

6. 建設用ロボットのリスク低減プロセスと安全設計手法の検討

池田博康*, 清水尚憲*, 齋藤 剛*, 呂 健**, 大西政紀***

6. Study on Risk Reduction Process and Safety Designing for Construction Robots

by Hiroyasu IKEDA*, Shoken SHIMIZU*,
Tsuyoshi SAITO*, Jian LU** and Masanori ONISHI***

Abstract: For the industrial robots with the fixed movable space, the safety measures have already been specifically stipulated by the relevant international safety standards. However, since these standards are not applicable to the mobile robots due to impossibilities to prepare fixed guards, the application of the safety design principles for general machines to the mobile robots is tried. In this research, for designing a construction robot categorized as a mobile robot, a concept of the safety designing based on risk assessment and procedure for realizing such concept are proposed.

Under the risk assessment principles, the risks of hazards assumedly caused by the construction robots are estimated and evaluated. The risk estimation is made on the risk factors utilized by general risk assessment techniques (i.e., severity of hazards, frequency of exposure, possibility of avoidance). In addition to the judgment parameters applied to the conventional industrial robots, the allowable risk ranking described above is applied as one of the judgment parameters. Then, according to the magnitude of the risks, the safety performance of the required risk reduction means is stipulated.

Then, the procedures for layered safe designing along risk reduction activity are described and applied to the designing of the construction robot equipped with the mobile platform and manipulators, which can be operated in the environment with the presence of workers around. Assumable typical hazards lead to hazardous events that the manipulator squeezes a worker and that the robot body collides with a worker.

The manipulator is provided with the inherently safe designing with the force output and speed of the actuator controlled by a brake and a clutch, and the robot mobile mechanism is applied with safety measures for the risk reduction since it is difficult to provide the same inherently safe designing as that for the actuator. Particularly, as the safety measures to prevent the collision of the robot bodies with workers, an ultrasonic radar sensor, a photoelectric reflective sensor and a soft-touching bumper switch are hierarchically managed by a safety controller. According to the size of the detection area for these human detection measures, the safety requirements for them are stipulated, and according to the intervals between the mobile construction robots and individual workers, the human detection measures are hierarchically functioned.

The construction robot provided with the risk reduction activity can freely behave as long as it is physically secluded from workers. However, when it is approaching a worker, the robot functionally secures the safety in such a way that it can avoid the worker or stop its operation before it makes dangerous contact with the worker. As described above, in whatever the status of robots and workers, it is a require-

* 機械システム安全研究グループ Mechanical and System Safety Research Group

** 境界領域・人間科学安全研究グループ Interdisciplinary and Human Science Safety Research Group

*** 神鋼電機 (株) Shinko Electric Co., Ltd.

ment of the construction robots to functionally secure the safety in the low-risk status and inherently secure the safety in the high-risk state.

Keywords; Construction robot, Mobile robot, Safe design, Human-robot coexistence, Protective measures, Risk assessment

1. はじめに

40年ほど前の実用的な産業用ロボットの登場以来、我が国は世界最大のロボット供給国であると共に、世界の5割強の産業用ロボットが稼働している世界最大のロボット市場を形成してきた¹⁾。21世紀になってロボットを取り巻く社会環境は大きく変化しつつあり、急速な情報化社会への変革や労働力需給構造の長期的変化、環境・エネルギー問題などに対応することが求められている。さらには、ユーザ産業の構造的変化に伴ってロボットの需要構造も大きく変わりつつあり、現在、製造業分野での需要が約98%であるのに対して、非製造業分野需要は10年後に製造業分野に迫ると予測されている¹⁾。

建設・土木分野へのロボットの導入は比較的早くから始まり、無人の作業環境下で躯体工事を行うものや建設機械を遠隔操縦する型のもが開発されてきた²⁾。今後のこの分野におけるロボットの需要も右肩上がりだと予測されているが、一方では、普及を妨げる要因として、コスト、耐環境の脆弱性、自律化等の技術の不完全さ、安全性への不安が指摘されている³⁾。特に、重量物の搬送や位置決めなどに導入される建設用ロボットの場合、柵で隔離された作業場が与えられることは期待できないため、人間が接近することは覚悟せざるを得ず、時には人間と共同作業することも想定される。このような建設用ロボットには人間の安全を確保するための安全防護は不可欠であり、これなくしては実用化は難しい。

柵を持たず、自由に移動できる建設用ロボットは、人間と作業環境を共有する故に、従来の固定式の産業用ロボットに対して規定される安全対策がそのまま適用できない。このような新しい形態のロボットの安全設計を行うためには、改めてリスクアセスメントに基づく安全設計の考え方を整理しなければならない。その際、あくまでもリスクアセスメントやリスク低減活動は基本的な安全設計原則に準拠する必要があるため、人間とロボットの共存・協調状態に応じて各々検討されることになる。

そこで、本研究では、人間と作業空間を共有する条件で移動型の建設用ロボットを導入する場合を想

定して、まず、広く移動ロボット全般に関する安全要件の体系化を試みて、安全関連要求事項を提案する。特に、新規ロボットを設計するに当たり、危険源の同定から始まるリスクアセスメントに対して、安全防護性能の緩和を考慮したリスク低減方法を論ずる。また、リスク低減活動に従った階層防護設計の手順と各階層の安全防護の安全性能について述べ、これを施工作業用ロボットの設計に適用した場合のリスク低減効果を検討する。

2. 建設用ロボットの設計のための安全要件と手順

2.1 移動型ロボットに対する安全規格の考え方

固定式の産業用ロボットが人間と近接するのは、教示等の特別な場合であり、このような作業の際は事故防止のために多くの対策⁴⁾や安全要求事項⁵⁾が規定されている。しかし、移動型の建設用ロボットにこれらを厳格に適用しようとするれば、移動機能自体を阻害することになりかねない。

現状では、建設用ロボットは元より、移動型ロボットに関する安全要件を定めている基準や規格はない。単に移動する機械の安全規格としては、無人搬送車システムに関する安全通則⁶⁾や半導体製造用無人搬送台車に対する安全ガイドライン⁷⁾が発行されているが、これらも設計上の安全性能要件については十分言及されていない。

現在の機械の国際基本安全規格類の考え方を踏襲すると、対象機械に個別対応する安全規格がなくとも、リスクアセスメントに基づくリスク低減プロセス（安全設計手順）が適用されねばならない。機械設計の一般通則規格⁸⁾によれば、設計者がリスク低減プロセスを行ってもなお残るリスクを使用者へ通知することでプロセスは終了する。ただし、本来は、使用者にとって受容可能なリスクレベル以下になるまでstate-of-the-artの安全方策を適用しなければならない⁹⁾。つまり、そこまで周到な準備を実施した上で、結果として起こる事故は受容するという前提があり、決して事故の責任を曖昧にしようとするのではなく、安全の責任を果たすための共通の方法を

社会的に認めるといふ考えがあると思われる。

ロボットが自由に移動できる場合には、人間とロボットが接近・接触する状況は必ず考慮しなければならない。どんなに対策を講じて、柵の中の産業用ロボットと同等の安全保障は不可能であり、これらのロボットを動作させる以上、残存するリスクに対して、利益を享受する使用者が許容できるか改めて検討が必要である。その上で、合理的な安全設計の手順を実施しなければならない。

そこで、リスクに基づく国際安全規格の原則^{8)~10)}を踏襲して、従来の産業用ロボットに対する規格類を移動ロボットに拡張した安全要件を提案する。なお、この移動ロボットの新しい安全要件の体系枠組みは、米国ロボット規格¹¹⁾を参照することとした。

2.2 移動ロボットのための安全関連要件

移動ロボットのための安全関連要求事項は、指針の体裁となるよう Fig. 1 の構成とし、基本的に項目 1～8 までが移動ロボットの設計者、製造者、改造者、再組立者、及び安全防護装置の設計者、製造者を対象とし、項目 9 以降は主に移動ロボットの使用者を対象としている。各項目についての要求事項概要は付録に記すが、新規移動ロボット設計段階において重要な点は以下の通りである。

- (1) 安全設計は、包括的なリスクアセスメント、安全防護方法の選択、リスク低減効果の確認を行うことによって完成する。(項目 6, 7, 8)
- (2) リスク低減方法の実施にはその内容によって優先順位があり、本質安全化による危険源(あるいはリスク)低減、安全防護装置適用によるリスク低減、付加的防護手段によるリスク低減の順となる。(項目 6)
- (3) リスクの見積もりの際、基本的なリスク要素に加えて、見積もられる危険度レベルに対する重み付けの要素を考慮する。これにより、必要とされる安全防護手段の安全性能の緩和が可能となる。(項目 7.3)
- (4) 安全防護手段の安全性能は分類され、査定された危険度レベルに対応した性能カテゴリーから選択される。(項目 7.5) 特に、制御システムの安全関連部の安全性能については、耐故障特性によって規定される。(項目 4.4)
- (5) 安全防護機能については、接触安全及び衝突安全確保についても考慮され、これらの機能の性能によって適用順位が規定される。(項目 5)

