

2. 人間協調型ロボットの本質的安全設計手法と安全設計指標の提案*

池田博康**, 齋藤 剛**

2. Proposal of Inherently Safe Design Method and Safe Design Indexes for Human-collaborative Robots*

by Hiroyasu IKEDA** and Tsuyoshi SAITO**

Abstract; Recently, there has been a tendency for robots having no guard but a moving mechanism to approach humans and for humans to positively utilize the abilities of robots. Such coexistent and collaborative relation between humans and robots is expected to have demand not only in industrial fields but also in service fields. However, while they are implementing their work, it is assumed that such new-mode human-collaborative robots contact and dynamically work on human bodies. Due to this assumption, the rules of isolation and the rules of stop, which have been regarded as the preconditions of the safety securement for workers when they are working with conventional-mode industrial robots, are no longer applicable. As a result, the safety securement for humans is one of the most important problems with their practical application. Particularly, there is no definite index of the relation between humans and robots, such as how much force output should be permitted to a robot according to the degree of contact required in the course of implementing the target work.

In the situation in which humans and robots work together by collaborating with each other, it is impossible to avoid the physical contact and the interaction of force between robots and humans. Even if a robot in motion contacts a human, the robot is not always requested to stop. The situation in which the human receives the excessive impact strength caused by collision and subsequent excessive pinching force may be regarded as a dangerous event. Since it cannot count on the robot for stopping its operation or on the human for avoiding accidents to prevent disasters, it is necessary to reduce the robot force conveyed to the human to be within the allowable range.

In this study, the authors propose a pain tolerance as an index for examining the specifications of human-collaborative robots from the human side, and try to define the force output characteristics of robot actuators based on this pain tolerance. The authors also examine the maximum allowable deformation of skin, which is another means of expression for the pain tolerance, and discuss the braking characteristics of robots as well.

As the index for examining the specifications of human-collaborative robots from the human side, the authors propose the pain tolerance as the dimension of force and the maximum deformation, define the force output characteristics of the actuator from the former and the braking characteristics of the actuator from the latter, and examine the safety design strategy for human-collaborative robot. The force output characteristics of the robot actuator are defined for each of 3 stages to restraint it under the pain tolerance of 57.7N and the mode of inching operation is selected to limit the overrun of the robot arm to the maximum allowable deformation.

Keywords;Robotics, Human-robot collaboration, Human-machine cooperation, Inherent safety, Safe design, Risk reduction

* 本研究の一部は、SIAS2005 (2005年9月)⁶⁾ で発表した。

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

1. はじめに

近年、人間とロボットとの物理的共存／協調が、製造分野のみならず、サービス分野などで強く求められている。このような非製造分野のロボット産業の需要は、2010年に約1.8兆円になると推計されているが、人間との協調作業を行うロボットは、如何に人間の安全確保を行うかが実用化への最大の課題となっている。このような人間協調型ロボットは、従来の産業用ロボットとは異なり、ロボットを人間から隔離することは不可能であるため、人間との安全な接触が求められるが、それが本質的安全として技術的に保証できないため、現実には適用事例は極めて限定されている。

一方、国際的整合化を目的として機械安全規格の体系化が進められており、設計で考慮すべき多くの安全原則がISO 12100-2 (JIS B 9700-2²⁾) で示されている。機械設備は、これらの設計原則に基づいて、「安全」と認められるまでリスク低減を繰り返すことが要求され、3ステップメソッド³⁾により、本質的安全設計、安全防護、使用上の情報提供という3段階でリスク低減を実施しなければならない。産業用ロボットでは、個別規格⁴⁾によりリスク低減方策が具体的に規定されているが、人間協調型ロボットにこの規格を適用できないため、改めて上記設計原則に従ってリスク低減を実施しなければならない。しかし、本質的安全による「安全」の判断が明確でないため、リスク低減活動で最初に実施すべき本質的安全設計が具体的に規定できない。

そこで、本研究では、人間協調型ロボットの本質的安全設計に当たって、上記の安全技術と安全規格上の問題を解決する方法について検討を加える。そのため、人間協調型ロボットの危険源除去に基づく本質的安全を展開するための安全確認の原理について言及し、ロボットアームが空間の正常性確認に基づいて動作出来ることを示す。さらに、ロボットアームが人間に接触するとき、この接触自体に「安全」の判断を求めるため、人体表面の柔軟構造による予防安全空間を考える。そして、この空間の限界を定めるために、人体への機械刺激に対する痛覚耐性に着目して、人間が受容可能な最大の力と変位を痛覚耐性値として調べる。続いて、ロボットアームの本質的安全を実現する空間条件を明らかにした上で、痛覚耐性値を本質的安全設計の指標として利用することにより、ロボットアームのアクチュエータの力出力特性と制動特性が規定できることを示す。

