

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C
Vol.75-754(2009-6)

加部隆史^{*1}, 木村哲也^{*2}, 高森年^{*3}, 杉本旭^{*4}

Safety of Service Robots (Basic Consideration on Methodology of Risk Reduction- ΔR)

Takashi KABE^{*1}, Tetsuya KIMURA, Toshi TAKAMORI, Noboru SUGIMOTO

^{*1} NPO The Safety Engineering Laboratory
3-39-8 Shoan, Sugunami-ku, Tokyo, 160-0054 Japan

Service robot is facing for the infancy stage as a new industry due to various needs of society such as limited production way for a wide variety of products, labor shortage accompanying the reduction in the younger age population in the coming aged society. Service robot is a machine equipped with potential harmful hazards to human being, but the conventional safety principles for industrial robot such as the principle of separating (safeguarding) or the principle of stopping often deteriorate the functionality of service robots. Therefore it is essential to create a new safety principle especially for service robot. Adequate safety sensors are not yet available on the market and thus the development of the inherent safety design are particularly required. In case of industrial robot educated workers are to operate the robot, but in case of service robot consumers including children and aged people come in touch with them, therefore the risk in the later case is usually higher because of much wider variety of operational conditions. It is crucial effective to clearly decide the "limitation of machine", e.g. target people, operating place and time etc. In this paper, the effective ways to reduce risk based on the limitation of machine and inherent safety design according to the relevant standards on safety of machinery are discussed and proposed a conception of ΔR , the stepwise reduction in risk, to reach adequate reduced risk (ARR).

Key Words : Risk-based Design, Safety Engineering, Control Device, ISO14121, ISO12100, Service Robot

1. 緒 言

サービスロボットは、急変する社会情勢の基に世の中の役に立ち福祉を増進するものとして期待されている。世界的にサービスロボットの定義は定まっていないが、例として案内ロボット、警備ロボット、掃除ロボット等が既に市場に投入され始めている。生産現場においても、人と機械の協働作業を目標として、研究開発が行われている。

どちらの場合も、サービスロボット用として世界的に未だ安全基準・規格未成立であるが、あくまでも機械である為に、機械的・電氣的・人間工学的等の危険

源を有し、はさまれ、捲き込まれ、追突、感電等に起因する危害が潜在的に発生する可能性を含んでいる。人と接触した時点でこれら危険源は危険事象となり、事故の誘発要因となる。

科学技術文明は特に20世紀に飛躍的に躍進し世の中の福祉増進という陽の部分を提供した反面、環境問題という不可逆性を持った陰の部分も育成してしまった。情報通信技術を含む高度な先端産業技術を基盤とするサービスロボットは、社会に危害を与える要素を短期的及び中長期的に有している。その為、機械の危険源は事前に把握され対処される事が本筋で有る。次世代の新産業を担う設計者は、それ故未来への責任という自覚を基に、予防概念に基づき危険源を事前に、適切に管理し製品を市場流通する事を求められる。

*原稿受付 0000年00月00日

^{*1} 正員, NPO 安全工学研究所 (167-0054 東京都杉並区松庵 3-39-8)

^{*2} 正員, 長岡技術科学大学(940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

^{*3} 正員, 特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構 (212-0013 兵庫県神戸市中央区港島南町 1-5-2)

加部隆史 E-mail: kabe@safetvlabo.com

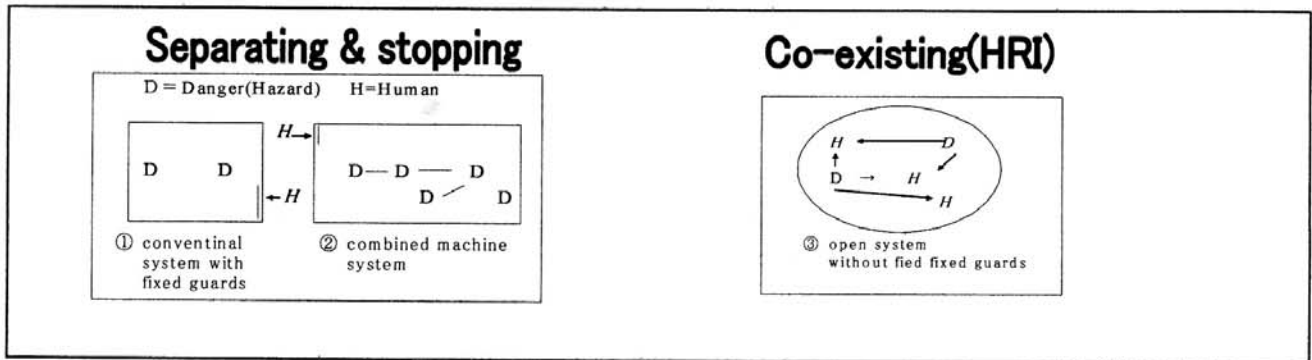


Fig. 1 Principle of Safeguarding and Co-Existing

それ故技術マネジメントの観点から、初期の開発目的としての「有用性」を明確にし「魔の川」を乗り切り、応用研究と製品開発の段階で経済性を配慮し「死の谷」を乗り越え、製品の市場投入時には安全技術を基本として「ダーウインの海」を乗り切り、社会的受容を達成する事が必要とされる。

本稿では、サービスロボットの安全性を確保する為に、リスクアセスメント及びその結果としてのリスク低減方策について考察と提案を行うものである。第2章でサービスロボットが人と接触する事を前提としている為に、適用可能な安全原則を現在の科学及び技術の水準を基に整理し、第3章で使用目的・人・空間・時間を制限する事による有効なリスク低減方策(ΔR)とその必要性につき、事例検証を基に考察の上その重要性を提案し、第4章で結語と共に残された多くの課題を展望するものである。