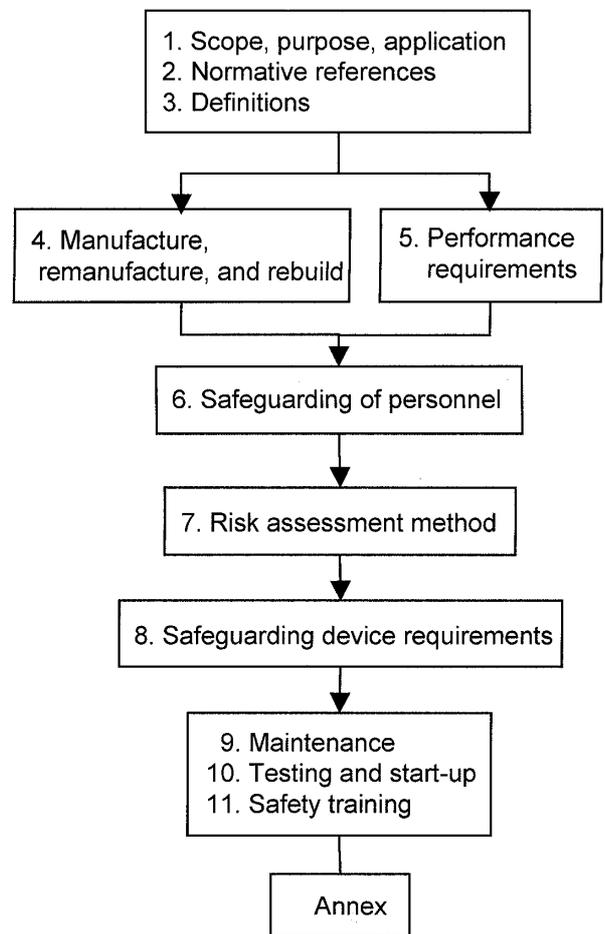


Fig. 1 Flow diagram of safety requirements for mobile robots.
移動ロボットのための安全関連要求事項の流れ

2.3 移動ロボットのためのリスクアセスメント

移動ロボットの安全設計はリスクアセスメントから始まる。移動ロボットにかかわらず、機械のリスクアセスメントの実施手順⁸⁾は、

- a. 使用環境(条件)の整備,
- b. 危険源の同定,
- c. リスクの見積もり,
- d. リスクの評価,

と規定されており、本来、独立したリスクアセッサによって実行されるものである。特に、対象機械とその仕事に対する危険源を抽出、同定する作業の確度と緻密さが、以降の危険度レベル、安全防護手段の選定に影響するため、危険源の同定は安全設計の要とも言える極めて重要な作業である。

リスク分析については、様々な手法が提案されている¹²⁾が、基本的には人間が危険源から被る(と予測される)危害の酷さとその危害の発生確率の組み合わせによってリスクの大きさは表現される⁹⁾。そ

Table 1 Example of risk factors and rank criterion.
リスク要素とランクの基準例

リスク要素	ランク	ランクの内容例
怪我の程度	C1	軽傷 (打撲など)
	C2	重傷 (後遺症が残る, 死亡)
危険源に暴露される頻度	F1	ほとんどない (1回/日未満)
	F2	頻繁~常時 (1回/時間以上)
危険事象の回避可能性	P1	可能 (安全運転速度未満)
	P2	不可能 (安全運転速度以上)

して、危害の発生確率は、人間が危険源に暴露される頻度 (あるいは時間)、危険事象の発生確率、人間が危険事象から回避できる可能性の 3 つの要素の関数となる。

Table 1 は、リスクの見積もりのために、3 つのリスク要素について簡単に 2 つのランク付けをした例¹³⁾であり、各々のランクの組み合わせによって危険事象の発生確率に依存しないリスクの大きさが推定できる。ただし、想定される怪我が軽傷 (C 1) の場合は、他の 2 つの要素のランクにかかわらずリスクは低いものとしている。また、危険事象の発生確率は、後述する安全防護手段の選定結果に関連して考慮される。

リスクの評価は、Fig. 2 に示すようなリスクグラフの形で記述して、5 通りの査定結果として危険度レベル I (低リスク) ~ V (高リスク) が得られる。なお、W 1~W 3 は前節 (3) で述べた重み付け要素であり、例えば、作業者が対象ロボットに関与する度合い、作業者がロボット機能を熟知している度合いによって、あるいは、救護ロボットのようにリスクを負っても対象ロボットを使用する必要がある場合は、危険度レベルを緩和する側 (すなわち W 2, W 3) に設定することができる。移動ロボットについては、標準のリスク査定 (W 1) によって移動自体が高リスクとされ、ロボット本来の機能を喪失することになる場合に、危険度レベルの緩和が考慮されるものとする。

2.4 リスクアセスメントに基づくリスク低減

リスク評価の結果、危険度レベルが決定すると、それに対応する安全性能を持つ安全防護手段が選定されねばならない。安全性能カテゴリーは、付録 (項目 4.4) で説明されるように、高カテゴリー (高安全性能) であるほど故障に対する安全機能確保の確実性が要求される¹³⁾。すなわち、対象ロボットに装備される安全防護手段の安全性能が高いほど、危

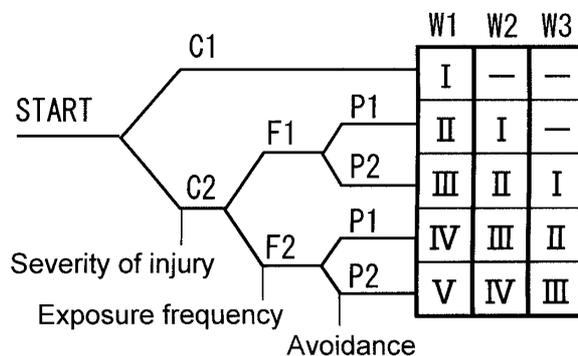


Fig. 2 Risk graph and hazardous level decision with weighted factor.
重み付け要素を付加したリスクグラフと危険度レベルの決定

Table 2 Risk reduction decision matrix correspond to safety performance.
安全性能に対応するリスク低減手段の選定

危険度レベル	安全性能カテゴリー	安全防護手段実施の優先度 (高 ← → 低)			
		ガード	注意喚起手段	手順書訓練	
V	4	本質安全設計	インタロック装置 トリップ装置 人存在検知設備		個人防護具
IV	3				
III	2				
II	2				
I	1		ガード	注意喚起手段	手順書訓練

険状態から危険事象への遷移を阻止することが可能となり、結果として危険事象の発生確率は低下することになる。なお、危険度レベルと安全性能カテゴリーとの対応は、最高危険度レベル以外は安全防護装置の技術的内容によって選択の幅を持たせている。

Table 2 は、様々な安全防護手段を安全性能カテゴリーにより分類したものである。ここでは、ガード等の機械的手段は、本質的に危険源を除去できる場合を除き、単独では安全性能は低く見積もられ、電気・電子あるいは油空圧の装置と組み合わせられて高安全性能を発揮できるとしている。同様に、注意喚起手段、手順書や訓練も単独では安全性能の低い補助的手段であり、個人防護具は安全性能に関係しない。本質安全設計も安全性能に関与しないが、リスク自体が生じないことを目的としているため、優先的に採られる手段である。

Fig. 2 の重み付けされたリスクグラフを用いるリスク低減の手順は、次の順序で行われる。

- 1) W 1 の危険度レベル判定に対応する安全性能

カテゴリーを選定する。(通常選定)

- 2) 通常選定が不可能な場合、低安全性能カテゴリーの組み合わせを適用して、再度危険度レベルを検討する。
- 3) 低安全性能カテゴリーの組み合わせ適用が不可能な場合、W 2, W 3 による危険度レベルの緩和を行う。

この操作によって、移動ロボットがあくまでもリスクを認めるシステムである限り、人間依存の安全方策や最高の安全性能ではない安全方策も積極的に活用することができる。移動ロボット導入により大きな危険性が改善される反面、それにより生じる小さな危険性は許容しようということである。

なお、リスクアセスメントは許容レベルまでリスクが低減されて終了する。リスクを受容する不特定多数の使用者に代わって、どの危険度レベルが受容レベルかを示すことは難しい。ただし、手術用ロボットのように、ロボット使用者と受益者が特定されれば、リスクの受容と使用に関する契約を締結した上でロボットを供用することも可能となろう。現実的には、ロボットの設計者・製造者が上述のリスクアセスメントに基づくリスク低減を可能な限り実施し、残留リスクに関する情報を使用者へ漏れなく提供することによって、使用者側でできるリスク低減活動に寄与することが最善と考えられる。

3. 施工作业用ロボットの基本機能設計とリスクアセスメント

3.1 施工作业用ロボットの概要

人間と混在する環境下で作業する建設用ロボットの新規開発に当たり、著者らは、専門家からなる「建設用ロボットの安全制御技術に関する検討委員会」を通して、今後建設用ロボットに求められる機能と研究課題を抽出してきた¹⁴⁾。そして、これらの課題に対する基礎技術の研究開発のために、先ず施工作业用ロボットの試作ロボットシステムを開発した。基本要素として、自己診断機能付き超音波センサ、軟接触式バンパスイッチ、MR (Magnet-Rheological) 流体を用いる力出力制限機構等が開発されている¹⁵⁾。

以上の成果を基にして、実規模施工作业用ロボットの基本機能の設計を行った。また、上記委員会で抽出された機能を設計に盛り込んだ。その結果、開発対象とする施工作业用ロボットは、ビル屋内の施工作业等での作業支援を目的とし、以下の基本機能

を持たせることとした。

- ・内装材 (パネル等) の搬送と据え付け作業が可能
- ・双腕によるマニュアルハンドリングと交換可能なハンド付き
- ・自在移動機構を持ち、障害物の乗り越えが可能
- ・標識認識による経路設定が可能 (簡易自律走行可)
- ・受動的な協調作業を可能とするマニピュレーション機構

