

学術論文

福祉ロボットの安全性に関する統一的評価法の提案 - 危険性の定量化による安全設計対策の評価 -

生田 幸士* 野方 誠*

General Evaluation Method of Safety Strategies for Welfare Robot - Evaluation of Safety Design by Quantifying Dangerousness -

Koji Ikuta* and Makoto Nokata*

The general evaluation method of various kind of safety strategies for welfare robot is first proposed in the world. The impact force and impact stress are chosen as safety evaluation values to quantify safety. The dangerous index and safety index are defined to make quantitative evaluation of the effectiveness for each safety strategy. Moreover, this method enables us to know the contribution of each safety strategy to the overall safety performance of welfare robot. As a result, design optimization of the safety robot is discussed successfully.

Key Words: welfare robot, safety strategy, dangerous index, safety index, safety design

1. 緒 言

21世紀の高齢化社会到来を目前にし、身障者や高齢者支援用福祉機器・介助ロボットの実現が急務である。従来の産業用ロボットの場合と異なり、福祉ロボットは人の近傍で作業したり、人に接触することが余儀なくされる。人がロボットの動作範囲内に侵入することを禁じた産業用ロボットの安全確保戦略は全く成り立たなくなる。そのため人間と機械とが共存する空間での安全性の評価法について、新しい視点からの研究が必要となる。

本論文では、まず福祉ロボットと人が何らかの原因で衝突した時に、人の損傷を皆無又は最小化することを目的として、設計と制御の安全対策について考察を行う。次に危険性を数値化する目安として、衝突時の衝撃力または衝撃応力を規範量に定義し、ロボットの危険性と安全性を定量的に評価する手法について提案する。さらに一般福祉機器の危険性評価への拡張について検討を行い、多岐にわたる安全対策を統一的に評価する手法について述べる。

また具体例を用いて福祉ロボットの危険性評価と改良を行い、本手法の有用性を検証する。

2. 福祉ロボットの安全戦略

本章では、ロボットや機械から人への損傷と安全戦略について考察する。

2.1 ロボットによる損傷

人の損傷は、下記に示すような機械的、電氣的、音響的原因に大別できる。

- | | | |
|----------|---|------------------------------|
| 1. 機械的損傷 | { | 打撲 … 内出血、骨折
切傷 … 出血、感染 |
| 2. 電氣的損傷 | { | 感電 … ショック死、火傷
電磁波 … 癌、白血病 |
| 3. 音響的損傷 | { | 大音響 … 難聴
低周波 … 不眠、ノイローゼ |

本論文では上記の内、1. 機械的損傷を対象とした安全戦略（組織的かつ総合的な解決策の意味）を検討する。この理由は2, 3の電氣的、音響的損傷に対しては、絶縁体や防音材などで電気や音を封じ込む一元的手法で大半のケースが解決可能であるのに対し、福祉ロボットでは産業用ロボットの場合のような作業空間内への封じ込め手法がとれないためである。

本質的に人の近くで物を運んだり、人に接触して作業することを目的とする福祉ロボットの安全性を確保するには、ロボットの設計と制御への多種多様な対策が不可欠となる。そこに問題の複雑さと困難さが存在する。

2.2 安全戦略の分類

福祉ロボットの安全戦略は下記に大別できる。

- (1) 接触前安全戦略 (Pre-Contact Safety Strategy)
- (2) 接触後安全戦略 (Post-Contact Safety Strategy)

(1)は危険状態に陥る前に人の損傷を最小にするような動きをすること、(2)は接触後の人の損傷を分散、吸収するためのものである。

原稿受付 1997年8月21日

*名古屋大学大学院工学研究科

*Graduate School of Engineering, Nagoya University

Table 1 Classification of safety strategy for collision of robot and human

		control strategy	design strategy	
before collision	avoid collision	distance		
	minimize impact force	speed posture moment of inertia	weight	
after collision	attenuation diffusion	stiffness	cover surface	joint compliance shape

近年の自動車安全対策を例にとると、ABS（アンチロックブレーキシステム）で衝突を回避するのが前者に相当し、衝突した時にエアバックが開いたりサイドドアビームで衝撃を吸収するのが後者に相当する。

以上の議論は、福祉ロボットを作り動かすロボット開発者の立場から見ると、下記の分類にも表現できる。言い換えれば、(1)(2) 両者とも「危険性を最小化」するようにロボットの設計や制御を行うことでもある。

- (1) 設計段階 … 安全設計戦略 → 設計による危険性最小化
- (2) 制御段階 … 安全制御戦略 → 制御による危険性最小化

以上の安全戦略の対策例を整理したものを Table 1 に示す。設計したい安全対策がどれに相当し何を強化すべきで、どうすれば強化できるかがわかる。

ロボット設計の安全対策では、既に筆者らはカリミッター機能を持つサイバネティックアクチュエータ [1] や非接触磁気歯車 [2] など、アクチュエータ自身や伝達部に直接安全機構を持たせる研究を行ってきた。その他にも電気粘性流体による力制限機構 [3] を用いたり、力センサを用いて力制御を行ったり、柔らかい材料で衝撃を吸収したり [4]、角を丸くするなど様々な対策が議論されている。