2. サービスロボットの安全原則

2・1 あらたな安全の原則 人との協働、同時に接触を意味するサービスロボットを本稿の対象として以下の様に大別する；

- ① 生産用の産業用サービスロボット
- ② 生産用以外のあらゆるサービスロボット

①工場向け製造用の産業用サービスロボット

については、工場内での使用となり、リスクアセスメントの原則ISO14121⁽¹⁾や安全設計に関する一般原則ISO12100⁽²⁾等の機械安全及び労働安全の概念を適用し、リスク低減を実施する事が出来、危険源を有するサービスロボットと向き合うのは、基本的に教育を受けた作業員である。これまで産業用ロボットに対しては、隔離の原則、停止の原則、エネルギー・ゼロの原則が適用されている。すなわちロボットは防護柵で覆われ、出入り口はインターロック装置で電源の管理が行われる。

産業用ロボットの安全性に関するISO10218⁽³⁾では、

出力80W以下のモーター、150Nの荷重、250mm/sの速度以下であれば防護柵は不要とされているが、これらの数値を超えるものは従来どおり防護柵が必要となる。

最新技術として、人とロボットの協働を目指しロボットの速度を制限し、それにより各軸の動きを制御し安全なバーチャル・フェンスを構成し、その中に人が侵入した際にはロボットは電気安全に関するIEC60204⁽⁴⁾に基づく停止カテゴリー0により即停止する技術がドイツで実現している。これを支えるのは安全ドライブシステムに関するIEC61800-5-2⁽⁵⁾及び機能安全規格IEC61508⁽⁶⁾であるが、人の侵入に対しては画像処理による人体検知等の新たな安全センサが必要とされており、労働安全の法律面からも現時点では適用範囲は限定されている。

②生産用以外のあらゆるサービスロボット

は、工場以外のあらゆる環境に設置されるもので、危険源であるサービスロボットと人との接触を前提とする為に、従来の工場の自動化技術に於ける「隔離の原則」、「停止の原則」及び「エネルギー・ゼロの原則」に対し、本稿では図1HRIに示す通りこの状況を「共存の原則」と用語を定める。同時にこれは、停止の原則に対し、大方の場合は、機能維持の為に駆動源が通電状態の「止まらない安全」を達成する事を意味している。これら前提条件の変化に伴い、安全の概念及び原則が①と②では大きく異なり、安全技術面ではパラダイムシフトを意味する。それを克服する為には、新たな安全原則、それに伴う新たな要素技術、社会システムの整備等がこの新産業に対しては必要とされる。②の場合、高齢者、身障者、子供を含む一般人を対象とする事があるため、その分危険源であるサービスロボットと人が接触して育成される危険事象としてのリスクは①よりも広範囲に発生する。

サービスロボットの分野では、世界的に研究開発段階から実用化への途上に有る為に、これに特化した追

加的な安全原則及び規格はこれから整備が必要とされている。

2・2 愛知万博に於けるサービスロボット

2005年の愛知万博において、およそ100体のサービスロボットが展示された。その大半は研究開発段階のもので、1割程度が実用化に近いものであった。

愛知万博での安全原則は、機械安全として体系化されたものを基準として、

- ・安全に関する用語を規定したISO/IEC Guide51⁽⁷⁾、
- ・リスクアセスメントの原則ISO14121、
- ・安全に関する設計原則ISO12100等が対象とされ、リスクアセスメントの実施、リスク低減については
- ・本質安全設計を基本とし、
- ・安易にセンサに頼らない事を要点とし、
- ・4線式センサの使用
- ・残留リスクは万博会場の要員が管理するという事であった。

2・3 NPO安全工学研究所の認証

NPO安全工学研究所は、その頃から市場に流通し始めた②に対しサービスロボットの認証業務として、残留リスクをクリティカル・ハザード(Critical Hazard=CH)として鑑定する業務を開始している⁽⁸⁾。

そのCH鑑定の前提として、設計者が確定的危険源を事前にリスクアセスメントにより同定し、リスクを見積り・評価し、その結果に基づきリスク低減を、ISO12100に定める適切に低減されたリスクに達するまで実施する事が求められ、幾つかの検証事例から、愛知万博で打出された以下の安全原則が引続き有効である事が検証されている；

- ・リスクアセスメントとリスク低減の実施
- ・本質安全設計の重視
- ・安易にセンサに頼らない

サービスロボットが、あらたな「共存の原則」及び「とまらない安全」に基づき、その機能を果たす為には、機械の駆動源の制御において、安全を確認した時にしか情報を伝達しない非対称故障特性をもったユニークな情報伝達のみを可能とする安全確認型⁽⁹⁾のセンサ及びISO13849⁽¹⁰⁾に示される適切な安全回路を構築する事は必ずしも現実的でないため、それに見合った安全なセンサやコントローラ等が新たな要素技術として必要とされてくる。すなわち、現状では市販されているセンサはフェールセーフな構造となっていない危険検出型センサが大部分の為に、故障検出が確実に達成しかねる。