2. 痛覚耐性値に基づく本質的安全の判断

2.1 危険源除去による本質的安全

新しい形態である人間協調型ロボットであっても、機械の安全設計原則に基づいて設計され、本質的安全設計を最優先で検討すべきである。本質的安全設計とは、危険源を除去するか、または、安全防護物を使用せずに危険源に関連するリスクを低減するかのいずれかのために設計段階で組み込まれた機械設備上の保護方策を言う³⁾。これら2つの方策の内、より「本質的」なものは危険源の除去であり、本研究における本質的安全の実現は、可能な限りリスクを生じない条件で危険源を除去することをあくまでも優先して指向する。

機械安全規格³⁾で例示される機械的危険源の除去あるいは低減の対象をTable 1に示す。人間と協調作業が可能なロボットの危険源とは、主に衝突や挟まれる危険源となるが、これは動作するロボットアーム自体であるためこの危険源除去とはロボットの本質を失う。そこで、ロボットアームの危険源を物理的特性(力と速度)に置き換えて考える。

安全方策として力や速度の制限機構を設ければ、これらの欠陥により事故に至ることになるが、接触がリスクを発生しない構造とすることにより、これら危険源を除去できれば、危険状態は生成されず、事故には至らない。すなわち、安全な協調作業の実現のために人間とロボットとの接触に安全の判断を求める限り、ロボットの機械的出力(力と速度)が人間に出力されて生ずる危害を軽減して、「受容」の判断を人間に委ねるという宿命を持つ。

2.2 本質的安全の判断指標

国際規格における人間工学原則で示されるよう

Table 1 Risk reduction by design based on ISO 12100-1.
ISO12100-1における設計によるリスク低減

Mechanical hazards	Risk reduction actions
•Crushing	•Avoiding sharp edges, etc.
•Shearing	•Limitation of actuating force
•Cutting or severing	•Limitation of mass and/or velocity
•Entanglement	•Observing ergonomic principles
•Drawing-in or trapping	•Applying safety principles for control systems
•Impact	•Applying principles of positive mechanical action
•Stabbing or puncture	•
•Friction or abrasion	•
•High pressure fluid ejection	

に、人間が危険源に暴露された状態で災害を防止するためには、人体の物理的特性（身体寸法、動作速度、反応速度等）を考慮して安全であることの判断を求めており、既にガードの寸法⁴⁾、操作装置の安全距離⁵⁾において人体の物理的特性が計測されて規格化がなされている。一方、工学的立場から機械的出力に対する本質的安全の判断目安として、動力ガードの操作力及び運動エネルギーの上限値が国際機械安全規格⁶⁾で規定されており、保護機能付きのガードでは操作力150N、運動エネルギー10Jを超えないことが要求されている。しかし、これらの値は、人体のどの部位にどのような条件で受容されるものか明確にされておらず、そのままロボットへ適用する根拠が希薄である。

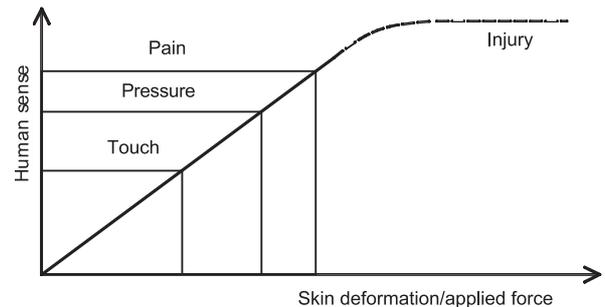
人間協調型ロボットの機械的出力に対して、本質的に安全と保証できるのは、あくまでも人間が「受容」の判断を下した結果が普遍的と認識され、なおかつ、定量的な指標として表現できる場合である。一般に、外部からの機械的刺激に対して人間が抱く感情は、当然、環境や個人の経験や価値観などによって大きく異なるが、本研究では、製品としての人間協調型ロボットが成立する前提条件として、その機械的刺激の評価に必ず社会的に受容可能なレベルが存在すると仮定する。すなわち、このようなロボットの利便性を享受する利用者の大多数が、ロボットとの接触の際の機械的刺激を、ごく日常的なものとして無視するか、生命の危険を感じる恐怖として忌避するかの境界が、ロボット側で抽出可能な物理量として明確に決定できるという考え方に立脚する。

2.3 痛覚耐性に基づく判断指標の採用

ロボットの機械的出力（力と速度）が人体に及ぶときの受容レベルを定量的に評価する例として、近年、ロボットの接近速度や加速度に起因する恐怖心を評価するもの⁷⁾や、脳震盪発生限界に十分な安全率を加味して衝撃力を評価するもの⁸⁾などが提案されている。