そこで、施工作业用ロボットは、Fig. 3 に示すような双腕マニピュレータが搭載された無軌道式移動

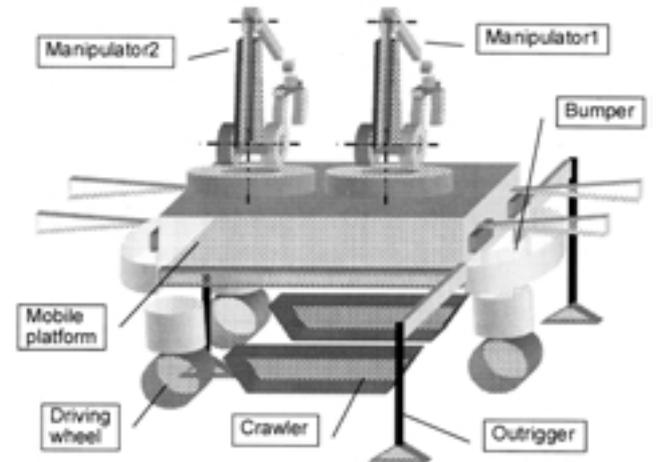


Fig. 3 Mechanisms outline of construction working robot.
施工作业用ロボットの機構概略

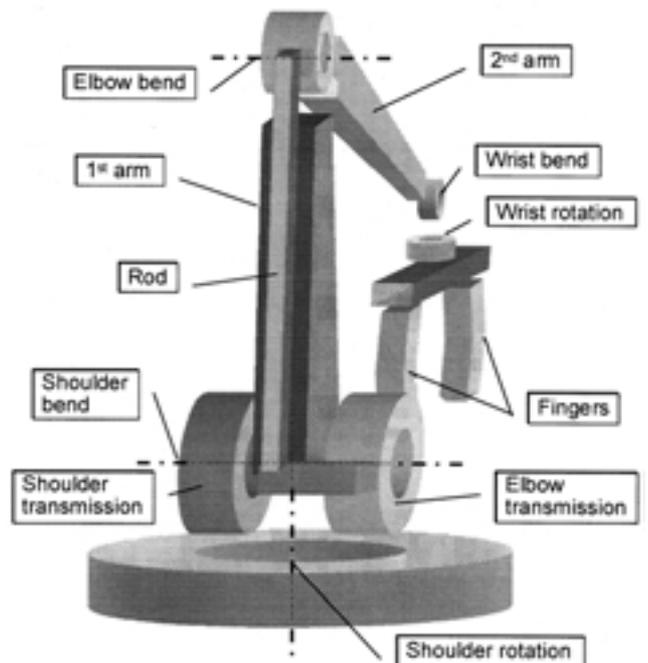


Fig. 4 Manipulator Mechanism of construction working robot.
施工作业用ロボットのマニピュレータ機構

ロボットの形態とし、路面状況に応じて三輪走行機構と油圧クローラ機構を切り替えることとした。平地で車輪走行する場合は、三輪の内二つはウレタンタイヤに内蔵されたダイレクトドライブモータで駆動され、残る一つは遊輪としてブレーキのみ内装される。なお、操舵用モータは全車輪に内蔵され、旋回やスピターン、横行といった自在な走行を可能としている。また、10度までの傾斜地走行は油圧駆動のゴムクローラで前後走行のみ可能である。なお、アウトリガは走行終了後のマニピュレーション機能時に利用する。

Fig. 4は5自由度の多関節型マニピュレータ機構であり、肩屈曲と旋回及び肘屈曲はACサーボモータによる駆動、手首屈曲と旋回は空気圧アクチュエータによる駆動としている。第1アームはパンタグラフ機構を採用し、各ACサーボモータのギアボックスには電磁ブレーキと電磁クラッチが連結される。なお、手首には空気圧駆動の開閉ハンドか吸着パッド付きハンドが装着される。

さらに、自律走行のために、ステレオカメラによる標識位置認識とCCDカメラによる標識内容（走行指示）のパターンマッチング処理を行う機能¹⁶⁾が装備される。

その他、施工作业用ロボットの概略仕様は以下の通りである。また、全景をPhoto 1に示す。

長さ：1.9 m

幅：0.9 m

高さ：1.8 m(車輪接地時、マニピュレータ格納時)、
2.5 m(車輪接地時、マニピュレータ伸張時)

質量：1100 kg

可搬質量：20 kg

移動速度：1 m/s (車輪時)、0.3 m/s (クローラ時)

電源：DC 24 Vバッテリー (走行時)、

AC 3φ200 V (マニピュレーション時)

3.2 想定施工作业とリスクアセスメント

施工作业用ロボットの作業形態は、先ず内装材を搭載した後に目的作業場まで標識誘導されながら運搬し、次に内装材を作業者と協調しながら位置決めを行い、また標識に従って帰還するものである。作業者は事前にロボット誘導路上に標識を適宜設置し、内装材の位置決めはロボットが大まかに位置決めしたものを修正する作業となる。このとき、ロボットは過大な力は出力しない順応動作を行うことになる。

以上の定常的な想定作業の間だけでも、作業者とロボットとの衝突、挟まれが予測できるが、施工作

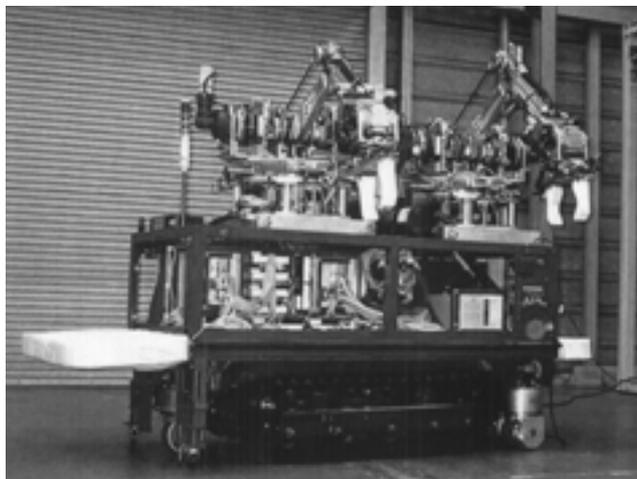


Photo 1 Exterior of construction working robot.
施工作业用ロボット外観

業用ロボットの安全機能の設計に当たっては、さらに詳細な危険源の同定が必要である。そこで、典型的な作業を5種類想定して、その場合に起こり得る危険状態あるいは危険事象を抽出した(Table 3)。ただし、ここでは作業に関連する危険源から同定した結果をまとめて危険状態、危険事象として表現している。これらと規格⁹⁾で例示される危険源との関連を改めてTable 4に示す。Table 4の危険事象の番号がTable 3の危険状態、危険事象の分類番号に該当するが、多岐にわたる危険源が衝突や挟まれ、下敷きに至ることが分かる。

Table 3におけるリスク要素はTable 1の定義に従っており、さらにFig. 2の重み付け要素Wを付加した上で危険度レベルを査定している。マニピュレーション時のみW 2として危険度レベルを1段緩和させているのは、作業者は内装材を介して、あるいは直接にマニピュレータと接触することが前提となっているからである。仮に、W 1としてマニピュレータが作業者に接触即停止するような厳格なインタロックの適用が求められると、マニピュレータは動作できなくなるためである。ただし、査定された危険度レベルに対応する安全防護手段には、後述する本質安全設計をマニピュレータに適用することが前提である。よって、重み付け要素Wは、マニピュレータと作業者が安全な接触を求める場合に、挟圧などの望ましくない事象の発生確率を下げる効果と見なすことができる。

一方、走行に関する作業においては、ロボット本体の質量と速度、さらに現実の制動能力を勘案すると、本質安全化は難しく、危険度レベルは緩和されずに最高Vの危険度と査定される。そのため、最高

Table 3 Risk estimation and evaluation for construction working robot.
施工作業用ロボットにおけるリスクの見積もりと評価

タスク	危険状態, 危険事象	傷害の 酷さ	暴露頻度	回避可 可能性	重み付け	危険度 レベル	
定常走行	1	台車部との接触	C1	F2	P1	W1	I
	2	台車部が前方から追突	C2	F2	P1	W1	IV
	3	台車部が後方から追突	C2	F2	P2	W1	V
	4	台車部と壁等に挟まれる	C2	F2	P1	W1	IV
	5	台車部旋回中に巻き込まれる	C2	F2	P1	W1	IV
	6	台車部に足を轆かれる	C2	F2	P1	W1	IV
	7	本体転倒により下敷きとなる	C2	F1	P2	W1	III
	8	搭載物の落下による衝突	C2	F1	P2	W1	III
	9	搭載物の突出部との接触	C2	F1	P2	W1	III
	10	バッテリー充電部との接触による感電	C2	F1	P2	W1	III
荷のマニュアル ハンドリング	11	マニピュレータ及び荷との接触	C1	F2	P1	W2	-
	12	マニピュレータ及び荷との衝突	C2	F2	P2	W2	IV
	13	マニピュレータ間に巻き込まれる	C2	F2	P2	W2	IV
	14	マニピュレータ及び荷と壁等に挟まれる	C2	F2	P2	W2	IV
	15	放り出または落下した荷との衝突	C2	F1	P2	W2	III
	16	本体転倒により下敷きとなる	C2	F1	P2	W1	II
	17	配線コネクタ部との接触による感電	C1	F1	P2	W1	I
	18	圧縮空気噴出による暴露	C1	F1	P2	W1	I
人間との協調 ハンドリング	19	マニピュレータ及び荷との接触	C1	F2	P1	W2	-
	20	マニピュレータ及び荷との衝突	C2	F2	P2	W2	IV
	21	マニピュレータ間に巻き込まれる	C2	F2	P2	W2	IV
	22	マニピュレータ及び荷と壁等に挟まれる	C2	F2	P2	W2	IV
	23	放り出または落下した荷との衝突	C2	F1	P2	W2	II
	24	本体転倒により下敷きとなる	C2	F1	P2	W1	III
ルート (標識) 調整	25	台車部との接触	C1	F1	P1	W1	I
	26	台車部との衝突	C2	F1	P2	W1	III
	27	台車部と壁等に挟まれる	C2	F1	P2	W1	III
	28	台車部に足を轆かれる	C2	F1	P1	W1	II
	29	本体転倒により下敷きとなる	C2	F1	P2	W1	III
保守・点検	30	台車部との接触	C1	F1	P1	W1	I
	31	台車部との追突	C2	F1	P2	W1	III
	32	マニピュレータとの接触	C1	F1	P1	W1	I
	33	マニピュレータとの衝突	C2	F1	P2	W1	III
	34	マニピュレータ間及び関節部に挟まれる	C2	F1	P2	W1	III
	35	鋭利部、突起部による擦過	C1	F1	P1	W1	I
	36	本体転倒により下敷きとなる	C2	F1	P2	W1	III
	37	充電部との接触による感電	C2	F1	P2	W1	III
	38	圧縮空気あるいは作動油の暴露	C1	F1	P2	W1	I

