

6. 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)

池田博康*, 杉本 旭*, 清水尚憲*, 呂 健**

6. Development of the Safety Control System for Construction Robots — Inherently Safe Manipulator and Hierarchized Sensing System —

by Hiroyasu IKEDA*, Noboru SUGIMOTO*, Shoken SHIMIZU*, Jian LU**

Abstract: Recently, the introduction of robots into construction work, in which automatization and labor savings are in rapid promotion, has been strongly desired. In building interior construction work, for example, as it involves a lot of manual labor, simple machines are used to ease the heavy, muscular labor of human workers. A system for enabling robots to collaborate with human workers in similar construction work is under research for future realization. However, according to this system, safety is not ensured for human workers in coexistence with robots, and safety work cannot be realized by merely taking measures to prevent human workers from approaching the danger condition, which is the basis of safety assurance under the conventional safety standards.

This study is to propose a safety robot control mechanism which enables robot arms for building interior construction work to achieve the intended work while securing the safety of human workers. Even if the robot happens to touch human workers, the robot should not be permitted to apply an excessive impact or pressure over the allowable limits to human bodies.

In order to satisfy these safety conditions, the construction working robot is classified under new robot class based on stop condition and designed based on the principle of machinery safety. This safety design principle which all machines must follow explains the risk reduction process. However, the inherently safe robot can be achieved by removing the hazards so that it may not produce risk itself. The functional safety will be conducted after the execution of the approach of such inherently safe for far remaining hazards.

This report adopted the inherently safe actuator as an inherently safe technology which could be applied to the construction working robot, and also adopted fail-safe and hierarchizing interlock of sensors for the obstacle detection as a functional safe technology.

The hierarchizing interlock of sensors is always monitoring the surrounding area by using a radar sensor with a self-diagnosis function. When the human worker approaches the robot, this system switches the maximum speed to a lower speed. Furthermore, when the human worker touches the soft-touching bumper switch of the robot, this system makes the robot stop immediately. At this time, the radar sensor, the bumper switch and the speed monitoring function for the actuator should not fail to the danger side. Therefore, in order to ensure the stopping process of the control system, the presently conceivable highest level of safety should be applied to the fail-safe and redundant technology in combination to these devices and the function.

* 機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety Research Division

** 物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

The inherently safe actuator system can regulate its output according to the work. This system has a device using Magnet-Rheological (MR) fluid and a friction brake together. The MR device can control mechanical force by making use of the characteristics of the MR fluid, and can regulate the torque to be transmitted from the motor output axis to the arm axis by changing the magnitude of the current applying to the MR device. Therefore, in any motion of the robot arm which may cause collision of the robot arm with a human worker, the transmitted torque is limited to adapt the robot arm to disturbance, and in any other motion of the robot arm, a strong servo control restrains disturbance.

Keywords; Construction robot, Inherently safe design, Magnet-Rheological fluid, Bumper switch, Radar sensor

1. はじめに

建設作業へのロボットの導入は強く求められてきたが、工場の自動化が即産業用ロボットの導入となる製造業に比べると、その進展は遅い。力補助を行うバランスの形態¹⁾から雲仙普賢岳での無人化重機²⁾やビル自動建設システム³⁾に至るまで、多くの事例が報告されているものの、現場では、自律的な高度なロボットよりも遠隔操縦ロボットのようなマン・マシンシステムが実用的と考えられている⁴⁾。現状のロボット技術の水準と特殊な作業環境を勘案すれば現実的な選択ではあるが、今後は、さらに人間との共存・協調を指向した建設用ロボットの出現が期待されている。

このような人間との共存を実現するロボットは、建設分野に限らずに多くの分野でニーズが強調される一方、共存型ロボットの導入により人間の安全確保が危惧されている。人間との隔離が困難で、ときには人間との安全な接触が求められる共存型のロボットでは、その活動範囲が極めて限定される。それにもかかわらず、このような環境では、いつ危険な状態が発生するか分からない状況で人間は行動せざるを得ず、従来の危険な状態に接近しないという安全方策で安全を確保するのは不可能である。

一般の固定式産業用ロボットに対しては、既に個別の安全規格⁵⁾が定まっており、安全方策が具体的に規定されているが、この規格を移動することを前提とした共存型ロボットへ適用するのは難しく、事実、移動ロボットはこの規格の適用範囲外である。しかし、機械の基本安全設計原則⁶⁾に従うことは必須であるため、改めてこの原則に基づくりスク低減の手順に共存型ロボットを当てはめ、危険源除去を系統的に進めて「安全」の判断を得なければならない。

そこで、本研究では、人間と作業空間を共有する条件で施工作業用ロボットを導入する場合を想定して、先ず、機械の安全設計原則のリスク低減手順の中で、残

存リスクに対する許容限界の観点から共存型ロボットの位置付けを論じる。また、危険源除去として実現する本質安全について検討を加える。そして、これらの検討結果を基に、ビル屋内の施工作業用ロボットに適用する安全関連技術を検討し、人間の安全を確保しつつ目的の作業を遂行できるロボットシステムの開発を試みる。今回はロボット要素技術として、センサによる監視システムと本質安全アクチュエータを提案し、試作ロボットシステムへの適用を図った。

2. 建設用ロボットの新しい秩序と位置付け

2.1 新しいロボットのクラス

人間とロボットとの共存状態は、移動ロボットをはじめとして、介護・福祉用ロボットやパーソナルロボットなどの新しい型のロボットで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の保障は不可能であり、これらのロボットを機能させる以上、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。

火災現場での救難ロボットは、緊急時には被災者を手荒く扱ってでも救出作業を遂行しなければならないだろう。このような人間の命を預かるロボットは、使用を拒否できないというディレンマがある。危険側の故障や操作ミス等がどうしても防止できないのであれば、これらにより伴う危険を受け入れるという使用者との申し合わせでもなければ、このようなロボットは実現しない。

空間的に隔離する安全が保証できない共存型ロボットでは、ロボットが停止することで安全を確保するしかないが、その運転停止の特性は対象ロボットの形態やそこに係わる人間の役割によって異なるはずである。そこで、対象ロボットが「止まる安全」を確保できるか、その手段は人間の判断に依存しないロボット側の

Table 1 Robot classification based on stop condition.
運転停止に基づくロボットの分類

クラス	特性	代用的な ロボット・機械
B	当事者にとってロマンの対称となる機械。危険であるか否かは当事者の問題として自己責任に委ねられる。	趣味のロボット
1	当事者にとって必須の機械で、その使用を拒否できない。故障は致命的であるが、高信頼化や訓練等により故障を克服して運用する。	救難ロボット ペースメーカー
2	「止まる安全」が常時確保できず、制御あるいは人間の操作によって安全な停止状態まで運用が維持される機械。その利用の判断はユーザに委ねられる。	飛行機
3	「止まる安全」が常時確保できるがその運転は人間の操作によるため、危険の判断や停止操作は人間に依存して「止まる安全」確保となる機械。	ロボットの 教示 自動車
4	安全/危険の監視と安全な停止ができる機械であり、人間はそのような操作に関与しない。	ロボットの 自動運転 自動倉庫
a	危険を検出して機械を積極的に止める制御を行う機械。	無人搬送車
b	安全を確認して運転し、確認できなければ運転停止により安全確保される機械。故障時危険とならないフェールセーフ性が要求される。	プレス機械
5	安全確認型であるばかりでなく、不要な安全停止を避けるための制御を行う機械。安全確保の下で高い運用効率を維持できる。	プレス機械の PSDI

