解 説

QOL向上のためのロボットにおけるリスクアセスメント

Risk Assessment of Robots for uparading QOL

野 方 誠* *立命館大学

Makoto Nokata* *Ritsumeikan University

1. は じ め に

産業用ロボットは、人がロボットの動作範囲内に侵入しないよう安全柵を設置することで、容易に本質的な安全を確保できる。十分な教育を受けた専属のオペレータによる操作と作業内容の限定により、事故の発生を限りなく小さくできる。これに対し、日常生活支援やQOL向上のためのロボットは、人体を直接扱うこと、人の近傍で作業することが大前提である。使用者や操作者、作業内容、稼働環境が多様多様であることから、不意な接触や誤使用による事故が発生しやすい。よって、産業用に代表される従来型ロボットに比べ、安全管理が極めて困難であると考えられてきた。しかしながら、産業用ロボットでも点検修理時に人がロボットの可動範囲内に入り、教示時には電源を入れ稼働させた状態でロボットの手先などを握って動かす。そのため人とロボットが空間を共有する際の安全方策のノウハウが多く蓄積されている。すでに多くの展示会やイベントに、さらには一部のスーパーや病院、会社の受付に、日常生活や業務をサポートするサービスロボットが出現し人がある空間で稼働している。その多くのロボットには、その安全方策が適用されている。

2005年万国博覧会「愛・地球博」で次世代ロボット実用化プロジェクト（NEDO技術開発機構事業）が開催されるにあたり、社団法人ロボット工業会では有識者からなる「愛知万博のロボット安全性ガイドライン調査専門委員会」を設置し、その下にロボットの設計、運用面から検討する「安全性ガイドライン検討ワーキンググループ」と、万が一事故が発生したときの対応を検討する「安全性の責任・体制検討ワーキンググループ」を設け、両面からの検討が行われた。経済産業省が平成19年7月に策定した「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」が示され、その後、人間支援型ロボット実用化プロジェクト（NEDO技術開発機構事業）などの研究開発で活用された。

以上のような状況を踏まえ、本報ではQOL向上ロボットの安全化手法を解説することを目的とし、まず国内外の規格で定められた一般機械のリスクアセスメントとその手順について紹介する。次にQOL向上ロボット開発におけるリスクアセスメント事例を紹介する。終わりに設計以外の安全確保方策である機能安全について触れる。

2. リスクアセスメント

JIS B 9702 (ISO 14121)「機械類の安全性－リスクアセスメントの原則 (Safety of machinery - Principle of risk assessment-)」[1]の基本概念では、「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」と記載されている。その概念で対象となる機械とは、「機械の包括的な安全基準に関する指針」の用語の定義で、「連結された構成品又は部品の組合せで、そのうちの少なくとも一つは機械的な作動機構、制御部及び動力部を備えて動くもの」と述べられているが、一方では「特に材料の加工、処理、移動、梱包等の特定の用途に合うように統合されたものをいう」とある。労働安全衛生規則第36条第31号の規定に基づき厚生労働大臣が定める機械を定める告示である労働省告示第51号では、定格出力（駆動用原動機を二以上有するものにあつては、それぞれの定格出力のうち最大のものの）が80[W]以下の駆動用原動機を有する機械を適用範囲から除くとある。以上のことから、複数の用途を有し出力の小さいQOL向上ロボットは含まれないとの見方もできる。これに対し経済産業省は、「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」[2]を作成し、現在の規格から外れるサービスロボットにおいても、リスクアセスメントを義務付けている。

リスクアセスメントの手順は、機械類の安全性を順番に判定する「リスクの評価」と、それに必要な情報を提供する「リスク分析」から成る。

「リスク分析」は、【機械類の制限の決定】、【危険源の同定】、【リスク見積】から成る。【Step1: 機械類の制限の決定】は、想定される機械の使用状況を明確にする。【Step2: 危険源の同定】は、機械類に付随するすべての危険源（ハザード）、危険状態および危険事象を同定する。【Step3: リスク