また、著者らは、傷害の実質的手前の段階で生じる不快な感情である「痛み」が感じられるまでを耐性限界とし、これを押しつけ力によって痛覚耐性値として表すことを提案している^{9), 10)}。これは、人体表面に機械刺激が与えられる際の人間の体性感覚は、Fig.1に示すように、加圧刺激量に応じて（接）触覚、圧（迫）覚、痛覚と変化するが、痛覚が人体組織のダメージを事前に察知する最後の感覚と見なせるためである。さらに、痛覚の形成に關与する傷

Fig. 1 Change of human somatic sensation against mechanical stimulus.
機械的刺激に対する体性感覚の変化



害受容器の分布が体性感覚受容器の中で最も密である¹¹⁾ことや、痛覚が個人差の少ない安定した感覚であること¹²⁾、繰り返し刺激に対する順応もほとんどないこと¹³⁾などの理由から、痛覚耐性値がロボットの設計指標として有力と考えた。しかし、これらの知見があらゆる条件下で妥当であるかを検証しておらず、また、この痛覚耐性値はロボット制御と被覆の粘弾性特性の選定¹⁴⁾以外には検討されておらず、ロボットの本質的安全設計に積極的に適用されていなかった。

本研究でも痛覚耐性値に着目して、これが人間協調型ロボットの本質的安全設計のための指標として採用できるか、改めて計測して検討することとした。

2.4 痛覚耐性値の測定と評価

痛覚は、皮膚直下にある表層痛覚と筋等の内部組織にある深部痛覚に分かれるが、今回の測定では人体表面を加圧中にリアルタイムで知覚される表層痛覚を扱う。また、今回対象とする痛覚は、皮下の自由神経終末が感知する2次表在痛¹⁵⁾を規範とするものであり、針で刺したときや熱で受ける1次痛とは区別している。これは、協調型ロボットが人間に接触する状況が、あまり高速でなく、接触面積を持つアームに挟圧されることを想定しているからである。ただし、被験者には痣等の事後の影響がないかは確認する。

痛覚耐性測定の詳細は本報告書の第3章に譲るが、従前の測定の問題点を改善した上で、比較的ロボットアームと接触可能性が高いと予測される人体主要部位へ接触プローブを一定極低速で押し込んでゆく過程のプローブ変位とプローブへの反力を逐次記録する。そして、被験者がプローブの押し込みに対して、耐えられないと判断した時点で緊急退避スイッ

チ (3ポジションイネーブル装置) を操作して、その時点のピーク力を痛覚耐性値とし、併せて、プローブの人体接触地点から緊急退避スイッチを操作するまでに移動したプローブ変位を最大許容変位量¹⁶⁾として記録する。ここで、力の次元である痛覚耐性値とともに最大許容変位量を規定するのは、ロボットアームの持つ運動エネルギーが人体の特性で熱的消散過程に変換される際に、アームの制動力とともに制動距離にも関連するためである。

健康な成人男性9名に対して直径10mm球状接触プローブを用いて測定した結果、比較的ばらつきの少ない値が得られた。13点の人体部位毎の痛覚耐性値と最大許容変位量の各々5パーセントイル値をまとめると、Fig.2に示すようになる。それによると、人体背面や下肢が比較的痛覚耐性値が高く、特に臀部と大腿部は大きな変位量を許容していることが分かる。また、骨に至るまでの皮下組織が薄い部位 (額、脛、手の甲) は数mm程度しか変位を許容しない。ただし、上腕のように皮下組織が厚くても痛覚耐性値が最小 (57.7N) となる場合があり、痛覚耐性値と最大許容変位量との間の相関関係は特に見られないことに注意が必要である。なお、痛覚耐性値57.7Nという値は、接触面の直径が10mm以下で限定された被験者グループという条件下での判断結果であるが、従前の測定結果¹⁰⁾ や実務的経験値として知られている値⁶⁾ と比較しても妥当な値と考えられる。

また、今回の測定では衝突の危険源を想定した衝撃耐性を調べていないが、従前の著者らの研究では、人体特定部位に衝撃を与えた際の衝撃ピーク許容力を衝撃持続時間とその間発生する衝撃力の実効値の関係から痛覚耐性値曲線¹¹⁾ を得ている。これより、