一方、安全性の評価法については、アクチュエータ配置の危険度 [5] や、操作の安全性の研究 [6] が行われている。また国内外の安全規格類 [7] [8] では、安全を「受容できないような損傷のリスクからの解放」と定義しリスクレベルを求め、それを最小にする努力がなされてきた。しかし、不十分な確率的データを用いざるを得ないため定量性が困難であり、単に個別対策を中心としたケーススタディに終始してきた。

以上の原因は、安全性の概念や議論の前提条件、想定している場面などが曖昧であるため、個々の安全対策の効果やロボット全体の安全性向上への寄与の割合を完全に定量評価することは困難と考えられてきたからである。

3. 規範量の提案

3.1 定量化の必要性

福祉ロボットの安全戦略を総合的に行っていくためには、危険性や安全性の数値化の目安となるもの（ここでは「規範量」と呼んでおく）が不可欠となる。規範量を定めることで、各種の安全戦略の効果を同じ座標軸上で定量的に比較、検討し、福

祉ロボットの設計と制御の最適化が初めて可能となる。

かつてシャノンによって情報量をエントロピーとして、また内山、吉川らによりロボットの操作性を可操作性として定量的に定義された。ただし厳密なことを言えば、両者ともそれらの概念のすべてを完全に定量表現しているとは言えず、ある限定された条件下でのとらえ方である。しかし、両定義の学術的工学的貢献度の大きさは疑うべくもない。若干の異論を超えて危険性の定量化の目安となる「規範量」を定義することで福祉ロボットにも同様の効果が期待できる。

3.2 規範量の選定

何を規範量にすべきかを定める前に、まずロボットと人との接触事故の発生過程を詳細に検討した。

ロボットが誤って人に傷害を与える場合の危険性を主要因のみで一般的に表現すると下式のようになる。

$$\text{傷害の期待値} = \{f(\text{設計}) \cdot g(\text{制御})\}(\text{事故発生確率}) \quad (1)$$

すなわちロボットの設計と制御による安全策の効果（関数 f, g ）と事故の発生確率が傷害の期待値を決める。

従来の ISO 規格等では、事故発生確率に対するリスクマネジメントの立場からのアプローチだけが行われてきた。すなわち事故発生確率をいかに小さくするか、又はどのあたりに見積るかが中心課題であった。福祉機械やロボットの設計や制御と傷害の危険性の関係については十分な注意が払われてきたとは言いがたい。

一方、本研究では、何らかの理由で不幸にして事故が発生してしまった時に、人の損傷を最小化できる設計や制御とはどうあるべきかを探求する立場に立っている。具体的に言えば、事故発生確率を 1 とした時、設計と制御に関する安全対策の効果を定量評価し、危険性を最小化することを目的としている。

それでは何を定量化の規範量とすべきか。福祉ロボットは予測できない人の動きに対し、接近したり接触することが大前提である。安全対策としては、前章で分類した安全設計戦略と安全制御戦略について考えると、前者は不用意な衝突に対し接触後の損傷を減少させる対策であり、後者はロボットが動作中常に不測の衝突に対し危険性を最小限にしつつ目的の福祉作業を行うように制御する対策でなければならない。従って接触時の損傷の評価が重要となる。

接触事故の原因が人又はロボットのいかにかわらず、一般に人がロボットから受ける機械的損傷の「打撲」は「衝撃力」の大小に依存し、「切傷」は「衝撃応力」によって決まるからである。すなわち「衝撃力」または「衝撃応力」を規範量として定義することが定量評価の基本と考えることができる。この時両者のどちらを規範量として使うかは、打撲か切傷のどちらを重視するかによって決めればよい。

以上より、衝突事故の場合、各種の安全対策の効果を同じ衝撃力という座標軸上で定量的に比較、検討し、福祉ロボットの設計の最適化に道が開かれた。

4. 規範量を用いた統一的評価法

前述の規範量を用いて福祉ロボットの統一的かつ定量的な危険性評価手法を提案する。

4.1 安全設計戦略の安全評価

本節では、事故時に発生する人の損傷を減少させるための設計対策を対象とし、その効果を定量的に評価することが目的である。事故防止の評価ではないので故障や操作ミスなどの発生率の検討は行わない。

まず、人間に障害をもたらす最小の衝撃力を「臨界衝撃力 F_c 」とおき、 F_c に対するロボットの発生衝撃力 F を「危険指数 α 」として定義する。

$$\text{危険指数 } \alpha = \frac{F}{F_c} \quad (\alpha \geq 0) \quad (2)$$

厳密な議論をすれば、臨界衝撃力 F_c の値は大人と子供、男性と女性、体の部位などにより異なる。しかし、統一的な危険性の評価を行うことを第一目的とする立場からは基準値として代表値を1つだけ定めれば良い。ただし触れただけでダメージを受ける目など、 F_c が極めて小さい部位は特異点とし、別の評価を行う必要がある。

