、人と機械の協調安全性を定めている。

4. もちつきモデル

さらにわれわれは、CSL と作業効率について、高度な協調作業の一つとして“もちつき“を例にあげて、協調安全レベルを説明してきた。”もちつき“は、人と人が阿吽の呼吸で、もちを作るために「杵でつく」「こねる」という作業を交互に行うものであるが、熟練者同士の”もちつき”では、作業速度が極めて早い例もあり、協調と作業効率向上の観点から、作業を人同士から、人とロボットに置き換えた場合の比較としては最適であると考える。

まず大前提として、作業者はもちつきについての基本的な動作や手順等を学ばなければならない。人とロボットの場合も同じく、作業の内容、ロボットの取り扱いや注意点等を学ぶ必要があり、セーフティアベーシックアセッサー等の資格を有している（基本的な機械安全に関

する知識を有している）ことが必要である。また、危ないと感じた場合は、すぐに作業を中止する必要がある。人は、「ちょっと待て！」等、声で相手に伝えたりすることができるが、人とロボットの場合は、即座にロボットを停止させる手段を常備していることが重要になる。具体的には、作業者が常に手の届く範囲に停止スイッチがあることが必要であり、この２つの条件を満たすことを最もベーシックな CSL1 とする。

CSL2 では、CSL1 の条件に加えて人の情報の活用を条件としている。“もちつき”では、杵を持った「つき手」は、「こね手」の熟練度や動作状態をよく確認して作業を行っている。「つき手」がロボットの場合、「こね手」が初心者であれば、「こね手」の動作情報をロボットが活用して、「こね手」に合った速度で動作するといったことになる。

CSL3 では、CSL2 の条件に加えてロボット側の情報伝達を条件としている。前述したように人は、何か動作を行う際に、掛け声や目配せ、予備動作、姿勢などでも動作予測は可能であるが、ロボットは、いつ動き出すのか、どの方向に動くのか、どこまでアームが到達するのかがわからない。これらの情報を視覚や聴覚情報などで人側に伝達するために、例えば表示灯やブザーを設置し、作業者に適切な行動を促すことを条件としている。CSL4 では、CSL3 の条件に加え、作業者とロボットの状態を最適化することを条件としている。“もちつき”では、それを周囲で見ている第三者が、2 人の作業の様子を観察して、2 人が気づかない異常、例えば死角から人が接近していることや、道具等の異常、疲労状態等を見て交代を促したりするようなことであり、人―ロボットの場合も同様に、作業者とロボットの共存環境をネットワーク等により監視することを条件としている。

図 4 は、”もちつき”で人と機械の動作を CSL 別のタイミングチャートとして表したものである。CSL1 の場合、作業者は資格と停止手段を持っているが、ロボットは一定周期の動作を行うだけである。それに対して作業者は、自分の感覚を頼りにしながら作業を行うため、人の動作や時間間隔のばらつきも考慮して、ロボットは遅い作業速度となってしまう。また、自分の感覚に頼るため、タイミングを間違えて、ロボットに接触、停止（チョコ停）させてしまう場合もある。

CSL2 の場合、ロボットが人の情報を活用することで、人の作業の後、最短時間で動作を行うことができるので、同じ時間内に多くもちをつくことができる。

CSL3 の場合、作業者は機械側からの情報伝達を活用するため、恐れることなく、動作を行うことができるため、同じ時間内でのもちつき回数は CSL2 よりもさらに高くなる。

CSL4 の場合、人の反応速度が低下してくれば、人と機械の状態を最適化するために作業者の交代を行うことにより、もちつき回数が多い状態を長時間安定的に維持できるので作業効率はさらに高くなる。

5. Safety1.0 から Safety2.0 へ

では、Safety1.0 と Safety2.0 は、人と機械の関係においてはどのような違いがあるのだろうか。図 5 は、Safety1.0 と Safety2.0 の違いを説明した簡易なシステム例である。Safety1.0 の環境での安全対策は、隔離と停止の原則に基づき、危険源であるロボットを柵で囲んでいる。自動運転中に人がアクセスすることができないため、人の情報機械に与える必要はない。これは技術的に安全を確保していることはもちろんであるが、危険源が柵で囲まれていること自体、「ロボットがいつ動き出そうと、どの方向に動きだそうと、どこまでアームが到達しようと、柵内のことであり、自分自身とロボットが隔離されている。」という、作業者の安心感にもつながっている。

