

協調生産システムの安全設計手法

築山 和成, 武田 紗織

近年、人とロボットが協調して製品を生産するための、様々な協調生産システムが開発されている。しかし現時点では適用可能な国際安全規格がないため、協調生産システムの安全設計を行う設計者は、最適な安全設計手法を見出すことができていない。また、協調生産システムのリスクアセスメントにおいて同定される多くの危険源に対して、どこまでのリスク低減が必要かを判断するための手法も存在していない。これらによって、協調生産システムのコスト増大や使い勝手の低下、安全設計の妥当性の証明ができない問題が生じている。

本稿では、この問題を解決するために創出した新たな手法と、その効果について検証した結果を報告する。

まず、協調生産システムのアプリケーションを分析し、“Consecutive application”という新しい概念を創出した。次に、この概念を適用することで、安全設計の基礎となる最も適切な安全基準を選択する方法を考案した。さらに、体系的な危険源同定と、リスク低減の必要性を判断するための手法を検討し、その有効性を確認した。

これらの手法を適用することで、設計者は、安全性を適切に立証できる協調生産システムを、最適な設計コストで使い勝手よく実現することが可能となる。

Safety Design Method for Interactive Manufacturing System

TSUKIYAMA Kazunari and TAKETA Saori

Various interactive manufacturing systems are developing to enable humans and robots to produce products in cooperation. For safety designers who design the safety of interactive manufacturing systems face difficulties to select a practical safety design method. The origin of this issue is a lack of appropriate safety standards for references. Determination measures of risk reduction against identified risks are also challenging to set the criteria for interactive manufacturing system. It leads to increased cost and decreased usability of the interactive manufacturing systems and the inability to prove the safety design's validity.

This paper reports on a new method for the efficient safety design of an interactive manufacturing system is studied and its effectiveness is verified.

First, applications of the interactive manufacturing systems were analyzed and a new concept of “Consecutive application” was created. Then, by applying this concept, a method was devised to select the most appropriate safety criteria as a basis for safety design. Furthermore, a method for systematic hazard identification and determination of the need for risk reduction was studied and its effectiveness was confirmed.

By applying these methods, designers can demonstrate safety of the interactive manufacturing system that adequate cost and user-friendly system.

1. まえがき

モノづくりを取り巻く環境は、製造技術の革新や多様化するグローバル社会の動向を捉え、時々刻々と変化している。この変化に対応する新たな生産システムの事例として、オムロンでは Cell Line Control System (CLCS) を提唱

している。CLCS は、変種変量生産において良品を最も効率良くつくるための生産管理の仕組みと情報プラットフォームを備えたセルラインである。この CLCS の一つとして、人と作業空間を共有して同時に運転する産業用ロボット (Cobot) を作業者と同一のセルに配置し、人と協調して動作する協調生産システムが存在する。

人と機械が協調する協調生産システムでは、働く人の安

Contact : TSUKIYAMA Kazunari kazunari.tsukiyama@omron.com

全を確保するための考え方も進化させる必要がある。従来の安全の考え方では、物理的なガードなどで明確に作業空間を分離するのが基本だったが、協調生産システムは、人と機械が作業空間を共有しながらも安全で生産効率の高いシステムが求められる。

生産システムの安全を実現するためには、ISO などの国際安全規格を活用して設計を進めるのが合理的である。しかし、Cobot を用いた協調生産システムの安全設計を行う際には二つの問題がある。一つ目は、Cobot を用いた協調生産システムのアプリケーションと産業用ロボット類の国際安全規格が想定しているアプリケーションとが合致せず、安全設計が過剰となることで、設備コストの増大と使用者の使い勝手の低下を招くことである。二つ目は、協調生産システムの危険源同定を行う際の問題である。危険源は体系的に抽出し、抽出した危険源に対してはリスク低減の要否を検討しなければならないが、どこまでリスク低減方策を実施すべきかを判断する基準はない。そのため設計者個人の感覚に依存した判断とならざるを得ず、使用者に対して安全の説明責任を果たせない事態が生じている。