原稿受付 2010年8月9日

キーワード: Risk Assessment, Safety of Machinery, QOL Robot

*〒525-8577 草津市野路東1-1-1

*Kusatsu-shi, Shiga

見積】は、おのおのの危険源のリスクの大きさを求める。

リスク分析は、文献[2]において、「使用者の視点を導入しつつ、使用者の特性に応じて行うこと。特に、高齢者や子供、障害者等による使用にかかわる安全性の確保に留意すること。また、管理者等、販売者または使用者と連携して行うことが望ましい。」「次世代ロボットの特性や使用等される状況に関して、(1) 次世代ロボットが移動するか否か、(2) 操縦型か自律型か、(3) 使用者が次世代ロボットの使用に関する専従者か否か、(4) 人間との接触度合い等に留意する。」と記載している。

さらに「使用者以外の合理的に予見可能な者」は、例えば、警備ロボットが稼働しているショッピングセンター内の買い物客や、清掃ロボットが稼働しているオフィスビル内の通行人等を挙げている。このことは【Step1: 機械類の制限の決定】において、考慮すべきである。

Step2: 危険源の同定については、JIS B 9702 の付属書 A (参考)「危険源、危険状態及び危険事象の例」[3] が参考になる。項目のみを列挙すると、(1) 機械的危険源、(2) 電氣的危険源、(3) 熱的危険源、(4) 騒音による危険源、(5) 振動による危険源、(6) 各種放射による危険源、(7) 使用材料/物質による危険源、(8) 人間工学を無視することによる危険源、(9) 危険源の組み合わせ、(10) 制御システム等の不調から生じる危険源、(11) 個別機械で考えられる危険源、(12) 機械が移動するために追加して考察すべき危険源、(13) 機械に持ち上げ作業が伴う場合に追加して考察すべき危険源、(14) 地下作業を伴う場合に追加して考察すべき危険源、…(中略)…、(34) 人の吊り上げまたは移動によって付加される危険源など、多岐にわたる。

Step3: リスク見積については「考慮下の危険源に潜在する危害のひどさ」と『「暴露の頻度及び時間」「危険事象の発生確率」「危険回避又は制限の可能」』の組み合わせとして関数を含む様々な手法が認められている。

「リスク評価」は、見積もられたリスクにより、安全性が達成されているか否か、リスク低減対策が必要かどうかを判断する。その判断について文献[4]によると、ALARP 原則 (As Least As Reasonably Practicable: 技術面や経済性を考慮して、合理的に達成可能なできるだけ低いリスクまで下げる)、GAMAB 原則 (Globalement Au Moin Aussi Bon: 既存類似商品に比べ、全体として少なくとも同様のレベルまでリスクを下げる)、MEM 原則 (Minimum Endogenous Mortality: 最低内因死亡率以下にリスクを下げる) に基づくと述べている。どの原則を用いるかについては、リスク評価された類似ロボットが既存であるか、それともまったく新しいロボットであるかなどによって選択される。

この他に、JIS B 9702 の付属書 B (参考) には、危険源分析及びリスク見積もりの方法[5] が示されているので、参考にしてほしい。

3. QOL 向上ロボットにおけるリスクアセスメント事例

QOL 向上ロボットのどの部分にどのような危険源があり、どのような状況で事故につながることが予想されるか、それに対する対策は何かを、ロボット開発における事例を用いて紹介する。本章では、その一部を使用者の身体に接続したり装着し、日常動作やリハビリテーション、トレーニングをアシストするロボット、身振り手振りをして案内したりコミュニケーションをするロボットにおいて、実施されたリスクアセスメントを調査した内容を示す。一部を除き、具体的なロボットの名前は伏せておく。

3.1 危険源の同定

リスク分析における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を行うために、多くのロボットでは「使用シナリオ作り」が行われていた。一連の使用において、使用者がどのようにロボットに触れるか、手に触れるところに危険源があるか否か、使用していくにつれ危険状態に変化していかないかを見出す作業を行い、意図する使用において危険源と成り得るのか、合理的予見可能な誤使用において生じるものなのか、制限を加えることで考慮しなくてよい危険源となりうるのかが行われていた。