機能か、さらにそれは安全確認型⁷⁾か否か、といった観点から運転停止に基づいたロボットのクラス分類を試みた。

Table 1 は、クラスを6段階に分類したもので、クラス番号が大きいほど安全性は高く、人間への依存度は低くなる。なお、クラスBは「止まる安全」とは関係ない場合であり、クラス4は手段の構造により4aか4bに分かれる。

一般の産業用ロボットはクラス3および4に該当し、通常クラス4bが要求されることが多く、「止まる安全」に対して厳格な責任が求められる。今後登場するであろう共存型ロボットは様々なクラスまで広範な展開が

予測されるが、例えばクラス3の場合は、最後の事故回避を人間に委ねる故、人間の訓練や資格制度、管理の徹底とともに、技術的なバックアップも必要となろう。

2.2 残存リスクと許容リスク

ISO/IEC-Guide51⁸⁾では、残存リスクが許容できるか否か（すなわち安全）の判断は、その時点の社会的価値観によって必ずしも同じではないことを認めている。しかし、残存リスクによる事故を認める場合、事故の原因に対する責任は依然として問題となる。事故に対する責任は、事故を減らす努力（リスク低減）とは別の要求である。例えば、クラス1に分類した救難用ロボットは、失敗による事故の責任がある程度免除されると考えられる。

残存リスクに対する許容の限界は、明らかに緊急時のロボットでは大きい。このように、人道的立場で使用されるロボットには、特別にリスクと事故の責任の軽減というメリットとの間にトレードオフが存在すると考えられる。失敗で救助できなかったのは止むを得ないという判断があつて初めて、救難ロボットは思い切った救難活動が可能となるのである。

病人の看護、高齢者の生活介助を行う機械では、安全性が何よりも重要である。しかし、機械による介助を直接受ける限り明らかに限界があり、しかも、ロボット看護・介助による残存リスクは決して小さくはない。しかし、高齢者のペースメーカーとなり、生命を維持するために使用されているのであれば、使用者が小さな事故を受け入れてしかるべきである。その意味で、福祉用のロボットには、ある程度大きな残存リスクで使用を求めることは不可能ではない。

このような許容リスクの判断に特別な配慮を求める場合、その判断は、合理的に説明されて社会的に公認されなければならない。そのため、リスクの共通の認識を得るべく、国際的標準化が早期に求められる。ただし、自動車事故が社会的に受け入れられているとは言えないにもかかわらず、クラス3の自動車は既に社会的構造の一部になっていることは注意を要する。

2.3 建設用ロボットのリスクとクラス

建設作業の機械化に際して、これまでのリスク戦略では、機械の導入に伴うコストと事故の減少で得られる経済的効果とを比較して、導入の意志決定をすることになる。リスクに基づく判断は、最終的に低減されたリスクが許容されるか否かで行われるが、もし残存リスクが大きかったら、機械の導入を控えて人間の作業が継続されることになる。このリスクの計算は、一般に人間が行う危険作業のリスクと比較すれば、機械

導入後のリスクの方がずっと小さいはずである。しかし、機械の導入によって新たに生ずるリスクが検討されると、危険な機械と見なされ、あえて導入はしないという結論になりがちである。

危険作業の削減・代替により災害防止が期待される建設用ロボットも同様に、安全確認型で安全が確保できるロボット(クラス4b)であればよいが、事故が起こりうるロボット(クラス1~4a)であれば同じ問題が起こる。つまり、ロボットを安全の目的で導入したとしても、人間の責任による事故が減るだけで、改めてロボットの責任で生ずる事故をどのように扱うかが問題となる。

建設作業を行うロボットは大型のものも多く、確かに危険である。ロボットが故障した場合、危険作業を人間に代行する機械であるから、故障修理はかえって危険作業となる場合もある。あるいは、他の作業者と混在するため、うっかりマニピュレータにぶつけられる恐れもある。

建設用ロボットがリスクを認めるシステムである限り、リスクに十分に見合う大きなプラス効果を求めるという関係は合理的な帰結であろう。安全確認型の安全装置が実現できない以上は、危険検出型の安全装置を認めざるを得ないという態度でもあり、また、大きな危険性の改善によって小さな危険性が生ずるのは許容するということである。いずれにしても、建設用ロボットはクラス3に共通する新しい安全の秩序化が適用すると思われる。

3. 国際安全規格に基づくロボット設計手順

3.1 国際安全規格によるリスク低減と活動

前出のISO/IEC Guide-51⁸⁾によれば、危険性をリスクで表し、「安全」を受容可能なリスクと規定しているように、国際規格は絶対安全を要求してはいない。しかし、事故の責任を曖昧にするのではなく、周到な準備を行った結果として生じた災害を受容しようという考え方である。設計で考慮すべき多くの安全原則がISO/CD 12100⁶⁾で示されており、「安全」と認められるまで、これらの原則に基づくリスク低減が繰り返される。このようなリスク低減には、現在の最高水準の技術を用いるというstate-of-the-artの原則が適用されると言われ⁹⁾、安全の責任を果たすための共通の方法として国際規格によるリスク低減を採用する限り、「安全」の判断のための説明原理が確立されていなければならない。

Fig. 1は、ISO/CD12100で示されているリスク低減の手順であり、ロボットに限らず機械設備はこの手順に従ってリスク低減活動を実行しなければならない。

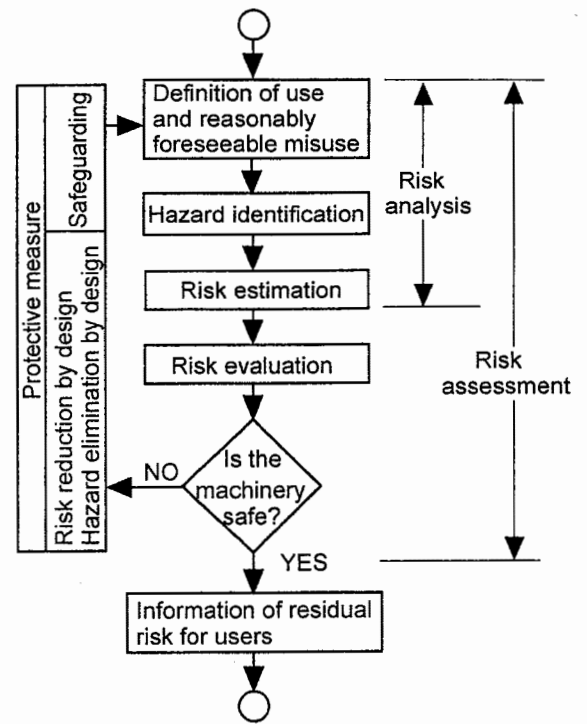


Fig. 1 Iterative process of risk reduction by ISO/CD12100
ISO/CD12100のリスク低減手順

多くの災害は人のミスで発生しているために、災害防止を単に求めるのであれば人の教育・訓練が最も効果的である。しかし、リスク低減の活動には優先順位があり、国際規格では、先に行うべき活動によって解決できなかった問題を次の活動に委ねるには、達成可能の限界であることの説明責任を負うとされる¹⁰⁾。機械の側からの安全対策を怠って、事故回避を人に委ねることは認めないとする考え方である。

