

# 人と機械の共存に於ける $\Delta R$

NPO 安全工学研究所 加部隆史

## Risk reduction( $\Delta R$ ) for Human-Machine-Interaction

Takashi Kabe, NPO The Safety Engineering Laboratory

Abstract: This manuscript describes a method for risk reduction( $\Delta R$ ) in context with Human-Machine-Interaction(HMI)for a. Industrial robot and b. service robot for non-production use. The principle of safety for machinery should be changed from principle of stopping or principle of separation into principle of co-existence. To overcome this paradigm shift, new technology and/or new way of thinking to reduce risk is required. It is also necessary to be acquainted with the borderline, how safe is it enough? No reasonable alternative design(RAD) could be implemented hier.

Keywords: safety of machinery, muman-machine-interaction,  $\Delta R$ , RAD, ISO14121, ISO12100

### 1. 緒言

科学技術は社会に多大な福祉をもたらしてきたと共に、産業革命の勃発以来それは新たなエネルギーとしての蒸気をもたらした数え切れない程の悲惨な事故を初めとして、その福祉は多くの先人たちの犠牲を基に成り立っている。それ故、科学技術の社会に与える重大な影響としての負の側面を除去或いは軽減する為に、事前に第三者検査という製品の製造プロセスを検査し、安全性が教育を受けた安全専門家により検証される認証行為<sup>1)</sup>が、社会的公平性を確保するという観点から欧米で歴史的に育成されてきた。

日本は近代になり、明治維新や第二次世界大戦という歴史的な大変換期を乗り越え、世界史上まれに見る近代化への成功を達成し、現在多くの日本製の製品は世界の工業レベルで比類なき地位を確保している。ところが、これら転換期において欧米社会が歴史的に失敗を乗り越え基礎作りをして出来上がったものを、受容してきた為に、経済成長が最優先され、それらを支える理念や背景を置き去りにしてきた。その結果、科学技術の進歩により恒常的に新たなリスクが生み出され、それに伴うリスクベース社会としての条件である 1) 製品認証 2) 要員認定 3) 適切な保険制度において、欧米諸国と比べ明らかに後進性を有している。又、社会の合意を一層確実に得る為に、第三者機関が欧米で育成された歴史的な事実を鑑みその改善が急務であり、とりわけ新技術に対しては、不可逆性を伴うものに対しての未来への責任という最高の倫理観からも、新たな制度が必要であるという認識が、本論の出発点となっている。

かような状況下において、NPO 安全工学研究所は新技術としてのサービスロボットの製品認証(鑑定)や、NPO 国際レスキュー機構研究システムと共同でサービスロボット安全技術者認定(要員認定)を開始し、現在保険制度のあり方を検討している。

### 2. リスク低減手法-ARR

これまで、産業用ロボットは人にとって危険な動きを伴う為に事故の要因となる物理的危険源と人は「隔離の原則」により柵等で隔離され安全が確保されてきている。同時に、柵の入口は安全なインターロック装置がつけられ、「停止の原則」が実践されている。

人とロボットの協働(Human-Machine-Interaction: HMI)は、上述の二つの原則を適用するには無理があり、接触を前提とした「共存の原則」となる為、安全技術上はパラダイムシフトであり、それを達成する為の諸条件があらたに整備される必要がある。それ故、設計者にとってはリスク低減をどうやり、どこまでやるかが大きな関心事となってくる。それと共に、共存の原則が適用された場合の安全なロボットが稼働できる為の社会受容性も併せて検討される必要が出てきている。

人とロボットの共存を生産用と一般人を対象としたサービスロボットに分けて以下最新の技術を考察する。

#### 2.1. 生産用の産業用機械とロボット

産業用ロボットの安全性に関する ISO10218 では、80W以下のモータ、250mm/s の速度、150N 以下の力については、HMI を可能としている。但し、この場合これらの条件下において実現できる機能は限定されている為に、安全要素技術で問題解決する方法が実現化しつつある。

ひとつは、ロボットで空間或いは軸制御を安全に保ち、バーチャル空間からロボットアームが飛び出した場合に急停止する安全な暴走検知で、これに加えそのバーチャル空間へ人が侵入するのを防ぐ進入検知がある。暴走検知は安全ドライブシステム(IEC61800-5-2)<sup>2)</sup>による安全な速度監視と不意の起動の防止であり、侵入