これらの問題点に対する解決策として、まず、協調生産システムのアプリケーションの分析を行い、新しく“Consecutive application”という概念を創出した。次にこの新しい概念を用いて、新しい協調生産システムを特定の規格に縛られず設計する方法を考案した。さらに、危険源の体系的な抽出とリスク低減方策の要否の論理的な判断のための手法を検討し、実際のアプリケーションで効果を検証した。設計者は、これらの解決策を用いることで既存規格にとらわれない最適な協調生産システムの安全設計の実現と、安全設計に対する客観的な説明を行うことができるという効果が期待できる。その結果、設計コストの低減や柔軟な設備安全設計の実現にも繋げることができる。

2. 協調生産システムの安全設計と安全規格

2.1 協調生産システムの安全設計の現状

本稿で対象とした CLCS は、人と作業空間を共有して同時に運転する産業用ロボット (Cobot) と作業者とが同一セルに配置されている協調生産システムである。この CLCS は、表 1 のようにワークの組み立て、ネジ締め、レーザーマーキング、検査などの作業を人と Cobot が独立してそれぞれ行いながらも、セルライン全体としては連動して一連の工程を完了させるものである。これらの作業は、図 1 のように 3 つの空間を左から右に向かって順次実行されていく。このように人と機械が協調して作業を行う CLCS を、本稿では協調型 CLCS と呼ぶ。

表 1 工程と作業内容・空間の分析

工程	作業内容	作業が行われる空間
工程 1)	作業者が標準作業手順に従ってワークの組み立て作業を実行する。	人の作業空間
工程 2)	作業者は組み立て作業が完了したワークを Cobot の手前の共有空間にセットし Cobot にワークを引き渡す。	共有空間
工程 3)	Cobot は、共有空間にセットされたワークを掴み、Cobot の作業空間に移動させる。	共有空間
工程 4)	Cobot は、Cobot の作業空間に移動させたワークのネジ締め作業を実行する。	Cobot の作業空間
工程 5)	Cobot は、ネジ締め工程完了後、次工程のレーザーマーキング部にワークを投入する。	Cobot の作業空間
工程 6)	これ以降別の Cobot が、レーザーマーキング部からのワーク取り出し・検査・払い出しの工程を実施する。	Cobot の作業空間

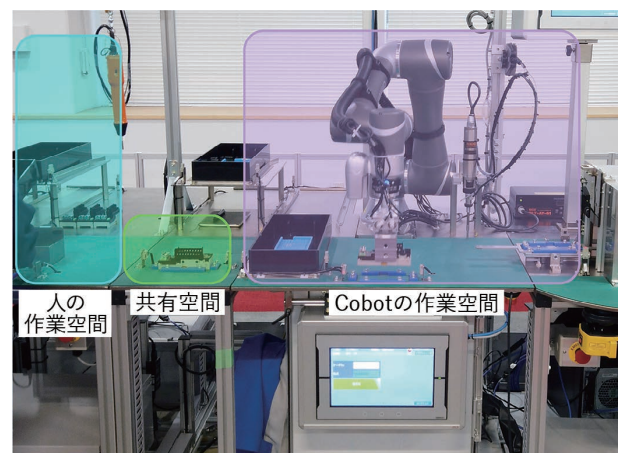


図 1 アプリケーションの空間分析

協調型 CLCS をはじめとする協調生産システムでは、人と機械が作業空間を共有することが前提とされている。このようなアプリケーションの代表的な例としては、Cobot のアプリケーションに関する国際規格である ISO/TS 15066¹⁾ で規定されている Collaborative operation がある。これは、Cobot と人とが同じタイミングで作業を行う Collaborative workspace と、Cobot が単独で動作する Operating space で構成されるシステムであり、本稿では Collaborative application と呼ぶ。

一般的に Cobot を使用する設計者は、Cobot を用いたす

すべてのアプリケーションをまずは Collaborative application と判断し、ISO/TS 15066 や、産業用ロボットシステムの安全規格である ISO 10218-2²⁾ を安全設計の適用規格とする。しかし、これらの規格が対象としているのは、Collaborative application に対する要求事項である。そのため、協調型 CLCS のように Cobot は使用するものの人と Cobot とは独立作業をしながら連動する協調生産システムでは、この二つの安全規格を満足する設計を行おうとすると、コストと使い勝手の点で問題がある。なぜなら、安全規格の規定を厳密に適用すると多くの安全機能を採用せざるを得ないことから、安全機能構築に必要なコストが増大するためである。またそれらの安全機能によって Cobot の停止要因が増えることで頻繁なリセット操作などが必要となり、使い勝手の低下につながるからである。

