

安全な人とロボットの共存の条件

NPO 安全工学研究所 加部隆史

Conditions for Safe Human-Robot-Interaction(HRI)

Takashi Kabe, NPO The Safety Engineering Laboratory

Abstract: Safety of machinery has been achieved by safeguarding and it means, dangerous machines will be surrounded by guards and dangerous movement of machine should be stopped by approaching human being. In case of service robot, people live together with machinery hazards and business form changes from B to B to B to C. Thus it would be necessary to set up a new concept, namely principle von safety co-existence. In this case various factors surrounding safety should be considered, which actually consist of ethics, technology, economics and social system. This paper describe conditions to create a principle of co-existence on the base of these four safety factors.

Keywords: safety of machinery, human-robot-interaction, principle of co-existence, risk reduction

1・はじめに

安全とはISO/IEC Guide 51によると、受け入れ可能でないリスクが無い事とされており、これは危害による自由の束縛から解放される事で、人は誰もがそれを望む人権に根ざしている。これはJ.S.ミルが自由論¹⁾でのべている危害防止の原則、すなわち危害は人の自由を拘束する為に良くないという考えに通じて来る。人権は歴史的に束縛からの解放により人類が獲得してきた財産である。危害を制御するのは、人工物の安全な設計行為である。

危害或いは労働災害は、人と機械の危険源という二つの要素が同一空間・同一時刻に同居して育成される危険状態から導き出される。従来の労働安全は人への教育を主として来たが、近年のリスクベース・アプローチによる機械安全の場合、因果的決定論に基づく危害の要因となる危険源を除去する事に主眼が置かれている。その為、主として危険な機械は包囲し(隔離の原則)、危険源と人との接触をハウスドルフ空間上で分離し、危険な機械の動きに対して人が接近すると安全なインターロック装置等により電源遮断を行う(停止の原則)、そしてエネルギー・ゼロの状態を確保する事により安全が確保されてきた。

製造現場で、或いは消費者を対象とした一般社会において社会変動の諸要因により、人と機械・人とロボットとの協働・共存・共生(Human-Machin-Interaction:HMI 或いは Human-Robot-Interaciton:HRI)が望まれてきている。安全の観点から見ると、本来危険状態である危険源と人が同居し、かつそこで危害は発生しないという安全が求められてくる。それ故、図1のベン図が示す様に HMI は安全におけるパラダイムシフトを意味しており、世界的にどのような条件の下に「共存の原則」が成立しえるかが研究・議論されてきている。例えば、ロボットの防護柵が不要で、

人とロボットが安全に協働できるとなると、生産技術的にも革新性が伴い、その経済的効果はかなり期待できる。又、近年取りざたされているサービスロボットの場合、人との接触・共存が最初から条件となっており、その為に安全な共存の原則というもの定められる必要がある。

設計という行為は社会の要求に人工物を持って答えるものであり、近代科学が成立する以前の古代から営われて来ている。その設計行為により達成される安全は価値を有している。それ故、第一義的な技術的解決に加え社会との妥協・共生がその達成条件となっている。安全に関する用語を定めている ISO/IEC Guide 51:1999 並びに筆者の分析・考察によると、安全は技術のほか、倫理・経済・社会システムという四要素から構成されている複合システムである。本稿では、この安全四要素を俯瞰的に考察する。

2・安全四要素

2・1 倫理的側面

科学技術は社会に多大な利便性をもたらしてきたが、反面処理されていない危険源による危害、地球環境問題、精神的ストレス等往々にして不加逆性を伴い社会に重大な影響を与える負の側面を同時に残してきた。又、その危険は場合により人が制御不可能な領域迄達している。社会に重要

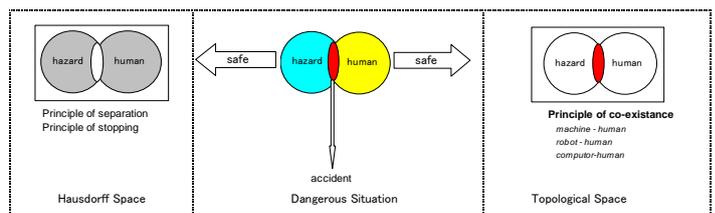


Fig.1.Paradigm Shift on Safety Hausdorff Space and Topological Space

な影響を与える危険源を処理してこれらの危害或いは不可逆的な負の側面を制御できるのは設計者であるという認識は普遍性をもっており、多くの技術者がそれを望んでいると確信したい。同時にこれが、本来基本的な技術者倫理であろう。とりわけ20世紀はそれに加え、従来の古典物理のみではこけない複雑性が明示された。安全四要素の相関関係を図2に示す。