Table 4 Hazardous conditions and events correspond to hazards of construction working robot.
施工作業用ロボットの危険源と関連する危険状態, 事象

危険源	危険源の例	関連する危険状態及び危険事象の番号
機械的	押しつぶし	1, 4, 6, 7, 11, 14, 16, 19, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 36
	せん断	該当なし
	切傷	8, 9
	巻き込み	5, 13, 21
	引き込み	該当なし
	衝撃	2, 3, 8, 12, 15, 23, 26, 31, 33
	突き刺し	8, 9, 12, 15, 20, 23, 35
電氣的	充電部との接触	10, 17, 37
	熱的	高/低温
材料及び物質	有害物質	8, 15, 18, 23, 38
	火災/爆発	8, 15, 23, 38
人間工学原則無視	不自然な姿勢 手足への不適切性	11~14, 19~22, 25~28, 30~35
	保護具の不使用	30~38
	不適切な照明	25~38
	ヒューマンエラー	11~38
	手動制御器	11~16, 19~24
	視覚表示器	1~7, 11~16, 19~24, 30~36
危険源の組み合わせ	(突然の障害物出現による過負)	4~9
	(搭載物の不整)	8, 9, 15, 23
制御システム、動力供給の不具合	制御の故障・異常 ソフトウェアエラー	1~7, 11~14, 16, 19~22, 24~36
	エネルギー供給 中断・回復	7~9, 15, 16, 23, 24, 30~36
	電気設備の外部への影響	1~7, 11~14, 16, 19~22, 24~36
	重力、地震	1, 4, 7, 11, 14, 15, 19, 23~25, 30
停止上の不具合 安定性の欠如	オペレーターエラー	11~16, 19~29
	押しつぶし、衝撃に同じ	
移動による	不整地、荷ずれ	7~9, 15, 16, 23, 24, 29, 36
	過大振動	7~9, 29

の安全性能を有する安全防護手段を適用する必要がある。走行に関する機械的危険源に対しては比較的高い危険度レベルと査定されていることがわかる。

その他、モータドライバ等の昇圧された高電圧充電部の露出に対しても、危険度は高く見積もられる。

4. 施工作業用ロボットのリスクアセスメントに基づく安全機能設計

4.1 リスク低減手段の防護階層

リスクアセスメントの実施において、留意しなければならないことは、最悪の条件でリスクを見積も

ることである。安全防護手段に要求される安全性能がこの段階での評価に依存するため、より厳しい側に査定することが求められる。また、個々の危険源毎に安全防護手段を検討しなければならない。

しかし、安全防護手段がリスクを低減する効果は、対象とする危険事象の発生確率のみに関係するのではなく、他のリスク要素のランクを低減することも多い。例えば、Table 3における台車部と作業者との追突については、追突以前に早期回避すれば暴露頻度は減って危険状態は生成せず、低速度になっていけば怪我をしても軽傷で済み、作業者は回避し易くなって危険事象に至ることは減る。すなわち、安全防護手段によるリスク低減は、危険源が危険事象に拡大してゆくプロセスの各段階で効果を上げることが可能であり、複数の安全防護手段を階層的に機能させることが有効である。

このような複数の方策を適切に組み合わせる方法についてはロボット関連分野では十分検討されていない。そこで、化学プロセス分野で提唱されている独立防護階層 (Independent Protection Layers, 以下IPL) ¹⁷⁾ の概念を導入して、ロボット防護手段の階層化を図ることとした。IPLによる設計思想は、対象危険源が危険事象として発現して拡大する時間順にリスク低減方策を階層配置し、より早期の防護層から独立して機能させて、システム全体としてリスク低減を図るものである。また、各階層の効果を独立に評価できるため、総合的システムの評価が容易となる。

IPLで定義される階層は、以下のものである。

- ・第1層：本質安全設計 (危険源除去)
- ・第2層：基本プロセス制御 (通常運転の維持)
- ・第3層：運転員の介入/重要警報 (人間の修正)
- ・第4層：インタロック (自動緊急停止)
- ・第5層：物理的防護手段 (リリース弁)
- ・第6層：物理的防護手段 (防液提)
- ・第7層：プラント内緊急対応計画 (事業所内)
- ・第8層：地域防災計画 (地域住民, 公共施設)

一般に、機械設備においては、インタロックが重要で最終防護階層として機能しなければならない¹⁸⁾が、プラント設備においては、インタロックが失敗もしくは不可能な場合でもその後の防護層がカバーすることとしている。また、プラント機能停止による損失に対して、人間のリスク低減効果を積極的に評価していることも特徴である。このようなIPLの考え方は、経済的損失を考慮するかの議論は別として、施工作業用ロボットのみならず、人間共存環境下で動作しなければならないような共存型ロボットに広く適用可能と思われる。

Table 5 Protection layers against collision and squeeze of construction working robot.
施工作業用ロボットの衝突と挟圧の危険源に対する防護階層

階層	衝突の危険源に対する防護	挟圧の危険源に対する防護
1	軽量化 速度の制限	小型のアクチュエータ 利用 挟圧部除去
2	回避性能の向上 早期障害物認識 最適経路計画	力監視と制御 人間の動作や意志の認識
3	警告（音，光，音声） 人間の回避行動の支援 手順・管理の整備	イネーブルスイッチ 人間の回避行動の支援 手順・管理の整備
4	近接センサ，接触センサ+駆動源遮断停止	力センサ，モータ電流検出，制御偏差の診断+駆動源遮断停止
5	摩擦ブレーキ 車輪のスリップ	トルクミッタ
6	バンパ 防護具	防護具
7	安全教育／運動， 負傷者の救命活動	安全教育／運動， 負傷者の救命活動

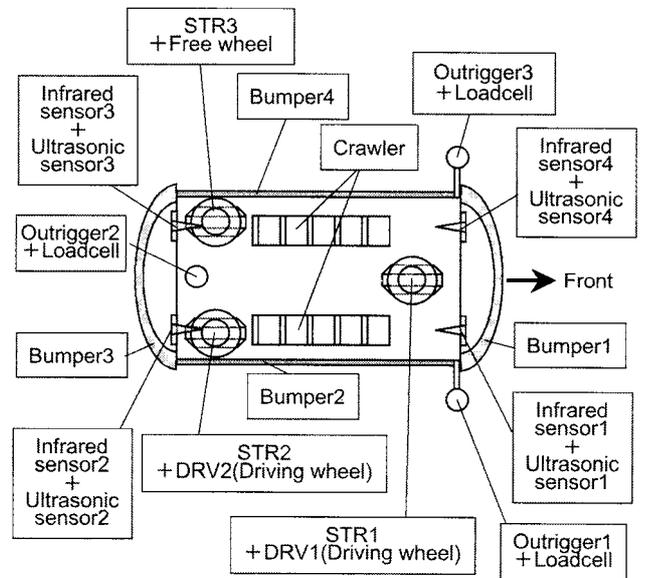


Fig. 5 Risk reduction measures equipped mobile platform of construction working robot.
施工作業用ロボット台車部に整備されたりスク低減手段

4.2 施工作業用ロボットへの防護階層の適用

Table 4 の機械的危険源の内，特に危険度レベルの高い台車部が人間に衝突する場合（レベルⅣ，Ⅴ）とマニピュレータにより人間が挟まれる（レベルⅣ）を例として，適用可能なリスク低減手段を前節のIPLの定義に従って分類する。

Table 5 にその結果を示すが，ここでは第 8 層は施工作業用ロボットでは考慮する必要がないため含んでいない。また，第 3 層まではロボットの動作を維持する機能であるが，プラント設備のオペレータとは異なり，ロボットに関わる人間は直接危険源と対峙する状況であるため，その当事者による介入操作によるリスク低減効果は期待すべきではない¹⁹⁾。したがって，ロボットの動作を放棄しても安全な状態へ移行する機能の第4層以降が重要となる。なお，第5層は蓄積された運動エネルギーを外部へ放出あるいは消散する機能であり，第6層は人体への伝達エネルギーを吸収あるいは遅延させる機能である。第7層は通常の機械システムを対象とする場合，直接リスク低減には寄与しない。

4.3 衝突に対するリスク低減手段の選定と機能

Photo 1 の施工作業用ロボットの衝突の危険源に

対して，次の防護層とそれらに対応するリスク低減手段を選定して台車部に装備した。

第 2 層：ステレオ・CCDカメラによる誘導標識認識及び障害物検知，超音波センサ，赤外線センサによる障害物検知

第 3 層：アラーム・ライト点滅による回避要求

第 4 層：赤外線センサ，バンパスイッチによる停止インタロック

第 5 層：負作動型電磁ブレーキによる制動

第 6 層：バンパ（緩衝材）による衝撃吸収

ここで，衝突の危険源を除去するためには，ロボットの走行に伴う運動エネルギーを低減しなければならないが，実規模ロボットに対して軽量化や運転速度の低速化には限界があることから，第 1 層の本質安全化は困難と見なして選定外としている。

Fig. 5 は，施工作業用ロボットの台車部に実際に装備されたりスク低減手段であり，超音波センサと赤外線センサは台車前部と後部に各々 2 個ずつ組み込んでいる。赤外線センサは遠距離検知用と近距離検知用の 2 つのユニットを持つものであり，近距離用は第 4 層として機能する。また，第 4 層のバンパは台車の全周囲をカバーするが，台車前後部には第 6 層の機能を併せ持つ軟接触式バンパスイッチ²⁰⁾を持つ。ステレオカメラは台車前後の上部に，CCDカメラは台車前上部に設置される。