検知については、1次元のライトカーテン、2次元のレーザーキャナの組合せである程度は達成できるものの、最適化するためには高速な応答速度に裏付けされた3次元の画像処理システムが必要とされ、これは現在研究開発段階でロボット機能に見合った理想的な実用化はこれからの段階である。これらの制御技術は、ソフトウェアで実現される為に、機能安全規格 IEC61508<sup>④</sup> に則った製品設計と第三者機関による認証が市場の要求から必須要件となる。

工作機械などでも、非定常作業の際にどうしても人と機械が共存しなければ実現できない機能があるために、例えばマシニングセンタにおいては、これまでイネーブル装置を用いて減速された状態で作業するモード4に対し、もし他に技術的可能性が無く、使用者がそれに同意した場合にはイネーブル装置無しで人と機械の協働を可能とするモード4が、ドイツ工作機械工業会から提案されている。

## 2.2.一般人を対象としたサービスロボット

愛知万博での展示発表を転換期として、現在 RT 振興を旗印に、次世代ロボットの研究開発と振興策が隆盛を極めていく。サービスロボットのリスク低減 ( $\Delta R$ ) をどう考えるかが問題となる。これまで、NPO 安全工学研究所が認証業務の一環としての残留リスクを設計者の state of the art に則した最善の努力の結果をクリティカル・ハザード (CH) として鑑定し、その結果を製造者は使用者の管理に委託するという業務経験から、サービスロボット用には基本的に以下のリスク低減方策が有効であると考えられる。

## 2.3.機械安全の原理・原則の可能な部分の適用

機械安全の場合、リスク分析の結果に基づくリスク低減が、体系化された機械安全関連規格により詳細に定められている。人と機械の共存を前提とするサービスロボットの場合、これらを適用しようとする、本来の機能を果たさなくなるか、既存の安全機器を適用した際に寸法と費用が大きくなりすぎ、実用的ではなくなってしまう。しかしながらその体系から、以下の3つの規格はサービスロボットの安全を達成する上で有効である。

1) ISO/IEC Guide 51<sup>④</sup>:安全側面一企画への導入指針  
安全はリスクを許容可能なレベルまで低減されることで達成される、許容可能リスクは使用者の利便性、費用対効果、社会因習名土のように諸要因によって満たされるべき要件とのバランスで決定される。。最小リスクを達成できるような改善が経済的に実現可能になった時。。絶対安全はありえない、許容可能なリスクは、リスクアセスメントによるリスク低減のプロセスを反復することによって達成させる、安全と品質は別の概念である等以下二つの原則を含む安全に関する基本的事項を定めている。

2)ISO14121<sup>⑤</sup> リスクアセスメントの原則

(機械の使用制限→危険源の同定→

リスク見積→リスク評価→リスク低減)

3)ISO12100<sup>⑥</sup> 安全に関する一般設計原則:

のうちとりわけ、三段階方式の 1. 機械的な本質安全設計を踏まえてのリスク低減の実施

## 2.3.より現実的な $\Delta R$ の手法 - $\Delta R$ の三段階

その為、2.1 項で述べた基本原則の適用の他に、次の

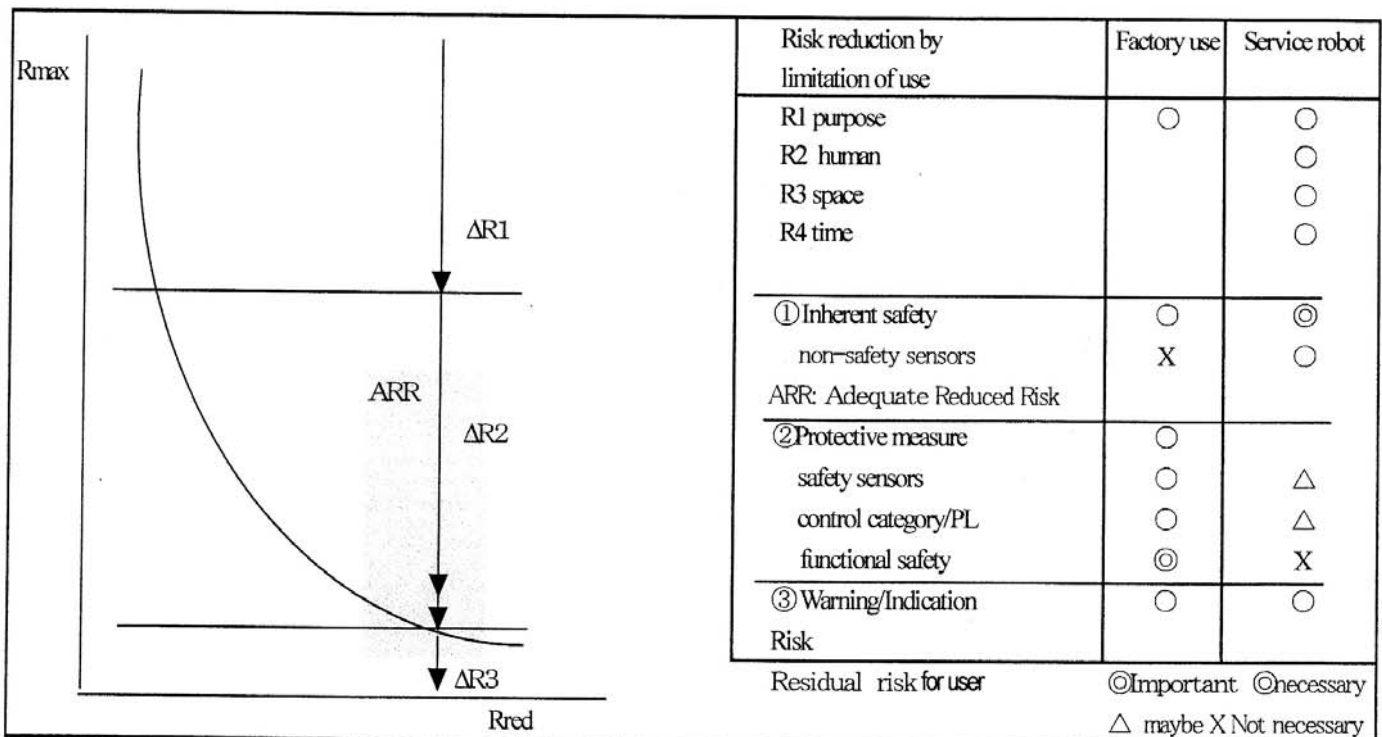


Fig.1.HMI and risk reduction ( $\Delta R$ )

通りの進め方が有効と思われる。Rmax(Risk max)からリスク低減するにあたり、以下の段階を提案する(図1参照)。

#### ΔR1 サービスロボットの使用制限

R1:まず、当該製品(サービスロボット)の使用目的を明確にし、その際に以下の制限を十分に配慮し、合理的に予見可能な誤使用を極力事前に定義する。

R2:対象の人:こども、高齢者、一般健康人、病人等。

R3:対象の空間:閉鎖空間か否か

R4:対象の時間:保証期間、寿命時間、廃棄設計等。

本来サービスロボットが有する機能に対して、これらISO12100が定めている機械の使用制限・使用条件を熟考の上設定する事により、技術的対応ではなく、かつ基本的に確定的危険源は除去されなくても、そこで発生しうる危害の程度はかなり限定される。結果として、危険源と人の組合せで発生するこれはリスクの低減にはつながる。

例えば、一般人の中でこども、高齢者、身体障害者等の社会的弱者が対象となるか、そして

使用場所(空間)として、一般道等の開放空間で、誰でも侵入できるか、或いは建物等の閉鎖空間か、更にはその閉鎖空間は建物の出入り口で人の出入りが管理されているか否か等、

同時に、生産現場へ特定製品の搬送用として投入されるサービスロボットの場合は、投入場所である工場が空間的に限定され、そこへの人の出入りは基本的に管理され、かつサービスロボットを運転する人は、教育を受けた作業員という条件が揃う為に、一般人を対象とした物よりも、逆にリスクが低くなる可能性がある。

或いは、昼間はショッピングアーケード等で案内ロボットとして活躍し、夜間は同じ建物の中で巡回ロボットとして活躍する場合、同じサービスロボットでも昼と夜とではリスクにつながる条件がかなり異なる。

