解 説

サービスロボットのリスクアセスメントとその課題

Risk Assessment of Service Robots and the Related Issues

木 村 哲 也* *長岡技術科学大学

Tetsuya Kimura* *Nagaoka University of Technology

1. は じ め に

稼働領域を人間の存在領域と共有するサービスロボットを次世代産業として確立するためには、安全性は最も重要な要素である。日本では現在、“次世代ロボット安全性確保ガイドライン[1]”が経済産業省から示されており、その中では製造者によるリスクアセスメントを義務としている。またリスクアセスメントは一連の国際安全規格の中核をなす考え方であり[2][3]、関連する国際安全規格との関係を正しく理解しておくことも重要である。

一方、サービスロボット産業が立ち上がる当初（すなわち現在）は市場規模が小さいため、ベンチャー企業が中心となりロボット開発が進められると考えられている[4]。日本では残念ながらリスクアセスメントの考え方は一般には普及しておらず、ベンチャー企業が自社で開発したロボットに対してリスクアセスメントを実施することは、技術的人的制約から困難が予想される。この現状と、次世代ロボット安全性確保ガイドラインの方向性を考えると、ベンチャー企業がすばらしい性能を有するサービスロボットを開発しても、リスクアセスメントを実施していないばかりに市場に出せない、という問題が近い将来起きかねない。

よって本稿では、リスクアセスメント初学者を想定してサービスロボットに対してリスクアセスメントに取り組む際の課題について説明を行う。

以下では JIS 規格に基づき説明を行う。対応する国際規格は JIS 規格本文内の対応記述を参照されたい（JIS 規格は日本規格協会のホームページ <http://www.jisc.go.jp> で無料で閲覧ができる）。

2. リスクアセスメントの概要

2.1 リスクアセスメントの特徴

国際安全規格では、ある機械が安全であるかどうかの判断は、その機械のリスク（＝事故の酷さ×事故の発生確率）

が規定されたレベル以下であるかどうかで判断される[2]。長さは定規で簡単に計ることができるが、リスクを計る「リスク計」は存在しない。また、リスクを明らかにするために実際に事故を起こすわけにもいかない。このため、リスクアセスメントにより該当する機械のリスクを推定することになる。JIS-B-9702[3]では、リスクアセスメントは「機械類に付随する危険源の審査を系統的方法で実施可能にするための一連の論理的手順である」としている。すなわち、適切なリスクアセスメントを実施することで、系統的にサービスロボットの危険性を明らかにすることが可能となるのである。

また、同規格では「事故履歴がない、事故件数が少ない、又は発生した災害のひどさ（障害のひどさ）が低いということで、自動的にリスクが低いとはならない」との記載があり、安易な経験則に基づくリスク判断を戒めている。日本での事故発生後の記者会見をニュース番組で見ると、関係者が「これまで無事故だから大丈夫と思っていた」という発言をすることをしばしば目にする。これはリスクアセスメントの思想に反する発言である。将来のサービスロボット関連の事故が発生した場合、このような発言が関係者からなされないことが望まれる。

2.2 リスクアセスメントの手順

リスクアセスメントは以下の手順で実施される[3]。

- (1) リスク分析
 - (a) 機械類の制限の決定（意図する使用と合理的予見可能な誤使用の決定）
 - (b) 危険源の同定
 - (c) リスクの見積り
- (2) リスク評価

また、この結果はリスクアセスメントシートとして文章化され、安全対策の妥当性の確認と残留リスクのユーザーへの提示に利用される。

3. サービスロボットのリスクアセスメントの課題

近年、生産現場ではリスクアセスメント（関連法律では「危険性・有害性等の調査」と表現される場合がある）の実施が強く求められている[5][6]。このため、生産現場でのリ