Fig. 2は、Fig. 1のリスク低減で行う活動の優先順位を明らかにしたものである。

まず活動1は、機械の使用条件(環境)の整備を行う。危険な行動を誘発するトラブルを最小にするという、とちらかといえば品質管理から要請されるアプローチである。ただし、予見可能な誤使用には、あくまでも活動1の結果として到達できる限界に対してstate-of-the-artの原則が適用されている。

次の活動2は危険源を明確にする。危険源を扱うプロセスはこの後2つに分かれるが、危険源そのものを除去するという本質安全の活動3を優先し、除去できなかった危険源による最悪の被害を予測して活動3の成果とする点は注目すべきである。

次いでリスク見積り/評価(活動4)を行い、「安全」と認められない場合、設計によるリスク低減(活動5)、さらに安全防護設備設置によるリスク低減(活動6)が実行される。なお、リスク評価の活動4では、人間が

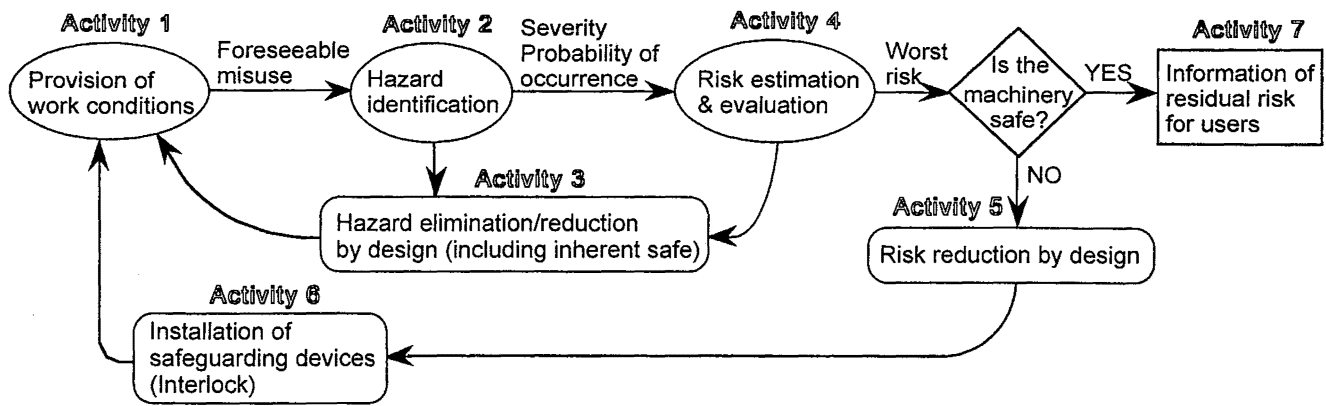


Fig. 2 Priority order of risk reduction activities.
リスク低減活動の優先順位

危険源に暴露される可能性と、被害の大きさによって推測される最悪のリスクに対して「安全」と判断されたとき機械の使用が許可される。そして、「安全」と認められた段階で人間の教育・訓練（危険の警告、警告解除を含む）と保護具の装着等によるリスク低減が認められるのである。このように、リスク低減活動は、機械の側（工学的立場）からの対策によって災害防止に確実性を得るプロセスだと考えることができる。

3.2 本質安全設計

Fig. 2の活動2としてロボットの危険源を明らかにすると、ロボットアーム自体が危険源の除去・低減の対象である。パワフルなアームであれば、人間と接触して容易に災害に至る。しかし、これを除去することはロボットの本質を失うため、共存型ロボットの場合は、接触しても人間に傷害を与えない本質安全化が絶対条件であると考えざるを得ない。

そこで、ロボットアームの危険源を物理的特性（力と速度）に置き換えて、アームが人間におつかるときの衝撃とその後の人間への挟圧が、人間に受容されることをもって「安全」という判断を行う（活動3）。したがって、まず衝撃力が許容限界であるためには、動作速度を低速に抑えることが人間と共存できるロボットの条件となる。挟圧力に関しては、人間の耐挟圧力は結構大きいと思われるが、人間が押し込まれて逃げられないような状況が頻繁に生ずるのは、共存ロボットとしては不適格である。ロボットは、人間の力に対する反力（受動力）はいくら出しても構わないが、動きを伴う能動的な力は、例えば人間が手で扱えるワークの重量に相当するような小さな力を標準に設定されるべきである。

ところで、この場合の安全確認は速度と力が許容限界を超えていないことの確認である。あくまでも、速度と力の安全確認システムを構成し、前出クラス4bの

ロボットシステムを構築することが正当なやり方である。対象ロボットシステムのクラスが低い場合、安全確認型ではないセンサを適用することが許容されるが、Fig. 2の活動4以降の手順に従うことが必要である。人間のロボットへの接近を検出して接触を回避したり、力を安全の限界となるよう制御を行うような、いわゆるアクティブセーフティの考え方は、安全支援機能であるという認識が必要である。

なお、ISO/CD12100で規定されている機械の本質安全化設計の一部には、①作動力を十分小さく制限することにより、要素による機械的危険源が生じないようにする、②可動要素の運動エネルギー（すなわち質量および/または速度）を制限する、という記述がある。これまで、80W以下のモータを用いるロボットはエネルギーが小さいとして安全だと見なされてきた¹¹⁾が、近年の高機能なロボットでは必ずしも安全とは言えなくなってきており、力と速度を個々に安全限界内に抑える本質安全設計を検討すべきである。

4. 施工作業用ロボットの基本設計

4.1 安全基本要件の検討

建設用ロボットといえども、国際安全規格の設計手順に基づき、設計・開発されねばならない。特に、人間と共存可能なロボットを指向するならば、可能な限りリスクを生じない条件で本質安全を達成すべきである。本研究では、主にビル屋内の内装等の施工作業用ロボットの開発を目指しており、これは、パネルや配管等の作業者が単独で持つには困難な作業対象物を、搬送、据付することで、作業による重量物取扱い作業や不自然な姿勢を強いる苦渋作業を低減、あるいは代行することを目的とする。基本的には、作業対象物が多様であるために完全な自動化は求めず、現場作業者が操縦できるマニュアルマニピュレータを搭載した無