2.2 協調型 CLCS のアプリケーションと Collaborative application との違い

ここで、Cobot を使用するすべての協調生産システムに ISO/TS 15066 が適用できるかどうかを判断するため、協調生産システムの工程とタスクが実行される空間の観点でアプリケーションの分析を実施する。これにより、既存規格が適用できるかどうかの基準となる、Collaborative application の有無を明らかにする。

まず、表 1 の工程 1)～6) の作業から人と機械 (Cobot) が接近する工程を抽出する。人と機械 (Cobot) の関係が最接近する工程は、工程 2) および工程 3) のワークの受け渡しである。この工程は、人が、人の作業スペースと Cobot の作業スペースの間に設けられた共有空間にワークをセットし、Cobot がそのワークをつかみに行くことで成立する。このとき Cobot は、共有空間の所定の位置にワークが置かれたことをトリガに動作を開始することから、人のワークセット作業と Cobot のワーク把持作業は同時に行

われることはない。そのため、2.1 で述べた二つの産業用ロボット安全規格が規定する、人と Cobot が同じ空間で同時に作業を行う Collaborative operation は存在せず、Collaborative application に含まれないことが判断できる。これによって協調型 CLCS は、Collaborative application とは異なる新たな協調生産システムとして、ISO/TS 15066 によらない安全設計が選択可能であることを明確にできた。

このような新たな協調生産システムのアプリケーションは、図 1 のように、人の作業空間、人と Cobot のワーク受け渡しのための共有空間、Cobot の作業空間の 3 つの空間で構成されるものと定義できる。このそれぞれの空間を Human workspace、Common space、Operating space とし、これらの 3 つの空間で構成される生産システムのアプリケーションを、本稿では Consecutive application と呼ぶ。2.1 で述べた Collaborative application との空間の違いは図 2 のように示すことができる。

2.3 協調生産システムのアプリケーションに応じた安全規格

2.1 および 2.2 で述べたとおり、協調生産システムはアプリケーションの特徴によって Collaborative application または Consecutive application の 2 つに分類することができる。これらを比較すると、表 2 のように表すことができる。

協調生産システムはいずれも人と機械が協調して作業を行うことから人と機械の間に物理的な分離手段はない。しかし人と機械が協調して作業をするための空間は、作業の特性に応じて Collaborative workspace と Common space のいずれかに分けることができる。またこの空間特性から、安全設計の指針として既存の個別機械安全規格が活用できるかどうか異なる。Collaborative application は Cobot を使用し、人と Cobot とが同じ空間で同時に作業を行うアプリケーションであるため、産業用ロボットの個別製品安全規格によりその安全性を評価できる。一方の Consecutive