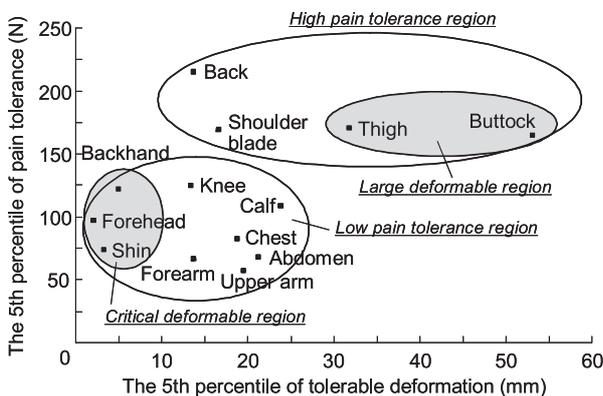


Fig. 2 Measurement result of pain tolerance and tolerable deformation (5th percentile values). 痛覚耐性値と最大許容変位量の測定結果 (5パーセントイル値)

静的挟圧力が持続時間無限大の痛覚耐性曲線の下限值として示されることが分かっている。そのため、今回の測定で得られた痛覚耐性値を、挟まれと衝突の両方の危険源除去の判断として利用可能と判断した。

3. ロボットの本質的安全を実現する準備

3.1 空間の正常性確認

痛覚耐性値が得られたことにより、本研究では本質的安全の実現に向けて危険源除去の方法に議論を集中すべきであるが、それ以前に、人間協調型ロボットが本来具備すべき条件が存在する。ここでは、ロボットの使用条件 (環境) を本質的安全の準備段階と見なし、その要求と実現について例を挙げて検討する。前述したように、ロボットのアクチュエータは力及び速度の出力源であり、よって機械的出力による災害は明らかに力と速度を介して発生すると考えてよい。そこで、まず、機械的出力が速度である場合について、安全作業の原理¹⁷⁾、すなわち危険を伴う機械的出力が安全の確認に基づいて発生するという原則に従って、ロボットアームが進行方向前方を監視しつつ移動することを考える。このような移動に伴う前方監視を空間の正常性確認¹⁸⁾と呼ぶことにする。

ロボットアクチュエータの機械的出力を改めて速度 $u(t) \in \{1,0\}$ とおき、速度ありを論理値1、なし (停止) を論理値0とすれば、不安状態を含む危険状態を表す論理変数 $H_c(t) \in \{1,0\}$ の否定、すなわち予想される安全 $\overline{H_c(t)}$ は空間の正常性確認による進入の許可を表すと考えられ、速度出力は $\overline{H_c(t)}$ に基づいて実行されるから、次式が成り立つ。

$$\overline{H_c(t)} \geq u(t) \quad (1)$$

さて、Fig.3 (a) に示すように、ロボットの動作空間を S_Z とし、これを行動空間と定め、行動空間の周辺に監視空間 Z_H を設け、空間 Z_H における正常性の判断 $\overline{H_c(t)}$ によって行動空間 S_Z の行動が実行されるという関係であるとすれば、空間相互の関係は次の通りである。

$$Z_H \supseteq S_Z \quad (2)$$

ここで、予見できる誤使用状態について、例えば、前方に転落するような溝があるという状況を考える。溝に接近するまでは、空間 Z_H のセンサ監視に基づく正常の判断 ($\overline{H_c(t)}=1$) で移動が実行されている ($u(t)=1$)。監視空間で溝が検出されると、一般

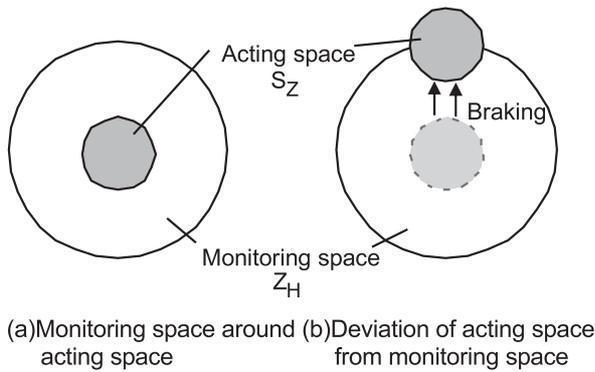


Fig. 3 Acting condition based on space normalcy. 空間の正常性に基づく移動条件

にセンサ出力はすぐに $\overline{H_c(t)}=0$ となるが、機械は急に停止できない。そのため、Fig.3 (b) に示すように、行動空間が監視空間を逸脱して溝に転落することが起こりうる ((2) 式が成立しない)。すなわち、最悪の誤使用の一つは、明らかに $Z_H \subset S_Z$ となる空間によって生ずる。