軌道式移動ロボットを予定している。したがって、ロボット周囲に人間が存在する環境下で作業を行う共存型ロボットの形態となる。

このような施工作業用ロボットの設計を、Fig. 2の活動の優先順位に従って行い、ロボット要素の安全要件を検討した。

ここでは詳細は示さないが、まず、活動1では作業環境を含めた人間とロボットの関係を整備して、予見可能な誤使用から危険源を同定した。この活動2の結果は、いくつかの国際規格にリストアップされている危険源^{6,12,13})を参照して導出されるが、主にロボットの移動機構とマニピュレータの機械的危険源にのみ着目して抽出すると、およそ以下の通りである。

- (1) マニピュレータまたは移動機構との衝突
- (2) マニピュレータまたは移動機構による挟まれ、巻き込まれ
- (3) 鋭利なエッジやギア等の露出 (接触形状)
- (4) 減速, 停止, 保持能力の不足
- (5) パワーの消失と変化
- (6) エネルギー源
- (7) 蓄積エネルギー (ポテンシャル, 運動)
- (8) 要素の機能不良 (破損, 緩み等)
- (9) 転倒, 落下

これらの危険源の内、活動3が実現できるのは(3)のみであるが、本研究における施工作業用ロボットは人間との安全な接触を保証するため、(1), (2), (7)の危険源の除去を求める。したがって、本質安全設計で言及したように、マニピュレータ用アクチュエータの力および速度の抑制による本質安全化を安全要件とする。これらの抑制は、別途リスク低減のための安全防護手段で実現することも可能であるが、その手段の欠陥により事故に至る恐れがある。本質安全アクチュエータは、接触がリスクを生じない構造として危険源を除去できる。

一方、移動機構用アクチュエータについては、本体重量を考慮すると(7)の削減は難しいため、活動4以降のリスク評価活動に委ねる。その結果、移動機構が人間と接触する前にセンサで検知して、ブレーキによって停止する機能を持つことが安全要件となる。これは無人搬送車の安全システムが適用される。このように、人間が危険源に暴露されて生じるリスクの低減を図ることを機能的安全と呼び、低減されたリスクの受容の判断は、センサやブレーキの安全性能に依存する。

また、残りの危険源(5), (6), (9)については、駆動源を除去できないため活動5, 6により対処し、危険源(4), (8)は可能な限り活動3または5により対処する。

以上の危険源除去とリスク低減による設計手順は、残

Table 2 Safety requirements for construction working robot elements.
施工作業用ロボット構成要素の安全要件

構成要素	安全要件
アクチュエータ (マニピュレータ)	本質安全化
ブレーキ (移動機構)	無励磁作動型
クラッチ (移動機構)	無励磁解放型
障害物検知センサ (非接触式)	安全確認型
障害物検知センサ (接触式)	安全確認型

存リスクが受容されるまで繰り返されるが、受容の程度はロボットのクラスにより影響を受ける可能性があり、それは別途検討を要する。

今回の施工作業用ロボットは、基本的にマニピュレータ部はクラス3、移動機構部はクラス4aのロボット形態である。クラス3のロボット教示作業あるいはマニュアル操作は、訓練、教育を受けた教示者が行う必要があるが、誰にでも安全を保証できる共存型ロボットの実現のためには、クラス4bに適應できるためのロボット要素、機構が必須である。本研究では、第5章の「建設用ロボットの安全制御技術に関する検討委員会」における検討結果を受けて、クラス4bに該当する施工作業用ロボット開発のために、主要危険源(1), (2)に対処するロボット構成要素を取り上げた。それらの安全要件をTable 2にまとめる。

4.2 試作ロボットシステム

本研究で対象とする施工作業用ロボットは、上記の機能的安全と本質安全の両方を指向し、実環境下で供用できるスケールを予定している。しかし、本質安全化アクチュエータの採用は全く新しいアプローチであり、また、実用化もされていないため、実験用に縮小スケールのロボットシステムを構成し、アクチュエータやセンサ等の要素技術の開発を先行させることにした。

要素試作の中心は、本質安全化マニピュレータと安全確認型障害物 (人間) 検知センサであるため、移動機構自体は既存の装置を利用した。移動機構のベースは、伴走キャリア「トランスポニー」((株) ニコン製)であり、元々駅構内のゴミ運搬用に開発された無軌道式バッテリー搬送車である。これは、操作者が操作レバーを持って歩くと、その速度と方向に合わせて追従走行 (最大4 km/h) する機能が特徴であり、30度までの階段の昇降ができるようにクローラ走行も可能なものである。

この移動機構の荷台上に3自由度 (旋回1, 屈曲2)

マニピュレータを設置し、さらに、障害物検知用超音波センサと軟接触式バンパースイッチを付加して施工作業用ロボットを模擬させた。なお、操作レバーによるマニュアル走行に加えて、自律走行させるために外部コンピュータから走行制御プログラムを実行できるようにした。

Fig. 3 に試作したロボットシステムの構成を、Table 3 にシステム要素の仕様を示す。マニピュレータは、本質安全アクチュエータを屈曲軸 2 に、バランス制御アクチュエータ¹⁴⁾を屈曲軸 1 に組み込んだ。障害物（人間を含む）検知センサは、台車に装備されている非接触式（反射型光線センサ）センサを超音波センサに交換し、接触式バンパ（テープスイッチ）を軟接触式バンパ（スイッチ）に換装した。

イネーブル装置は、台車をマニュアル操作するために、これを操作者が押している間のみ走行を許可するスイッチであり、元々操作レバーに組み込まれている。ただし、最近では、産業用ロボットの教示ペンダントのイネーブル装置として、従来のオン-オフの 2 位置スイッチよりもオフ-オン-オフの 3 位置スイッチが強制されている¹²⁾。そこで、半押しオン時のみ許可信号を出力し、オフ（押していないか押し込んだ状態）では許可信号を出力しない 3 位置スイッチ¹⁵⁾に換装した。Fig. 4 はスイッチの動作と操作状況を表しており、このスイッチの採用により、マニュアル運転時の操作ミスの低減が期待できる。

ロボットビジョンシステムは、超音波センサの検知範囲より遠距離にある障害物を早期に検知するものであり、障害物と作業対象物、人間の識別を目指している。また、自律走行のガイドを与えるための標識認識を検討している。

なお、移動機構用ブレーキは台車に装備されている無励磁作動型電磁ブレーキを利用した。

試作ロボットシステムに適用したこれらの要素は、改めて人間とロボットの共存関係から分類することができる。つまり、物理的に隔離される状況では危険なロボットは自由に振る舞えるが、近接してゆくと、危険な接触前にロボットが停止するよう機能的に安全を確保しなければならない。さらに、より近接して人間がロボット近傍でマニュアル運転させる場合にも、やはり機能的に人間が接触を回避することで安全を確保する。そして、接触状態では、アクチュエータの本質安全化こそが唯一の安全確保を実現する。このように、人間とロボットがいかなる共存状態であっても、機能的にあるいは本質的に安全を確保できることが共存型ロボットの必要条件と言えよう。試作ロボットシステムの各要素の位置付けは Table 4 で表現される。