又、プログラマブル電子制御システムで監視機能を行う場合、不具合の検出についてのシステムの挙動を

考慮しなければならない。その方法論については機能安全規格IEC61508に定められており、各々の安全機能に対して指定された性能を安全性インテグリティレベル(SIL)が達成されている事を確実にする為に妥当性確認を行いプログラマブル電子制御システムを設置する事になっている。幼年期の新産業であるサービスロボットでは大量生産が困難な為に、機能安全につきものの第三者認証を実施するとすると、数年の認証期間と多くの費用が必要とされる為に、例外を除きこれも現実的ではない⁽¹¹⁾。

ロボット政策研究会⁽¹²⁾の報告書では、「機構上の対策に於ける留意点として、危険検出センサやソフトウェアは、安全性確保の為にパーツではなく、あくまで衝突等事故発生危険性を低下させる機能を有するものと位置づけられる。欧州では、危険検出センサやソフトウェアによってロボットの安全性を高めようとする場合は、当該装置の信頼性に関する機能安全の規格(IEC61508)等を満たす必要が有る」と表現している。

それ故、センサに頼らない本質安全設計の実現が現実的であり、その際に重要な点は、衝突時に人に危害を与えない為に、例えば自動車産業で一般化している衝撃試験を実施し、HIC値を目安として安全性の判断を下す事につき、いくつかの事例がある⁽¹³⁾、⁽¹⁴⁾、⁽¹⁵⁾。HIC値が相応に低ければ、人と衝突しても危害は大きくない為に、幾つかの事例では安全と判断する事が出来る。

この場合、たとえ危険検出型の距離センサ等が装備されていても、これを安全関連信号と見なす必要はなくなる。同時に、これは安全機能ではなく危険源の除去には役立たないが、リスク低減には貢献する(上記引用文の下線部)。

制御安全の他に、IEC60204-1に定める基本的な電気安全があり、感電・発火への対応、防塵・防水に対する保護等級の設定、電磁波の影響の確認等は基本的事項として配慮の対象となる。

これまでの国内での死亡災害の分析を行い事故データベースにより分析を実施した結果⁽¹⁶⁾、これまで述べてきたような機械類の安全に関する一般原則等に基づく概念を適用していれば、災害の8割以上は、

- ・ 予見可能 (リスクアセスメントの結果)
- ・ 結果回避可能 (リスク低減の結果)
- ・ それに伴い再発防止が可能

である事が示されている。それ故、新たな使用環境が加わるにしても、新技術としてのサービスロボットへ機械安全の主要な安全原則、特にリスク低減の方法論を適用する事は有意義である。

3. 使用目的・人・空間・時間への制限とリスク評価

3・1 総体的リスクの低減 サービスロボットでは安全確認型のユネイトな情報伝達を実現するのは必ずしも現実的でない為に、前章で本質安全設計を重視する傾向が考察され、危険検出型のセンサは安全ではないがリスクを有る程度は低減する役割を果たす事をのべた。

更に機械安全では重要な危険源から出発しリスクを低減する方法以外の最初の段階で、リスクアセスメントの最初の方策であり、或いはISO12100の第5項で定める、「機械類の制限の決定」をする事が定められている。以下に、使用目的・空間的・時間的・人的制限を加えるとサービスロボットの安全性にどのような影響を及ぼしうるかを考察する。

既に市販されNPO安全工学研究所が最初に鑑定したサービスロボット wakamaru (図2, B) を現状の情報に基づき例にとると以下の様な使用目的等による制限が付与されている；

- 1) 使用目的の制限
人と暮らす為のコミュニケーションロボット、傾ける、もたれる、叩く、水をかける等の禁止事項
- 2) 空間による制限
現在の状況では家庭向けには販売しない事、階段があるところでの使用禁止等
- 3) 時間による制限
販売でなく、レンタル方式をとり、販売後の市場監視及び廃棄物処理に至るライフサイクル全般への対応
- 4) 人による制限
子どもへの特別な注意事項 (3歳未満, 3-5歳, 6歳以上に分けた使用上の注意事項をパンフレットに記載)

以下、wakamaruの例にならって個別の制限につき考察する。

図2：使用目的による制限

では、典型的なサービスロボットをA-Fと6通りに大まかな形態分類を行い、それに伴うリスクを考察する。この分類は、ロボットの安全性を取り扱うISO/TC184の2007年11月の東京会議で決定されSC2-PT2(safety for Personal Care Robot)での以下の4分類による。因みに医療用ロボットは患者と医者間に特別な契約関係が存在する為に、本稿の対象外とする。

a) Surgery and medical robots

b) Mobile manipulator robots

c) Physical assistance robots

d) People carrier robots

本稿では、このうちb)及びd)をとりあげ、これらをNPOのこれまでの業務を鑑みて、次のように細分化した；

b) Mobile manipulator robots 分類 A, B, C, D

d) People carrier robots 分類 E, F

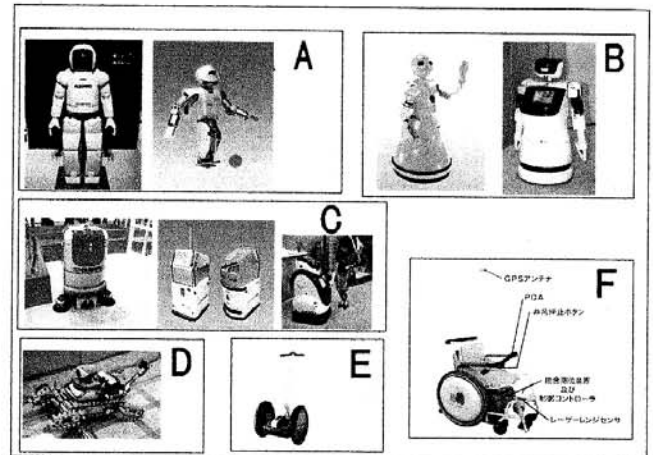


Fig. 2 Restriction by using purpose (Fotos by URL of each supplier)

