

ロボットの安全技術の概要と最新動向

向 殿 政 男*

1. まえがき

ロボットの安全問題について、筆者の古い思い出話から始めさせてもらいたい。1970年代のころから、我が国での産業用ロボットの本格的な研究が開始された。当時は、省力化の道具として期待され、筆者も当時の電気試験所（その後、電総研を経て現在の産総研）において、油圧で動くバーサトランという工業用ロボットにコンピュータをつなげて、知的な作業をやらせる研究をやっていた。あるとき、この油圧のロボットの腕が暴走して危うく大怪我を、いや、死亡事故を起こしそうになったことがあった。研究所のそばを通ったダンプからの強力な無線バンドの電波がコンピュータのメモリの数値を壊して、とんでもない行動を起させたのである。もしここで事故が起きていれば、我が国最初のロボット災害であったかもしれない。こういう経験をしたロボット関係の作業員や研究者は、多かったのではないだろうか。少なくとも筆者は、ロボットの危険性、すなわちロボットの安全問題に当初から遭遇をしていた。その当時、工業用ロボットと呼ばれていたものが現在の産業用ロボットに発展し、省力化を超えて、高度化、高速化、知能化を実現し、これなしには自動車をはじめ各種の製造ラインは考えられないほど産業の重要な担い手に成長をした。このことに関しては、産業用ロボットに関する安全原則、「隔離の安全」、「停止の安全」が確立されたことの意義は大きい。

一方、我々の年代では、誰でもが鉄腕アトムに憧れ、その実現に夢をもって、ロボットの世界に飛び込んで行った研究者は多かったはずである。マンガの鉄腕アトムは、手塚治虫が1952年に50年後を想定して作ったもので、アトムの誕生日は2003年4月

と設定されていた。現在、既に10年も過ぎているが、我々の周りにアトムのようなロボットの姿は見えない。色々な困難な技術的課題はあろうが、どうも安全問題もその原因の一つと考えられる。原子力エネルギー、コンピュータ、ロボット、当時の夢の三つの将来技術を天才手塚治虫が結びつけた結晶が鉄腕アトムであるが、現在、この三つの技術はそれぞれ安全問題を抱えている。原子力エネルギーは、ご存じの通りの避けがたい放射線被曝があり、コンピュータはサイバーテロなどのセキュリティ問題を抱えており、ロボットは人体への物理的な危害問題がある。この最後が、本稿の主題である。

機械システムが人間に危害を及ぼすことを避けるには、産業用ロボットの場合のように、人間と機械とを隔離するという確定論的な手法が有効である。しかし、人間とロボットが共存する場合には、この原則は使えない。エネルギー源がなければロボットは動かないし、ロボットと人間が共存している時に、ロボット側、または人間側に間違いが発生すると、エネルギーが人間に達することで、人体に危害が及ぶ可能性、すなわちリスクは常にあり得る。絶対安全は存在しない。どこまでのリスクならば許せるのかという許容可能なリスクを、技術的にどのように実現させるのか、その信頼性をどこまで高めるべきか、等のリスクベースに基づいた確率論的な手法を用いざるを得ない。事故に遭う可能性のある利用者や作業員は、その考え方で納得するのか、事故が起きた場合の対応と責任と補償をどのように考えるのか、等々、安全確保に関する技術的、人間的、組織的な面を総合的に考えなければならなくなる。まさしく安全学¹⁾で取り扱うべき典型的な課題となる。ロボットと人間との共存を許し、納得して我々の社会にロボットを受け入れて行くためには、本来の意

* 明治大学理工学部 教授

味での安全の定義, 「許容可能なリスクしか存在しない状態」という安全の概念に戻って, 基本からロボットの安全の考え方を確立し, 理解し, 普及させて行く必要がある。

2. 産業用ロボットの安全原則

まず, 産業用ロボットの安全原則を再確認してみよう。エネルギーの高い産業用ロボットから人間が危害を受けないようにするためには, 基本的には人間とロボットとが触れ合わないようにすることが基本となる。そのために次の二つの原則,