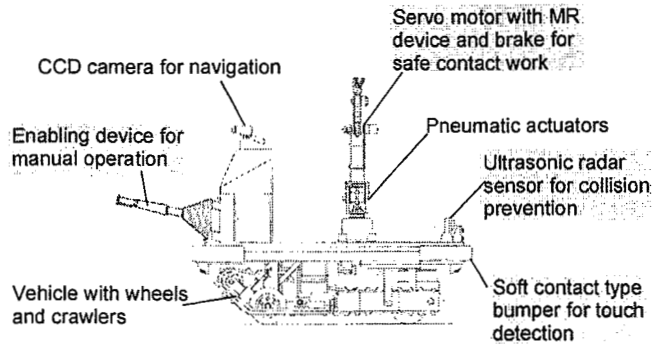
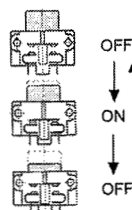


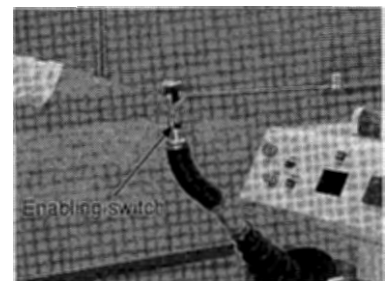
Fig. 3 Prototype robot with safety function.
試作ロボットシステム

Table 3 Main elements specifications of prototype robot.
試作ロボットシステムの主要要素の仕様

構成要素	仕様
マニピュレータ	全長 1m 可搬重量 0.5 kgf 回転速度 各軸最大 0.52 rad/s 旋回軸：空気圧ロータリーシリンダ+電磁ブレーキ 屈曲軸 1：空気圧複動シリンダ+電磁ブレーキ+バランス用ロードセル 屈曲軸 2：AC サーボモータ+ハーモニックドライブギア+電磁ブレーキ+力出力制限機構（MR デバイス） 角度検出用エンコーダ（各軸）
超音波センサ	動作確認用反射板付き サイクルチェック 0.1s ウィンドウコンパレータ+AND ゲートによるフェールセーフ信号処理
軟接触式バンパ	圧縮距離 450 mm 積層リングバネによる緩衝機構 感圧導電ゴムセンサ内蔵 フェールセーフなレベル検定
イネーブル装置	3 位置スイッチを操作レバーに内蔵
ロボットビジョンシステム	標識認識による走行ガイド（自律走行時） 障害物認識



Example of 3 position mode of enabling switch for teaching pendant



Manual operation lever with enabling switch for prototype robot

Fig. 4 Three-position mode of enabling switch for manual operation lever.
操作レバーに用いる 3 位置イネーブルスイッチ

Table 4 Category of ensuring safety according to human-robot coexistence.
共存状態による安全確保のカテゴリ

Category	Category of contact	Device used in the system
Isolating (Physically)	Physically avoiding contact with human	—
Isolating (Functionally)	Stopping robot before contact with human	Ultrasonic radar sensor, Photoelectric sensor, Bumper switch
Evasion by human	Evasion from contact	Enable Switch
Unconditioned	Safe contact	Force Limiting Mechanism using Magneto-Rheological Fluid

5. 階層化障害物検知センサの開発

5.1 センサ階層化に基づく走行制御

自動走行中の移動ロボットの停止パターンは、無人搬送車と同様に、定常高速走行時から一旦低速走行へ減速した後、完全停止することが基本である。高速からの急停止は強力且不変の制動能力が求められるために現実的でなく、また、ロボット自体の転倒や搭載物の放出の危険性があるため、試作ロボットシステムでは、高速度から低速度への切替は超音波センサの障害物存在検知信号によって行い、低速度からの停止は軟接触式バンパスイッチの接触検知信号によって行われる。一般に、高速度からの減速には回生ブレーキ等の高応答の装置を用いて、低速度からの制動と停止保持には無励磁型電磁ブレーキを用いる。

このようなセンサ・スイッチを階層化して利用すると、試作ロボットの速度切替制御は Fig. 5 に示すような走行制御インターロックの形態として実現できる。ただし、センサやスイッチ、コントローラは危険側への誤り、すなわち人間がセンサ・スイッチの検知空間に存在するにもかかわらず、誤って「不在」と認識・通報することは許されない。ロボット停止を確実にする最後の切り札であるバンパスイッチが安全確認型であるのは当然のことであるが、超音波センサも安全確認型でなければ、電磁ブレーキは高速時からでも所定の時間で停止できる制動能力が必要となる。しかし、現実には、ロボット本体の重量に見合った能力の無励磁型電磁ブレーキの装着はほとんど不可能であるため、安全確認型の超音波センサは必須と考えられる。

なお、Fig. 5 では、人間がロボットのバンパに接触しても、極低速の行動（これは停止に至る減速過程

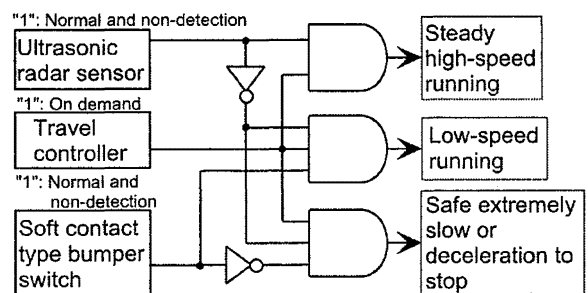


Fig. 5 Hierarchized interlocking configuration for travel control.
走行制御の階層化インターロック

を含む) が許容されている。これは、特定の操作者がイネーブル装置付きの操作レバーによってマニュアル走行させる際、ロボットに接触しながらのロボット動作を認める特別な場合である。ロボットのクラスは3となるが、ロボットが人間に接触する際の許容速度については、別途検討が必要である。

また、走行速度が切り替わった後、実際にその速度を守って走行しているかどうかの速度監視の機構にも言及しておく。このような機能のフェールセーフ化は難しいため、ダイバシティ・コントローラ¹⁷⁾を導入して、機能的に速度監視機構の安全水準を向上させることを試みる。このコントローラは、3つの異なるプロセッサが異なるオペレーティングシステム上で同じ内容のジョブを実行し、その結果が3つ同じ場合のみ外部出力するという仕組みを持つ。強力な自己診断機能と共通故障を極力避けるダイバシティ化によって、このコントローラは現在考え得る最高の安全レベルを達成する。速度監視用には、市販の近接センサを走行車輪に2カ所設置することにより、多重化して安全水準を向上できる。

5.2 超音波センサの構成

超音波レーダセンサは、非接触の障害物検知手段として広く利用されているが、反射型の形態故に故障時に障害物を検知できない恐れがある。

そこで、ダイナミックな自己診断機能を設けた超音波センサ¹⁶⁾を用いれば、センサ正常時でかつ障害物が存在しない場合にのみ検知空間が正常と判断して信号出力し、超音波センサ故障時あるいは障害物検知時は、信号出力オフとなる特性を得る。センサ出力信号オフ時は、直ちにロボットの走行速度は低速度へ移行する。このセンサの特徴は、トランスデューサ内に設けた自己診断用反射板に周期的に(0.1s毎)超音波を反射させて、その反射の受信によって、その後の0.1s間はセンサの正常性を保証することである。