2・2 技術的側面

従来の隔離の原則・停止の原則・エネルギーゼロの原則という概念と方法論から、あらたなHMIにおける共存の原則というものが、技術的に達成される必要がある。HMIでは基本的に、通電状態で人と機械が協働・共存するという事が前提となる。その為、機械が暴走しても痛くない、重大な危害を蒙らない事が要求事項或いは共存の原則の第一条件となってくる。アシモフのロボット第一原則に従い、ロボットは人に危害を与えない、という事が危害からの開放を本能的に求める社会から要求されてくる。共存を前提としたHRIでの安全確保は、それ故、この第一原則への新たな挑戦となる。

ロボット設計者は、ISO14100 リスクアセスメントの原則に基づき、危険源の同定ーリスク見積もりーリスク評価ーリスク低減の実施が必要で、リスク低減後の残留リスクを使用者情報として提供する必要がある。又、リスクアセスメントの結果は設計ノウハウである為、そして製品出荷後の設計変更を反映する必要がある為、本来管理番号のついた図書として保管する事が望ましい。

リスク低減を実施する設計的な対応以前に、リスクアセスメントの原則が定める最初の課題、すなわち機械の使用目的の制限が、実際にはリスク低減(ΔR)に大きく影響してくる²⁾。ロボットが、どのような空間的・時間的条件の下に稼動するのか、そして人と接触・共存する際に、大人・高齢者・障害者・子ども等制限や区分が可能か、或いは全員が対象となるのか、等の条件設定である(図3の $\Delta R1$ 参照)。

同様に、通常機械安全では安全とみなされない危険検出型のセンサでも、危険源は除去されないものの、信頼性の観点から大方そのセンサが稼動するという事から、危害防止には確率的に有益な為、結果としてリスク低減には貢献するという解釈が成立する。その後 $\Delta R2$ と $\Delta R3$ を行う。

製品安全で最近国が寿命設定を表示するように促した例に見られるように、人工物の製品は事件の経過と共に経年変化などが発生し事故に繋がる要因ともなりえる為、製品寿命或いは安全寿命を設定し、時間制限を設定する事は重要である。

予見可能な誤使用については、リスク低減後の残留リスクと共に、取扱説明書に明示する事が望まれる。

接触安全・衝突安全等を確保する為には、安全設計が要求されてくる。リスク低減手法ISO12100で定める安全確保の3段階方式のうち、まずはリスク低減の第1段階で定

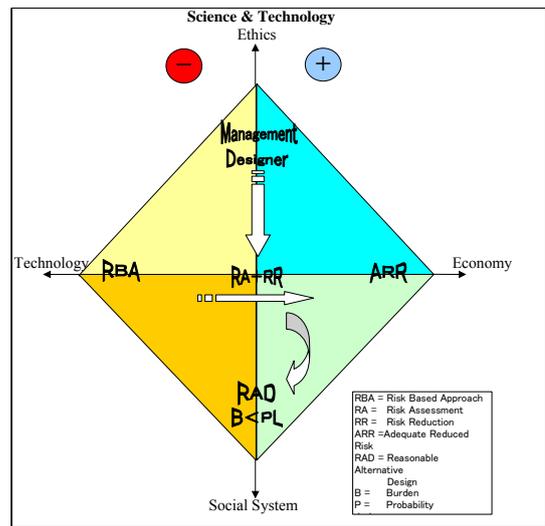


Fig.2.Four Safety Factors & Risk Assessment and Risk Reduction

める地球環境にもやさしい本質安全設計を優先する事は意義があり、利便性・経済性の意味からも重要である。又、人と接触した際の危害の程度を配慮した場合、質量が少なく、駆動源のモータ容量が小さければ小さいほど有利となる。但し、この本質安全設計は、対象となる機械の形状・寸法・機能等により様々であり、とりわけサービスロボットという定義自体が未だ明確でない機械につき、標準化された本質安全設計の解決案というものは存在していない。