身体に装着するロボットでは、特徴的な使用状況として、装着時や脱着時に危険状態に陥る状況を見出していた。関節部に減速機付きモータが装備されている装着型ロボットの場合、電源が入っていない状態で装着すると、ギアの摩擦で関節を動かすことができず、立位のバランスを保てず転倒する恐れがある。この問題は、緊急停止時に電源を遮断する時にも起こりうる。また脱着時に一部が外されていない状態で使用者が動くと、ロボットを引き寄せる形になって倒れて押しつぶされる恐れがある。この危険状態は稼働中ではないので見落としがちである。対策としては、電源が入っていない装着状態であっても使用者が関節を動かせる程度の減速比にする、電源を入れるまでは立ち上がらないように監視指導すると報告されていた。

装着が完了する前に動作が始まる、もしくは動作が始められる構造になっていると、動作中に装具が外れて転倒したり、身体の一部が機械的危険源に接触するなどの危険状態に陥ることもある。対策として、装具の止め具にスイッチを設置し、装着が確認されるまではモータは起動しない構造にするなどが実施されていた。

使用シナリオ作り以外で、「(1) 機械的危険源」や「(2) 電氣的危険源」に接触する箇所や状況を探すことでも、危険源を見出すことができる。「(1) 機械的危険源」としては、「押しつぶし、せん断、切り傷や切断、巻き込み、引き込み、衝撃、突き刺し、こすれ、高圧流体の流入又は噴出」がある。使用者や操作者、第三者がこのような損傷を受け

る箇所に接触することにより、そこは機械的危険源となる。事例調査したロボットにおいても、隙間、車輪、関節などの稼動部と本体やカバーの隙間に、指が入ると「押しつぶし、せん断、切断、巻き込み」が生じる部分が指摘され、対策が講じられていた。動きによって隙間間隔が変化するので、間隔の最大最小値の確認が必要となることが指摘された。なお人体部位の押しつぶされについては、JIS B 9711を参考にしていきたい[6]。

「(2) 電氣的危険源」としては、充電部、電源部に人が接触、静電現象、短絡や過負荷から起こる溶融物の放出や化学的効果、これら箇所に接触することにより生じる。充電部に手が触れて感電することを防ぐためには、充電部をカバーで覆う、そのカバーは特殊ネジで閉じられ、内部に接触できないようにする対策が講じられていた。保守の際はこれらの部分に接触しなくてはならない状況があるため、作業には手袋の着用を義務づけるとの対策が実施された。

固定しない QOL 向上ロボットは、「(18) 機械の安定性の欠如、転倒」という危険状態が存在する。ロボットの姿勢変化による重心の移動、使用者の想定外の寄り掛かりによりロボットがバランスを崩す状況や、子供がロボットに抱きついて倒れる状況が示されていた。意図しない動作ではあるが予見は可能な事態であるため、対策や対応の検討が必要である。これに対し、小児ダミーがロボットを抱きかかえた状態で取り付け、転倒させたときの衝撃力を計測し、ダメージの大きさから判断したケースがある。

使用者がロボットとともに歩行をする場合、床の上の紙類やコード類によって、「(19) 人の滑り、つまづき」に至ることも示されていた。そうでないものでも、本体からの電源コードに第三者がつまづき事故に至ることも予見は可能な事態であると認識されていた。

「(14) 制御回路、センサ、配線の断線、周辺機器の故障」、またはノイズ、ソフトウェアのバグにより、「(10) 予期しない始動、超過走行、超過速度」に至る。対策としては、安全認証をうけた故障が限りなく少ないデバイスを使用するか、(10) の事態になって接触しても危害が生じない本質安全設計とすることが示されていた。

3.2 リスクの見積もりと評価

人とロボットが接触したとき、どのぐらいの力で身体にどの程度の損傷が生じるかについては、ロボットの形状、接触の仕方、接触の部位、人の年齢、性別、体格によって変化する。よって QOL 向上のためのロボットにおいても、事故接触を想定した実験を実施し、測定した値を用いて自動車安全基準に用いられる HIC (Head Injury Criteria) 値[7]を計算し使用した例がある。

$$HIC = \left\{ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right\}^{2.5} \{t_2 - t_1\} \quad (1)$$

本質安全であるか否かを判断するために使用したロボットでは、小児ダミー人形にロボットが衝突したり、一緒に転倒して子供に乗るように転倒したり、腕でたたいたりした時の HIC を算出している。