3.2 ブレーキによる停止条件

Fig.4は、ロボットに通常用いられる負作動（非励磁あるいはノーマルクローズ）型電磁ブレーキとその停止トルク特性の例である。 $\overline{H_c(t)} \rightarrow 0$ が生じたときのロボットアームの運動エネルギー E を $mv^2/2$ (m を質量、 v を速度とする) とし、Fig.4のブレーキを用いるとすれば、監視空間から定まる許容停止距離 x_c との関係で制動距離 x が監視空間を逸脱しない条件は次式で与えられる。

$$x < x_c \quad (3)$$

すなわち、溝への転落を許容しないものとするれば、(3)式の停止条件が保証されなければならない。ブレーキによる運転停止過程は、運動エネルギー $mv^2/2$ を熱的エネルギーに変換する過程として次式で表される。

$$\frac{1}{2}mv^2 = \int f dx = f_c \cdot x \quad (4)$$

この停止過程で動力の供給が遮断されていれば、Fig.4 (b) のような制動力 f_c が一定である機械的ブレーキを使用して制動距離 x が決定される。逆に、(3)式の制動距離 x を約束するために、ブレーキの制動力が一定値を維持する特性でなければならないと考えることもできる。ただし、現実には、環境からの

外力 f_N を考慮して、制動力（及び停止後の静止力） f_c は次式で与えられる。

$$f_c > \frac{mv^2}{2x_c} + f_N \quad (5)$$

安全側となる制動力 f_c は、さらに安全（確認）の原理を適用し、最大質量、最高速度、最大の外力を予測して決定される。ただし、制動力は大きくなる側が必ずしも安全側であるとは限らない。急速な停止は、転倒や把持物放出の危険性があり、そのため、同じ目的で、速度によらずに一定の制動力を生ずるようブレーキの改良がなされてきている。このように、ロボットの運転許可は、単に空間が正常であるというだけでなく、重要な停止条件の保証を与えており、負作動型ブレーキは、力（制動力）及び距離（停止距離）の個々の条件を満たしつつ、運動停止過程を実現する有力な手段であるといえる。

4. 痛覚耐性に基づくロボットの安全設計戦略

4.1 アクチュエータの力出力特性の検討

Fig.2で得られた痛覚耐性値に基づいて、ロボットアームが人体へ接触する際に人体へ及ぼす力出力そのものが危険源と見なされる場合について論じる。すなわち、ロボットアクチュエータの力出力が痛覚耐性値以下であれば安全であると容認される場合を想定する。ただし、最悪の状況を考え、痛覚耐性値測定条件と同じく、人体またはその一部が壁に拘束された状況でロボットアームが接触して挟圧するものとする。

このような条件下でも、アクチュエータが本質的に痛覚耐性値以上の力を出力できない構造ならば安全上の問題はない。しかし、一般に人間と接触を前提とする協調ロボットは、玩具の類を除けば、人間

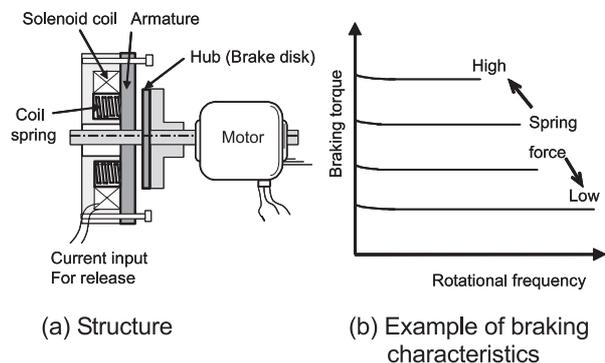


Fig. 4 Magnetic brake of normal-closed type. 負作動型電磁ブレーキ

の体重を支持するなどのある程度の力出力が要求される。現実には、57.7Nしか出力できないアクチュエータは、よほど小型のロボットでない限り、ロボットアーム自体の運動のためには十分な能力とは言えない。また、アクチュエータが能動的に出力してなくても、アーム自重の影響がアクチュエータの見かけの推力を増大させる。特に、アクチュエータに減速機を利用する場合は、アクチュエータの等価慣性モーメントが大変大きくなって定常的な力出力の抑制を非常に困難にする。また、通常はアームの質量にアクチュエータの等価慣性モーメントが含まれるため、実用的なレベルの動作速度が許可される場合は非常に稀である。

壁に固定された人体の一部に質量のあるロボットアームが速度を持って衝突する場合、人体部位によって粘弾性特性が異なるため、同じ運動量の衝突であっても人体部位が受ける衝撃力は異なる。この粘弾性特性により、人体が受けるアクチュエータからの力はFig.5に示すような時間変化を辿る。このようなアクチュエータの力出力特性に対して、全ての時間において動的並びに静的痛覚耐性値を超えないように力出力を制限することが安全設計の目標であり、本研究では本質的手段を優先して以下の段階毎に規定する。