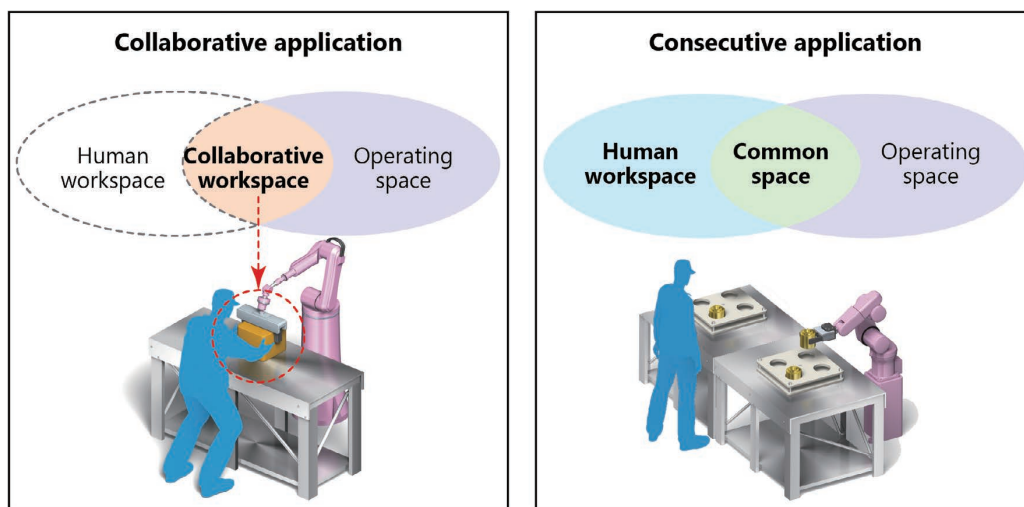


図 2 Collaborative application と Consecutive application の空間構成の違い

表2 協調生産システム (Interactive manufacturing system) の分類

分類項目	協調生産システム (例: 協調型 CLCS). Interactive Manufacturing System	
	Collaborative application	Consecutive application
人-機械間の物理的分離手段	なし	なし
Cobot の使用	必須	任意
人と機械の同時作業	あり	なし
人と機械の作業空間	Collaborative workspace	Common space
個別機械安全規格 (C 規格)	ISO10218-2, ISO/TS 15066	なし

application は、人と機械が連動して製品を作り出すが同じ空間で同時に作業はしないアプリケーションが対象であり、人と連動する機械の種類は Cobot に限定されない。そのため、既存の個別機械安全規格における規定では、適切な安全設計が実現できない。

この表は、協調生産システムの設計の際に行うアプリケーション分析の着目点を示しており、適切な参照規格を選択することに役立つものである。この表を活用することで、Cobot が含まれる場合でもアプリケーションによっては ISO 10218-2、ISO/TS 15066 の適用の対象外であることを明確にできるため、実態にあわないそれらの規格の安全要求事項に対応することによる過剰な安全設計を避けることができる。

3. 協調生産システムのリスクアセスメント

3.1 協調生産システムの危険源同定の現状

協調型 CLCS は、人と機械 (Cobot) の間に物理的なガードなどを設けないシステムであることから、物理的な防護手段がある一般的な生産システムに比べて、危険源へのアクセスが容易である。そのため、機械の稼働エリアに人が誤って入り込む可能性も高いことから、それらの誤った人の挙動すなわち誤使用による危険状態を考慮したリスクアセスメントを行う必要がある。

生産システムのリスクアセスメントでは、幅広いリスクを設計の初期から考慮するために、誤使用を含む様々な事故シナリオを想定し、危険源を漏れなく同定する必要がある³⁾。しかし漏れなく同定することに注力するあまり、現実的にはおよそ発生し得ない危険事象や極めて限定的な条件でしか起こり得ない誤使用も含めて、事故シナリオを数

多く想定することばかりに努力が注がれてしまうことがある。またリスクアセスメントは、多様な経験や知識をもつ人がチームで行うことが望ましいとされている⁴⁾ が、実際には生産システムの設計担当者など特定の人のみによって行われることも多く、想定される誤使用の範囲が担当者の過去の経験などによって精度がばらつくことが問題視されている。さらに、危険源同定の中で想定した誤使用は、「合理的に予見可能」な場合には設計によってそれを避けるための方策を実施しなければならないが、何を根拠に合理的に予見可能か否かを判断すればよいかについては ISO 12100 等の国際安全規格では規定されておらず、個々の設計者の感覚に委ねられている。しかし、無作為に数ばかりを求めた事故シナリオの想定、属人的な経験値や想像力に依存した誤使用の検討、個人の感覚的なリスク低減要否の判断を行っているだけでは、その網羅性や根拠に偏りが生じ、結果的に重大な危険源の見落としやリスク低減の不足につながってしまう。その結果、使用者に対して安全の説明責任を果たせないという問題が生じている。

そこで、2章で取り上げた空間の分類と、人の誤った挙動の分類に着目して、これらの問題を解決する方法を考案した。

3.2 体系的な危険源同定および誤使用の分析によるリスク低減の要否の判断手法

まず、人の誤った挙動に起因する危険源の抽出を体系的に行う方法を検討する。危険状態につながる人の挙動の原因は、図3のように a~d の4つに分けることができる^{5,6)}。この人の挙動の4分類を手がかりとして、協調型 CLCS の空間における危険源と人との関わり・挙動を考慮し、事故シナリオを検討していく。