サービスロボットの機能、それに伴う寸法及び形態等、すなわち使用目的から、特定の類型分類が可能であり、それらに基づき検証されたものを帰納的に集積し、将来的にはそこから特定の形態のロボットについての安全原則を導く事も考えられる。

Mobile manipulator robotsの例として、二足歩行のヒューマノイドロボット(分類A)の場合、安全性を確保しようとしても二足歩行の為にロボットが転倒し人に危害を与えるという宿命を抱えており、いくら要素技術が発展してもこの問題を解決しロボットが人と共存する為には多くの課題が残されている。

二輪駆動(で転倒防止用の補助輪付き)で手の有るもの(分類B)、類似したもので手の無いもの(分類C)がある。手の有るロボット(分類B)は、公共施設などで子供等がいる場合に、その手先で人の目を突いた場合にならぬかが、問題となりそれなりの設計対処が必要とされる。

手の無いロボットを工場内の搬送作業や建物の清掃作業で使用する場合は、基本的に例えば無人搬送車の安全性を配慮する事、及び衝撃の確認により、当初のリスク低減をそれなりに達成する事が可能である。

次に小型のレスキューロボットの発展系(分類D)等があげられる。これらは、例えば建物の白蟻防除用として投入され始めようとしているが、その投入先は

床下の場合には基本的に隔離の原則が例外として適用され、かつ又、同様にリスクはそれだけ低減される。

People carrier robots として、電子制御式バランスを装備した二輪走行車(分類E)、自律式の車椅子(分類F)等が現存し部分的にかつ、例えば、以下の様に特定条件の基に市場に導入されている。

電子制御式バランスを装備した二輪パーソナルモビリティロボット(分類E)は、海外では一般公道が走行可とされている地域もあるが(パーソナルモビリティロボットのリスクを社会的に受け入れている)、日本では同じロボットでも、そのリスクを社会的に受け入れ一般公道走行可能と直ちに判断することはできない。

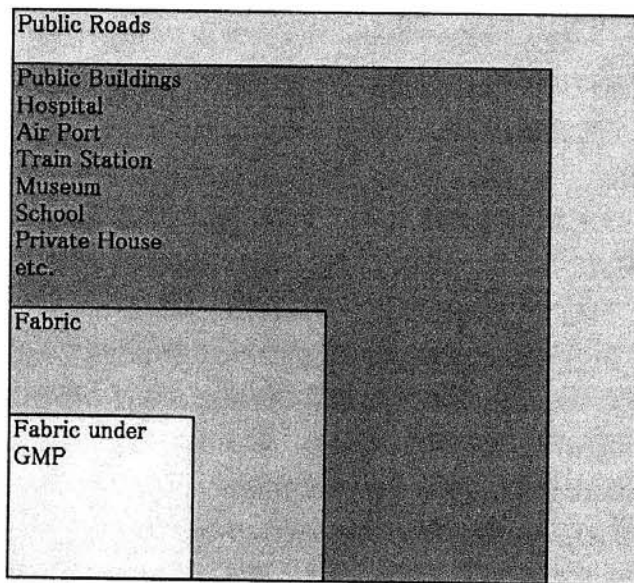


Fig. 3 Restriction by space factor

自律式の車椅子(分類F)では、走行経路上の障害物にどのようなものがあるのか、障害物の多様性・予見可能性により障害物との衝突リスクは大きく変化する(外部と隔離された病院の敷地内の障害物は予見しやすくリスクは低い。一般公道の障害物は多様で予見可能性は低くリスクは高い)。

これらの大部分のロボットに該当する合理的に予見可能な誤使用として、段差或いは階段から落下するという危険事象が上げられる。ロボットの落下先に人がいて衝突をすると、通常走行時の衝突以上の衝撃力を人が受け結果として重症或いは致命傷に至る事が充分に考えられる。これに対するリスク低減方策として、第一に段差や階段が有る場所での使用を禁止する、或いはその様な場所へロボットが侵入できないような、例えば柵等の防護を施す等が考えら得ると共に、第二に設計的において機械的或いは電氣的に段差などを検知してロボットが停止する機能を設ける等の方策が合

理的な範囲での代替設計であれば実施する事が推奨される。

この様に、ロボットの使用目的を限定する事により、予見可能な誤使用をかなり排除できうることは、注目に値する。

図3：空間による制限

空間による制限を図3に示す。ここでは、工場か或いはそれ以外かにより、子供、高齢者、障害者等の社会的弱者をも対象とするか、しないかでは大きなリスクの度合いの相違がある。公道の場合、全ての人を対象となりリスクは高くなり、状況に応じ道路交通法との関連が発生する。病院や学校等は目的が限定された人達の共同体である為、その状況に照らし合わせたリスクアセスメントが必要となる。

生産用の産業用・サービスロボットでも、製造用でなく搬送に特化したサービスロボットがある。この場合、適用空間は工場であるので一般人との接触は無く、教育を受けた作業員がロボットと接触するという事から、自ずからその分リスクが限定される。更に、世界保健機構(WHO)が1969年より医薬品の製造管理・品質管理として定めているGMP(Good Manufacturing Practice)管理下の場合、工場並びに各作業区域への作業者の出入りが厳しく管理されている為、リスクはその管理により一般工場よりも低減されている。そして二輪駆動の搬送用ロボットを無人搬送車と見なし、JIS D 6801等⁽¹⁷⁾を適用すると、相応な安全性は達成される事となる。同じロボットを機能的にもそのままでも有益な役割を果たす可能性が充分にあるとして、例えば百貨店等の営業時間内で搬送用に適用した場合には、そこに一般人が存在する為、その分リスクは増大する。