次に、複数の安全対策を行った時のロボット全体の危険指数について考える。

衝撃力を最小化する安全対策は、制御理論でよく用いられているブロック線図で表現できる。発生した衝撃力が入力、安全対策が要素でその危険指数が伝達関数、最後に人に伝わる力が出力に相当し、伝達関数でどれだけ値が小さくなるかが決まる。このような系では、要素が複数ある場合直列結合になるから、系全体の特性は各要素の伝達関数の積で表すことができる。

従って、ロボット全体の危険度を意味する危険指数 α_{all} は式(3)のような積の形になる。これは、安全対策の効果を同じ規範量で定量化し、同じ座標軸上に乗せたことにより可能になる。

$$\text{全体での危険指数 } \alpha_{all} = \prod_{i=1}^n \alpha_i \quad (3)$$

(n は対策数、 i は安全対策の番号)

極端な例として、完璧な衝撃吸収材で人へ伝達する衝撃力が0になる場合を考える。形状やその他の因子がどんなに危険なロボットが非常に大きな力で接触しても、材料により力の伝達が完全に遮断されるため、人への衝撃力は0になり定量的に危険は0である。本章で提案した安全評価では、伝達材料に関する危険指数 α_j は0になる。全体での危険指数はすべての指数の積をとるから0になり、現象と一致することが明らかである。

ただし、過度の安全対策は、ロボットの作業性や操作性を損ねる原因となる。この点については、作業性能の最低条件を満たすことを前提条件として安全対策を講じてから危険指数を求めたり、あるいは式(3)と作業性についての式を連立させ最適解を算出することで解決できる。これはロボット全体の危険性を定量化することで初めて可能となる利点である。

危険指数の逆数を安全指数 β と定義することで、各対策によって得られる安全性を定量的に把握することができる。もちろん、安全性が一般的に危険性の逆数とは言い切れないが、ここでは数学的定義として安全指数を式(4)で定義する。

$$\text{安全指数 } \beta = \frac{1}{\alpha} \quad (4)$$

$$\text{全体での安全指数 } \beta_{all} = \prod_{i=1}^n \beta_i \quad (= 1 / \prod_{i=1}^n \alpha_i) \quad (5)$$

安全対策前後の危険指数を α_0, α とすると、これらの比をとることで改善率 η を求めることができる。

$$\text{改善率 } \eta = \frac{\alpha_0}{\alpha} = \frac{F_0 F_c}{F_c F} = \frac{F_0}{F} \quad (6)$$

$$\text{全体での改善率 } \eta_{all} = \prod_{i=1}^n \frac{\alpha_0}{\alpha_i} \quad (7)$$

式(6)では臨界衝撃力 F_c は打ち消されており、対策前後の衝撃力のみを相対評価が行えることがわかる。

危険性評価の手順を以下にまとめる。

- (1) 人の損傷の原因となる因子を規範量とする
- (2) 安全対策ごとの衝撃力を算出する
- (3) 危険指数を求める
- (4) 全体での危険指数から総合的な危険性評価と安全評価を行う
- (5) 結果より安全戦略の再検討の有無を判定する

上記の手順に従うことで、各種の安全対策ごとの危険性低減効果と全体での安全評価が可能となる。

4.2 安全制御戦略への適用

前章の安全設計対策は接触後の衝撃力を減少させるものである。これに対し「安全制御対策とは、万一不用意な衝突が起こっても衝撃力が最小となるよう、常にロボットを制御しておくこと」を言う。

制御の効果を定量評価する場合にも、衝撃力を規範量として定義することが有効であり、各指数は安全設計の場合と同様にして導出することができる。

ただしここでは、人が誤ってロボットに衝突する場合や、ロボットに過失がある場合でも少なくとも事故発生の直前までは可制御であることを前提としている。

$$\text{危険指数 } \alpha^* = \frac{F^*}{F_c} \quad (\alpha^* \geq 0) \quad (8)$$

$$\text{全体での危険指数 } \alpha_{all}^* = \prod_{i=1}^n \alpha_i^* \quad (9)$$

$$\text{安全指数 } \beta^* = \frac{1}{\alpha^*} \quad (10)$$

$$\text{全体での安全指数 } \beta_{all}^* = \prod_{i=1}^n \beta_i^* \quad (= 1 / \prod_{i=1}^n \alpha_i^*) \quad (11)$$

$$\text{改善率 } \eta^* = \frac{\alpha_0}{\alpha^*} = \frac{F_0}{F^*} \quad (12)$$

$$\text{全体での改善率 } \eta_{all}^* = \prod_{i=1}^n \eta_i^* \quad (13)$$

安全設計と安全制御の両戦略を行った場合、ロボット全体の総合評価は、これまでと同様に積をとることで式(14)(15)(16)のように求まる。

$$\text{危険指数 } \alpha_{all} = \prod_{i=1}^m \alpha_i \prod_{j=1}^n \alpha_j^* \quad (14)$$

$$\text{安全指数 } \beta_{all} = 1 / \left(\prod_{i=1}^m \alpha_i \prod_{j=1}^n \alpha_j^* \right) \quad (15)$$

$$\text{改善率 } \eta_{all} = \prod_{i=1}^m \frac{\alpha_0}{\alpha_i} \prod_{j=1}^n \frac{\alpha_0}{\alpha_j^*} \quad (16)$$