(b) 停止の原則: 機械は止まっていれば安全である

(c) 隔離の原則: 人間がそばにいないれば安全である

を産業用ロボットに適用すればよい。すなわち, ロボットをガード(柵)等で囲んで, ロボット稼働中は人間は近づけないようにする(隔離の原則)。人間が近づけるのはロボットが止まっている時に限る(停止の原則)ことになる。これらの原則に従えば, ロボットが動いている間は, ガード(安全柵)で人間は隔離されており, 無理にガードを開けようとすると電源が切れてロボットが止まる構造(強制乖離機構の採用), またはガードに鍵を掛けておいて, ロボットが停止しない限りガードの鍵が開かない構造や, ガードの鍵を開けると電源が切れてその鍵を本人が持ってロボットに近づくという構造(インターロック構造の採用), 等のアイデアが生まれて確実に安全が確保される。ガードの代わりに光カーテンが採用されたり, 空間的に分離するのではなく時間的に分離する等のアイデアも採用されている。

3. 接近が許される条件

産業ロボットにおける安全原則は明確である。機械側が故障しても, 人間が間違えても, 事故に至らないような原則である。しかし, 現実には常に人間とロボットを分離しておく訳にはいかない。修理, 検査, 点検などの非定常作業や教示などでは人はロボットに近づかざるを得ない。そして, 現実のロボット災害はほとんどこのときに起こっている。電源の入っているロボットにどうしても人間が近づかなければならない時には, 産業ロボットの分野では, 条件を付けて許されることになる。一般的な考え方は, 通常の運転モードに対して, 協調運転モードとかアシストモードとか呼ばれる異なったモードに設定し

て, 機械側に条件が付けられる。例えば, 協調運転モードでは250mm/s以下に減速しなければならないなどのようにエネルギーを小さくすることを要請している。更に, 訓練された人間しか近づけないようにしている。なお, 一般的に, 我が国の労働安全衛生規則では, 80ワット以下の駆動用原動機を有する機械に関しては, 人間と機械との隔離を要請してはいない(80ワットルールと呼ばれている)。国際規格でも, 80ワット以下, または最大力が150ニュートン以下ならば隔離を要請していない。

今後, 人間とロボットが共同で作業をする, すなわち人間とロボットの共存を許すことに対して強い要望があり, 世界はこの方向を模索するように動き出している。80ワットルールのように当初からエネルギーが小さなロボットならば問題はないが, そうでない場合には, 構造をどのようにすべきか, ロボットの信頼性, 特に危険側に誤る故障率をいかに小さくすべきか等, 人間とロボットの共存を許す“共存の原則”を, リスクに基づき明確にする方向に動き出している。実は, 次に述べるように我が国はこの方向をかなり早くから模索していたのである²⁾。

4. 産業用ロボットから人間共存型ロボットへ

人間とロボットと一緒に共存することが前提の人間共存型ロボットでは, 隔離の原則は意味がない。人間とロボットとが共存することを許すためには, 上で述べたように, 新しい共存の原則を見出さなければならない。現在, この方向は国際規格の場でも盛んに議論をされており, 現時点で, ISO規格になる直前にある³⁾。それを紹介する前に, 我が国の経済産業省が2007年に出した次世代ロボット安全性確保ガイドライン²⁾について, 紹介しておこう。

このガイドラインは, 人間と共存することを目的とするロボットを次世代ロボットと称して, 例えば, 具体的には当時, 我が国の各企業が開発しようとしていた清掃ロボット, 搬送ロボット, 受付・案内ロボット, 警備ロボット, 介護支援ロボット, 施工ロボット, メンテナンスロボット, 農業支援ロボット, 漁業支援ロボット, エンターテインメントロボット, 教育用ロボット, 溶接ロボット, 電子部品実装ロボット, 塗装ロボット, 組立ロボット, 検査ロボット, 研磨ロボット, 洗浄ロボット, コミュニケーションロボット, ペットロボット, 玩具ロボット等々を対象として, その安全性の確保を目的としていた。その考え方の基本は, ISO 12100(機械類の

安全性－設計のための基本概念、リスクアセスメント及びリスク低減⁴⁾に基づいて、

- (1) リスクアセスメントに基づくこと
- (2) 必要な保護方策を講じることによりリスクを許容可能なレベルまで低減すること
- (3) リスクが許容可能かどうかの判断に当たっては、当該次世代ロボットの効用の大きさも判断の要素の一つとすること

等のリスクに基づく共存のための安全原則の確立を目指していた。

具体的には、安全性確保の原則として三つを挙げ、

- (1) 安全性の目標：死亡事故等の重大事故を生じさせてはならず、その他の事故の頻度も可能な限り低減すること。
- (2) リスクアセスメントと保護方策の立案，検証の反復：リスクアセスメントを実施し、その結果に基づく保護方策の立案，リスク低減効果の検証を反復し、リスクを許容可能な程度に低減すること。
- (3) 多重安全の考え方：一つの保護方策が十分機能しなかった場合でも事故防止が図られるようにする多重安全の考え方に基づき、多重的で余裕のある保護方策を講じること。