- ①人体接触時のアーム速度の抑制あるいはアーム質量と等価慣性モーメントの分離により、衝撃ピーク力を動的痛覚耐性値以下に下げる。
- ②衝撃ピーク力の低減が①のみでは不十分な場合、アーム緩衝材を付与する。
- ③衝撃ピーク後の挟圧持続期間中の接触力は自重補償分を除いた受動力制御状態とし、接触力を能動的に出力するときは静的痛覚耐性値を超えない。

本来、衝突部位によって衝撃ピーク力の受容レベル（すなわち、動的痛覚耐性値）は異なり、この差異は静的受圧に対する痛覚耐性値の部位毎のばらつきに比べてかなり大きく、実験的に求めることは困難である。動的痛覚耐性について明確な検証が出来ない場合は、前述したように、最も安全側に見積もった値として静的受圧に対する痛覚耐性値を利用できる。

4.2 アクチュエータの力出力抑制手段

段階①の実現は、本質的安全を指向することが優先されるが、これにはアームの持つ運動エネルギーを消散する手段が利用できる。前章で述べた機械的ブレーキが速度の抑制を、機械的クラッチがアクチュエータの等価慣性モーメントを含むアーム質量を

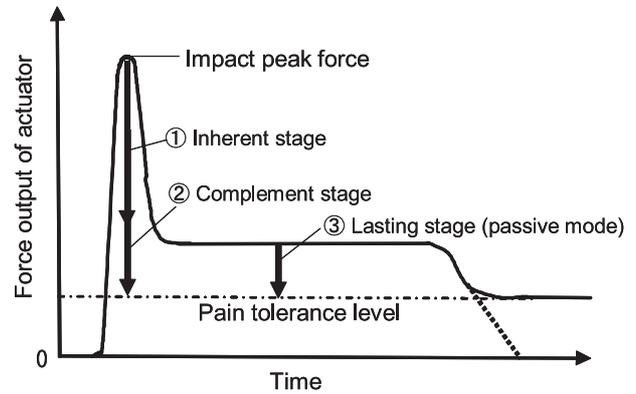


Fig. 5 Design stage depends on force output change of actuator.
アクチュエータの力出力に応じた設計段階

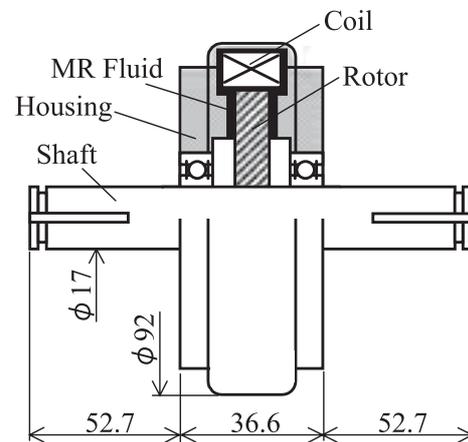


Fig. 6 Schematic of Magnet-Rheological Force Limiting Mechanism.
MR流体を利用した力制限機構

分離することを可能とするが、いずれも連続的な調整は不得手である。そこで、著者らは、ロボットの関節に可変ビンガム流体を用いた力出力制限機構（Fig.6）を挿入し、これによって衝突時のモータの等価慣性モーメントの影響を遮断する手法を開発し、その有効性を検証している¹⁹⁾。これは、ビンガム流体の降伏せん断応力を制御できる流体として、磁界によって制御されるMR流体を利用した機構（Magnet-Rheological Force Limiting Mechanism）であり、理想的固体摩擦クラッチの特性を有しつつ、励磁電流に応じてアクチュエータの制動に要する力を制限することができる。この方法により、力の限界に対する可変ヒューズ効果を呈することが分かっている。

次に、段階②の実現は本質的手段ではなく、あく

までも人体への衝撃緩和の目的で補足的に準備される手段によるものである。したがって、その効果の限界を把握しておく必要がある。著者らは、得られた痛覚耐性値からロボットアームに付与すべき柔らかい被覆の粘弾性材料¹⁴⁾と厚さを検討している。

最後の段階③においては、アクチュエータの受動的力出力、すなわち自重を含む外力に対しては対抗する反力を発生し、能動的力出力は静的痛覚耐性値以下に制限するようなアクチュエータ制御が必要である。ただし、外力とバランスをとるような反力発生時は許容最大変位量以内にアームの動作は制限されねばならない。能動的なアクチュエータ推力は、人体接触時にアーム自重をバランス補償する分を含めて出力され、その結果、人体に伝達される力はこの補償分を差し引くように制御されなければならない。このとき、自重補償分の管理は極めて高い安全性能が要求される。同様に、人体接触の検知も確実にかつ高速に行われねばならず、検出性能の高さと安全性能の高さが求められ、本質的安全ではなくリスク低減手法としてその安全性が評価される。