本質安全設計により十分にリスク低減が実現できない場合には、安全なセンサ等を含めた要素技術の開発が必要となってくる。サービスロボットの分野においては、必要な安全の要素技術は現時点で明確にはなっていない。要素技術等による安全技術は製品の量産化(経済性)とあいまり初めて実現可能となる。HMIにおける安全な共存の原則は世界的に未制定であり、その条件作りが急務とされている。

2・3 経済的側面

欧州での安全確保の理念は、一方で人の健康安全を確保し、他方で貿易障害を除去し自由貿易を確保し、安全な製品の市場への橋渡しをする仕組みがCEマーキング制度である。すなわち、安全は技術のみでは解決せずに、利便性・生産性という経済活動が円滑に実施する事が配慮されているという事である。体系化された機械類の安全に関する国際規格も、多数の国々が参加して策定する為に、必ずしも技術的に最高水準ではなく、社会との妥協という価値により決定付けられている事の認識が必要になる。

リスク低減をどこまでやるべきかについては、技術的にはISO12100或いはISO13849-1で定める適切に低減されたリスク(Adequate Reduced Risk: ARR)或いはIEC 61508で定めるアラープ(As Low As Reasonably Practicable: ALARP),そして法的には、製造物責任法における合理的代替設計基準(Reasonable Alternative Design

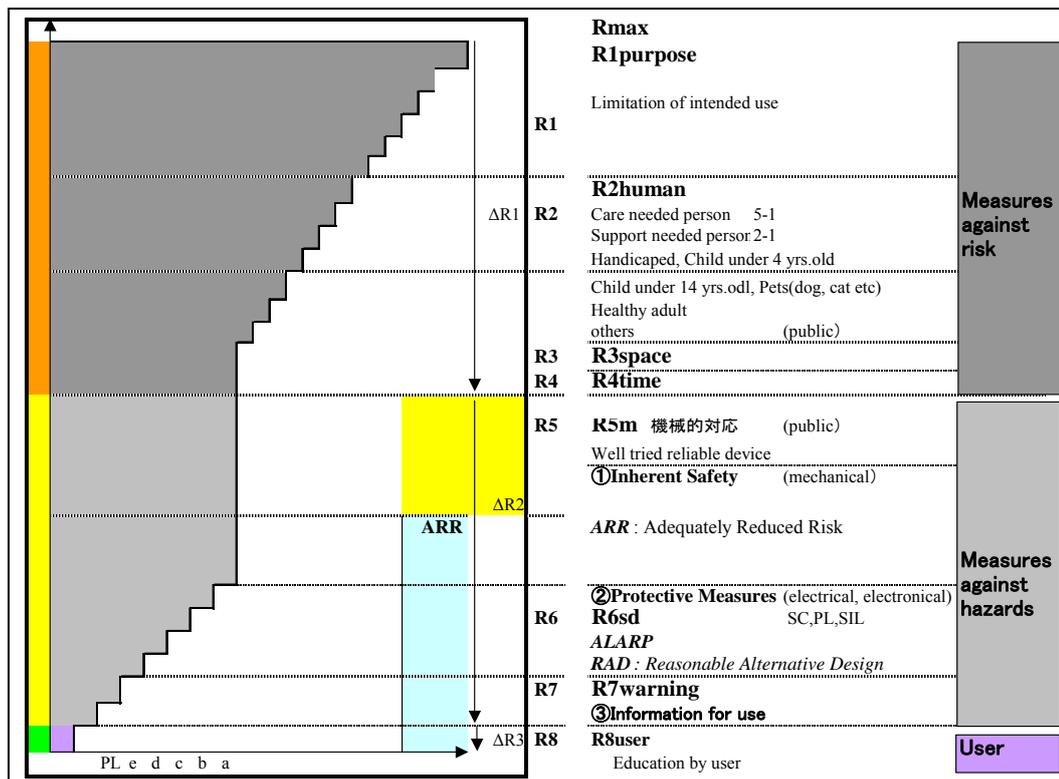


Fig. 3 Restriction by using purpose and human factors(ΔR)

・RAD)は共通して、費用便益分析(CBA)が基となっている。その基となるハンドの定式($B < PL$)では実際の損害とその可能性を上回る方策までは求めていない。