Fig. 6は、フェールセーフなゲート素子¹⁸⁾1, 2を用いて受信信号のレベル検定と論理積演算を行う超音波センサの概略構成を示している。反射板からの受信信号があって、次いで検知範囲内のフェールセーフ否定受信信号、検知範囲外の検知無効信号が継続して出力されていれば、正常かつ障害物なしを意味するオン信号が出力され、安全確認型が達成される。

なお、前出のダイバシティ・コントローラを用いれば、市販の危険検出型超音波センサと赤外線センサの併用による多様化・多重化が容易になり、安全水準の向上と人間検知性能の信頼性向上とが期待できる。

5.3 軟接触式バンパースイッチの構成

バンパースイッチも、故障時は必ずオフ出力となる特性が要求される。通常のバンパースイッチは、人間の接触によって機械的な接点が開閉するという、いわゆるノーマルオープン型タッチスイッチの構造を持つため、この要求には適さない。

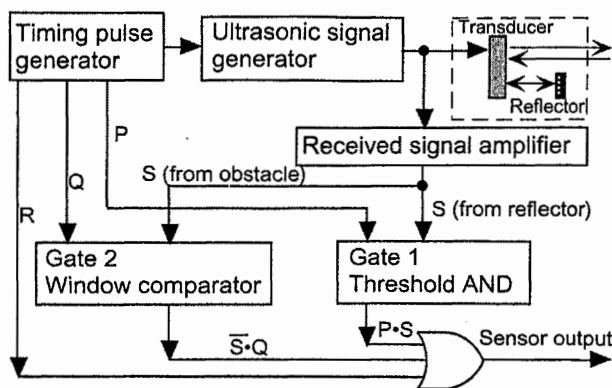


Fig. 6 Ultrasonic radar sensor with dynamic self-diagnosis function.
自己診断機能付き超音波センサの構成

そこで、新たに柔軟歪みセンサ¹⁹⁾を利用してフェールセーフなバンパースイッチを構成する。このセンサは、Fig. 7に示すように、シリコンゴムの表面に導電性塗料を塗布したものであり、伸張させるとその抵抗値が変化するという特性を有する。このセンサを、リング

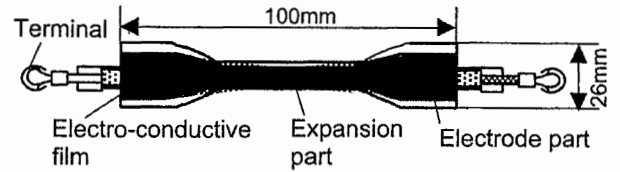


Fig. 7 Flexible strain element for soft contact type bumper switch.
軟接触式バンパースイッチ用柔軟歪みセンサの構造

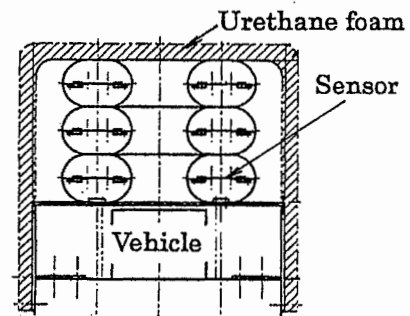


Fig. 8 Configuration of front bumper with six units for vehicle.
6つのユニットを持つ前方バンパ

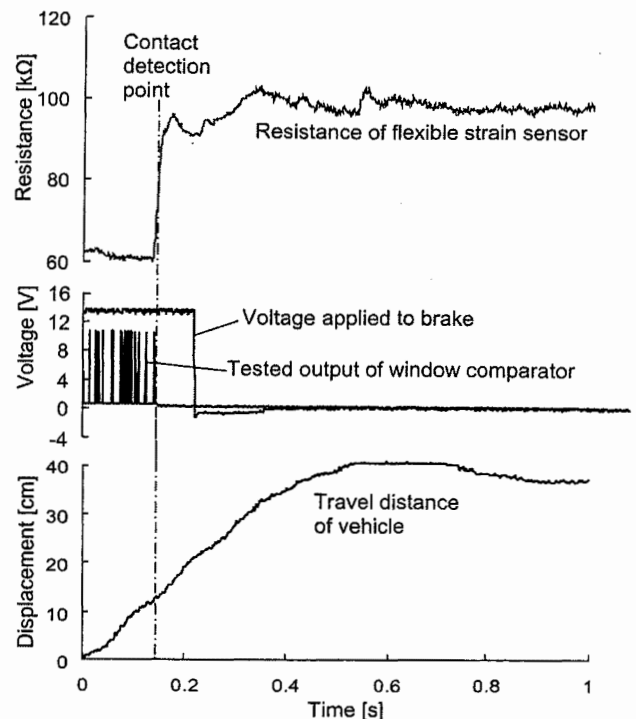


Fig. 9 Contact detection characteristic and test result.
接触検知特性と試験結果

状の板バネを内側から引っ張る形で貼りつけたものを一つのユニットとして、これを多層に重ねることによって、緩衝性のあるバンパの形状とした (Fig. 8)。ユニット内のセンサは常にプリテンションがかかった状態であるため、このときの抵抗値をフェールセーフウインドウ・コンパレータでレベル検定すれば、センサ自体の正常性が確認できる。

Fig. 9 は、バンパを取り付けた試作ロボットを走行させて、実際に人間に接触するとセンサ出力信号がオフとなって、ロボットの無励磁型ブレーキにより急制動した結果である。人間の接触によりセンサの抵抗値が増大し、抵抗値がしきい値を超えると検定出力がオフとなってブレーキを効かせていることが分かる。なお、ロボットが接触後完全に停止するまでの間に、人体 (臍) が受ける力は最大 34N であり、これは人間側から受容される値と判断した。

6. 本質安全アクチュエータシステムの開発

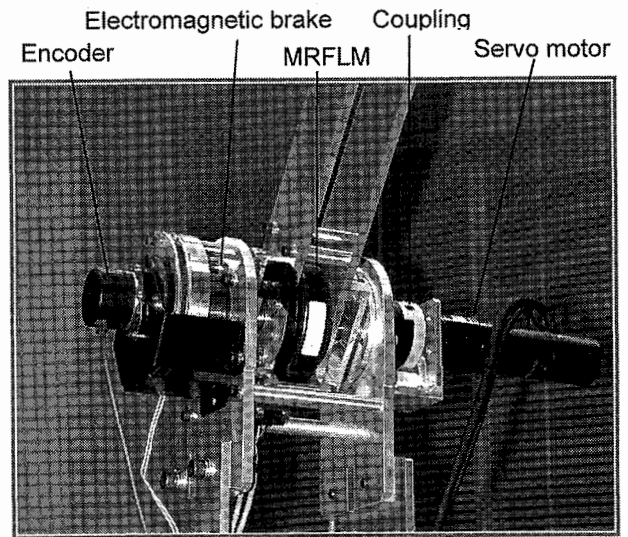
6.1 MR 流体を用いた力出力制限機構

本来、ロボットは人間と安全な距離だけ離れて作業を行う。しかし、ロボットが人間に接触する場合であっても、少なくとも、人体へ許容限界を越える衝撃や圧迫を与えることは許されない。そのためには、ロボットが人間との接触時に安全な力出力を保証する必要がある。