としている。次世代ロボットはそのライフサイクルにわたり、設計から廃棄までの安全性確保を製造者、販売者、管理者、利用者全員が連携して共同で実施すべきことを述べ、特に製造者等に対しては、リスクアセスメントの実施とスリーステップメソッドによるリスク低減の実施を義務付けている。

リスクアセスメントとは、ISO/IECガイド51⁵⁾における図1の手順を次世代ロボット用に適用して改良し、高齢者や子供、障害者等による使用を留意しつつ、

- (1) 使用等の状況を特定すること。
 - (2) 合理的に予見可能な危険源及び危険状態を同定すること。
 - (3) 同定された次世代ロボットの危険源及び危険状態のリスクを見積もること
- を意味している。特に、上記(1)使用等の状況の特定は、次世代ロボットではこれまでにない多くのことを考えなければならず、
- (1) 意図する管理、販売又は使用が行われる状況
 - (2) 故障、異常等が発生している状況
 - (3) 合理的に予見可能な誤使用等が行われる状況
 - (4) 使用者が接近又は接触している状況
 - (5) 使用者以外の合理的に予見可能な者が接近又は

接触している状況等を含めるよう述べている

製造者等が行うべきリスク低減のための保護方策の具体的方法として、いわゆるスリーステップメソッド^{4), 5)}を採用し、

- (1) 本質的安全設計（機構部の軽量化，移動速度の制限，駆動力の制限，柔軟構造・材質等）
- (2) 安全防護及び付加防護（防護機器，補足手段，安全防護物，等）
- (3) 使用上の情報提供（警告表示，設置・取扱説明書，マーキング等）

の順序で行うべきことが基本となっている。なお、非常停止のような追加の保護方策の方法にも言及している。

このガイドラインについては、次世代ロボットの使用実態や性能向上等を踏まえ、適宜見直しを行うと記されており、現在の国際規格もこの流れの中で検討されている。当時としては先駆的で画期的なガイドラインであったが、その具体化に対しては、我が国における規制の問題，認証の問題，保険の問題，安全意識の問題等の障害を克服すべき課題が多かった。

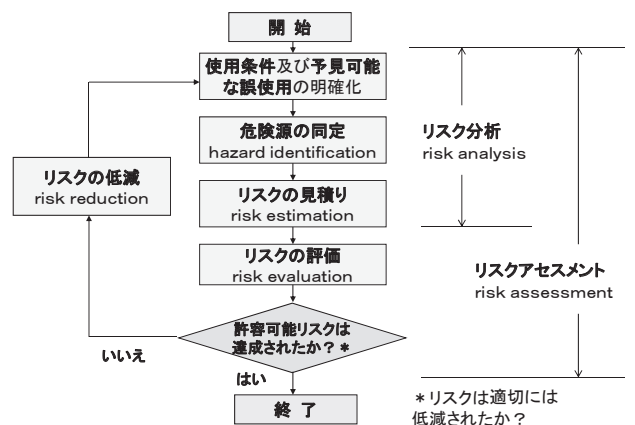


図1 リスクアセスメント（ISO/IECガイド51）⁵⁾

5. 生活支援ロボットの安全性

産業用ロボットの次に来るロボットは人間共存型ロボットになるはずであるとして、その例として上では次世代ロボットという用語を用いて来たが、現実には、これまで多くの用語が用いられてきている。人間共存型ロボットや次世代ロボットだけでなく、例えば、サービスロボット、生活支援ロボット、パーソナルロボット等々があり、その境界は明確ではない。これらの具体的内容は幅広く、家庭用ロボット、身体アシストロボット、人間搬送ロボット、福祉ロボット、介護ロボット、リハビリテーションロボッ

ト、高齢化社会支援ロボット、医療ロボット、手術ロボット、等々、産業用ロボットに比べたら裾野の分野の広さはケタ違いであり、これらをまとめて一分類にするのは本来、無理がある。

ロボットを安全性の観点から分類するには、ロボットの持つエネルギーの大きさやロボットと人との距離等に着目する必要がある。例えば、人とロボットとの距離で分類してみると次のようになるだろう⁷⁾。