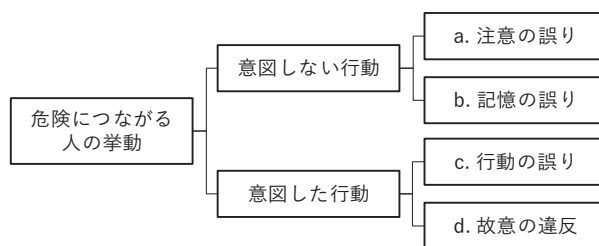


図3 人の挙動の分類

協調型 CLCS に関わる人の挙動に起因する事故シナリオを、機械 (Cobot) が作業を行う Common space と Operating space を対象に検討し、危険状態につながる人の挙動の分類 a~d にあてはめたものを表3に示す。ここでは機械 (Cobot) が Common space に存在しているにもかかわらず人がその空間に侵入することに起因する事故シナリオを No. 1~4 に、Cobot が動作中の Operating space に人が侵入することに起因する事故シナリオを No. 5~8 に記載した。

表 3 人の誤使用による事故シナリオ

No.	空間	人の挙動の分類	事故シナリオ
1	Common space	a	Cobot が Common space 内でワークの移載作業遂行中であることに気付かず、Cobot が Common space から離脱したと勘違いして、次のワークをセットするために手を Common space に侵入させ、エンドエフェクタとワークの間に挟まれる。
2	Common space	b	Cobot のワーク移載工程のプロセスが即時に終了すると見込んで Common space に手を入れたところ、工程完了のための追加タスクを行うために Common space に入ってきた Cobot のエンドエフェクタに衝突する。
3	Common space	c	標準作業手順の勘違いによって、Cobot がワークをつかもうとしているときに Common space に手を入れてしまい、エンドエフェクタに捕捉される。
4	Common space	d	いたずらで Cobot のワーク移載タスクのトリガとなるセンサーを細工した結果、作業者がワークをセットしている途中に Cobot が Common space に侵入し、エンドエフェクタと衝突する。
5	Operating space	a	他工程で発生したエラーに対処する指示を作業者が見誤り、Cobot が正常にネジ締めタスクを遂行中の Operating space 内に侵入し、ドライバーに接触する。
6	Operating space	b	Cobot が自動的にタスクを遂行中に、Cobot が停止していると作業者が誤認識し、状況を観察するために Operating space 内に頭部を侵入させ、エンドエフェクタと衝突する。
7	Operating space	c	標準作業手順の勘違いによって、Operating space 内で Cobot のタスク実行中に手を入れてしまい、エンドエフェクタに衝突する。
8	Operating space	d	Cobot が使用するネジの数量が足りないことを認識した作業者が、Cobot がネジ締めタスクの実行中に Cobot 代わりに Operating space のネジ供給パレットを交換しようとしたときに、パレットを掴もうと動作した Cobot のエンドエフェクタに挟まれる。

次に表 3 で検討した人の誤使用による事故シナリオに対して、リスク低減の必要性を判断するための分析を行う。3.1 で述べたとおり、リスク低減の必要な誤使用を見極めるためには、その誤使用が合理的に予見可能か否かを見極める必要がある。このプロセスを検討し、図 4 のとおりフローチャートにして示した。このフローチャートで合理的に予見可能と判断した誤使用は、その後のリスク見積り等のフローを経て、リスク低減までを行わなければならないものと判断できる。それ以外はリスク低減の必要はないことから、この判断結果を記録することで誤使用の分析を終了できる。

ここで、事故シナリオの原因となる人の動機による判断基準を示す。「a. 注意の誤り」「b. 記憶の誤り」のように人が意図せずとってしまう行動については、それらを誘発することで危険事象を招かない設計が必要であり、合理的に予見可能な範囲として扱う。「c. 行動の誤り」は、なんらかの人の認識の誤りによって意図的に行動をとった結果起きる事象のため、誤った認識や行動の原因を作らない設計とすべきであり、合理的に予見可能な誤使用に含める。

しかし「d. 故意の違反」には、「人の意図的な違反」によって発生するものと、近道反応・省略行動などの「最小抵抗経路」をとることで発生するものとの 2 種類が考えられる。そのいずれにあてはまるかによって合理的に予見可能か否かが分かれることから、さらなる分析を必要とす