又、時間的制限については、例えば製品への寿命設定が明確に定められているか、廃棄の際の設計が考慮されているか否か等により、同一製品においても使用者にとってのリスクは大幅に異なってくる。

#### ΔR2 三段階方式

(①本質安全設計 ②付加的保護装置 ③警告表示)

①本質安全設計: ΔR1の作業の後に、技術的解決方法を検討する。サービスロボットの場合、相対的に産業用ロボットと比較して小型の場合が大きく、それによりもたらされる発生エネルギーは限られている。インテリジェントなサービスロボットではあるが、古典的なニュートンの運動法則  $F=ma$  を適用し、例えば衝突時の人への危害を考える。質量が大きくても、走行速度が遅ければ、回避可能性はある。質量が小さい場合、人と衝突したとしても、その危害は限られている等が検討の対象となる。その際に、機械的な挟まれ・巻き

込まれ等の部位があるかないかを確認し、適切な処理が必要となる。

②付加的保護方策: 現在、サービスロボット用の合理的な安全センサなどが未発達の為、基本的にはISO12100で定める三段階方式の機械的対応である。1. 本質安全設計に頼るべきである。制御カテゴリ等を配慮する際には、state of the artに従う。又、安全関連信号をソフトウェアで処理しようとする、複雑な機能安全規格 IEC61508 に合致した製品が必要となり、それには第三者認証が必要となるが、これは数年間の認証期間と相応の費用が発生する為に、設計者にとり問題となる。機能安全は、対象製品が量産化される場合には是非適用すべきだが、産業の黎明期であるサービスロボットに適用しようとする、かなり無理がある。

安全でない通常の汎用センサ(危険検出形センサ)を使用した場合、故障検出が確実に出来る保障は無いが、実証されたコンポーネントを使用する場合には、信頼性の観点から大方機能する為に、上述の通り発生エネルギーが限定されている場合、汎用センサを使用する事により、危険源除去にはつながらないが、リスクの低減には寄与するという事が言える。その為に、産業用機械や産業用ロボットの場合には適用できないが、サービスロボットの場合には全体のΔRの方策として考慮する事は可能である。

#### ③ΔR3 警告表示

設計者は、リスク低減の結果はゼロに成らないために、リスク低減後の残留リスクを、危険情報として使用者へ伝達する事によりその役割を終了する。この方法は、産業用機械やロボットと基本的に同じである。とりわけΔR1でのべた一般人と適用場所、及び時間への制限が重要である。

以上、合理的に予見可能な誤使用を極力排除する目的として、事前の予防概念としてのΔRの考え方を述べたが、残留リスクを社会が受容するために、事故は発生するので、その方策として事後の補償としての保険で被災者が十分に救済される事が必要条件となる。

### 3. リスク低減基準-RAD

2006年にシュレッダーでこどもが指を切断する事故が相次いで報道された。最悪の事態は、2歳の女児が9本の指を切断した。この子供は80年余りの余命を指一本のみで生活しなければならぬ。それは、通常の世界生活の営みが阻害され、生涯にわたりこの不幸を背負って生き抜かなければならぬ。本人、或いはその家族がどのような思いで生活を営まなければならぬかは、想像を絶する。この指は戻らないという不可逆性を有している。製造者の責任者は、製品に警告表示

をしてあったと説明し、被災した子どもの母親は、私も注意が充分ではなかったと報道に対し説明した。この事故は予見可能であり、回避可能であったか？

技術的には、シュレッダーの開口部近くで危険源である刃物が回転しているわけで、そこに指を入れれば人間工学に基づく人体の寸法を考慮すれば切断される事は、一般人の常識でも事故は予見可能であり、かつそれを回避する為に、例えば技術的にも簡単に達成可能で、経済的にもそれ程負担とならないプラスチック製のアダプタ等を取り付け、人の指がはいらぬ様にするのは、とりわけ困難な事ではなく、すなわち事故は回避可能であるという事になる。この場合の回避可能性は、合理的な代替設計が存在した事を意味する。