図4：時間による制限

時間による制限を図4に示す。ここでは、機械の全ライフサイクルの観点から、安全寿命、保守時期或いは廃棄方法をどう定めるかにより、リスク及び製造者責任の度合いが異なってくる。

これは往々にして設計者の危険責任の引受を法的に如何に制限するかにも関わっており、万が一の事故の際にはこの制限をしたか、どの程度したか等により、法的責任を請負う範囲が決定されてくる。

サービスロボットの安全寿命を何年に設定するか、廃棄をどのように扱うかにより、設計者の責任範囲が異なってくる。すなわち、サービスロボットと時間軸との関連性である。

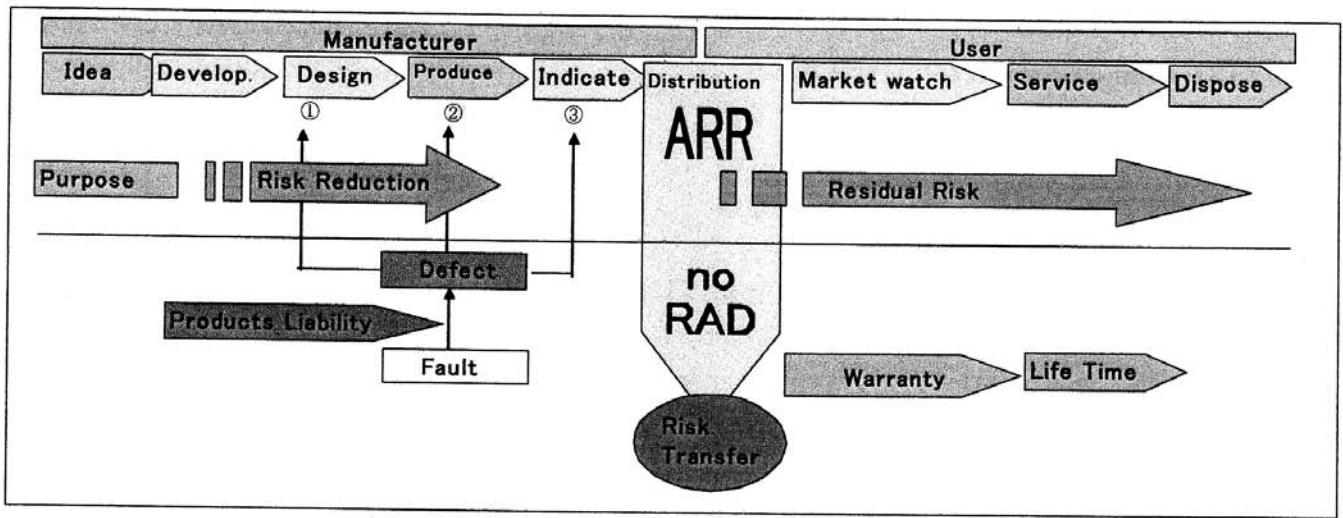


Fig. 4 Restriction by time factor

又、図2の分類Cの下部に例示してあるのと同じロボットを、使用目的の全く異なる昼間と夜間で使用する場合には、時間的要素に加え人による要素が同一空間にて発生する為に、リスクの度合いが異なってくる。

図5：使用者（人）等による制限

例として昼間は案内ロボット（分類Cの一部）がショッピングモールに設置され、同じロボットが夜間はその建物を警備ロボットとして見回りするものがある。前者の場合、高齢者や子供を含む一般人が対象となり、後者の場合は警備会社に管理された建物の為、基本的に一般人は対象外となり、リスクの度合いは、使用目的が異なる為に全く異なり前者の方が大きくなる。福祉関連サービスロボットにおいては、接触する人の健康状態如何によりリスクの度合いが大幅に異なる。例えば、パワーアシストを健康な人に装備する際には、万が一の際には電源遮断するなどの操作が可能だが、老人で重度な介護を必要とする人はその操作が出来ない場合がある。この場合、介護保険法で定める要支援や要介護の基準をリスクの度合いとして活用する事が考えられる。

一般人の中で、高齢者は身体的に中年までの健康体と比べ一般に体力が低下している為、例えばパワーアシストのロボットを着用し、階段などでの踏み外しに関しては回避の可能性が弱まり、衝撃に対しても耐久力が弱まっている。

子供の場合、サービスロボットが人と共存している際に、大きな好奇心を示し、いたずらをする可能性が高い。例えば、赤く目立つ非常停止釦などを装備していると、面白がってそれを押し、入れ替わり立ち替わりその動作が繰り返されると、ロボットの機能自体に支障をきたす恐れがある。タンパープルーフを考えても、本来の非常停止の機能が損なわれてしまう。それ

故、一般人と接触するサービスロボットの場合には、非常停止釦を設置するか否かが機能面の観点から往々にして議論となる。

3・2 段階的 ΔR リスク評価には複数の方法

が存在するが、本稿ではISO13849に適用されているリスクグラフを参照し、5段階評価を基準として推奨する。一般的にロボットの速度が人の歩行速度である時速4km以下の場合、通常健康成人などの場合に回避可能性は充分にあるため、本来リスクはこれにより低減される。アメリカの軍用規格