- (1) ロボットを人間と隔離する：産業用ロボット
例：工業用ロボット，極限ロボット，災害ロボット
- (2) ロボットと人間とが協同で仕事をする：協調運転型産業ロボット
例：共同組み立てロボットハンド
- (3) ロボットは人間のそばに居る：共存型サービスロボット
例：警備ロボット，掃除ロボット，接客ロボット
- (4) ロボットと人間とが密着する：密着型サービスロボット
例：装着型ロボット，身体アシストロボット，手術ロボット，福祉ロボット，介護ロボット，搭乗型ロボット
- (5) ロボットと人間とが一緒に暮らす：家庭用ロボット
例：家庭用掃除ロボット，くらしロボット（人間と対話・心の交流），エンタテインメントロボット，癒しロボット

この分類は、ある意味ではロボットの進歩の変遷、ロボットの過去、現在、未来に相当し、ロボットの発展は人間とロボットの距離、すなわち安全問題に強く依存していることが分かる。写真1はエネルギーの大きな産業用ロボットであり、人の気配はない。写真2の掃除ロボットでは、ある程度人間がそばに居ることが想定されている。写真3のロボットスーツ「HAL」は人に密着している。脳から筋肉へ与えられる神経信号を読み取って、身体機能を補助したり、増幅したりする装着型ロボットであり、安全性が確認されれば、広い分野で大きな福音をもたらすと期待される。人間と一緒に暮らすロボットの代表は、写真4の癒し系のロボット『パロ』であろう。癒し系ロボットは、エネルギーが小さいから、将来は心理的な安全問題を起こすかも知れないが、傷害などの安全問題は起こらない。

将来の社会的な応用が期待される福祉ロボットや介護ロボット、ロボットスーツ等のように、人間のそばか人間と一緒に居て、ある程度大きなエネルギーを出さなければ意味のないロボットの場合には、安

全問題がクリアされない限り、特殊な条件以外では現在の我が国の風土を考えると、事故が起きた時のことを恐れて、実用に供するには難しい雰囲気があ



写真1 産業用ロボット：トヨタ自動車(株)提供



写真2 掃除ロボット：富士重工業（株）
(2006年度今年のロボット大賞：経済産業大臣賞受賞)

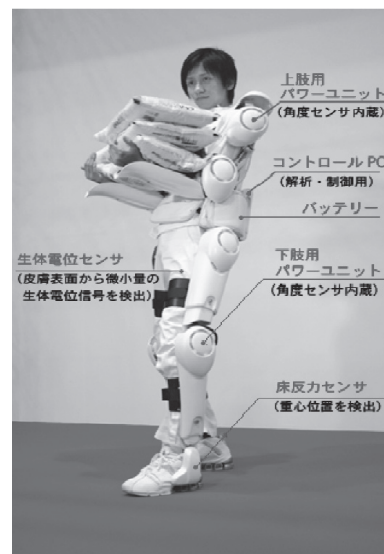


写真3 ロボットスーツ（HAL）：筑波大
山海研究室 + CYBERDYNE（株）



写真4 癒しロボット：パロ) 産総研
(2006年度今年のロボット大賞：優秀賞受賞)

り、なかなか産業に結び付かないのが現実である。

この現状を打破すべく、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）は、2009年度より、生活支援ロボットの概念を明確にして、その認証制度の確立とロボットビジネスの実際的な立ち上げを目指して、5年間の「生活支援ロボット実用化プロジェクト」を立ち上げた。このプロジェクトは、生活分野におけるサービスロボットを対象に、安全性の基準の確立、安全性の検証と評価手法の確立、安全性の国際標準獲得を目標に、以下の五つのテーマを掲げてスタートした。

- (1) 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発
- (2) 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発
- (3) 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発
- (4) 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発
- (5) 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

既に5年目を迎えようとしているが、その中で採択されたロボットのいくつかがビジネスとして立ち上がっていることを期待したい。我が国にとって最も重要な課題は、上記の(1)の安全性の検証手法の研究であり、それに基づく認証制度とその機関の構築であろう。この仕組みなくしては、我が国における上記の生活支援ロボットの普及・定着は困難であろう。

6. ロボットの国際安全規格

一方、世界的には人間共存型ロボットの安全基準を確立して、認証システムを経て実用化、産業化に向かおうとしている。この動向に関しては、パーソナルケアロボットの国際安全規格の策定状