4.3 アームの制動特性の検討

人間との安全な接触を保証する本質的安全の実現のためには、痛覚耐性値による力の規範とともに、最大許容変位量による位置の規範も利用できる。ここでは、人体表面の柔軟構造に注目し、人間に接触して柔軟な構造の範囲内で停止すれば、接触によって過大な力が発生しない動作制御について検討を加える。

いま、Fig.7に示すように、ロボットアームが人体との接触寸前の停止状態から接触点まで動作すると仮定する。このとき、ロボットアームが生成する運動エネルギーは人体側へ伝達されることになるが、実際には、ロボットアームは制動力を生ずるブレーキを持つため、この仕事によりロボットアームの速度は停止距離に置き換わって人体に作用する。(3)式の条件はブレーキを持つロボットアームの動作にも適用され、接触を前提とした動作では、許容停止距離 x_c は人間側から与えられることになる。すなわち、ロボットアームが停止状態から加速されて到達する最大速度に対する人間側の受容は、ブレーキによる制動距離が人体表面の許容変位内であるかを判断することになる。

一般に、人体表皮は粘弾性特性を呈するとされており、人間と機械が接触する場合、皮膚が弾性変形をして人体の破壊に至らない領域が存在する。この領域では、人体表皮（皮膚と軟組織）に蓄積される

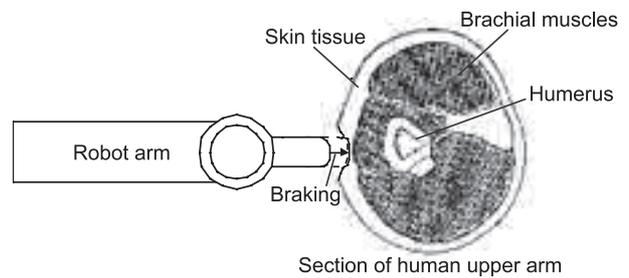


Fig. 7 Contact and braking of robot arm to human Body.

ロボットアームの人体への接触と停止

力学的エネルギーが、最終的に熱に変換されて環境へ消散されて元に戻るという可逆性が維持され、もし、人体表皮の変位が限界を越えると、人体の構造的破壊に至ることになる。このような領域を人体のコンプライアンス空間と呼び、人体部位に応じたこの空間の大きさが最大許容変位量として x_c を与える。

4.4 最大許容変位量に基づくアームの寸動動作

実際の x_c は、Fig.2より皮下組織の薄い部位では高々数mmであるから、ロボットアームには極めて強力な制動力が必要となる。また、制動力の喪失は直ちにロボットアームの全運動エネルギーを人体へ伝達してしまうから、ブレーキ故障による制動不良は許されず、前章と同様にFig.4 (a)のような負作動型電磁ブレーキが利用される。すなわち、(4)式に基づく運動エネルギーを規定すれば、一定の制動力によって停止距離の条件 (x_c 以下で停止) が約束できる。したがって、ロボットアームの動作の形態は、大きなアクチュエータ出力を小さな距離（加速距離）で区切って速度出力することで運動エネルギーを規定し、これを大きな一定制動力を生ずるブレーキによって x_c 以下で停止することになる。

以上のようなロボットアームの動作では、動作開始から許容変位内での制動・停止までが一つの基本的動作単位として考えることができ、さらに、この動作単位を連続的に行うことによって動作の継続が可能となる。このような動作は、Fig.8に示すように、ロボットアームが人間と離れて停止している状態から、許容変位内で基本動作単位での移動完了後、人間との非接触が非接触確認手段等により確認されると新たに次の許容変位を設定して基本動作単位を実行する。このように基本動作単位による移動と許容

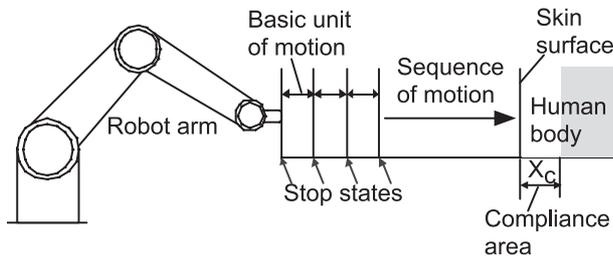


Fig. 8 Inching motion plan for robot arm.
ロボットアームの寸動動作計画

変位の生成を繰り返し、非接触確認手段の故障等により一連の動作が停止されれば、少なくともロボットアームの人間への危険を伴う接近は生じない。このようなa) 非接触の確認, b) 許容変位の設定, c) 基本動作単位による移動動作(加速と制動・停止), という一連の周期的動作を寸動動作と呼ぶことにする。