MIL-Standard882C⁽¹⁸⁾のリスクマトリックス

を参照する場合が国内では良く見受けられるが、こちらは回避可能性を直接的に考慮していない為に、前述の通り一般健康人と高齢者とでは回避可能性の度合い、すなわちリスクの度合いが異なる為に、リスクグラフの方が有効と思われる。

リスク低減をどこまでやるか、についてはこれまで複数の規格で様々な用語が使用されてきたが、ISO/IEC Guide 51:1999では許容可能(acceptable risk)、ISO 14121:1999では許容可能(tolerable)、ISO 12100-1:2003では、「許容可能なリスクを達成する」から「適切にリスクを低減する(adequate reduced risk: ARR)」という表現に変更することが議論された。類似概念としては、機能安全規格 IEC61508にあるALARP 或いは、最新のアメリカPL法に基づく合理的代替設計(Reasonable Alternative Design:RAD)が無いという解釈に通ずる。本稿では、これらの経過から表現をARRに統一する事とする。

欧州でのCEマーキング制度は、安全なものしか市場に流通できない事を製造者に義務付けているが、その法的根拠となる欧州指令は、EU設立の為のEU協定第95条に基づき、自由貿易を確保する為という目的

をもっている。その自由貿易を円滑に進める為には、安全設計を事前の予防概念としてとらえ、state of the art 或いは good engineering practice に基づく安全技術を実践し、適切に低減されたリスクを達成し、それにも関わらず発生した事故（偶発の事態）に対しては、製造者（設計者）を責めることなく社会がそれを許容し、被害者は保険により救済されるという構造が、欧州では社会システムとして確立されている。

それ故、同じ外観、機能、特性を備えた同一のサービスロボットが、その使用目的・適用する人・空間・時間の組合せにより異なるリスクの度合いとなる事が NPO 安全工学研究所の認証事例の経験から明らかである。設計の際にこれらの要素をどう制限するかにより、危険源は同一であってもリスク低減に繋がる事から、慎重に検討する事が必要である。

これらの制限適用とリスク低減の関係を図5に示す。図5のΔR1は、安全技術を適用する前の機械に対する各種制限を加えた場合のリスク低減の可能性を示す。

ΔR2は、リスクアセスメントの結果 ISO12100 が定めるスリー・ステップ・メソッド(サービスロボットの場合は、とりわけ第一段階の本質安全設計が重要)による安全技術によるリスク低減を示す。

小型で家庭用のサービスロボットでその形態、容量の小さな駆動源、走行速度が遅い等の場合は、結果として人に危害を与える衝撃力が小さくなる。本質安全設計の段階で安全性を確保する例は、SIAS2007 の発表⁽¹⁶⁾において例示されている。

ΔR3は、上記方策を講じた後の残留リスクで、これはARRの範囲である。

この図は定性的なもので、定量的評価に基づく厳密なものではなく、使用制限の分類も厳密な検証結果に基づいていない為に不十分では有るが、ここで制限を加えるか否かによりリスクの度合いはかなり異なってくる。