技術者として、このような予見可能性及び回避可能性が事前に把握できた際に、どのような行動を起こすかは、技術者倫理の問題であり、本件についてはおそらく多くの人から共通の認識は得られると考える。もちろん、法的な制裁が果たして、或いはどのように取られるか否かは、時間的経過を待たなければいけない。

製造物責任法はアメリカで不法行為法の延長として発生し、1965年の権威有るアメリカ法律協会による第2次リステイメント § 402A により、消費者保護の観点から無過失責任を基盤とする消費者期待基準が導入された。しかしながらこれは消費者の主観等がはいる、諸要因も加わりアメリカを訴訟大国にし同時に様々な社会問題も引き起こした。

機械文明による効用と便益を考慮すると、製造者が事故が起こるとその結果のみで無過失責任を課せられることは、必ずしも社会正義でないとの議論から、1998年の第3次リステイメント(2), (3)においては、危険効用基準と共に欠陥に対する3類型が示された；

1. 製造上の欠陥
2. 設計上の欠陥
3. 表示上の欠陥

ここで、設計上の欠陥については、ウェイドの7要素に基づく危険効用基準を踏まえた、危険便益分析(CBA)ひいては、代替設計案を採用して得られる便益をその代替設計案を採用する事に伴う費用と比べるマイクロ衡量としての「合理的な代替設計基準」(reasonable alternative design: RAD) が提唱された<sup>6)</sup>。この解釈においては、設計上の欠陥は無過失責任で無く、訴える側が合理的代替設計があった事を証明しなければいけない事になった。実質的に、この基準がこれまでのアメリカの判例においては主に適用されてきている。

設計者の立場からこれを解釈すると、製造者としてその時代の科学及び技術の現状を十分に考慮しリスク低減を行い、その結果合理的(技術的及び経済的)な代替設計が無い事を証明できれば、訴訟の場合でも十分に抗弁は出来るという事になる。第三者認証機関がそ

の安全設計のプロセスを確認済の場合は、より安全の妥当性が証明される事になる。

リスクアセスメントとリスク低減の結果を証拠書類としての図書として保管することは必須要件となる。

## 4. 結語

科学技術の成果を利便性として人々に提供するものは技術者であり、その社会に与える重大な影響を事前に制御できるのも技術者である。

安全を達成するには、これまでの多くの事故により犠牲となった人々の血で書かれた形式知としての安全規格の原理・原則並びに方法論が既に存在しており、それらを駆使して新技術に対し、確定的な危険源を a priori としての安全設計を適用する事により制御する事が、技術者に求められている。

とりわけ、様々な形態の人と機械の協働においては「共存の原則」がこれから定義づけされる必要があり、それを支える製品認証・要員認定そして社会受容性を達成する為の補償・救済措置としての保険がそれを実現する為の条件となる。

本稿において、共存の原則を成立させ社会的受容を取り付ける条件として、先ず事前の安全設計、とりわけ  $\Delta R1$  において、サービスロボットの使用制限を厳密に行い、本質安全設計を重視し、安易にセンサに頼らない設計が重要であることを、これまでの認証業務の経験と考察から提案した。更には、リスク低減を実施する限界として、技術的には「適切に低減されたリスク (ARR)」、法的には「合理的代替設計基準 (RAD)」を配慮する事を提案した。同時に、万が一事故(不慮の事態)が発生した際には事後の補償の概念から、被災者は保険により救済される事が条件となる。これらの知見が、今後サービスロボットの社会的受容を促進させる為に活用頂ければ幸いである。

### 参考文献

- (1)Shinnsaku Onodera, Certification, Coma(1995)
- (2)IEC61800-5-2,Adjustable speed electrical power drive system-Safety Requirements(2007)
- (3)IEC61508, Functional Safety of Electrical /Electronic / Programmable Electronic Safety-Related-Systems (1999)
- (4)ISO/IEC Guide 51:Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards (1999).
- (5)ISO 14121:1999,Safety of machinery – Principles of riskassessment (1999).
- (6)ISO 12100-1,-2:2003,Safety of machinery – Basic concepts of general principles for design (2003).
- (7)Takashi Kabe,Shigeo Umezaki, The relationship between safety design as a preventional measurement and products liability law: RAD, Proceedings of 40<sup>th</sup> annual conference of the Japan Society for Safety Engineering, (2007)