寸動動作を行う場合の条件を考えると、ロボットアームが許容変位 x_c 内に加速(加速距離 x_a)と制動(制動距離 x_b)を行うために、

$$x_a + x_b < x_c \quad (6)$$

でなければならない。これは、ロボットアームが x_a の間に最大速度 v_{max} の速度を出力し、次に x_b の間に(4)式を満足する制動力を持つブレーキによって停止する関係を示している。いま、簡単にロボットアームのアクチュエータが一定の力出力 f_a とすると、 $f_a \cdot x_a = mv^2/2 = f_c \cdot x_b$ の関係より、

$$f_c > \frac{x_a}{x_b} f_a + f_n \quad (7)$$

という関係でブレーキの制動力は規定されねばならない。(6), (7)式がロボットアームの寸動動作の安全条件を表す。実際には、制動の繰り返しによる熱の蓄積やブレーキの応答遅れなども含めて最悪の条件を設定した上で、寸動制御のための機構設計が行われる必要がある。

なお、本動作方式はあくまでも危険源除去の条件を得る方法論を優先して検討したものであり、実用性は別の論議が必要である。人体接触を想定した極低速動作時を除けば、最大許容変位の小ささからアーム緩衝材の装備によって制動距離のマージンを稼ぐことは現実的な戦略である。

5. おわりに

協調型ロボットの安全設計は、機械安全規格の原則に従えば、リスク低減より優先して危険源の除去

を求めており、本質的安全の確保が重要とされる。本研究では、本質的安全化のアプローチに、人間の痛覚に基づく耐性に「安全」の判断を求めてこれを安全設計指標とすることを提案した。この痛覚耐性値から、ロボットアクチュエータの力出力特性と制動特性を規定し、危険源除去を求める本質的安全化のアプローチを検討した。今後は、さらなる痛覚耐性データの蓄積を行って指標の検証を進めるとともに、本質的安全設計に基づくロボットマニピュレータの開発とその安全性の評価を考えたい。

参考文献

- 1) 次世代ロボットビジョン懇談会報告書, 経済産業省 (2004)
- 2) 日本工業規格, 機械類の安全性.設計のための基本概念, 一般原則.第2部:技術原則, JIS B 9700-2 (2004) pp.4-15
- 3) 日本工業規格, 機械類の安全性.設計のための基本概念, 一般原則.第1部:基本用語, 方法論, JIS B 9700-1 (2004) pp.4-13
- 4) 日本工業規格, 機械類の安全性.危険区域に上肢が到達することを防止するための安全距離, JIS B 9707 (2002)
- 5) International Standard, Safety of machinery Positioning of protective equipment with respect to the approach speeds of parts of the human body, ISO 13855 (2002)
- 6) International Standard, Safety of machinery - Guards -General requirements for the design and construction of fixed and movable guards, ISO 14120, Geneva: ISO (2002)
- 7) M. Rahimi, W. Karwowski, Human Perception of Robot Safe Speed and Idle Time, Behav. Inf. Technol., Vol.9, No.5 (1990) pp.381-389
- 8) 森田, 鈴木, 他, 人間共存型ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1 (1998) pp.131-136
- 9) 池田, 杉本, 人間特性を考慮したロボット設計のための人体痛覚耐性値の評価, 産業安全研究所研究報告, NIIS-RR-97 (1998) pp.9-15
- 10) 山田, 吹田, 池田, 他, ヒト・ロボット共存のための人間工学実験に基づく痛覚レベルの人体耐性値の解明, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.63, No.612 (1997) pp.2814-2819
- 11) R. P. Arthur, W. B. Shelley, The innervation of human epidermis, J. Invest. Dermat., Vol.32 (1959) p.397

- 12) 赤松, 痛みと評価, バイオメカニズム学会誌, Vol.14, No.3 (1990) p.151
- 13) Greene, Handy, J. Applied Physiology, Vol.17 (1962) p.693
- 14) 山田, 吹田, 今井, 池田, 他, 痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出および停止機能を有するロボットシステム, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.63, No.614 (1997) pp.3552-3557
- 15) 花岡, 他編, わかりやすい神経系の話, メジカルトリビューン (1985) p.7
- 16) H. Ikeda and T. Saito, Proposal of pain tolerance index for the safe design of human-collaborative robots, Proc. of 4th International Conference Safety of Industrial Automated Systems, Section 1 (2005)
- 17) 杉本, 蓬原, 安全の原理, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.56, No.530 (1990) pp.2601-2609
- 18) 池田, 齋藤, 杉本, 人間と共存するロボットの本質安全化.国際安全規格に基づく危険源除去のプロセス, システム制御情報学会論文誌, Vol.13, No.12 (2000) pp.575-584
(平成17年11月21日受理)