対象者（人）の制限に関わる部分は、場合によりサービスロボットの使用目的と形態により、例えば介護

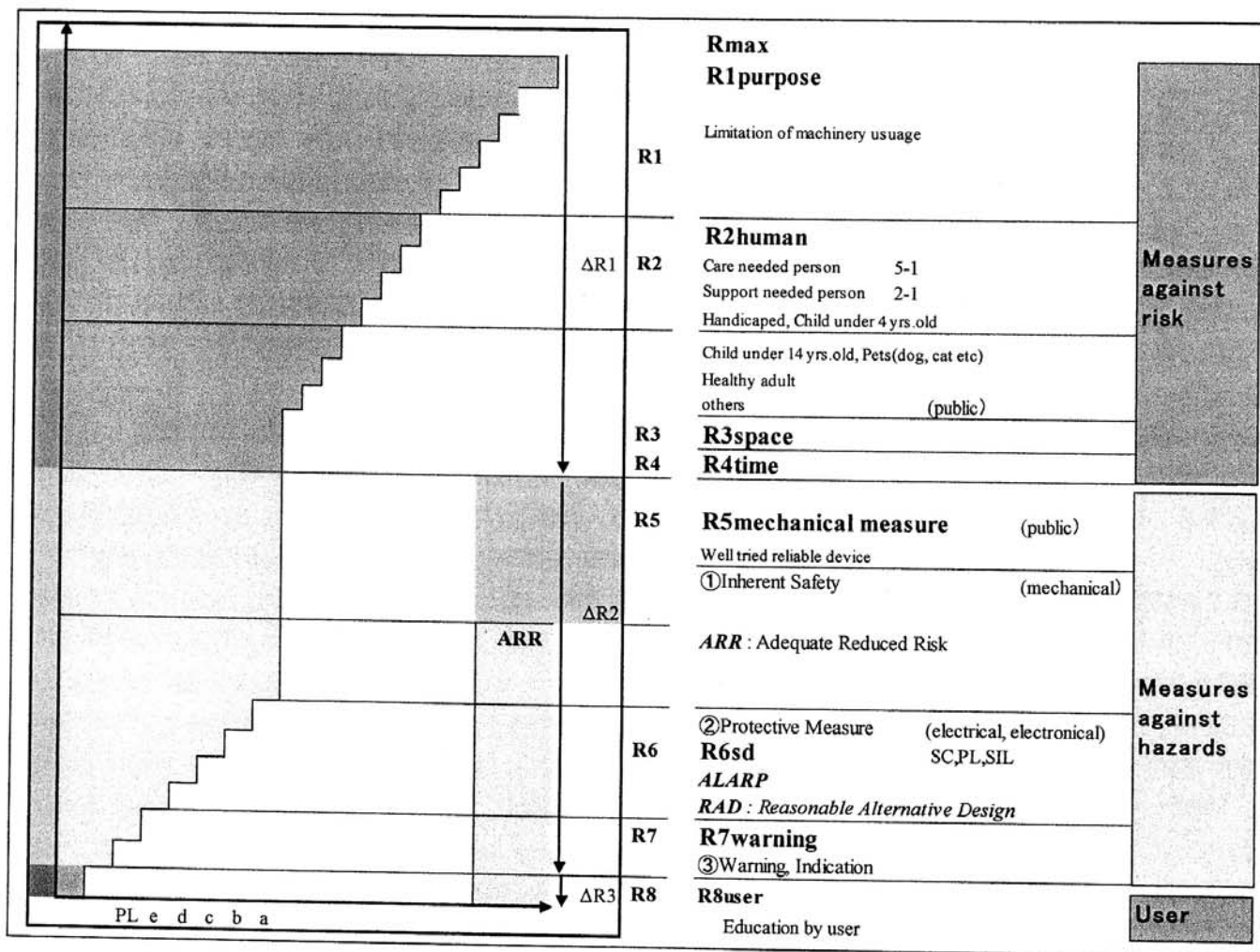


Fig. 5 Restriction by using purpose and human factors

用ロボットの場Ⓐ、既存の介護保険の等級などを参考にする事も有効であり、今後の検討課題となる。

図5に示された略語の意味は、以下の通りである；
Rmax は危険源及び、起源事象としての人に依存するリスク

低減前のリスクの総和を表し、

R1purpose は機械の使用目的よる制限、

R2human は対象者（人）による制限、

R3space は空間的制限、

R4time は時間的制限、

R5m は本質安全設計による主に機械的方策、

R6sd は必要に応じ制御関連部のリスク低減、

R7warning は警告・表示による使用へ情報伝達で、

ARR(Adequate Reduced Risk)^{(2),(10)}はこれらの手順を踏まえて、適切に低減されたリスクを表す。

R8user は、リスク低減後に使用者へ管理が委ねられる残留リスクであり、使用者はこれら取扱説明書等に明示された残留リスクを守る必要がある。

同時に、ドイツ職業保険組合中央研究所(BGIA)の安全専門家と議論した結果を踏まえ、安全でない通常の危険検出型センサを使用しても、確率的には信頼性が高い場合には大方の場合機能するという前提から、総体的リスクは低減される可能性が充分にある事を R5m で配慮している。

本章での考察或いは、これまでの NPO 安全工学研究所が実施した認証業務からの検証結果及びそこで得られた知見を考慮すると、 $\Delta R 1$ によりかなりのリスクが低減されることが明らかである。

サービスロボットの場合、 $\Delta R 1$ に対しては、使用者及びその設置場所、時間、対象者が限定され、残留リスクを使用者が引受けるという条件が整っていれば、よしとする。しかしながら、 $\Delta R 2$ の設計対応は必要である。

$\Delta R 2$ の場合、とりわけ対象者が不特定多数であり、合理的予見可能な誤使用が明確に定めきれない場合には、機器自体へのリスク低減が必要となる。すなわち、本来は $\Delta R 1$ の制限の選択と同時或いはそれ以前に、設計的に確定的な危険源が処理可能かの検討が必要となり、同様に $\Delta R 3$ の場合にも、 $\Delta R 2$ の安全設計を充分に行わず、安易に警告表示で処理してしまう事は、説明責任の観点からも推奨できない。

本稿においては、いきなり確定的危険源の対処として従来の機械安全のように安全技術面での方策からはじめるのではなく、その前に機械の使用目的と範囲を図5に基づく順列で整理した際に、かなりのリスク低減に繋がるという事を明示する事に留め、他の要素と

の相関関係と全体リスクの分布については、さらに考察と検討が必要とされる。同時に、ロボットの形態や使用目的によりリスクの度合いが大幅に異なる為、具体的には個別のリスクアセスメントに従った方策が必要である。

4. 結 語

サービスロボットについての研究開発は盛んに行われ、市場での流通が開始され始めている。しかしながら、産業自体が幼年期にある為、サービスロボットの定義がさだまっておらず、共通する安全規格も未設定である。

危険源と人が常に接触するという前提では、従来と異なる新たな「共存の原則」が必要とされる。

機械としてのサービスロボットは様々な危険源を含んでおり、これらを機械安全の安全原則に沿い、愛知万博或いは NPO 安全工学研究所で検証された方法を実績として(well tried good engineering practice)配慮の上設計する事が有益である事を検証した。

更に、リスクの度合いを測るには、従来重要であった確定的危険源に基づく安全技術の導入という段階以前に、機械の使用目的・人的・空間的・時間的な制限に関する概念とその相互の関連性を配慮の上サービスロボットの使用目的を確定する事により、機械の使用上の制限を実施する事で、リスクが低減される可能性を検証した。本稿では、障害をもつ人達へ適用するか否かによりリスクの度合いが異なる為、その目安を提案した。

それに基づき安全を達成する為の事前措置として、機械の使用目的の制限、危険源の同定・リスクの見積り・評価並びにその結果に基づくリスク低減措置を本質安全設計—追加防護—警告・表示の順番で実施する。使用者へは、「適切に低減された」残留リスクを明示しその管理を委託する事が、リスク低減を実現するリスク・ベースド・アプローチ(RBA)の流れである。