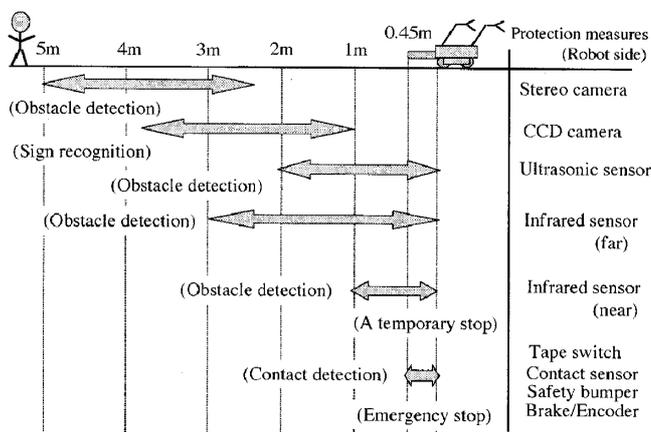


Fig. 6 Configuration and functions of risk reduction measures for collision prevention.
衝突防止のためのリスク低減手段の配置と機能

衝突に対する上記センサ類の検知領域と機能を Fig. 6 に示す。ステレオカメラは約 5.0 ~ 2.5 m 前方の障害物を捉え、これを障害物と認識すると回避のための操舵制御が行われ、標識と識別されると、改めて CCD カメラによって識別処理されて約 0.8 m/s の定速度誘導制御が行われる。前方 2.5 m からは超音波センサと遠距離用赤外線センサの監視領域となり、どちらかが障害物を検知すると低速モード (0.25 m/s) に移行し、さらに前方 1.0 m で近距離用赤外線センサが障害物を検知すると、ロボットは一時停止し、警報を鳴動して回避か障害物の除去を要請する。以上の方策が失敗 (故障) した場合、軟接触式バンパの接触検知 (0.45 m) に基づいて、走行系の駆動源遮断とブレーキによる停止を行う。

4.4 挟圧に対するリスク低減手段の選定と機能

マニピュレータの安全防護手段としては、ワークを介した接触作業を想定しているため、以下のリスク低減手段を構成した。

第 2 層：関節角度とトルク制御

第 4 層：トルク監視，クラッチの励磁電流と滑り監視システム

第 5 層：ブレーキ制動，クラッチによるトルク制限

ここで、トルク監視システムはマニピュレータの主要 3 軸のトルクをモニタして、マニピュレータ自体の重力補償分を除く過大な力出力を発生させないように制御上のインタロックを設けたものである。Photo 2 に、ブレーキとクラッチ，トルクセンサが組み込まれた肩屈曲関節の外観を示す。

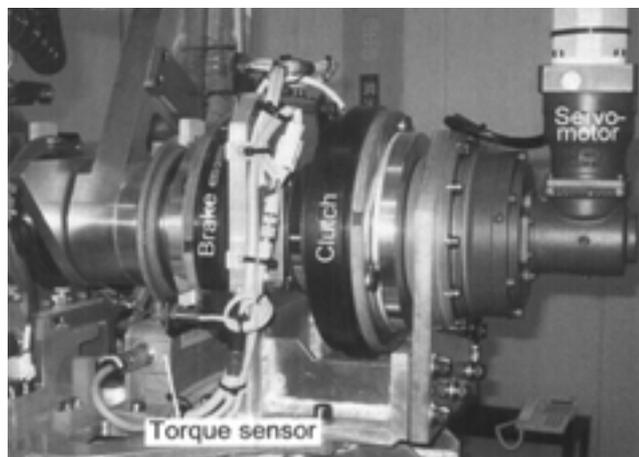


Photo 2 Torque controlling mechanism of shoulder bend joint of manipulator.
マニピュレータ肩屈曲関節のトルク制御機構部

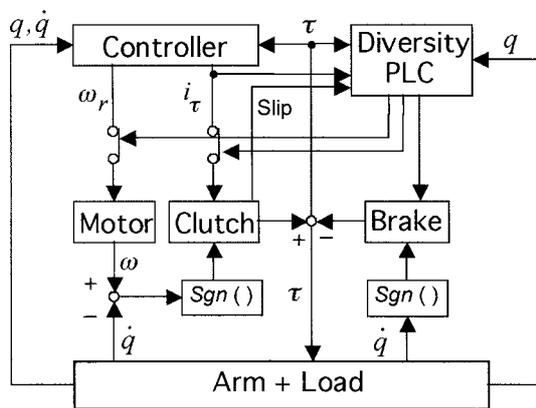


Fig. 7 Control system diagram of shoulder bend and elbow bend joints.
肩屈曲と肘屈曲関節の制御系

Fig. 7 は肩と肘の屈曲関節の制御系の構成を示しており、 q は関節角度、 τ は関節トルク、 ω はサーボモータ回転速度、 ω_r はモータ回転速度指令、 i_τ は電磁クラッチの励磁電流であり、 $sgn()$ はクラッチとブレーキの受動要素的特性を表す。目標軌道に基づいてトルク指令値を演算し、モータでトルクを方向を、クラッチでトルクの大きさを調節して各関節を制御するが、これが正常に機能していれば第 2 層の防護が有効となる。一方、 τ と i_τ とクラッチの滑りの監視は異種多重化プログラマブル・ロジックコントローラ (PLC) 21) で行い、次の手順によって第 4 層の防護が機能する。

- ① 肩屈曲関節をブレーキによって固定
- ② 全てのモータ電源を遮断
- ③ 全てのクラッチを解放

- ④ 肩回旋・肘屈曲関節をブレーキで一旦静止
- ⑤ 肩回旋関節のブレーキを開放
- ⑥ 作業者を自重で押しつぶしている場合は肘屈曲関節を固定、壁に押付けている場合は肘屈曲関節のブレーキを徐々に開放

ただし、PLCの処理速度は、人間を扶圧する反力を関節角度に応じて実時間に比較演算するには十分でないため、関節トルクの大部分が重力項の補償分であることに着目し、予めオフラインでマニピュレータの姿勢に応じた参照値を計算しておく方法とした。なお、トルクセンサが故障している場合、 i_{τ} が適切な値であればクラッチが滑りを生じて第5層の防護が機能する

4.5 転倒による押しつぶしに対するリスク低減手段

施工作业用ロボットには、走行中の横転あるいは停止中のマニピュレーション時の転倒によって人間を押しつぶす危険源に対しても、安全防護を施している。

走行中の横転に対しては、

- 第2層：ステレオカメラによる段差回避制御、
- 第3層：超音波センサによる段差検知と一時停止、アラーム、

第4層：傾斜角センサによる非常停止、
が機能する。段差回避に失敗すると、一時停止して操作者の介入を要請し、それでも傾斜が解消されないと、液面検出式と力平衡サーボ式の2種類の傾斜角センサが機能して非常停止に至る。なお、非常停止後は、キースイッチの切替えにより低速マニュアル運転を行うが、仮に前進中に非常停止となった場合には後進のみが許可されるようにしている。

一方、マニピュレーション時の転倒に対しては、3本のアウトリガに内蔵されたロードセルの荷重検出信号から、床面上での重心位置を前述のPLCによって演算し、その結果をマニピュレータの動作制御に反映する。**Fig. 8**に示すように、重心判定のための許容範囲に対応して、

- 第2層：本体が傾く前に予測回避、
- 第3層：アラームにより操作者に注意喚起、
- 第4層：非常停止（転倒限界）、

と機能する。アウトリガ展開後の接地状態において、ロボット本体重量に応じた荷重を検出できないか、あるいは作業中に検出出力が急変した場合、これをロードセルの故障と見なしマニピュレーション作業を放棄する。

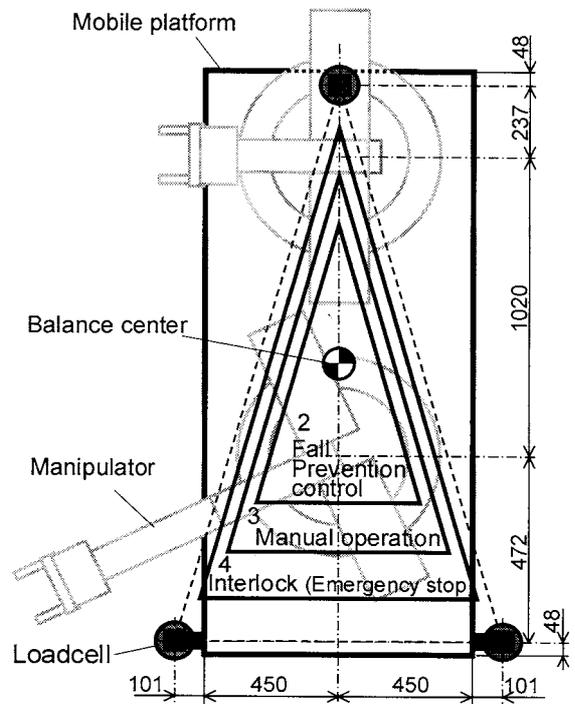


Fig. 8 Judgment of balance center based on loadcell outputs.