以上の方法を用いれば、福祉ロボットにおける危険性最小化設計と制御を同時に評価することができ、設計と制御のバランスを取りながら最適化することも可能となる。

なお、切傷に注目する場合は、衝撃力を衝撃応力に置き換えて評価すればよい。

5. 統一的な危険性評価法への拡張

福祉ロボットや機器の安全性について統一的な議論するためには、様々な危険性を考慮し検討する必要がある。多くの場合、それらは独立した傾向が強いため、定量化して変換したとしても同じ座標軸に乗せることは困難である。

そこで前述の評価法を拡張することにより、福祉機器全体にわたる危険性を統一的に評価する手法を提案する。

衝撃力を規範量に定めたように、安全戦略ごとに適切な規範量(ここでは S とおく)を定義する。人間に障害をもたらす臨界量 S_c を与えることで、危険指数は下式ようになる。

$$\text{危険指数 } \alpha = \frac{S}{S_c} \quad (\alpha \geq 0) \quad (17)$$

同じ規範量の対策をまとめて評価する場合は、上式を積算することで危険指数が求まる。

$$\text{全体での危険指数 } \alpha_{all} = \prod_{i=1}^n \alpha_i \quad (18)$$

(n は対策数、 i は安全対策の番号)

複数の規範量にわたる総合的な危険指数については、互いに1次独立であることから、積ではなく和の形になる。

$$\text{総合危険指数 } G_\alpha = \sum_i c_i \alpha(S_i)_{all} \quad (19)$$

なお、重み係数 c_i には人の特性などの値を別途測定し決定すればよい。

例として、危険因子を感電とした場合、人へのダメージは電流の大小で決まることから、規範量は電流値 I になる。人の損傷が発生する電流値を臨界電流値 I_c とおくと、危険指数は、式(17)より下式のようになる。

$$\text{感電に対する危険指数 } \alpha(I) = \frac{I}{I_c} \quad I_c: \text{臨界電流値} \quad (20)$$

あとは衝撃の場合と同様にして、改善率を求めることができる。総合評価についても全く同じ手法が使え、式(21)のように積の形になる。

$$\alpha(I)_{all} = \prod_{i=1}^n \alpha(I)_i \quad (21)$$

その他、火傷(温度 T)、転倒(回転モーメント M)、圧迫(圧力 P)、騒音(デシベル dB)などについても同一の方法で定量評価が可能である。

これらをまとめた危険指数は、互いに1次独立であることから、式(19)より和の形で求めることができる。

$$G_\alpha = c_1 \alpha(I)_{all} + c_2 \alpha(T)_{all} + c_3 \alpha(M)_{all} + \dots \quad (22)$$

以上のことから、本手法を用いることで、様々な要因にもとづく危険性を総合的に定量評価することができる。本論の「統一的」の意味はここにある。

6. 衝撃力規範における危険指数の具体的導出

安全対策の実例を用いて、具体的に危険指数の導出を行う本章では、規範量が衝撃力の場合の安全設計を取り上げ、危険指数の算出式を対策ごとに求めた。これは改善しようとしている因子の効果のみを抽出して、他の要素の影響をできる限り排除するためである。

一般には、いくつかの影響をすべて同時に満たすモデルを作成し、式をたてて解かれる。しかしこの方法では、安全対策が増えたり境界条件が変わると、モデルの作成からやり直す必要がある。さらに多くの現象を考慮すると式が複雑化し、同定が困難な変数が増加してしまう。

対策の安全性の評価や比較を実行するためには、すべての現象をこまかくモデルに導入するのではなく、ある程度厳密性は失われたとしても汎用性の高い定量化が必要であると考えている。そのために我々は1次近似モデルによる危険指数の個別導出を行った。

以下、対策ごとに説明を行う。

6.1 軽量化対策の効果

ロボットの質量を削減することで衝撃力を最小にする対策を考える。衝撃力はニュートンの運動方程式から式(23)のように求まり、これを臨界衝撃力で割ったものが式(24)の危険指数である。

$$\text{衝撃力 } F_1 = ma \quad (23)$$

$$\text{危険指数 } \alpha_1 = \frac{ma}{F_c} \quad (24)$$

例としてロボットの構成材料を変えて軽量化を行った時の危険指数を示す。主材料が鉄(密度 $7.86 \times 10^3 [kg/m^3]$)で質量が $20 [kg]$ のロボットが危険指数1の加速度で動く場合、材料をアルミニウム(密度 $2.69 \times 10^3 [kg/m^3]$)に変更すると質量が $6.7 [kg]$ 、危険指数が 0.34 になる。またプラスチック(密度 $1.40 \times 10^3 [kg/m^3]$)を用いると質量が $3.5 [kg]$ 、危険指数が 0.18 になる。つまり、軽量化により質量が半分になれば危険指数も半減する。