原稿受付 2007 年 8 月 22 日

キーワード: Risk Assessment, Safety, Service Robot, ISO
*〒 940-2188 長岡市上富岡 1603-1

*Nagaoka-shi, Niigata

スクアセスメントに関して実際の実施手順も含めた関連情報が多数公開されている（例えば文献[7][8]等）。しかし、そのノウハウをサービスロボットに直接適用するには難しい場合がある。その原因に、サービスロボットの開放性（利用者、利用環境が限定しにくい）と新規性（類似機械が少ないため、リスクの推定が困難）がある。

以下、この二つの特性を軸に、サービスロボットのリスクアセスメントの課題を考察する。

3.1 「機械類の制限の決定」での課題

「機械類の制限の決定」では利用者からの意見を反映する必要がある。しかし、特に新規性の高いサービスロボットを開発する場合、次の理由により開発者と利用者の間に「思い違い」が生じ、適切な「機械類の制限の決定」がなされない可能性がある。

p1) サービスロボットの利用者が工学的素養をあまり持たない

p2) 開発者がサービスロボットの利用状況を十分把握していない

p1) に対しては、以下の対策が考えられる。

- コンピュータグラフィックの利用：3D-CAD とアニメーションにより臨場感あるロボットの利用状況を提示する。ロボットだけでなく、利用者のモデルも CG に入れ込むことが望ましい。
- モックアップの利用：ロボットの形状と動きを、モックアップにより利用者に実感させる。

p2) に対しては、開発者が十分な時間を取って利用状況を工学的に分析し、リスクアセスメントに必要な情報を明確化する必要がある。しかし、現在のサービスロボット開発では利用予算の都合上、開発スケジュールの制約が厳しい場合があり、「機械類の制限の決定」の安易な簡略化への誘惑が考えられる。特に後述する「合理的予見可能な誤使用」の推定はサービスロボットでは困難が増加し、また実際に事故が起こった場合の製造者責任の中心的課題となることが考えられる（民法上の安全配慮義務での事故の予見可能性、回避可能性に関係する）。「機械類の制限の決定」の安易な簡略化は、サービスロボットビジネスでの命取りともなりかねないので、注意が必要である。

3.1.1 「意図する使用の決定」での課題

生産設備は比較的単純な作業を繰り返し行うことが多い。また類似の設備を用いられることも多く、意図する使用を記述することは、その設備を十分理解している技術者にとっては大きな困難ではないと考えられる。また、意図する使用を決定することは、標準作業表を書くことに関連する。生

産設備に対して標準作業表を作成することは、作業最適化による生産性効率向上を計ることに有効とされており[9]、リスクアセスメントの実施以外にも意図する使用を明確化することの動機付けが生産設備にはある。

一方、サービスロボットは意図する使用のうち、要素作業（腕で物をつかむ、移動をするなど）は明確化可能であるが、それらが複合される意図する使用をどのように取り扱うかが課題である。要素作業の組み合わせで単純に意図する使用を決定しようとする、組み合わせの数の爆発が起こり、記述が不可能となってしまう。また、外部環境との相互作用も考えると、より一層、問題が複雑化する。さらに、サービスロボットが関係する作業は、最適化が求められるほど一般には成熟は進んでおらず、詳細な標準作業書を作成する要求は生産設備ほど高くない。このため、意図する使用を明示する現実的な方法として、いくつかのシナリオを用いることが考えられる。厳密に安全性を保証する場合は、ベトリネットを用いた行動解析など、理論的アプローチが必要であろう。

3.1.2 「合理的予見可能な誤使用の見積もり」での課題

リスクアセスメントでは、合理的予見可能な誤使用も考慮して安全設計を進めることを要求している。すなわち、合理的予見可能な誤使用に起因する事故では設計者責任が問われることになる（国内でも PL 問題として関連判例がある[†][10]）。何をもって「合理的予見可能な誤使用」とするか明確な基準があるわけではないが、これまでの判例や安全規格での記述から、日常生活で起こりうること（例えば下記）は「合理的予見可能な誤使用」として考慮し、リスク評価を実施すべきであろう。