危害の酷さや発生確率が定まったら、次にリスクの見積もりと評価が行われる。MIL-STD-882D のマトリックス法[8]、ISO13849-1 のリスクグラフ法[9]、数式や実験で求めた数種の数値を加算や乗算し計算する手法がある。その中からここでは MIL-STD-882D を紹介する。これは危害の酷さと発生頻度の組み合わせでリスク評価を行うものである。

危害の酷さ (mishap severity) の分類として、Catastrophic (I), Critical (II), Marginal (III), Negligible (IV) が提示されている。それぞれの酷さの程度は、例えば Catastrophic は、死、永久全身障害、1M ドルを超えている損失であると例示している。損失額については、例えば産業界では実務的に使用される労働損失日数より計算される。危害の発生頻度 (mishap probability) は、Frequent (A), Probable (B), Occasional (C), Remote (D), Improbable (E) の分類が示されている。それぞれは、使用期間中に常に起こり得る、頻繁に起こり得る、数回起こり得るといった表現や、発生確率数を例示している。危害の酷さと発生頻度の分類で作られるマトリックスから数字を読み取り、その値からリスク値、リスクの分類やレベルを求める。例えば、危害の酷さが Marginal、発生頻度が Occasional であれば、それらが交差する数値は III になり、リスクレベルは Medium であると求まる。このマトリックスは JIS C 0508-5 附属書 B [10] にも示されている (表 1, 2)。

文献[11]にはサービスロボット wakamaru (三菱重工工業製) の安全妥当性を検証した内容が記されており、MIL-STD-882D で示されるリスクマトリックス法による評価の採用、日本自動車研究所における衝撃試験により HIC 値は 500 未満、胸衝撃は 45 [G] 未満という数値を、通常想定される利用状況においては満足することを確認したと記されている。その他の本質安全設計については、内部電圧 30 [V] 以下、最大 70 [W] モータであること、手先の形状・素材を滑らかで柔軟で曲面をもたせ、子供の目を突く危険源をなくし、十分リスクを低減できていることも確認している。この文献はサービスロボットの第三者機関による安全認証についても述べられているので、参考にしていきたい。

4. お わ り に

本報では、国内外の規格を紹介しながらリスクアセスメントとその手順について解説した。次にリスクアセスメント事例として、QOL 向上ロボット開発における危険源の同定、リスクの見積もりや評価について紹介した。QOL 向上

表1 災害に関するリスクの等級化 (JIS C 0508-5 附属書 B より抜粋)[†]

頻度	結果			
	Catastrophic	Critical	Marginal	Negligible
Frequen	I	I	I	II
Probable	I	I	II	II
Occasional	I	II	III	III
Remote	II	III	III	IV
Improbable	III	III	IV	IV
Incredible	IV	IV	IV	IV

表2 リスク等級の説明 (JIS C 0508-5 附属書 B より抜粋)

リスク等級	説明
等級 I	許容できないリスク
等級 II	好ましくないリスク。リスク軽減が、非現実的すなわち、リスク軽減にかかる費用対効果比が著しく不均衡であるときだけ許容しなければならない好ましくないリスク。
等級 III	リスク軽減にかかる費用が得られる改善効果を超えるときに許容できるリスク。
等級 IV	無視できるリスク

のためのロボットの開発は始まったばかりであり、紹介できる事例は少なく、開発中のものについては詳細な情報を示すことはできなかった。先行事例として、産業ロボットやサービスロボットの報告 [12]、本学会誌で取り上げた記事を参考にしたい。

最後に設計以外の安全確保方策である機能安全について触れる。ロボットの動作が危険状態に陥らないように、もしくはハードウェアのリスクを低減するためのプログラム制御によるリスク低減方策は、ロボットに高い機能を搭載するためには実施しなければならない。国際規格などでは機能安全と呼び、IEC 61508 に内容が記されている [13]。これを機械の分野に特化した規格として IEC 62061 (JIS B 9961) がある [14]。機能安全の定義は「機能的な工夫を導入して、許容できるレベルの安全を確保すること」であり、「機能的な工夫」とは「コンピュータ、センサやプログラム、制御により、安全を確保すること」であると示されている。この文面からは、例えば「プログラムにより力制御を行い発生力を抑える」などの方策は実装可能であるように読み取れるが、IEC61508 への適合は容易ではない。なぜなら IEC61508 はこれまで機能安全を「機能の安全 (Functional Safety)」と捕らえ、製品の「故障率」を適合判定に用いているからである。ようやく第2版で「機能による安全 (Safety integrity functions)」という用語が追加されたが、適合判定の基準検討はこれからだと考える。なお産業機械の安全