一方、人とロボットが協調作業を行う Safety2.0 の作業現場はロボットと作業者は隔離されておらず、ロボットが安全な動作をするためには、どのような知識、資格を持った人が近くにいるのか、人がどこにいるのか、どういう状態なのかという情報をロボットに正確に伝えるこ

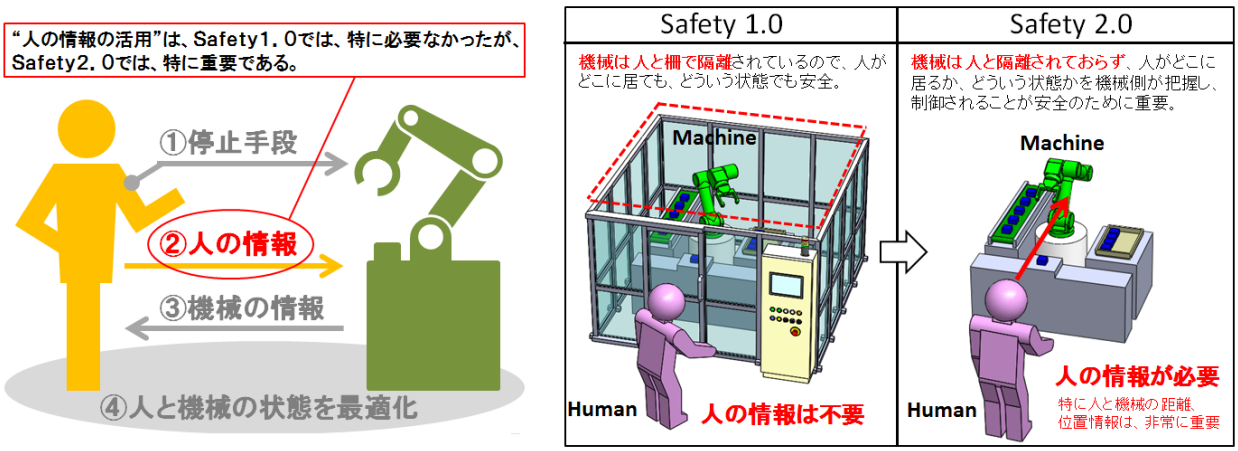


図 5　Safety1.0 と Safety2.0 の違い

Fig.5 Difference Safety1.0 from Safety2.0

表１　センシング機器の例

Table1 Sensing devices

種類	静脈認証	RF ID	静電容量	バイタル	レーザスキャナ	ビジョンセンサ	UWB	3D LIDAR
人・物認証	○	○	×	×	×	△	○	△
位置測定	×	△	×	×	○	○	◎	○
状態監視	×	×	×	○	×	△	×	×

とが非常に重要となる。もちろん、そういった現場では協働ロボットと言われる、人体に接触すれば停止するといった機能を備えたロボットを使用し、重大事故につながる可能性は低いが、作業者がロボットに接触してロボットが停止した場合、その都度ロボットは原点調整などのキャリブレーションをする必要があるなど、協働作業の生産性を著しく低下させる原因となる。

6.　人の情報をセンシング

つまり安全性を確保しながら、高い生産性を維持するためには、人の認識情報、位置情報および状態をセンシングし、ロボットにリアルタイムにそして正確に伝えることで、ロボットが人との接触を回避することが必要となる。人のセンシングに利用できる技術は、現状でもさまざまな技術があると考えられる。その中で代表的な技術を表 1 に示す。まず人の認識を行うには、静脈認証などの生体認証機器が挙げられる。この技術は、作業者がどのような知識、経験や資格を有しているかなどの情報を得るのに最適である。ただし、あくまで過去の経験などからどういった行動を取るのかを機械・ロボットが予測するだけなので、ロボットが正確に行動を把握することはできない。また、認証を行うには、RFID を使用することもできる。この場合、位置情報も得られるが、仕様距離内に存在有無のみしか検出することができない。