- ロボットの構造に隙間があれば指等を入れる
- ロボットは人・環境に意図せず接触・衝突する
- 移動ロボットは段差があれば落下する

実際のリスクアセスメントでは、この合理的予見可能な誤使用をより具体的に設定することが必要となる（利用者は大人だけか子供も考えるのか、利用環境は整頓されたオフィスビルなのか散らかった一般家庭なのかなど）。新規性の高いサービスロボットの場合、どのような誤使用までを合理的と見なすのかその推定が大変難しい。合理的予見可能性についての議論を深めないままサービスロボットの製品化が進むと、実際に事故が起こった場合に大きな問題となる。今後、体系的な取り組みにより社会的合意形成を試みる必要があると考えられる。

一方、合理的予見可能性に関する問題を避ける重要な技術に、本質安全設計[11]がある。あらかじめ事故の原因となる危険源をなくしてしまう（アクチュエータの出力を十分小さくする、可動部の隙間を十分広く取るなど）本質安全設計の考えを用いれば、事故は本質的に起きないため、合理的予見可能性に関する問題も考える必要はなくなる。ど

[†]上昇しているリフトに利用者が身体を入れ作業をし（この作業は許可されていない）、天井とリフトの間に挟まれ死亡した。判例では、この作業を「意図された作業ではないが、合理的に予見可能な誤使用である」と判断し、事故の製造者責任を認めた。

こまで本質安全設計でサービスロボットを設計できるかが、実用化への大きな鍵になると考えられる。

3.2 危険源の同定

3.2.1 JIS-B-9702 附属書 A の利用

生産機械の危険源の同定では、JIS-B-9702 の附属書 A の危険源チェックリストがしばしば用いられている [8]。サービスロボットの危険源の同定でも、まずはこの危険源チェックリストを用いるのが適切と考えられる。

附属書 A のチェックリストでは「押しつぶしの危険源（はないか）」「充電部に人が接触（しないか）」など、技術分野ごとの危険源の例が列挙されている。押しつぶしの危険源等の機械的危険源に関しては、次の規格はその判断に有用な基準を提供している。

JIS-B-9707：機械類の安全性—危険区域に上肢が到達することを防止するための安全距離

JIS-B-9708：機械類の安全性—危険区域に下肢が到達することを防止するための安全距離

JIS-B-9711：機械類の安全性—人体部位が押しつぶされることを回避するための最小すきま

表 1 に JIS-B-9707 に示される安全距離の例を示す。この表から、例えばシュレッターの開口部から歯までの距離は、開口部幅が 8 [mm] の場合は、開口部の弾性変形や工作誤差を考えると 80 [mm] とする必要があることが分かる。ただし、この距離は成人を対象にしたものであり、子供の場合は別な値を用いる必要がある。

注意しなければいけないのは、JIS-B-9707 に準拠したからといって、その部位に関連する危険源がすべて除去されたと判断はできないことである。開口部幅と安全距離を JIS-B-9707 に従い設定しても、その開口部を設けることがさらなる危険源とならないか（例えば、開口部を広げることによって指が入りやすくなり、指が入ったまま転倒して指を骨折するなど）を検討する必要がある。規格に従うことで単純に安全であると判断してよいのは、国際安全規格の構造上の C 規格に厳密にしたがって設計された製品だけであるとされている [12]。C 規格を持たない現在のサービスロボットの場合、既存の安全規格に基づく判断も、慎重でなければいけない。

また、JIS-B-9702 の附属書 A の危険源チェックリストでは「ヒューマンエラー」「危険源の組み合わせ」「制御シス

テムの故障／混乱」に起因する危険源も考慮するように求めている。これらの項目に対応するサービスロボットの危険源は、サービスロボットの目的や利用状況により多様なものが想定される。今後、サービスロボットの適切な分類を行い、各分野のサービスロボット用危険源チェックリストの整備が望まれる。