6.2 表面素材による衝撃力吸収対策の効果

Fig. 1に示すように、ロボット表面を柔らかい材料で覆うことで、衝突速度を減少させ衝撃力を最小にする対策を考える。

一般には、材料の変形問題で時間応答を算出するため、人間の接触位置や個人差など詳細な境界条件の設定が必要である。しかし統一的な危険性評価を行う観点から境界条件の統一を行い、接触時における衝撃力の最大値を用いて危険指数の算出を行う。

ロボットの速度が v から v' へ減速した時、衝撃力は運動量の時間変化より式(25)のようになる。

$$\text{衝撃力 } F_2 = \frac{mv - mv'}{dt} \quad (25)$$

また人とロボットをFig. 2のように第1次近似モデル化することで、この系の運動方程式は以下のようになる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (x = x_{rg} - x_{rs}) \quad (26)$$

通常は減衰振動となるので、式(26)の解は次のような形となる。

$$x = e^{-\zeta\omega_n t} C \cos(\omega_d t - \beta) \quad (27)$$

但し、 $\omega_n = \sqrt{k/m}$, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$, $\zeta = c/2\sqrt{mk}$
 $C = \sqrt{a_0^2 + \left(\frac{v_0 + a_0\zeta\omega_n}{\omega_d}\right)^2}$, $\beta = \tan^{-1} \frac{v_0 + a_0\zeta\omega_n}{a_0\omega_d}$
 ($t = 0$ において $x = a_0, \dot{x} = v_0$)

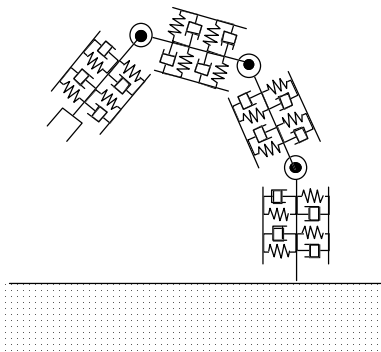


Fig. 1 Manipulator covered with soft material

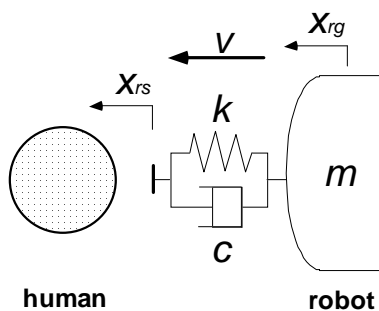


Fig. 2 Model of the collision between human and robot

これを微分すれば、

$$\dot{x} = C e^{-\zeta\omega_n t} (-\zeta\omega_n \cos(\omega_d t - \beta) - \omega_d \sin(\omega_d t - \beta)) \quad (28)$$

接触後の速度 v' が0の時、ロボットの運動がすべて人に伝わり衝撃力が最大になる。衝突時間 dt は速度が0になる t の値を用いる。 $\dot{x} = 0$ より、以下のように求まる。

$$\text{衝突時間 } dt = \frac{\tan^{-1}(-\zeta\omega_n/\omega_d) + \pi/2}{\omega_d} \quad (29)$$

この結果、危険指数は次式となる。

$$\text{危険指数 } \alpha_2 = \frac{mv}{F_c dt} \quad (30)$$

結果的に時間応答は現れないが、最大値を用いているために最も危険な状態を考慮した形になっている。

具体例として、ロボット表面により柔らかい材料を用いて減速化を行った時の危険指数を示す。表面が鉄(ヤング率200.0[GPa])のままのロボットが危険指数1の運動量で動く場合、厚さ10[mm]のゴム(ヤング率5.0[MPa])で表面を覆うことで危険指数が0.05に減少することが分かる。

6.3 関節のフレキシビリティ対策の効果

Fig. 3のように、ロボットの関節に柔らかさを持たせることも有効な対策である。接触後は関節まわりの回転運動になるので、衝撃力 F_3 は次の角運動量の時間変化式を満たす。

$$F_3 l = \frac{I\omega - I\omega'}{dt} \quad (31)$$

I はアームの慣性モーメント、 l は関節から接触点までの長さである。衝突時間 dt の求め方は「6.2 表面素材による衝撃力吸収」と同じであり、式(26)を

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = 0 \quad (32)$$

として式(27)から式(29)を用いて算出する。

$$\text{衝突時間 } dt = \frac{\tan^{-1}(-\zeta\omega_n/\omega_d) + \pi/2}{\omega_d} \quad (33)$$