況を見ると明らかである⁶⁾。現在、ISOでは、ISO/TC184/SC2 のWG7では、パーソナルケアロボット（personal care robot）の安全規格ISO 13482 Robots and robotic devices- Safety requirements - Non-medical personal care robot³⁾の制定に動いており、近づく発行の予定である（2013年8月の予定と聞いている）。我が国でも専門家が参加して、NEDOプロジェクトの成果も踏まえつつ、この国際安全規格の策定に積極的に提案、協力をして来ている。

ここでのパーソナルケアロボットとは、医療分野を除いて

- (1) 移動手伝いロボット
- (2) 搭乗型ロボット
- (3) 身体アシストロボット

を対象としていて、この範囲は、生活支援ロボットの範囲とほぼ一致しており、パーソナルケアロボットは、我が国では生活支援ロボットに対応していると考えてよいだろう。この内容については既に出てくる解説⁶⁾を参考にして頂くとして、ここではその基本的な考え方を紹介する。

このパーソナルケアロボットの国際安全規格ISO 13482は、A規格であるISO 12100⁴⁾に基づいて、リスクアセスメントによって危険源（ハザード）を同定して、各危険源のリスクが許容可能になるまでスリーステップメソッドでリスク低減をすることを基本としている。この考え方は第4節で紹介した我が国の次世代ロボット安全性確保ガイドライン²⁾と同じである。この基本の下に、認証にも使えるように安全要求事項やリスク低減方策（保護方策）について具体的な技術や検査の規準を明らかにする。特に、パーソナルケアロボット特有の危険源について、移動手伝いロボット、搭乗型ロボット、身体アシストロボットそれぞれに分けて、詳しく述べられる。更に、機能安全の考え方が採用されており、安全関連制御系に関する安全度水準、すなわちパフォーマンスレベルの概念が導入される。安全制御における安全機能、例えば、各種停止モードの機能、速度制御機能、力制御機能等に対する安全度水準の決め方や安全要求事項が定められる。

7. リスクが高い機械設備に関する共存の原理⁷⁾

ここで改めて、ロボットなどのようにリスクが高い機械設備に関する人間と機械との共存の原理について考えてみたい。一般的に安全確保には、リスクを下げるための技術的側面、ルールや社会制度など

の組織側面、そして、受け入れる我々の安全に関する認識や注意、社会的受容性等の人間の側面が重要であり、これらの三つの側面が総合的に、統一的に取組まなければならない¹⁾、人間共存型ロボットに関してはこれらがいまだ未解決である。特に、生活支援ロボットでは、人間とロボットとが一緒にいるのが大前提になる。ただし、人間と機械とが一緒であることは、製品安全等の分野では当然なのである。

ロボットのようにリスクが高い機械設備でも、その有用性を考えて、製品安全のように人間と機械と一緒に居ることを認める方向に世界は動き出していると述べた。そこでは、リスクの許容範囲を決めて互いに許しあう原則、リスクをお互いに認め、合意し合う原則、リスクを分担し合う原則、最悪何が起きるかを情報公開して、お互いにそれを知り、合意し、納得して使用する原則、等々が必須であると筆者は考えている。また、責任に関しては、事前責任を旨として、事前に、どこまで手を打ってあったかを問うものとするべきであると考えている。すなわち、人間と機械との共存の原則を、以下の考え方の下に早急に確立すべきことを提案したい。

- (1) 製造メーカは、設計の段階からリスクアセスメントを行い、出来る限りリスク低減を実施する(含む：合理的に予見可能な誤使用)
- (2) 使用上の条件(利用する人間の制限も含む)を明確にする。
- (3) 設計基準やルールを明確にして、公表する
- (4) 前もって分かっているリスクには対応し、それを文書として残しておく(リスクアセスメント、未然防止)
- (5) 残留リスクを公表して利用者に警告すると共に、正しい意図した使用法を示す
- (6) 製造メーカと利用者との間でのリスクの受容に関して合意を取れる制度を導入する(社会的受容性、第三者評価)
- (7) 最新の事故情報・技術情報に学び、常にリスク低減に対応する(State of the Arts, リコール)
- (8) それでも事故は起こるので、起こった事故に対しては、事前にやるべきことをやっていれば、製造メーカの責任は基本的には問わない
- (9) 被害者には、保険で補償をする(どこまでリスクが低減されたら保険が対応するかは、保険業界が決定する・・ビジネスモデルの成立)
- (10) 事故の原因究明を行い、基準、ルール、制度を