3.2.2 JIS-T-14971 附属書 D の利用

前述の JIS-B-9702 附属書 A では、保守点検等のマネジメントに起因する危険減は明示されていない。これは、労働安全に関しては国内法で規制することが一般的であり、国際規格として労働安全の詳細を規定することは、国際規格と国内法の運用上困難であるためと考えられる。一方、医療機器に関してはリスクマネジメントの考えが国際規格として採用されており、以下の規格のその詳細が記載されている。

JIS-T-14971：医療機器—リスクマネジメントの医療機器への適用

JIS-T-14971 の附属書 D では、保守点検等のマネジメントも含む危険源（ハザード）のチェックリストが明示されている。

人と接触することを前提とするサービスロボットの危険源同定では、JIS-T-14971 附属書 D に沿って医療機器の考え方を用いることは有益なことと考えられる。一方、JIS-B-9702 附属書 A と JIS-T-14971 附属書 D の内容を比較すると、機械的危険源の評価においては JIS-B-9702 附属書 A のほうが詳細なチェック項目を提示している。これは医療機器が機械的には比較的単純な動作をするためと考えられる。サービスロボットの危険源同定では、両者を適切に融合して用いることが必要と考えられる。

3.2.3 チェックリスト利用の課題

チェックリストの利用は危険源同定で有効であるが、万能ではない。すべての危険源を含むチェックリストを作成しようとすると闇雲に大きなリストとなってしまう、形式的にリストを満たすことのみに労力を注ぐことにより、本質的な危険源の評価を誤る危険性が指摘されている [12]。また、チェックリストを利用したからといって、設計者責任から開放されたわけではない。（チェックリストに乗っていない項目を評価しなくてよいわけではない）。チェックリストはあくまでも目安であり、すべての危険源を同定できたかの最終的な判断は、設計者責任で行うべきことを認識しておく必要がある。

3.3 リスクの見積り

リスクの見積りで、危険源に対応する事故のひどさの見積りは比較的容易であるが、事故の発生確率の見積りは、利用状況が具体的に想定されないと難しい。これは、設計の初期段階では顕著である。よって設計の初期段階では、リス

表 1 JIS-B-9707 に示される安全距離の例（開口部が長方形の場合）

身体の部分	開口部幅 (mm)	安全距離 (mm)
指先	$e \leq 4$	≥ 2
指先	$4 < e \leq 6$	≥ 10
指または手	$6 < e \leq 8$	≥ 20
指または手	$8 < e \leq 10$	≥ 80
	(以下略)	

クとして評価するのでなく、危険源の事故のひどさの評価に基づき対策を考える（高いリスクの部分からでなく、ひどい事故を起こす部分から対応を考える）のがサービスロボット開発では有効と考えられる。このような、事故のひどさを優先する安全の考え方は、米軍のシステム安全規格の中にも見られる[13]。

3.4 リスクの評価

残留リスクを受け入れるかどうかの評価の原則として、代表的な次の考え方がある[14]

ALARP 原則 「合理的に達成可能なできるだけ低い (As Least As Reasonably Practicable)」領域までリスクを下げる。合理的に達成可能かどうかは、技術的な実現可能性と経済的な実現可能性を考慮して判断する。ALARP 原則に関しては JIS-T-14971 の附属書 E にも説明がある。

GAMAB 原則 既存の類似製品と比較して「全体として少なくとも同様 (Globalement Au Moin Aussi Bon)」のレベルまでリスクを下げる。

MEM 原則 「最低内因死亡率 (Minimum Endogenous Mortality)」以下にリスクを下げる。最低内因死亡率は、事故および先天的奇形の影響を除く自然死亡率で最低のもの（先進国における 5～15 才の自然死亡率）であり 2×10^{-4} 人/年である。MEM 原則を用いる場合は、さらに負傷者数の影響も考慮する。

例えば、類似製品がすでに世の中にあるサービスロボットの場合（マッサージチェアを高度化したロボットマッサージチェア等）、類似製品と同等のリスクならばそのサービスロボットは GAMAB 原則により世の中に受け入れられる可能性は高い。