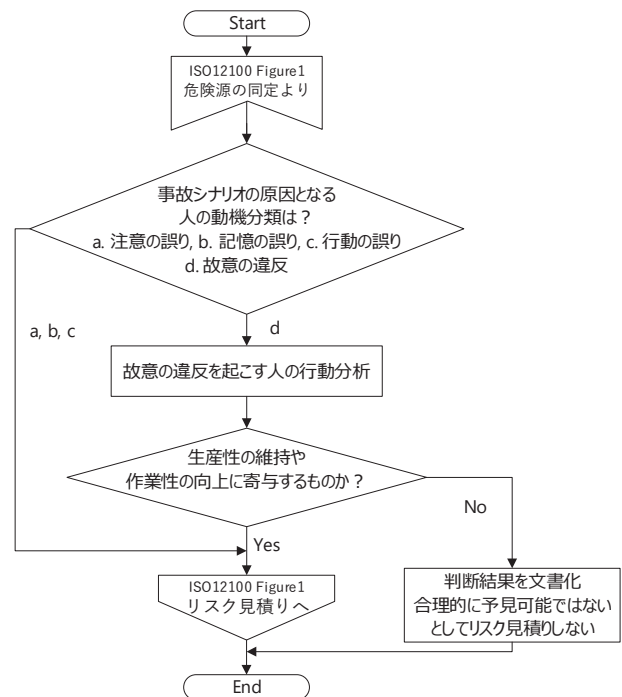


図 4 協調生産システムの誤使用の分析プロセス

る。「d. 故意の違反」のうち意図的な違反は、悪意をもった人による機械の乱用などが考えられる。この機械の乱用については、一般的に機械類の安全性を考える際には検討

の対象としないため、合理的に予見可能な範囲に含む必要はない。一方で近道反応・省略行動によるものは、規定の手順に沿わないことで作業の簡略化や工程の短縮化が図れるなどの、生産性や作業性を向上させる意図でとられることの多い行動である。機械を稼働し続けなければならないというプレッシャーから、不具合発生時などに正しい手順を踏まずにとってしまうとっさの行動もここに含まれる。これらの行動の多くは、生産システムの設計や標準作業手順の不備に起因すると考えられるため、合理的に予見可能な範囲としてリスクを評価し、設計方策を検討しなければならない。つまり故意の違反に含まれる誤使用は、その行動が生産性や作業性の向上や工程の継続を意図したものか否かという「行動の動機」を判断基準とすることで、合理的に予見可能な範囲に含めるべきか否かを判断することができる。

3.3 協調型 CLCS への危険源同定および誤使用の分析手法の適用

これまで述べた判断のプロセスを、表3で抽出された協調型 CLCS に適用し、その結果を以下に示す。

Common space で考慮した事故シナリオのうち No.1～3 は、挙動の分類 a～c にあてはまるものである。そのため、合理的に予見可能な範囲とする必要がある。分類 d にあてはまる No.4 は、作業による制御機器への故意の操作に起因して発生するものであることから、その行動の動機についての分析が必要となる。Cobot は、通常のタスクにおいて作業者が Common space 内の所定位置にワークをセットしたことをセンサーの入力によって検知し、そのワークを Common space から Operating space へ移動させるための動作を行う。この Cobot の移載動作のためのセンサーに対する細工という行為は作業時間の短縮や作業手順の省略などの最小抵抗経路につながらないことから、その行動をとる際の動機は、好奇心やいたずらによるものであると判断する。その結果、この事故シナリオ No.4 は合理的に予見可能ではない、つまり設計上考慮する必要のない誤使用として取り扱うことができる。

同様に、Operating space について考慮したシナリオそれぞれに対して誤使用とすかどうかの判断を行う。挙動の分類 a～c にあてはまる事故シナリオ No. 5～7 は、合理的に予見可能な範囲とする必要がある。分類 d にあてはまる No. 8 は、合理的に予見可能か否かを判断するために工程と違反行為の動機を分析する必要がある。Cobot は、通常のタスクにおいて図5の赤枠部に示されるパレットに存在するネジを画像認識し、ネジを吸着させてワーク上に移動してネジ締めを実行する。その後パレット上のネジがなくなると、空になったパレットの払い出しと新たなパレットの供給を Cobot 自身で行う。そのため、パレット交換は人の標準作業手順になく人はパレット交換の作業に介入する