試作ロボットのマニピュレータでは、外力を検出してアクチュエータの力出力を動的に制御する機能的手法ではなく、本質安全アクチュエータによる力出力の制限手法を適用する。機能的手法では、制御の失敗によって過大な力出力を及ぼす可能性があったり、バネ等を用いるフォースリミッターでは、マニピュレータと人間の位置関係に応じて能動的に力の制限を変えることができないからである。

そこで、3 自由度のマニピュレータの屈曲軸 2 の関節に、可変ビンガム流体を用いた力出力制限機構を挿入し (Fig. 10)、力出力を本質的に低減することを試みる。可変ビンガム流体とは、外部信号によりビンガム流体の降伏せん断応力を制御できる流体であり、電界によって制御される ER 流体²⁰⁾と磁界によって制御される MR 流体²¹⁾が知られているが、ここでは Fig. 11 に示す MR 流体を利用した機構 (Magnet-Rheological Force Limiting Mechanism: 以下、単に MRFLM と記す) を例に説明する。

MRFLM 内部のコイルを励磁すると、発生する磁界強度に応じてトルクがアームに伝達される。励磁電流を i 、入力軸の角速度を ω 、出力軸 (アーム) の回転



Elbow joint

Fig. 10 Elbow joint mechanism with inherently safe actuator.

本質安全アクチュエータを持つ肘屈曲部溝

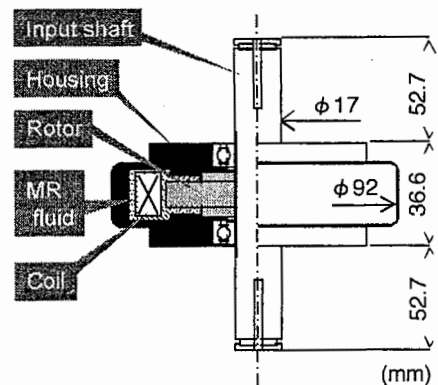


Fig. 11 Magnet-Rheological Fluid Limiting Mechanism (MRFLM).

MR 流体を利用した力出力制限機構 (MRFLM)

角度を θ 、比例係数を α とすると、MRFLM の伝達できる最大トルク τ_{MR} は次式で表される。

$$\tau_{MR} = \alpha \cdot i \cdot \frac{\omega - \dot{\theta}}{|\omega - \dot{\theta}|} \quad (1)$$

ただし、 $(\omega - \dot{\theta})/|\omega - \dot{\theta}|$ は伝達されるトルクの方角を表す。一般的な粘性流体を用いたトルク伝達では、伝達可能な最大トルクは入出力部間の相対回転速度差の影響を受ける。一方、MRFLM の伝達できる最大トルク τ_{MR} は、相対回転速度差の大きさと完全に独立であり、理想的固体摩擦クラッチモデルに極めて類似する。MRFLM に利用した Load 社製 MR ブレーキの特性を Fig. 12 に示す。

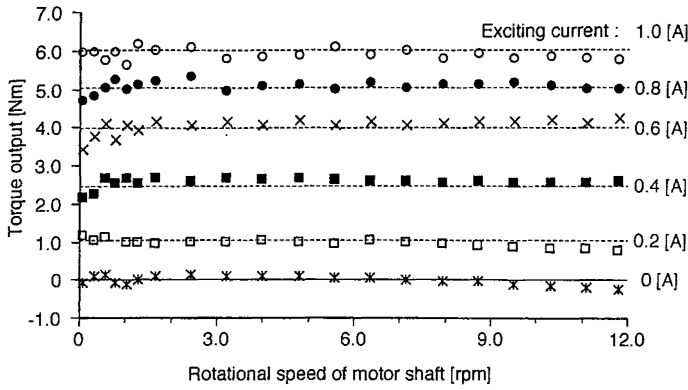


Fig. 12 Steady-state torque characteristics of MRFLM.
MRFLM の定常トルク特性

6.2 力出力制限機構による安全な接触作業

MRFLM へ与える電流を制御することにより、アクチュエータは様々な機能を実現することができる。すなわち、

- 1) 過大な力出力の制限、
- 2) 外部からの力伝達の制限、
- 3) 軸関節の固定、
- 4) 過大な衝撃力の制限

である。Fig. 12 の特性から明らかなように、MRFLM へ与える電流を抑えれば (1) の状態となり、逆に増やせば (2) の状態、すなわち強固なサーボによる外乱の抑制が実現する。また、アクチュエータが低トルク、低剛性のものか、MRFLM がアクチュエータから切り離される場合は、電流増加により (3) のように関節の剛性を高めることができる。さらに、マニピュレータと人間との衝突時に電流を抑えることにより、衝突時のアクチュエータの等価慣性モーメントの影響を遮断し、(4) を実現する。なお、(1) の機能によりアクチュエータからの伝達トルクを制限すると、人間との接触によりマニピュレータは正規の動作から逸脱することがあるが、MRFLM がアクチュエータの安全な力出力を保証していれば、人間がマニピュレータと接触中はアクチュエータ制御を緊急停止させる必要は必ずしもない。

ただし、MRFLM の電流制御手段の故障やアーム制御システムの故障を考慮して、これらの故障が生じたときは電流制御を速やかに停止し、マニピュレータの姿勢を MRFLM 以外の手段で固定しなければならない。そのためにも、無励磁型電磁ブレーキを関節に組み込んでおく必要がある。このブレーキをより積極的に (3) と (4) の用途に適用することも可能であるが、(4) の用途への使用はブレーキの発熱等の問題が生じるため、本研究では (3) の用途に限ってブレーキを利用して、その他の機能を MRFLM で実現することとする。

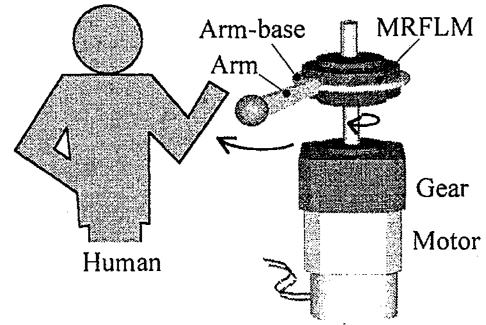


Fig. 13 1 d.o.f. robot arm model.
1 自由度ロボットアームモデル

6.3 衝撃力低減手法

前節の (4) の機能を検証するために、Fig. 13 に示すような 1 自由度ロボットアームモデルを考え、高減速比を持つサーボモータの出力軸とアームとの間に MRFLM を挿入した。また、ここでは、最悪の衝突の状況として、①人間は硬い壁で拘束されて静止している、②一定角速度で回転していたアームが人体に直角に衝突する、③一度の衝突で両者の相対速度はゼロになる、という条件を設ける。