(但し、 $\omega_n = \sqrt{K/I}$, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$, $\zeta = C/2\sqrt{IK}$)

$$\text{危険指数 } \alpha_3 = \frac{I\dot{\theta}}{F_c dt} \quad (34)$$

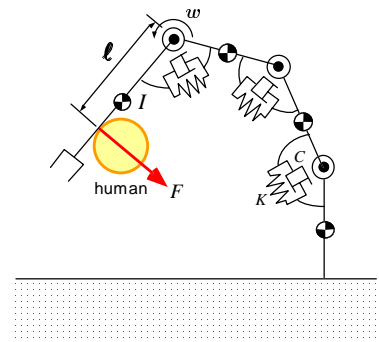


Fig. 3 Manipulator with compliant joints

6.4 形状による衝撃応力最小化対策の効果

衝突時に局地的に衝撃力（衝撃応力）が大きくなる形状にする対策のことである。一般に衝撃力は尖った形状になるほど大きく、包み込む形状になるほど小さくなる。このことは式(35)に示すように分母の接触面積が大きく影響するからである。

$$\text{衝撃応力 } \sigma = \frac{F}{A} \quad A: \text{接触面積} \quad (35)$$

厳密には、接触面積は形状の他に衝撃力の大小や表面材料特性により異なる。しかしここでは形状の影響のみを抽出するため、Fig. 4のように人の占める空間(A₁)と変形可能空間(A₂)を考慮した式(36)より危険指数を求める。

$$\begin{aligned} \text{形状変形率 } \lambda &= \frac{A_2}{A_1} \\ &= \frac{\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} (\text{human}(x) - \text{robot}(x)) dx}{\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} (\frac{1}{2} - \text{human}(x)) dx} \end{aligned} \quad (36)$$

これより危険指数は以下ようになる。

$$\text{危険指数 } \alpha_4 = \frac{\lambda}{\lambda_c} \quad \lambda_c: \text{形状変形臨界値} \quad (37)$$

例として、人の頭(直径0.2[m])に(1)包丁(幅50[mm], 最大厚さ2[mm]), (2)バット(直径0.1[m]), (3)表面がなめらかな曲線(y = -0.5x²)のロボットが衝突した場合を考える。表面が平面のロボットを基準にすると、それぞれの危険指数は(1)24.08, (2)4.8, (3)0.92という値になり、包丁などの形状の危険度を定量的に表すことができた。

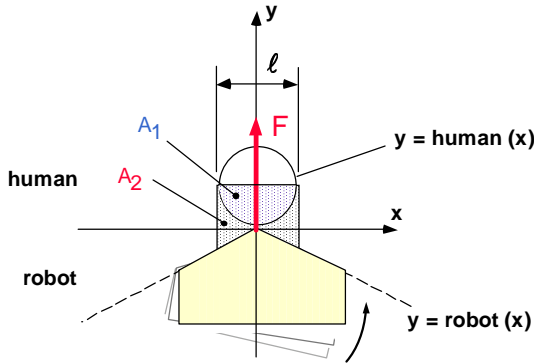


Fig. 4 Deformation area under the collision between human and robot

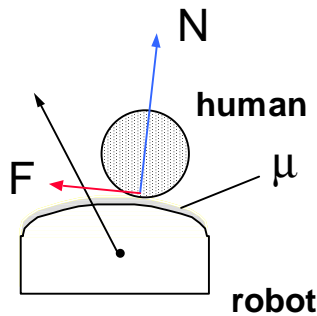


Fig. 5 Surface friction under the collision between human and robot

6.5 表面摩擦の低減対策の効果

ロボット表面に摩擦の小さい材料を使用し、Fig. 5のように滑らせることで衝撃力を逃がすことができる。衝撃力は摩擦力であるから式(38)のようになり、危険係数は式(39)のようになる。

$$\text{衝撃力 } F_5 = \mu N \quad (38)$$

$$\text{危険指数 } \alpha_5 = \frac{\mu N}{F_c} \quad (39)$$

摩擦係数μ = 0.5の鉄で覆われたロボット表面が接触した時に臨界衝撃力に達したとする。これに対し表面をナイロン(μ = 0.2)に変えれば危険指数は0.4であり、テフロン(μ = 0.04)の場合は0.08となる。

以上をまとめたものがTable 2である。各設計パラメータを代入するだけで簡便に危険指数を算出できる。

Table 2 Safety design strategy and calculation method of dangerous index

安全設計対策	衝撃力	危険指数
(1) 軽量化 m:質量 a:加速度	$F_1 = ma$	$\alpha_1 = \frac{ma}{F_c}$
(2) 柔らかい表面素材 弾性係数 k 粘性係数 c 衝突前後速度 v, v'	$F_2 = \frac{mv - mv'}{dt}$ $dt = \frac{\tan^{-1} \frac{-\zeta\omega_n}{\omega_d} + \frac{\pi}{2}}{\omega_d}$ $\omega_n = \sqrt{k/m}$ $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ $\zeta = c/2\sqrt{mk}$	$\alpha_2 = \frac{mv}{F_c dt}$
(3) 関節の柔軟性 弾性係数 K 粘性係数 C 慣性モーメント I 衝突前後角速度 ω, ω' 接触位置までの距離 l _p	$F_3 l_p = \frac{I\omega - I\omega'}{dt}$ $dt = \frac{\tan^{-1} \frac{-\zeta\omega_n}{\omega_d} + \frac{\pi}{2}}{\omega_d}$ $\omega_n = \sqrt{K/I}$ $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ $\zeta = C/2\sqrt{IK}$	$\alpha_3 = \frac{I\dot{\theta}}{F_c dt}$
(4) 形状 A ₁ :人の占める空間 A ₂ :変形可能空間	$\text{衝撃応力 } \sigma = \frac{F_4}{A}$ $\lambda = \frac{A_2}{A_1}$ $= \frac{\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} (\text{human}(x) - \text{robot}(x)) dx}{\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} (\frac{1}{2} - \text{human}(x)) dx}$	$\alpha_4 = \frac{\lambda}{\lambda_c}$
(5) 表面摩擦の低減 摩擦係数:μ 垂直抗力:n	$F_5 = \mu n$	$\alpha_5 = \frac{\mu n}{F_c}$