設計者がリスク低減を技術的に相応に行っても、その妥当性が証明できて始めて社会はそれを受容する。任意規格に基づく基準認証制度はそれを支えるものであり、日本ではその判断を実施できる認証制度が安全に関し未発達であり、企業の経済活動を支える必要な要素が欠落している。その早急な整備が必要とされている。

又、CBAとあわせてリスクアセスメントとリスク低減による現実的な危険源の処理を超えて、科学技術が社会に与える影響評価を、事前のテクニカルアセスメント(Technical Assessment=TA)により実施する事は、今後インテリジェンスの複合体であるサービスロボットの実用化の過程において配慮する事も有益であろう。

近年ドイツで、機械使用者は機械を停止する事による生産性の阻害要因を取り除く為に、法律で禁止されている安全装置の無効化を多くの企業で実践してきたが問題視され、ドイツ職業保険組合が詳細な調査を実施し、報告書を発表した⁽⁹⁾。これによると、3割近くの企業が無効化を定期的に行っており、かつ経営管理者がその事実を黙認しているという実態が明らかにされた。この機械使用者による無効化により、せっかく機械設計者が達成したリスク低減が同時に無効となり、露呈された危険源による事故がこれまで多く発生してきた為に、HMIによる解決方法が模索されてきた。例えばマシニングセンタの安全性に関するEN12417においてHMIを一定の条件の下に許容するモー

ド4等はそれに該当する。一方では、それに見合う要素技術の開発、他方では安全と経済性のトレードオフの限界から、従来の労働安全による人による管理を許容し、未処理の危険源の管理を一定条件の下で、機械使用者が認める場合、HMIを法律的にも許容する動向になっており、最新の欧州機械指令2006/52/ECの1.2.5項プロセスモニタリングがこれに該当する。着目すべき点は、隔離・停止の原則による機械安全の限界が経済性の観点から認識され、危険源を人が管理するという従来の労働安全の概念がHMIを実践する上で再び導入されたという事である(3)。

サービスロボットの場合、安全装置或いは方策が使用者により簡単に無効化されてしまう事は宜しくない為、その防止の為に技術的配慮が必要とされる。

このように、技術と経済性はそのトレードオフから密接な相互依存関係にあり、HMIにおいて安全を達成する際には、とりわけその均衡が要求される。

2・4 社会システム

倫理・技術・経済面での整合性がはかかれても、人工物として設計された機械がどのように使用者側で適用されるかについては、予防(安全設計)と補償(保険)に関する法を配慮した適切な社会システムが必要とされる。民間による任意な認証制度もこの範疇に入る。

労働安全の場合、工場という制限された空間内で基本的に教育を受けた作業員が対象となる為に(B to B)、リスクはその範囲で限定される。一般消費者も対象となる(B to C)サービスロボットの場合は、消費者期待基準という主観的な判断基準により事故は判断される為に、これら安全四要素についての十分な配慮をした上での、適切な社会システ

ムの構築が必要とされる。同様に、サービスロボットの場
合、この製品対象者がBからCへ変更となる為、逆にリス
クが高くなる為、生産設備様のロボットよりも、安全配慮
がより必要となってくる。

技術の解決案は、全ライフサイクルを通じ、全てのステ
ークホルダーにより徹底した管理が求められる。ISO/IEC
Guide 73 が定めるリスクマネジメントの中で、リスクコミ
ュニケーション(Risk Communication: RC)は一般消費者を対
象としたサービスロボットの場、重要な要素となってくる。
その一環として、例えば医療品、食品等で国内でもす
でに実施されている製造者、製品構成内容、使用期間、問
題の際の連絡先等に関する表示事項は、有意義ではないか。

医療機器の場合、その形状や機能は様々であるが、リス
クをI-IVの四段階に分類し、各段階に認証の必要性の有無
等が明示されている。これらの事実を配慮すると、新産業
であるサービスロボットに対し、このリスク区分及び表示
を導入し、それにより使用者が判断できる材料を提供する
事は、十分に検討の余地がある事からここで提案したい。

日本は矛盾容認社会で、責任の概念及び権利の概念が希
薄である⁴⁾という認識から出発し、とりわけ新技術であるサ
ービスロボット、そして人との接触を前提としているが為
に、安全な製品を世界に発信するとなると、これら安全四
要素の総合的な均衡の上にならなくては、初めてグローバルな社
会がそれを受容するという事になる為、相応な社会制度の
設計が必要となる。