類似製品がまだ世の中にない新規性の高いサービスロボットの場合、十分に安全化を考慮されたものならば、ALARP 原則を用いてそのリスクレベルの正当性を世に示すことが可能と考えられる。

4. おわりに

リスクアセスメントの基づく国際安全規格に整合した安全対策の実施には、手間、時間、費用がかかる。しかし、安全の視点で製品を見ることは、機能設計とは異なる視点から見る機会を提供することになり、安全化が思わぬ性能向上に繋がる場合があることが報告されている。例えば文献[15]では食品製造機械に密閉型のガードを設置することで、安全性向上の他に大幅な省エネ化が計られ、ガード設置投資費用が1年で回収できたとしている。優秀な技術者ならば、このような一石二鳥の効果が安全化には期待できる。サービスロボット開発でも同じように考えたら、リス

クアセスメントを実施する動機も少しは向上するのではないだろうか。

ところで筆者は、2001年に現在の所属大学に移動してから国際安全規格に基づくロボットの安全性に関して研究を始めており、安全分野で十分な経験があるわけではないと考えている。「安全は利用者が注意して終わり」というのが2001年当初の筆者の安全の知識であった。これまで、数件のサービスロボットのリスクアセスメント関連業務に携わったが、国際安全規格に基づくリスクアセスメントの考え方を理解するには当初相当な苦労があった。安全に関して浅学の筆者が本解説を執筆すべきか当初躊躇があったが、サービスロボットの安全の裾野を広げるために、筆者の経験が少しでも役立てばと思い筆をとることにした。本稿がサービスロボットのリスクアセスメント実施の最初の一步に繋がることを望んでいる。

謝 辞 本稿の内容は、杉本旭教授、蓬原弘一教授、ノイドルファー教授（長岡技術科学大学）からの安全に関するご指導に負うところが大きい。ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 経済産業省：次世代ロボット安全性確保ガイドライン，2007.
- [2] JIS-Z-8051：安全側面—規格への導入指針，2004.
- [3] JIS-B-9702：機械類の安全性—リスクアセスメントの原則，2000.
- [4] 日本機械工業連合会，日本ロボット工業会：21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書，2001.
- [5] 厚生労働省：改正労働安全衛生法，2007年4月1日施行.
- [6] 厚生労働省労働基準局長：「機械の包括的な安全基準に関する指針」の改正について，基発第0731002号，2007.
- [7] 中央労働災害防止協会技術支援部：機械設備の安全化のためのリスクアセスメント，中央労働災害防止協会，2002.
- [8] 安全技術応用研究会：安全システム構築総覧，通産資料調査会，2001.
- [9] 大野耐一：トヨタ生産方式，ダイヤモンド社，1988.
- [10] 損保ジャパンリスクマネジメントクラブ：PL情報 no.56，『食品容器製造機』のPL判決紹介，2003.
- [11] JIS-B-9700-2：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，2004.
- [12] アルフレッド・ノイドルファー：安全な機械の設計—国際規格対応—，NPO安全工学研究所，2002.
- [13] Department of Defense in USA: MIL-STD-882C (Military Standard, System Safety Program Requirements), 1993.
- [14] CENELEC: Railway Applications, The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), Part 2: Guide to the application of EN50126 for Safety, prTR50126-2, 2005.
- [15] 酒寄雄二：“攪拌装置の変速方法改善による省エネルギー化”，藤沢・戸塚電気協会（東京電力主催）会報，2004.

木村哲也 (Tetsuya Kimura)

1995年東京工業大学後期博士課程中退。神戸大学助手等を経て2001年より現職。2003年文部科学省在外研究員としてダルムシュタット工科大学，BGIAに滞在。安全技術を中心にレスキューロボットの実用化研究に従事。NPO安全工学研究所理事，博士（工学）。

（日本ロボット学会正会員）