7. ロボットの安全設計への適用

本章では具体的なロボット設計への適用法を説明する。

(ケース1)

従来型のロボットアーム (Fig. 6(1)) を以下の安全設計対策を施行することで安全性を向上させることを考える。

- (1)形状：人に対してとがらない形状
- (2)質量：より軽い材料
- (3)表面素材：ゴムなどの柔らかい素材
- (4)表面摩擦：滑りやすい表面材料

これらに基づいてデザインしたものとしては、Fig. 6(2) の様なものが考えられる。従来型に比べ中央部のくびれ全体的に丸みをおびた形状であることが分かる。(質量0.9[kg], 形状: $y = 0.25x^2$, 表面:ゴム ($E = 5.0[MPa]$, 厚さ0.1[m]))

これを用いて前章で述べた安全評価を行う。今回は軽量化(式(24)), 形状(式(37)), 表面素材(式(30)) について計算を行った。アームの長さを0.25[m], 質量1.8[kg], 角速度1.57[rad/s]でアームの中心で接触させたときの衝撃力[n]を計算した。なお従来型アームの発生衝撃力を臨界衝撃力とした。

結果をTable 3に示す。ロボット全体での危険指数 $\alpha_{all} = 0.031$ となり、安全規範に基づき設計したロボットアームは1の普及型アームに比べ32.78倍の安全性を獲得したことが分かる。(ケース2)

次の例として、Fig. 7の3種類のロボットを評価する。それぞれの設計仕様は以下の通りである。

- (1)1関節ロボット；素材：鉄($\epsilon = 200.0[GPa]$)
- (2)1関節ロボット；アームの表面を厚くゴムで覆い、人への衝撃力を緩和する
- (3)n関節ロボット；各関節をゴム($\epsilon = 5.0[MPa]$)で覆い全体で柔らかさをもたせる

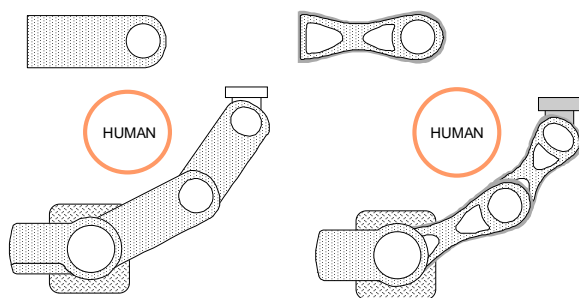


Fig. 6 Safety design of manipulator(case 1)

Table 3 Safety estimation result of manipulator(case 1)

	shape α_1	weight α_2	cover α_3	α_{all} β_{all}
(1) conventional arm	1	1	1	1 1
(2) safety designed arm	0.61	0.50	0.10	0.031 32.78

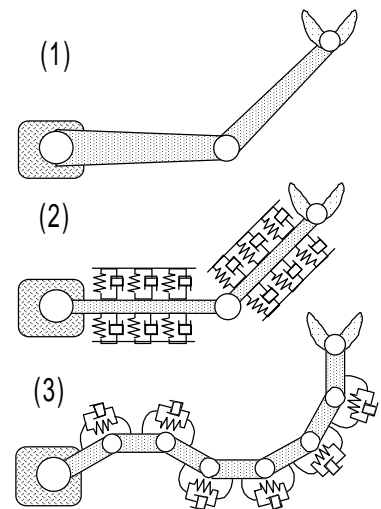


Fig. 7 Safety design of manipulators(case 2)

Table 4 Safety estimation result of manipulators(case 2)

	cover α_2	joint α_3	α_{all} β_{all}
(1)normal robot	1	1	1 1
(2)soft cover	0.1	1	0.1 (10.0)
(3)joint compliance	1	0.024	0.024 (41.7)

なお危険指数を求めるために、ロボットの全長と断面は1[m] $0.1 \times 0.1[m^2]$ とし、2のロボットのゴムの平均厚さを0.1[m] 3のロボットの関節数nを10とした。

結果をTable 4に示す。1のロボットが $\alpha_{all1} = 1.0$ となる運動を2, 3のロボットにさせた場合、全体での危険指数は $\alpha_{all2} = 0.1$, $\alpha_{all3} = 0.024$, 全体での安全指数は $\beta_{all2} = 10.0$, $\beta_{all3} = 41.7$ となる。