常に修正の対象とする

- (11) 時代と共に社会的受容のレベルは変わることを意識し、常に時代に対応する

ここでどうしても必要な仕組みは、どこまでやったら安全とするかを現場レベルでの判定が可能な安全基準の設定と、それに基づいて認証する制度の整備であり、我が国においては、一般的にこの面が最も欠けていると思われる。このことは、大阪万博におけるロボットの展示に関連して、本ロボット誌にも既に問題提起されている^{8), 9)}。生活支援ロボットの安全性については、世界的にはまだ緒についたばかりであり、我が国は優位に立てる可能性があり、上記の点を考慮して今後積極的に進めていく必要がある。

8. あとがき

ロボットは総合技術である。従って、多様な産業技術の存在と集積が必要であり、高度な先端的技術開発能力が必要であり、自主的に開発をするチャレンジ精神が必要であり、実験フィールドが必要であり、多様な要望と賢明な消費者が必要であり、更に、何よりも産官学の連携が必要である。我が国にはすべてが揃っている。従って、生活支援ロボットの開発に対しては、我が国は絶好のポジションにあるように思われる。この時、人間と共存することを目指す生活支援ロボットでは、安全技術がキーポイントとなる。しかし、安全技術に関しては、残念ながら欧州の方に歴史があり、哲学と理念がしっかりしていて、我が国より実力が上であると認めざるを得ない。欧州では既にロボットの安全研究を着実に積み重ね始めているといわれている。我が国のロボットの安全性研究において、何が欠けているのであろうか。今や世界標準となっている次のこと、すなわち、どのくらいのリスクならば、それから受けるベネフィットを考慮してお互いに認めて許容し、覚悟するのかという考え方、及びそれを決める手順を明確にしてお互いに合意し、安全基準を策定して第三者がその安全性を認証し、被害が出た場合には保険で補償する制度、等の未成熟と未整備が原因なのではないだろうか。このために、大手企業は当面採算が取れるとも思われぬ生活支援ロボット分野へビジネスとしての進出には、事故と責任の問題が本体のブランドを損なうことに波及することを恐れて乗り出さないとと思われる。リスクを取らない限り、将来有望な分野を手に入れることは出来ない

はずなのであるが、これを担保する制度が我が国に出来あがっていないのは残念である。

幸いにロボットの認証制度の確立とロボットビジネスの実際的な立ち上げを目指したNEDOの「生活支援ロボット実用化プロジェクト」が最終の5年目を迎えたが、実際に認証制度を立ち上げようという動きがあると聞く。是非、我が国初のオリジナルな新しい生活支援ロボット、例えば、ロボットスーツHAL（写真3）や掃除ロボット（写真2）等を認証して、生活支援ロボットが産業ロボットに続く我が国における次のロボットビジネスの突破口になることを期待したい。なお、我が国の生活支援ロボットの今後の残された技術的な課題は、コンピュータを用いた機能安全への取り組みとノイズ問題であるEMC（電磁環境両立性）への対応であろう。冒頭で紹介した私の経験した古いロボット災害の可能性は、まさしくロボットに対するコンピュータ制御とノイズの問題であった。

参考文献

- 1) 向殿政男, 北野大, 他, 安全学入門～安全の確立から安心へ～, 研成社, 2009
- 2) 経済産業省, 次世代ロボット安全性確保ガイドライン, 2007-9
- 3) ISO 13482 Robots and robotic devices- Safety requirements - Non- medical personal care robot,
- 4) ISO 12100 (JIS B 9700) 機械類の安全性—設計のための基本概念, リスクアセスメント及びリスク低減, 2010
- 5) ISO/IECガイド51 (JIS B 8051 2004) 安全面—規格への導入指針, 1999
- 6) 山田陽滋, 人間共存型ロボット安全の国際規格策定の現状, 品質, Vol.42, No.3, pp.56-62, 日本品質管理学会, 2012-7
- 7) 向殿政男, 次世代ロボットの安全性, 基調講演: 日本機械学会 産業・化学機械と安全部門研究発表講演会講演論文集, pp.1～5, 日本機械学会, 2009-11-27
- 8) 杉本旭, サービスロボットの安全規格と認証について, ロボット, No.168, pp.4-9, 日本ロボット工業会, 2006-1
- 9) 加部隆史, サービスロボットの認証, ロボット, No.168, pp.10-13, 日本ロボット工業会, 2006-1