制御技術については、本学会誌の解説 [15] において、その動向と次世代ロボットへの適用について述べられているので参考にしたい。本学会研究専門委員会の「RT 機能安全研究専門委員会 (委員長 山田陽滋)」[16] の中心課題は、「ロボティクスに特徴的なビジョンや力制御系、ヒューマンインターフェイス等の要素技術を対象とした RT のソフト、ハードの機能安全」とされている。委員会の活動に注目していきたい。

参 考 文 献

- [1] JIS B 9702:2000 (ISO 14121:1999), 機械類の安全性—リスクアセスメントの原則, p.2, 2000.
- [2] 経済産業省: 次世代ロボット安全性確保ガイドライン, http://www.meti.go.jp/press/20070709003/02_guideline.pdf, 2007.
- [3] JIS B 9702:2000 (ISO 14121:1999), 附属書 A (参考) 危険源, 危険状態及び危険事象の例, 2000.
- [4] 木村哲也: “サービスロボットのリスクアセスメントとその課題”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.8, pp.1151–1154, 2007.
- [5] JIS B 9702:2000 (ISO 14121:1999), 附属書 B (参考) 危険源分析及びリスク見積もりの方法, 2000.
- [6] JIS B 9711 (ISO 13854:1996), 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, 2002.
- [7] J. McElhaney: “Head Injury Criteria,” *Mechanics of Composite Materials*, vol.12, no.3, pp.411–429, 1976.
- [8] MIL-STD-882D, APPENDIX A, GUIDANCE FOR IMPLEMENTATION OF A SYSTEM SAFETY EFFORT, Standard Practice for System Safety, United States Military Standard, 2000.
- [9] ISO 13849-1:2006, Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design, 2006.
- [10] JIS C 0508-5 (IEC 61508-5) 附属書 B, 安全度水準決定方法の事例, 1999.
- [11] 加部隆史, 平野晋, 梅崎重夫, 田中紘一, 杉本旭: “サービスロボットにおける安全設計の妥当性判断基準 (クリティカル・ハザードと合理的な代替設計基準)”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.758, no.75, pp.2837–2846, 2009.
- [12] 「人間支援型ロボット実用化基盤技術開発」事業原簿, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/20h/jigo/5/1/5-1-1.pdf>, 2009.
- [13] JIS C 0508 (IEC 61508), 電気・電子・プログラマブル電子安全関連系の機能安全, 1999.
- [14] JIS B 9961 (IEC 62061), 機械類の安全性—安全関連の電気・電子・プログラマブル電子制御システムの機能安全, 2008.
- [15] 齋藤剛: “産業機械の安全制御技術の動向と次世代ロボットへの適用”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.8, pp.1155–1158, 2007.
- [16] 日本ロボット学会 RT 機能安全研究専門委員会, <http://staff.aist.go.jp/nakabo-yoshihiro/RTFS.html>

野方 誠 (Makoto Nokata)

1998 年名古屋大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。2002 年立命館大学理工学部ロボティクス学科准教授, 現在に至る。2007 年スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) 客員教授。2004 年愛知万博のロボット安全性ガイドライン調査専門委員会委員 (社団法人日本ロボット工業会), 2007 年ロボット倫理問題および安全性の検討専門委員会委員 (NEDO 人間支援型ロボット実用化 PJ 安全性ガイドライン検討 WG) (社団法人日本ロボット工業会), NPO 安全工学研究所研究員。 (日本ロボット学会正会員)

[†]備考には「実際にはどの事象がどの等級になるかは、適用される分野によって異なり、また「頻繁に起こる」又は「かなり起こる」などというのが実際にどのぐらいの頻度なのかに依存する。したがって、この表は、今後利用するための使用として見るよりは、この表がどのようなものかを示す一例として見るべきである」と記されている。