3・日本の特異性

国際規格で定める安全の背景として、歴史的育成過程を
省みると、科学技術を推進してきた西洋合理主義の精神が
そこに横たわっている。西洋社会は、1)一神教による天地
創造、2)宗教改革、3)市民革命、4)科学革命を経て、初めて
5)産業革命が起きた。更に、近年はそれに加え情報通信革
命が進行している。日本の場合、1)-5)の成立過程を経験す
ることなく、これの成果を一期に短縮し、明治時代の近代
化段階において国内へ導入した。その為、基本的人権が基
となる安全の概念理解とその運用については、他の先進工
業諸国と比較し差異が存在している。

リスクベースの概念に基づく機械安全の普及が国内で円
滑に進まない理由として、技術や経済は、その普遍性ゆえ
に伝播が早く、倫理や社会システムという価値に基づくも
のは人々の風習などが歴史的に関連している為に伝播の速
度が遅くなる事による。安全は後者に属する。

そもそもデカルトの機械論に象徴される要素還元主義の
限界から、生物学を発端としてシステムズ・エンジニアリ
ングが提唱され、量子力学等に代表される複雑性の考え方
は、従来の西欧合理主義を超えて、自然との共存・共生を
目指している。何よりも、オープンシステムにおける入力・
制御・出力の関係を適正化し、恒常性を保つという生態系
の機能は、本来全ての自動化技術が理想とするところでも

ある。日本にも歴史的に蓄積されてきた東洋的な世界観は、
本来自然との共生、社会での和を目指しており、この世界
観は本来人とロボットが共存する際の基本的な世界観とし
て取り入れる事は、グローバルな観点からも普遍性及び納
得性があると考えられる。この哲学を、どう安全四要素に反映
できるかは、これからの課題となる。

4・おわりに

人と機械の共存(HMI)の世界観は、要素頑健主義により
自然を解明し克服するという従来の線形的科学のみならず、
自然と共存し必要以上のエネルギーを節約するという生態系
との共存に基づくことが、時代の要求である。即ち、資本
主義の原則に基づき拡大再生産による需要の喚起と、供給
者理論よりも、需要者の求めにより安全で安心な社会に暮
らせるような共存社会である。世の中の実態は線形よりも
非線形の要素がはるかに多く、その複雑性の中で安全がエ
ントロピーの増大を適切に制御し、恒常性を保つという事
が求められており、本質安全設計の手法はそれを実現する
有力な方法論である。

本稿の結論は以下の通りである。

1. 安全は、倫理・技術・経済・社会システムの四要素か
ら構成されており、その相互依存関係を複合的に均衡
する事で、合理的な解決案が導かれる。
2. 倫理的には、科学技術の負の側面として社会に重大な
影響を与える事を機械設計者は認識する必要がある。
3. 技術的には、危害要因としての危険源処理に関しては
リスクアセスメント及びリスク低減が必要。HMI・HRI
については、リスク低減手法が確定していない為、安
全な共存の原則の条件作りが必要。ΔRやリスク区分
と表示等はその一部の検討材料である。
4. 経済的には、安全は利便性・生産性等経済要因とのト
レードオフ関係となり、リスク低減の目安にもこの要
素が影響している。
5. 社会システムとして、グローバル時代の工業先進国の
要件を満たす社会システムが必要となる。日本の場合、
西洋合理主義を技術・経済面では採用したが、倫理・
社会システムについては改善が要求される。

参考文献：

- (1)J.S.ミル、自由論、塩尻公明・木村健康訳、岩波文庫1971
- (2)加部隆史、木村哲也、高森年、杉本旭、サービスロボットの安
全性(リスク低減に関する方法論の基礎的考察-ΔR)、日本機械
学会論文集75巻754号C編、P1812-1820,2009.
- (3)HVBG、Manipulation von Schutzvorrichtungen an Maschinen,2006.
- (4)加部隆史、梅崎重夫、杉本旭、機械の確定的危険源に関する安全
規制についての基礎的考察(労働安全衛生規則が定める危険)、日
本機械学会論文集75巻755号C編、P1902-1910,2009.