ロードセル出力に基づく重心判定

5. 施工作业用ロボット防護階層の統合とリスク低減効果の検証

5.1 安全防護手段の統合制御システム

施工作业用ロボットの走行制御とマニピュレーション制御は、各々独立した専用コントローラによって行われ、作業目的を完遂するための機能的な制御を基本とする。また、前章で述べた各危険源に対する第2階層防護を実現するためにも利用される。しかし、第4層のインタロック機能は安全防護層の中で最も重要なものであるため、危険状態を検知するセンサやその情報を判断・処理する制御システム、制御出力要素には安全性能の高い手段が要求される。

前章で述べた異種多重化 PLC はインタロック専用の制御系に導入するものであり、汎用 PLC や他の専用コントローラの上に配置され、これらが扱う安全関連情報を主に処理する。**Fig. 9**に、異種多重化 PLC (図中のSafety PLC) を中心としたインタロックシステムの概略構成を示す。この PLC は、異なるメーカーのものを三重化することによって機能的に非対称故障特性を向上させており、**Table 2**における安全性能カテゴリ4対応と認証されている²²⁾。

なお、CPUを用いるハードウェアの高安全性能を実現するためには、実行されるプログラムも同様に

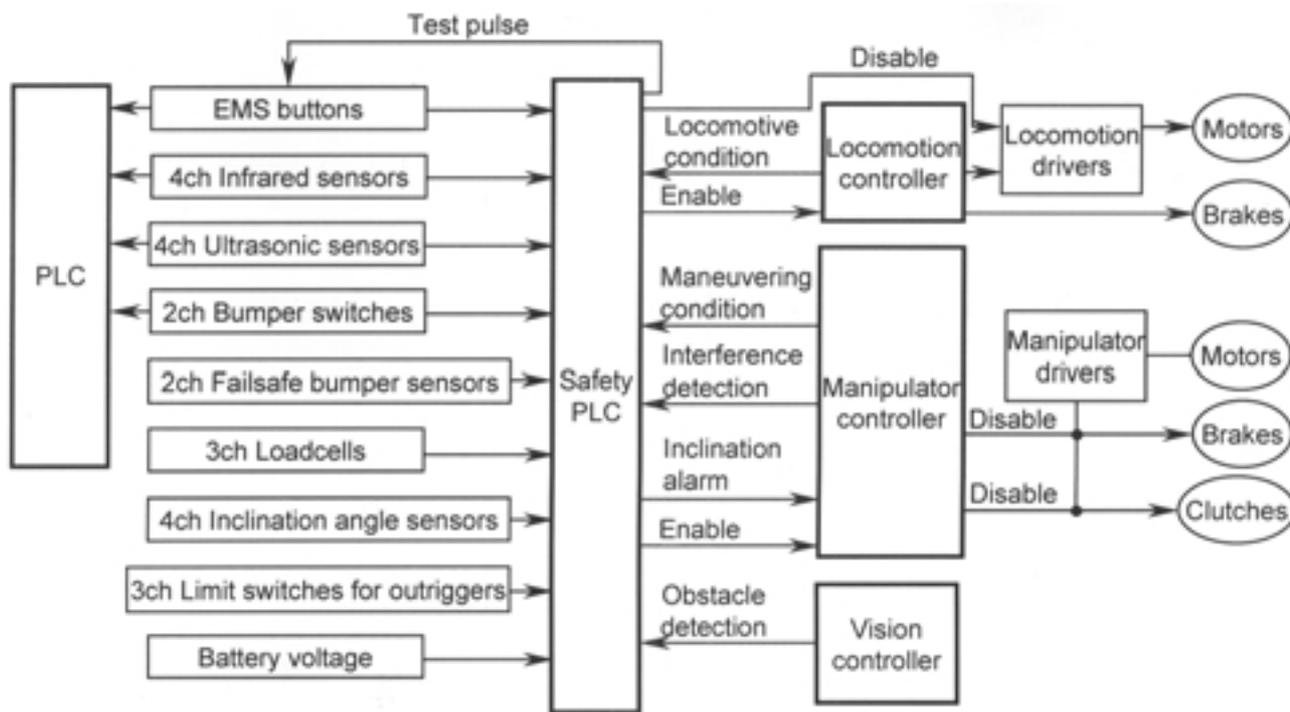


Fig. 9 Safety control system integrated by diverse redundant PLC.
異種多重化PLCにより統合された安全制御システム

安全性能について考慮されねばならない。このPLCのプログラムでは、Fig. 10のようなプログラムブロック構成とし、特に、Table 3におけるシステムティックな障害を可能な限り排除している。また、非常停止ブロック (Fig. 10のPB20) は、外部接点等のハードウェア診断用テストパルスの処理プログラムを含めて、ソフトウェアとして認証実績のあるものを採用している。

5.2 衝突に対するリスク低減効果

Table 3におけるリスクの査定は最悪の場合を想定したものであるが、衝突のリスクを作業の時系列で詳細に見積もるとすると、人間とロボットとの距離、あるいは両者の接近速度に応じて衝突に関するリスクは変化するはずである。すなわち、人間とロボットが離れていれば低リスクであるので高安全性の防護手段は要求されないが、接近するほど高リスクとなるためより高い安全性能が必要となる。

施工作业用ロボットでは、人間との距離がある場合は高速走行や障害物回避等の機能的走行制御が可能であり、人間とロボットが近づくにつれ、走行制御は低速に制限されて最後は停止インターロックが働く。よって、Fig. 6に示した防護手段は第2階層より第4階層の方が高い安全性能を有し、さらに、

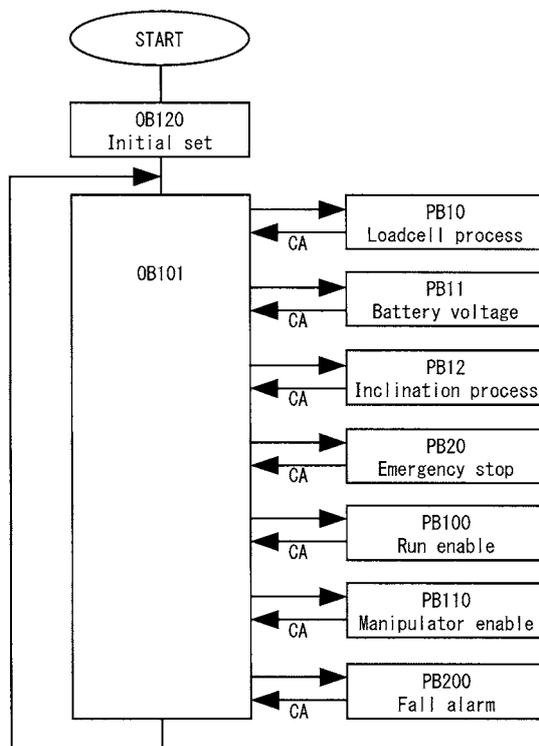


Fig. 10 Program block configuration for diverse redundant PLC.
異種多重化PLC用プログラムブロック構成

同一階層内の手段であっても、それが機能し始める領域がロボットに近いほど高い安全性能を持たねばならない。

そのような観点から Fig. 6 の手段を検証すると、赤外線センサと超音波センサはいずれも反射波を受信する危険検出型センサ²³⁾であるから、これらの安全性能が各防護層の安全性能を律することになる。今回はいずれのセンサも市販品を利用したため、センサ以外で全体の安全性能の向上を図っている。Fig. 11 に示すこれらのセンサの検知特性から分かるように、第 2 層では、赤外線センサ（遠距離用）と超音波センサの異種二重化と異種多重化 PLC の管理により安全性能を向上させ、さらに第 4 層では、第 2 層に近距離用赤外線センサが付加される三重化としている。第 4 層の安全確認型²³⁾ 軟接触式バンパはさらなる安全性能の向上に寄与する。

以上のリスク低減手段の適用によって、Table 3 の危険度レベルは下げることができる。例えば、Table 3 の 3 の危険事象に対して、傷害の酷さは衝突部位にも依存するため一概には決められないが、第 2、4 層の防護が機能すれば衝突自体の発生確率は激減することになり、少なくとも暴露頻度が減り (F 1)、人間の回避可能性は上がる (P 1) ことが予想される。よって、危険度レベルは V から II に下がることになる。ただし、どこまで下がれば許容とするかは別の指標が必要となるため、ここでは言及はしない。

5.3 挟圧に対するリスク低減効果

今回想定している作業は内装材等の据え付けのため、マニピュレータは比較的低速で動作すれば良く、マニピュレータとの衝突に起因するリスクは本質的に除去可能と見なしている (第 1 層)。

Fig. 12 は、マニピュレータの肘屈曲関節におけるトルク監視結果の例であり、トルク参照値と実トルクがほぼ一致してことが分かる。これにより、挟圧を防止するための第 2、3 層の防護機能が有効となり、マニピュレータが人間を挟圧する機会が減少し、また、人間が回避できる余裕が生じてリスクは低減される。ただし、Fig. 7 の手段については、前節のセンサ類と同様に安全性能について考慮されていない市販品を利用しているため、安全性能の向上は結局異種多重化 PLC の能力に依存する。第 4 層の機能としては、この PLC が直接クラッチとブレーキを制御するため、制御出力要素の安全性能の向上にも寄与していることになる。

また、挟圧状態であっても、第 5 層の機能により挟圧力を制限でき、傷害の酷さを軽減することが期

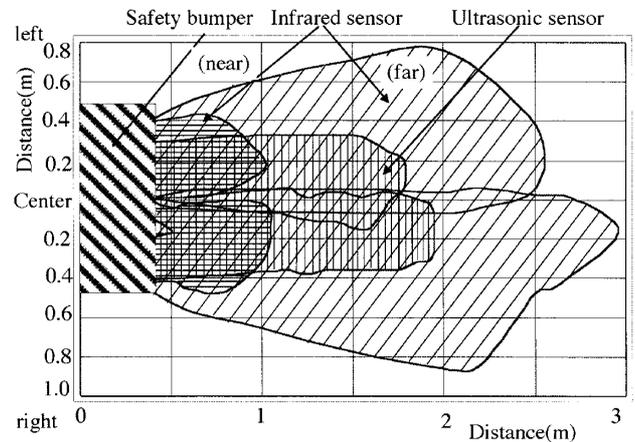
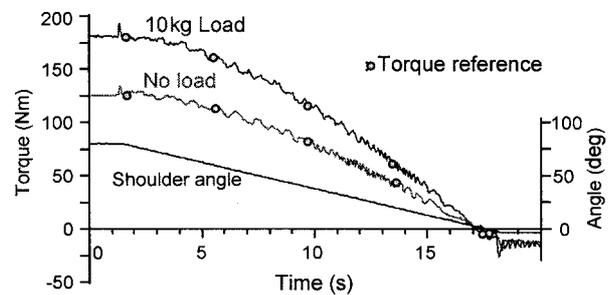
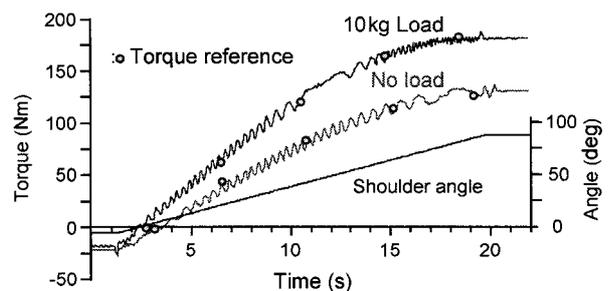