アームが一定の角速度 $\dot{\theta}_i$ で回転しているとき、系の運動エネルギーは次式で与えられる。

$$E = \frac{1}{2}(\gamma^2 I_m + I_g + I_a)\dot{\theta}_i^2 \quad (2)$$

ここに、 I_m , I_g , I_a は、それぞれ、モータのロータ、ギヤと MRFLM のロータ、アームとアーム基部の慣性モーメントであり、 γ は減速比である。ここで想定している最悪の衝突状況において衝撃力が最も大きくなるときは、衝突後の最初のピークのときである。このとき、アームのもっていた運動エネルギーは、すべて人体の表面組織に吸収されている。したがって、安全な衝突の条件は、衝撃力の許容上限値を f_{ac} とすると、次式で表される。

$$\int f(x_h) dx_h = \frac{1}{2}(\gamma^2 I_m + I_g + I_a)\dot{\theta}_i^2 \quad (3)$$

$$\forall x_h; f(x_h) < f_{ac}$$

ここで、 x_h は人体の変位 (アームの食い込み量)、 $f(x_h)$ は x_h の関数として表した衝撃力である。

MRFLM は、アクチュエータの制動に要する力を制限するものであり、(1) 式および Fig. 12 の特性から次のエネルギーの収支関係が成立する。

$$\frac{1}{2}(\gamma^2 I_m + I_g)\dot{\theta}_i^2 = \tau_{MR} \int_0^{t_a} (\omega - \dot{\theta}) dt \quad (4)$$

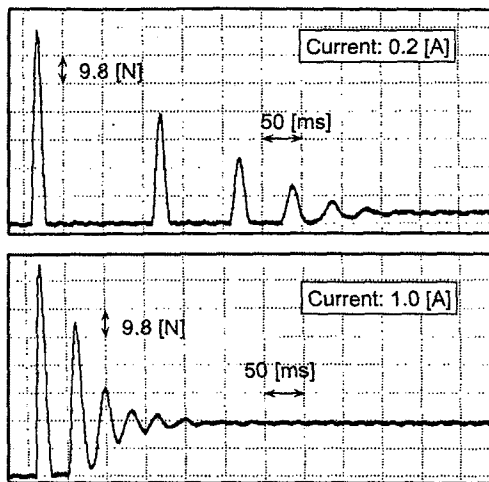


Fig. 14 Comparison of impact at 0.2A with at 1.0A.
0.2A と 1.0A の印加時の衝撃力の比較

ここに、 t_a は減速機を含むモータの制動に要する時間であり、MRFLM の伝達トルク T_{MR} を変化させることで任意に選択できる。特に、故障で MRFLM によってトルク T_{MR} が発生しないとき、モータの停止はギヤの内部摩擦のみによるため長時間を要するが、人間に伝達する力はむしろ小さくなって安全側となる。

Fig. 14 は、本手法を適用した実験結果の一例である。実験では、アーム先端に力センサを取り付け、アームを角速度 1.0 rad/s で一定回転させ、人体の代わりに硬質ゴム片に突き当て、そのときの衝撃力を観測した。アームの長さは 300 mm、アームの質量は 1.2 kg、ギヤの減速比は 1/200、モータの等価慣性モーメントは 2.4 kgm² である。また、MRFLM の励磁電流は衝突の間一定とし、0.2A と 1.0A の 2 種類を比較した。衝撃力の第一主波のピークは、アームの質量の影響であり、モータ・減速機は急停止を要さないため、これらによる影響は力の定常特性には現われるが、衝突にはほとんど現われていないことが分かる。すなわち、MRFLM が力の限界に対するヒューズ効果を呈しており、このことから、本方式によってアクチュエータの本質安全性が達成されたと判断できる。

7. まとめ

今回は、人間と共存可能な施工作业用ロボットを実現するために、本質安全を優先する設計手順を明らかにして、これに基づいたロボット要素の開発を行った。試作したロボットシステムには、安全確認型障害物（人間）検知用センサと、本質安全アクチュエータを含めたマニピュレータを搭載して、それらの制御方法や評価について考察した。しかし、ロボットと人間との衝突に対して、衝突速度や人間にかかる衝撃力がどこま

で許容されるかという判断指標は明確にされていない。この場合、受容の判断を人間に委ねることが必要不可欠であると考えられ、実際のロボットシステムの設計に当たっては、合理的な評価指標に基づいた検討が必要となろう。

今後は、今回提案したシステムと制御手段を、実規模施工作业用ロボットに適用するとともに、機能的なビジョンシステムと安全制御システムの構築を進める予定である。

参考文献

- 1) 養安豊彦, 建設ロボットの現状と導入効果, ロボット, No. 103, pp. 17-21 (1995).
- 2) 酒向信一, 藤岡 晃他, テレアースワークシステム (遠隔土工システム) の開発と実施, 第 12 回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集, pp. 201-208 (1994).
- 3) 古屋則之他, 高層 RC 造建物自動化建設システム「BIG CANOPY」の開発と実用化, 大林組技術研究所報, No. 55, pp. 29-38 (1997).
- 4) 長谷川幸男編, 建設作業のロボット化, 工業調査会 (1999).
- 5) ISO10218, Manipulating industrial robots -safety (1992).
- 6) ISO/CD12100, Safety of machinery -Basic concepts, general principles for design (1998).
- 7) 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).
- 8) ISO/IEC Guide51, Safety aspects -Guidelines for their inclusion in standards (1999).
- 9) 川口邦供, 国際規格集 ISO/TR12100:1992「機械類の安全性, 基本概念, 設計のための一般原則」, 安全, Vol. 49, No. 7 (1998).
- 10) 向殿政男, 設計によるリスク低減 (制御システムにおける安全確保原則), 第 28 回安全工学シンポジウム講演予稿集, pp. 412 (1998).
- 11) 労働省告示第 51 号, 労働安全衛生規則第 36 条第 31 号の規定に基づき労働大臣が定める機械を定める告示 (1983).
- 12) ISO14121, Safety of machinery - Principles for risk assessment (1999).
- 13) ANSI/RIA R15.06-1999, American National Standard for Industrial Robot and Robot System -Safety Requirements (1999).
- 14) 杉本 旭, 池田博康, 重量物組立支援のための重量物

- 搬送システムの開発, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-No.16, pp. 11-21 (1996).
- 15) 福井孝男他, 操作における安全性を追求した3ポジションイネーブルスイッチの開発, 第14回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 659-664 (1998).
- 16) N. Sugimoto, H. Ikeda, The construction of a radar-type safety device to complement human vision in safety prediction, *ERGONOMICS*, Vol. 33, No. 6, pp. 735-762 (1990).
- 17) Guide to Machinery Safety 6th Edition, Pilz Automation Technology, pp. 145-182(1999).
- 18) M. Kato, M. Sakai, et al., LSI Implementation and Safety Verification of Window Comparator Used in Fail-Safe Multiple-Valued Logic Operation, *IEICE TRANS. Electron*, Vol. E76-C, No. 3 (1993).
- 19) 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).
- 20) 小山清人監, ER流体の開発と応用, シーエムシー (1994).
- 21) J.D. Carlson, et al., Commercial magneto-rheological fluid devices, *Proc. Of the 5th Int. Conf. on ER fluids and MR suspensions* (1995).

(平成12年1月14日受理)