続いて、人がロボットに当たる前に検知するための接近検知デバイスとして静電容量センサが挙げられる。この技術は、人とロボットが接触する前に検知することができるが、検出距離が安定しない。また、静電容量の変化を検知するため、検出体として、人体だけではなく、水や金属などの導体にも反応するため、何が接近したのかは判別できない。さらに、ロボットのアームやワークを検出することも想定されるため、取り付け位置や感度の設定にも制約がある。接近検知デバイスとしてはレーザスキャナや他にも、超音波のタイプや ToF センサもあるがそれぞれ、死角ができるもしくは、人が近づいたのか、物が近づいたのかわからないといった問題がある。

実際のアプリケーションでは、人が近づいたときは低速運転、もしくは停止する必要があるが、ワークが正常に接近する場合はロボットを低速運転、もしくは停止させる必要はない。ビジョンセンサや 3DLiDAR を利用する場合、人と物の認識を行うためには、それ相応の画像処理を行う必要があり、そもそも検出できない場合が想定されるのと、検出できた場合でも処理が重くなるので、リアルタイム性を満足できるかどうかという問題もある。一方、近年日本でも周波数帯域が使用できるようになった UWB の技術は物流倉庫の人の動きをトレースするアプリケーションなどで利用されている。この技術は、RFID 同様、人がタグを装着している必要があるが、認証や位置測定を比較的精度良く行うことができる。

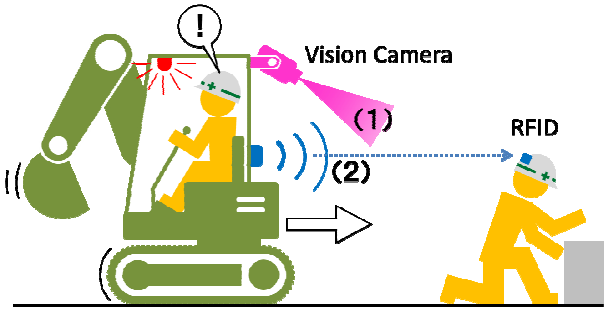


図 6 Safety2.0 の例 1

Fig.6 Safety2.0 system1

7.　Safety2.0 の具体事例

そういったセンシングデバイスを用いた実際のシステムで課題などを考察する。図 6 はパワーショベルの後部に取付けたビジョンカメラと RFID で後方の作業者を検出しパワーショベルのドライバにライトなどを使って、危険を知らせるというシステムである。このシステムはそもそも建築現場などで、パワーショベルがバックする際、後方の作業者に気がつかずに接触する事故が発生する可能性があるが、パワーショベルを本質的な安全設計で接触しても人体に重大な危害を加えないような重量、エネルギー、材質に変更することは難しい。また、パワーショベルを柵で囲って人と隔離するような Safety1. 0 を実現することはできない。そこで、隔離と停止ではなく、人の情報を機械に伝えて安全を確保する Safety2.0 のシステムを実現している。このシステムを搭載することにより、多数の事故を未然に防ぐことができると考えている。しかしながら、ビジョンカメラによる人認識は画像処理を使っており、作業現場の路面状況もさまざまで、そもそも認識できない場合や認識できても時間がかかる場合がある。また、RFID は RFID のタグが取付けられたヘルメットをかぶることが検出の条件になるため、ヘルメットをかぶり忘れていたなど検出できない場合も考えられる。一方、ビジョンカメラや RFID で検出がうまくいった場合でも、危険を検知してドライバにそれを知らせるシステムであるため、ドライバが集中力を欠いていた場合やそもそもドライバが熱中症などで意識を失っていた場合などには危険回避の効果が低くなることも想定