必要はないが、生産システムの作業時間を短縮するために、この作業工程の Cobot 動作のタイミングを作業者が学習した上で Cobot のネジ締め作業時間内にパレットを交換することを試みる可能性がある。これは生産性を向上させる行為と判断できるため、このシナリオ No. 8 は合理的に予見可能な誤使用として取り扱わなければならないと判断できる。



図5 事故シナリオ No.8 が想定される空間

3.4 危険源同定と誤使用の分析手法の適用のポイントと効果

協調型 CLCS においても、当初は 3.1 で述べたように設計者の経験に依存した危険源同定が行われていたが、今回考案した方法を使用することで、人の誤使用による危険事象を論理的に導き出せた。またそれらの誤使用が合理的に予見可能か否かについて、設計者の感覚に依存せず機械的に判断できることが実証できた。これらによって、協調型 CLCS で想定される事故シナリオに対して、どこまでのリスク低減が必要かを明らかにすることができた。

また、図3による誤使用の分類を活用した事故シナリオの想定と、図4のフローチャートを適用した誤使用の分析にあたって共通して重要なポイントは、「人が行動を起こす原因・きっかけ」「人が侵入する場所」「危険源との関わり・危険状態」である。これらのポイントに着目することで、リスクアセスメントに関与する人の経験や感覚のばらつきを最小化しながら危険源を同定することができ、やみくもに数を求める危険源同定から、体系的な危険源同定に進化させ、設計効率の向上とリスクの見落としの可能性の低減につなげることができる。これらの3つの着目点については、表3のように具体的な表現で記録することで、リスクアセスメントに関与した担当者以外の第三者にも、リスクの成り立ちやリスク低減方策の要否の判断の根拠を明確に示すことができる。

4. むすび

本稿では、協調生産システムの安全設計の問題を解決する手法として、既存の安全規格の適用可否とリスクアセスメントの観点を取り上げてその解決手法を創出し、協調型 CLCS を対象に検証することでそれらの手法の効果を示した。

2章においては、協調生産システムを作業空間および人と機械との作業の同時性の2つの観点で捉え、Collaborative application と Consecutive application の2種類に分類できることを明確にした。これによって、従来は既存規格を選択するしかなかった協調生産システムに対して、アプリケーションの実態に合わせた適切な安全設計とするための手法を示すことができた。3章においては、既存規格に明示されていないことで設計者の論理的な安全設計の妨げとなっていた、人の挙動に起因する事故シナリオの体系的な抽出法や表現方法、抽出された誤使用に対する合理的に予見可能か否かの判断手法を創出した。これらを適用することで、設計時点で考慮しなければならない誤使用に対する判断基準が明確にでき、設計者は協調生産システムの使用者に対する安全の説明責任を果たせるようになる。本稿に示した各手法は、論理的で妥当性のある安全設計を最適な設計コストで使い勝手よく実装するための指針として活用できるものとする。

今後のさらなる取り組みとしては、3.4で示した危険源同定のポイントの具体的な表現方法を反映したリスクアセスメントシート事例の創出と、合理的に予見可能な誤使用を考慮した協調生産システムの新たなリスク低減方策に関する検討を行いたい。これらによって人と機械が自律的に協調する生産システムの進化に貢献するとともに、新たな生産システムの安全化に対する提言として、既存規格等へ盛り込んでいくように活動していきたい。

参考文献

- 1) ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices-Collaborative robots.
- 2) ISO 10218-2:2011. Robots and robotic devices-Safety requirements for industrial robots- Part 2: Robot systems and integration.
- 3) ISO 12100:2010. Safety of machinery-General principles for design- Risk assessment and risk reduction.
- 4) ISO/TR 14121-2:2012. Safety of machinery- Risk assessment – Part2: Practical guidance and examples of methods.
- 5) James Reason, *Menschliches Versagen: Psychologische Risikofaktoren und moderne Technologien (in German)*, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag, 1994.
- 6) ノイドルファ, A. 安全な機械の設計. 田中紘一訳・監修. 第1版, NPO 安全工学研究所, 2002, 365p.

執筆者紹介



築山 和成 TSUKIYAMA Kazunari

インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー
技術開発本部 第1技術部
専門：機械安全



武田 紗織 TAKETA Saori

インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー
営業本部 オートメーションセンタ 技術部
専門：機械安全

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。