この流れを実践すれば、社会に福祉をもたらすサービスロボットを設計した技術者は、事故が起きても RBA を実践した事により説明責任は全うされ基本的にサンクションを受けずに済み、被災者はその為に準備されるべく保険により救済されるということで、社会が受容する事になる⁽¹⁹⁾。

その他、残された多種多様な課題については各ステークホルダが協力の上、未来への責任を自覚した上で協議を重ね適切な解決方法を見つけ出す事が望まれる。

残された課題：サービスロボットのリスク評価にあたり、前章の使用目的・人・空間・時間の他に、形態が有る。すなわち、寸法、重量、手が有るか無いか、車輪走行か二足歩行か等であるが、この分類をするには現時点では恐らく期は熟しておらず、それをやる事により逆に研究開発の自由の眼を摘み取ってしまう事にもなりかねない為、これは慎重に配慮する必要がある。

その他、ソフトウェアの安全性については、機能安全規格 IEC61508 を新産業の幼年期に関して適用する。量産品を除きその膨大な手間と第三者認証機関への費用を考えると適切ではない。将来的には、製品が量産化されれば、十分に検討する必要は出てくる。同時に、機構やセンサ等の要素技術が更に進化するのを待つ方が、現実的であろう。

とりわけ、ハイテク機能を有するサービスロボットの際には、現時点では因果関係が明らかになっていないが、その不確実性による社会への重大な影響やセキュリティの観点からも、情報通信に関する安全性も追加される必要がある。

更に将来的な課題として、自律機能や学習機能を有するロボットの場合は、例えばアメリカで既に実践されているように、ロボットが戦場に配置・稼働されるという事を本来倫理的に問うてしかるべきであり、ハイテク技術の悪用を如何に防止できるかという観点と共にテクニカル・アセスメント(Technical Assessment: TA)を通して将来の技術開発のあり方並びにリスクコミュニケーションやコンセンサス会議等による社会受容性の確認に関する評価をする事が求められる。

サービスロボットが技術的に安全だとしても、技術に完全は無く、事故は起きる可能性が残る為、その際の被災者救済を保険制度で賄う必要があり、それが整備され初めて、社会が新しい産業であるサービスロボットを許容する事になる。どのような保険が整備されなければならないかについては、これまでの保険の種類とステークホルダの整理を踏まえ、整理される必要がある。

謝辞

本稿の作成にあたり、国のサービスロボット産業育成の為に複数プロジェクトの対象となったロボットを検討対象とさせて頂いた。経済産業省並びに該当企業に謝辞を述べたい。同時に、ドイツ職業保険組合の専門家諸氏より実際のサービスロボットを複数検証頂き貴重な意見を頂いた事を感謝する。

参考文献

- (1) ISO 14121:1999, Safety of machinery – Principles of risk assessment (1999).
- (2) ISO 12100-1,-2:2003, Safety of machinery – Basic concepts of general principles for design (2003).
- (3) ISO10218, Robots for industrial environments – Safety requirements – Part 1 (2006).
- (4) IEC60204-1, Safety of machinery-Electrical equipment of machines-Part1:General requirements (2005).
- (5) IEC61800-5-2, Adjustable speed electrical power drive systems– Part 5-2: Safety requirements – Functional (2007).
- (6) IEC61508, Functional Safety of Electrical /Electronic / Programmable Electronic Safety-Related-Systems (1999).
- (7) ISO/IEC Guide 51:Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards (1999).
- (8) Kabe, T., Safety Certification of Service Robot, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.25No.8 (2007).
- (9) Sugimoto, N., Kumekawa S., Fukawa K., Shimizu S., Umezaki S., Ikeda H., Houshi T., Futsuhara K., Fundamental Structure of Safety of the Safety Confirmation Type, JSME C Vo.54, No.505, (1988).
- (10) ISO 13849-, Safety of machinery – Safety-related parts of control systems Part1:General principles of design (2006).
- (11) Kabe, T., Tanaka, K., Ikeda, H., Sugimoto, N., Safety Principle for Service Robot, Proceedings of SIAS 2007, Tokyo (2007).
- (12) Report of Research Committee on Robotics Politics, Ministry of Economic, Trade and Industry (2005).
- (13) Kabe, T., Hiura, R., Ikeda, H., Sugimoto, N., Safety Certification of Service Robot “wakamaru”, Proceedings of SIAS 2005, Chicago (2005).
- (14) Oberer, S. Malosio, M. Schraft, R.D., Investigation of Robot –Human Impact, Proceedings of ISR-Robotik (2006).
- (15) Haddadin, S. Albu-Schaeffer, A. Hirzinger, G., Safety Evaluation of Physical Human – Robot Interaction via Crash – Testing, Proceedings of Robotics: Science and Systems III (2007).
- (16) Kabe, T., Tanaka, K., Someya, M., Sugimoto, N., Safety Design of Machinery: a priori Prevention, JSME C Vo.73, No.734 (2007).
- (17) JIS D 6802, Automatic guided vehicle systems – General rules of the safety (1997).
- (18) MIL – Standard 882C, Standard Practice for System Safety Program Requirements, US Department of Defense (1993).
- (19) Sugimoto, N., Safety Principle of Safety of Machinery in the Case of International Standard ISO12100, JSME-Industrial, Chemical Machinery & Safety Division Conference (2008).