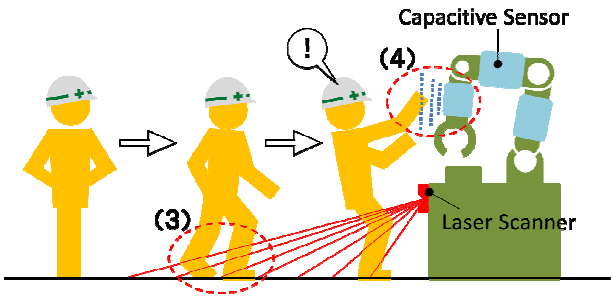


図 7 Safety2.0 の例 2
Fig.7 Safety2.0 system2

される。

他方、図 7 はレーザスキャナを使用して、人の侵入を検知し、人がある一定距離に近づいたら、ロボットは低速運転を行う。もしくは、レーザスキャナで設定した特定エリアに人がいなかったら通常運転を行い、特定エリアに人が侵入してきたら低速運転を行う。一方、協働作業している作業者がロボットアームに接近したら静電容量センサが人を検知し、ロボットは停止もしくは人を回避するといった生産システムである。このシステムでは、レーザスキャナおよび静電容量センサは人と物を区別することができないため、ワークなどの接近については、正常な動作を記憶しておいて、それ以外に人が接近すると検知する。また、静電容量センサはロボットのアームやワークなど人体以外に反応しないように設定しているため、感度はあまりよくできない。さらにロボットのハンドやエンドエフェクタ部など取付けられない箇所も存在するといった課題も存在する。

8. おわりに

人と機械が協働する現場の実現において、人の情報を機械に伝えることは高い安全性を確保するためのみならず高い生産性を達成するために非常に重要である。今後もわれわれがこれまでに培ってきた知見を元に、3DLiDAR や UWB のセンシング技術を発展させて、新たな位置検出や認証を行うシステムを構築するとともに、Safety2.0 への対応を進めていきたい。そして、新たなセンシングデバイスを組み合わせることで、高い安全性と高い生産性を合わせ持ったシステムの構築と日本発の協調安全の評価水準である CSL への活用を進めるとともに、ケーススタディを進めることで新たな安全指標を発信していく所存である。

9. 参考文献

[1] ISO 12100(JIS B 9700)：機械類の安全性 - 設計のための一般原則 - リスクアセスメント及びリスク低減(2010).

[2] ISO 13849-1(JIS B 9705-1)：機械類の安全性 - 制御システムの安全関連部 - 第 1 部：設計のための一般原則(2015).

[3] Safety2.0 プロジェクト：Safety2.0 コンセプト編，日経 BP 社(2015).

[4] Safety2.0 プロジェクト：Safety2.0 具体化編，日経 BP 社 (2016).

[5] 向殿政男：IoT 時代におけるものづくり安全の動向；情報通信学会誌，Vol.34, No.1, pp.41-46(2016)

[6] 向殿政男：ロボットの安全技術の概要と最新動向；ロボット,日本ロボット工業会, No.211, pp.1-7(2013)

[7] 土肥正男：多品種変量生産で先駆けたロボット制御セル生産システムと Industry4.0 を凌駕する新しい考え方（特集　ロボットを活用した生産システム設計のポイント）－（ロボットセルの現状と課題）；機械設計 = Machine design No.60(14), 日刊工業新聞社, pp.14-19(2016)

[8] 藤田俊弘：Safety2.0 時代における経営戦略としての安全への取り組みによる企業力の強化，日経 BP Safety2.0 シンポジウム“日本初！協調安全がもたらす生産現場革命”，日経 BP 社(2016)

[9] 土肥正男：これが Safety2.0 ソリューションだ　安全装置から生産ラインまで、具体例を一挙紹介，日経 BP Safety2.0 シンポジウム“日本初！協調安全がもたらす生産現場革命”，日経 BP 社(2016)

[10] 藤田俊弘：新時代の安全の主役は経営者だ：エグゼクティブに求められる安全への理解と取組み，Safety2.0 国際安全シンポジウム“第 4 次産業革命時代の安全はこう構築する”，（一社）セーフティグローバル推進機構，日経 BP 総合研究所（2017）

[11] Toshihiro Fujita: Safety concept and personnel competency certification program essentially required for implementation of human – robot collaboration safety; the 11th IEC ACOS Workshop “Safety considerations for next generation industrial automation” (2017)

[12] 前田育男：ロボット等を用いたものづくり現場に必要とされる機械安全教育に最適なセーフティアセッサおよびセーフティベーシックアセッサ資格認証制度(SA/SBA)の現状；ロボット，日本ロボット工業会，No.227, pp.50-55(2015)

[13] 土肥、岡田、前田、藤谷、藤田：人-ロボット共存環境における生産性と安全性の向上を高次元で実現する新しい協調安全の考え方と協調安全の水準(CSL)の概念の提案；ロボット，日本ロボット工業会，No.237, pp.1-6(2017)

[14] 藤谷、岡田、前田、稲田、土肥、藤田：人ーロボット共存環境時代における協調安全のためのインターフェースの新しい考え方：ヒューマンインタフェースシンポジウム（2017）