Fig. 11 Detection characteristics of obstacle detection measures against dummy model. ダミーモデルに対する障害物検知手段の検知特性



(a) Elbow 60° upward



(b) Elbow 75° downward

Fig. 12 Comparison between experimental torque and reference torque of elbow bend joint. 肘屈曲関節における実トルクと参照トルクとの比較

待される。ただし、現状の摩擦式クラッチはオン・オフの切り替えのみで、アナログ的な制御を想定して製作されていないため、任意のトルク制限値を正確に定めてそれを維持することは難しい。理想的には、試作ロボットシステムで利用したMR流体を用いた力出力制限機構が有効であるが、施工作業用ロボットの規模には能力不足であることと負作動型の機構ではないために今回は採用しなかった。本来、

このような機構を組み込んだアクチュエータが本質安全アクチュエータ¹⁵⁾と呼ばれ、一般に高リスクの接触状態ではアクチュエータの本質安全化が唯一の安全確保を実現する。

5.4 転倒に対するリスク低減効果

施工作業用ロボットの走行中の横転に対する第3、4層の防護機能の効果について調べたところ、Fig. 13に示すような結果が得られた。ロボットが段差を乗り越えようとするとき、先に超音波センサによって前方の段差が検知され、その後傾斜角センサがロボット本体の後方向への傾斜を検知していることが分かる。したがって、第3層の防護が正常に機能すればロボット本体の傾斜前に回避でき、それが失敗した場合には第4層でインタロックが機能する。傾斜角センサは異種構造のものを二重化して前述の異種多重化 PLC で信号処理しているため、第4層の防護手段の安全性能は高い。

以上のリスク低減の効果については、傷害の酷さは下げられないが、一時停止とアラームにより人間の回避可能性は高くなると見積もられ、危険度レベルは1段階下がることになる。

6. おわりに

人間と共存する環境下で作業するロボットが単に危険だからという理由で、その実用化を妨げてはならない。そこで、合理的で正当な手続きによるリスク低減を行った後に生じる事故は許容するという前提から、新しい形態のロボットの安全設計を行う必要がある。今回は、従来の安全設計の手順を逸脱せずに拡張したリスクアセスメントと、その結果に基づく階層化安全防護の考え方を提案し、施工作業用ロボットに適用した。

基本的には、ロボットは人間と隔離されている間は自由に振る舞えるが、人間に近づくにつれて、より高い安全性能を有する安全防護手段が機能し始めるといった防護階層が形成される。適切なリスクアセスメントの実施により、防護階層の安全性能が規定されるが、安全設計指標を確立するためには、人間工学的観点からの受容リスクの判断等を検討する必要があり、さらにはより本質安全を指向する要素技術の開発を目指したいと考えている。

参考文献

1) ロボット技術便覧編集部会編，ロボットハンドブック，日本ロボット工業会，pp.2-29 (2001)。

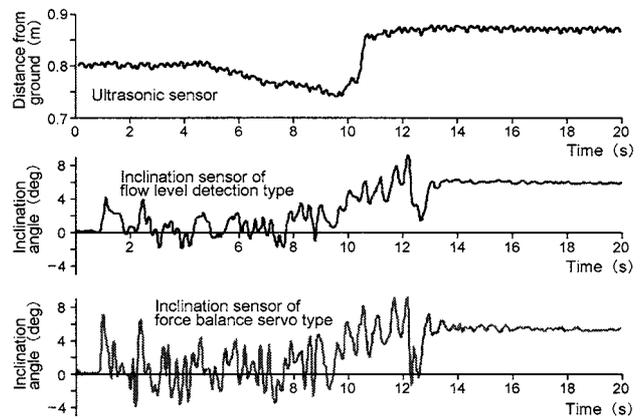


Fig. 13 Experimental results at running of robot on to bump.

ロボットの段差乗り越え時の測定結果

- 2) 土木学会建設用ロボット委員会編，21世紀を展望した建設工事の自動化・ロボット化－人と機械との協調を目指して－，土木学会 (1996)。
- 3) 長谷川幸男編，建設作業のロボット化，工業調査会，pp. 73-92 (1999)。
- 4) 技術上の指針公示第13号，産業用ロボットの使用等の安全基準に関する技術上の指針 (1983)。
- 5) ISO10218, Manipulating industrial robots - safety (1992)。
- 6) JIS D 6802, 無人搬送車システム-安全通則 (1997)。
- 7) SEMI S17-0701, Safety guideline for unmanned transport vehicle (UTV) systems (2001)。
- 8) ISO/CD12100, Safety of machinery -Basic concepts, general principles for design (1998)。
- 9) ISO14121, Safety of machinery - Principles for risk assessment (1999)。
- 10) ISO/IEC Guide51, Safety aspects -Guidelines for their inclusion in standards (1999)。
- 11) ANSI/RIA R15.06-1999, American National Standard for Industrial Robot and Robot System -Safety Requirements (1999)。
- 12) 例えば，MIL-STD-882C, DIN V 19250など。
- 13) JIS B 9705-1, 機械類の安全性-制御システムの安全関連部-第1部：設計のための一般原則 (2000)。
- 14) 池田博康，梅崎重夫他，建設用ロボットの安全制御技術に関する検討委員会の報告と今後の研究課題，産業安全研究所特別研究報告，NIIS-SRR-NO.21, pp.31-52 (2000)。
- 15) 池田博康，杉本旭他，建設用ロボットの安全制御システムの開発 (第1報：本質安全マニピュ

- レータと階層化センシングシステム), 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-NO.21, pp.53-65 (2000).
- 16) Jian Lu, H. Ikeda, et al., A Robot Vision System Designed for Mobile Construction Robots, Proc. Pan-Yellow-Sea International Workshop on Information Technologies for Network Era, pp. 273-276 (2002).
- 17) AIChE/CCPS, Guidelines for Engineering Design for Process Safety, AIChE, p. 10, 1993.
- 18) 池田博康, 星野春康他, IPL設計におけるリスク認識とインターロック構造, 第 31 回安全工学シンポジウム講演予稿集, pp. 77-78 (2001).
- 19) 齋藤剛, 池田博康, 独立防護階層に基づく人間共存型ロボットの安全設計, 第 19 回日本ロボット学会学術講演概要集, p.112 (2000).
- 20) 池田博康, 清水尚憲他, 柔軟歪みセンサのフェールセーフ検定と軟接触式バンパーへの応用, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 1, pp. 433-434 (1999).
- 21) 三平律雄, "3 of 3"に基づいたフェールセーフ(安全) PLCの考え方と活用利点, 計装, Vol. 40, No. 12, pp.63-68 (1997).
- 22) Guide to Machinery Safety 6th Edition, Pilz Automation Technology, pp.145-182 (1999).
- 23) 杉本 旭, 梅崎重夫他, 安全制御システムの基本構成 - 安全制御の原理とフェールセーフシステムの構成方法 -, 産業安全研究所研究報告, NIIS-RR-95, pp.9-22 (1996).

(付録)

「移動ロボットのための安全関連要求事項」要約

項目1：総則（範囲，目的，適用，適用除外）

本要求事項は，移動ロボットの設計，製造，改造，再組立，導入，保守・修理，試験，起動及び訓練に対して適用し，移動ロボットに関する要員及び人の安全確保のための指針を与える。要員以外の第三者が接近する可能性を考慮する。

項目2：参照規格

本要求事項は，機械安全に関する国際規格体系の中で個別規格に該当するため，引用される規格は関連する上位基本規格（基本安全規格，グループ安全規格）類を網羅する。また，産業用マニピュレーティングロボットに関する各規格，無人搬送車関連規格が参照される。

項目3：定義

本要求事項で使用する用語は，主に国際基本安全規格やJIS B 0134:1998（産業用マニピュレーティングロボット - 用語）で定義される。用語の分野は，一般，構造，制御，動作，安全関連にわたるが，ここでは主に移動ロボットに関連する特有の用語について記す。

- ・移動ロボット：自動的に移動できるロボット。本要求事項では，自立（外部から動力源の供給を受けない）移動ロボット，自律（環境を認識理解し，外部から支援を受けない）移動ロボット，及び移動機構付きマニピュレーティングロボットを含む。
- ・制動機構：移動体の速度を減少させる機構。
- ・障害物回避：移動経路上にある障害物を避けること。
- ・衝突回避：移動中に障害物，構造物等との衝突を避けること。
- ・接触安全：人への静的接触におけるリスクが十分に低いこと。
- ・衝突安全：人への動的衝突におけるリスクが十分に低いこと。

また，動作領域に関する用語を最大領域，制限領域，安全防護領域，運転領域と区別するが，無軌道形移動ロボットの場合には定義できないこともあり得る。

項目4：移動ロボットの設計，製造，改造，再組立

移動ロボットの設計，製造，改造，再組立に当たっては，以下の各要求事項を満足しなければならない。

項目4.1：要員及び人に対する危険源

要員及び人に対する危険源は，リスク低減プロセスに従って，設計により取り除かれるか，防護方策により対処しなければならない。それが実現できない場合は警告等の準備が必要となる。

項目4.2：駆動源なしでの動作

マニピュレータの各軸及び移動機構の各駆動部を駆動源なしで動かせるよう設計しなければならない。移動機構の各駆動部が駆動源なしで動かせない場合は，駆動源なしでの動作（標準設計），イナープル装置を用いる駆動源供給の速度限定動作，要員の管理下での駆動源供給の速度限定動作，の優先順位で各々の動作を満足する設計を行う。

項目4.3：作動制御

作動制御装置は意図しない操作から保護されねばならない。また，遠隔制御可能な場合は，他位置か

らの始動防止のためにローカル制御とする。

項目4.4：制御システムの安全関連部の性能要件

電気、油圧、空気圧の制御システムの安全関連部は、以下の性能基準の一つを満たさなければならない。これらの性能基準はJIS B 9705-1¹³⁾の安全方策カテゴリーに準ずる。

- (1) 制御機能の実現（カテゴリーB）：安全関連部の目的の機能を実現する。
- (2) 高信頼化（カテゴリー1）：十分に吟味された高信頼性の要素を使用し、安全原則に従った設計が行われる。
- (3) チェックによる機能確認（カテゴリー2）：安全機能が適当な間隔でチェックされる。
- (4) 機能確認付き二重系（カテゴリー3）：単一故障で安全機能を損なわない。単一の障害はできる限り検出される。
- (5) 連続的な機能確認（カテゴリー4）：単一故障は安全機能実行時、もしくはその前に検出される。それができない場合は、故障の蓄積で安全機能を損なわない

注：各カテゴリーの性能は、そのカテゴリー以下の性能要件を全て満足しなければならない。

項目4.5：ロボット停止回路

一つ以上の非常停止装置による非常停止機能、及び停止を指示する外部安全防護装置と接続する機能を有する。非常停止については、JIS B 9960-1（機械類の安全性－機械の電気装置第1部）で要求する停止カテゴリー0（動力源遮断）または1（停止後動力源遮断）を満足するものとするが、有線接続されていない非常停止装置の場合や停止カテゴリー2（制御上の停止）の実現手段については、それらの情報を付記しなければならない。

項目4.6：ペンダント並びにその他の教示装置

安全防護領域内のロボット近傍で操作するペンダント等の操作装置には、3位置のイネーブル装置を持つことが望ましく、ペンダント上のボタンはホールトランジスタ機能を持たねばならない。また、ペンダント等から始動されるロボットの速度は、安全運転速度以下とする。

項目4.7：高速有人プログラム検証（APV）

安全運転速度以上の速度による始動が可能な場合、モード切替や速度の制限が課せられる。移動体の安全防護領域が完全に生成されない場合は、安全運転速度以上のAPVは実行できない。（基本的には、移動体が停止時に、移動体上のマニピュレータにのみ高速APVが適用される。）

項目4.8：安全運転速度

移動体では、想定されるタスクの実行により生じ得る危険状態を明確に示した上で、最高速度を設定しなければならない。特に、最高速度が250 mm/sを超える場合は、安全運転速度とその運用についての情報を使用者へ提供する。また、移動体上のマニピュレータでは、移動体停止時にツール・センタ・ポイント（TCP）における床から見た最高速度が250 mm/sを超えない速度を安全運転速度とする。

項目4.9：動作範囲制限装置

マニピュレータの動作範囲制限のため、一次軸は機械的なりミット装置を、二次軸以降は機械的あるいは非機械的なりミット装置を用意しなければならない。（周回動作のできる旋回軸については適用除外とする）。移動機構では、動作範囲制限が必要でなかつ実現可能な場合に限り、機械的あるいは非機械的なりミット装置を用意する。

項目4.10：緩衝装置

人との接触に対して、衝突安全性を確保するためのバンパ等の緩衝装置を準備しなければならない。基本は衝突による運動エネルギーを消散する物理的な装置とするが、それが適用できない場合はリスクアセスメントによって適切な代替装置を選定する。

項目4.11：要求される情報

全てのロボットと付属装置について以下の項目に対する表示をして使用者へ提供しなければならない。

- (1) 操作方法：駆動源供給による非常停止後の回復動作など
- (2) 警告・注意：事前注意情報
- (3) 仕様・技術的情報：機能と仕様、停止時間、制御システムの安全関連部の性能、安全運転速度、緩衝機能情報など
- (4) 保証・品質：規格リスト、関連規格と関連文書情報
- (5) 保守：予防的保守スケジュールを含む保守情報
- (6) システム要求事項：電気的要求、電磁妨害等の特別な環境に関する情報（帯電危険性を含む）
- (7) その他の情報：故障モード解析情報、危険源解析と全ての危険操作に関する説明、訓練用素材

項目5：安全防護装置の性能要求

ガード類（固定ガード、インタロック付きガード）やインタロックのための安全防護装置などは、上位の機械基本安全規格類の一般安全要件を満足しなければならない。特に、制御システムの安全関連部の性能に関する文書があることが求められる。

また、人との接触や衝突を想定して具備される防護機能についても同様であるが、機能別に次の優先

順位で分類される。

接触安全確保の機能については、

- 機械的力制限装置（トルクリミッタなど）、
- 機械的力伝達装置（クラッチなど）、
- 機能的力制限装置（接触センサによる力制御）、

衝突安全確保の機能については、

- 機械的制動手段（機械的なブレーキ）、
- 電氣的制動手段（回生ブレーキなど）、
- 緩衝機能、

である。特に、緩衝機能については、衝突のリスクの大きさに応じて、物理的バンパ、接触検知による制動制御、接触検知による回避制御の順で選定する。なお、物理的バンパについては、バンパの十分なストロークをカバーできない場合、人との接触可能性や機能的な緩衝可変効果を考慮することもできる。

項目6：要員及び人の安全防護－概要

安全防護方法の選択は、包括的なリスクアセスメントに基づいて実施しなければならない。リスクアセスメントは、機械設備によって生じる危険の審査を系統的な方法で行うための一連の論理的手順であり、ロボットのタスクと危険源の同定、リスクの見積もり、リスク評価の順に実施する。リスク評価の結果、リスクが許容できない場合は必要な場合は次の手順（1）、（2）、（3）の順にリスク低減を実施する。また、この過程は文書化されねばならない。

- (1) 本質安全設計：設計による危険源自体の削減、低減、あるいは、要員及び人が危険源に暴露される必要性を減少させるリスクの低減
- (2) 安全防護方法の選択：安全防護装置の適用によるリスク低減
- (3) 付加的防護方法の選択：付加的あるいは補助的な防護手段の適用によるリスク低減

リスク低減の結果の妥当性を検証するために、再度リスクアセスメントを実施し、最終的に許容可能なリスクレベルになるまでアセスメントは反復される。残留リスクに関しては、使用者へその情報を提供し、または警告を与える。

項目7：リスクアセスメントの考え方と方法

アセスメント第1段階は、安全防護なしで危険源の同定とリスクの見積もりが行われる。リスクの評価結果を許容できるレベルまで下げるため、リスク低減方策として、第2段階では本質安全設計を行い、第3段階では安全防護及び追加防護策を選択する。第2、3段階の実施毎に第1段階に戻って、リスク低減効果を確認する。

項目7.1：タスクと危険源同定

予見できるタスクを想定した上で、ロボットの使用上の制限、据え付け状況、寿命などを考慮し、各々のタスクに関連した危険源を同定する。危険源の同定は上位規格¹³⁾及びJIS B 9702を参照できる。

項目7.2：リスクの見積もり

各々のタスクと危険源の組み合わせに対して、リスクを見積もるためのリスク要素を定める。リスク要素及びリスク要素のランク付けの基準は限定されない。重要な点は、複数人の場合は最も怪我が酷い人を対象とするなど、最悪基準を用いることである。また、暴露頻度は暴露時間も考慮し、回避可能性は危険事象の発生速度や要員かそれ以外の人かを考慮すべきである。

項目7.3：リスク低減方法の決定

対象危険源のリスク要素の査定により対象タスクにおける危険度レベルを定め、対応するリスク低減カテゴリ（安全性能カテゴリ）と安全防護手段を選定する。リスクアセッサは必要に応じて重み付け要素を追加設定できるが、作業環境や条件等によって重み付けのランク及びリスク分析手法の適用を検討し、その理由を提示する必要がある。

項目7.4：本質安全化

設計段階で危険源自体の除去あるいはリスクの除去、低減を行うことにより、安全防護を必要とせず機械の持つ危険なエネルギーを抑制、制限する方策である。機能的に実現される場合は安全性能とリスク低減効果の検討が必要となる。

項目7.5：安全防護の選択

安全防護手段は、必要な安全性能を有するものを項目6の優先順位に従って選択しなければならない。基本的に、低カテゴリ対応手段の組み合わせよりも単一高カテゴリ対応手段が優先される。

項目7.6：安全防護手段適用後のリスク低減効果の確認

前述のプロセスを繰り返した後、再度危険度レベルを見積もり、この残留リスクが許容可能であるかを判断する。許容可能でないときは、再度追加の安全方策を適用する。残留リスクが許容可能であるかの判断は、リスクアセッサに依存する。

項目8：安全防護装置-適用要求

本項目で規定される安全防護装置の要件は、主に上位グループ安全規格類に準拠する。例えば、

- ・ガード（固定、インタロック）
- ・トリップ装置
- ・ライトカーテン／ライトスクリーン

- ・エリア走査安全防護装置
- ・マットシステム
- ・接触センサシステム／バンパシステム

が既に規定されている。現行規格類で規定されていないレーダーセンサシステム，拡散放射型光線センサシステム，焦電センサシステム，カメラによる画像認識システム，GPS等位置測定システムなどについては，設計者が機能，性能，操作等の情報を使用者へ提供しなければならない。

項目9：移動ロボットの保守

使用者は，継続的利用に必要な保全プログラムを予め確立しておかねばならない。その際，移動ロボット製造者の要求事項や特別要求事項を考慮しなければならない。

項目10：試験と立ち上げ

移動ロボットの据え付け，立ち上げ及び試験は，安全防護の据え付け，臨時の安全防護物の選択，製造者／インテグレータの指示，初期立ち上げ手順（動力供給以前の検証，要員及び人の制限領域からの退出，動力供給後の検証）の順で実施されねばならない。

項目11：要員の安全訓練

使用者は，移動ロボットに関わる要員が対応すべきタスクに関連する安全問題について訓練を受けていることを保証する必要がある。訓練は，安全防護訓練，教示者の訓練，オペレータの訓練，保全要員の訓練を含む。

(平成 14 年 9 月 12 日受理)