以上より、具体的に設計されたロボットに対し、本手法を用いることで安全対策ごとの効果を定量的に表現することができた。

8. 結 言

筆者らは、超高齢化社会で必要となる福祉ロボットの早期実現を目指し、人間と機械が共存する空間でのロボットの安全性について、新しい観点から研究を行った。

まず、人に対するロボットによる損傷について分析を行い機械的損傷を対象とした安全対策が重要であることを明確にし危険性と安全性の指標が不可欠であることを述べた。

ロボットと人との接触事故を対象とし、衝撃力と衝撃応力を安全規範量に定めた。これを用いた危険性評価法を提案し、危険指数、安全指数、改善率といった評価指数と、それぞれを積算した全体での評価指数の定義を行った。具体的な安全対策と

して、設計戦略に焦点を絞って定量的な検討を行い、対策ごとに導出した評価指数を本危険性評価法に適用し有効性を確認した。

以上より、各種安全対策の効果を同じ座標軸上で定量的に比較、検討することが初めて可能となり、これまで困難であった安全面における福祉ロボットの最適設計や、福祉機器の安全性向上にも適用できる手法を提案した。ただし、各対策の危険指数算出式やパラメータの妥当性については、今後実験を含めた検討によって、より完全なものとしてゆく必要がある。

9. 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、有益な資料を提供して頂きました。労働省産業安全研究所の杉本旭主任研究官に心より感謝致します。

参 考 文 献

- [1] K.Ikuta, A.Kawahara and S.Yamazumi: "Miniature Cybernetic Actuators Using Piezoelectric Device", Proc. of International Workshop on Micro Electromechanical Systems(MEMS'91), pp.131-135, 1991.
- [2] K.Ikuta, S.Makita and S.Arimoto: "non-contact Magnetic Gear for Micro Transmission Mechanism", Proc.of International Workshop on Micro Electromechanical Systems (MEMS'91), pp.125-130, 1991.
- [3] 齋藤 剛, 杉本 旭: "安全ロボットの基礎的要件と構成に関する研究 - ロボットの協調作業における力学的条件 - ", 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, no.1, pp.269-270, 1994.
- [4] 山田陽滋: "安全機構技術", 日本機械学会第74期通常総会講演会資料集(V), pp.222-223, 1997.
- [5] 土肥健純: "医療福祉ロボットの種類とその安全", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96講演論文集, pp.1181-1182, 1996.
- [6] 斎藤之男 他: "介護用ロボットの安全操作に関する研究 - 障害者の操作評価とハザード", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96講演論文集, pp.1177-1180, 1996.
- [7] "Guidelines for the inclusion of safety aspects in standars", ISO/IEC GUIDE 51, 1990.
- [8] 欧州規格案 prEn1050.
- [9] 中央労働災害防止協会: "労働安全衛生規則の解説" pp.117-118, 昭和58年.
- [10] 生田幸士, 野方 誠: "福祉ロボットマニピュレータの安全軌道計画", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96講演論文集, pp.1183-1186, 1996.
- [11] 生田幸士, 野方 誠: "人-ロボット共存系における安全戦略に関する研究(第1報)福祉マニピュレータの安全規範の定義と安全軌道生成", 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1167-1168, 1996.
- [12] 生田幸士, 野方 誠: "人-ロボット共存系における安全戦略に関する研究", 第2回日本ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.269-272, 1997.
- [13] 生田幸士, 野方 誠: "人-ロボット共存系における安全戦略に関する研究(第2報)統一的安全指数の提案", 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.721-722, 1997.
- [14] 生田幸士, 野方 誠: "人-ロボット共存系における安全戦略に関する研究(第3報)統一的安全指数を用いたロボット設計", 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.723-724, 1997.
- [15] 生田幸士, 野方 誠: "人-ロボット共存系における安全戦略に関する研究", 第3回日本ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.119-126, 1998.
- [16] 生田幸士, 野方 誠: "安全ロボティクスの研究 - 安全評価法の提案と設計への適用 - ", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98講演論文集, 1A1111-8(1-2), 1998.
- [17] 野方 誠, 生田幸士: "安全ロボティクスの研究 - 安全制御への適用 - ", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98講演論文集, 1A1111-9(1-2), 1998.
- [18] 生田幸士, 野方 誠: "人-ロボット共存系における安全戦略に関する研究(第4報)福祉ロボット制御の危険性評価法", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.931-932, 1998.
- [19] 野方 誠, 生田幸士: "人-ロボット共存系における安全戦略に関する研究(第5報)福祉ロボットの設計と制御の総合評価法", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.933-934, 1998.
- [20] 生田幸士, 石井英毅, 野方 誠: "人-ロボット共存系における安全戦略に関する研究(第6報)統一的安全指数を用いたロボット設計", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.935-936, 1998.

生田幸士(Koji Ikuta)

1953年8月30日生。1977年大阪大学工学部金属材料工学科卒業, 1979年同学基礎工学部生物工学科卒業, 1981年同大学院博士前期課程(生物工学専攻)修了, 1987年東京工業大学博士後期課程(制御工学専攻)修了, 工学博士, 同年4月より米国カリフォルニア大学(ロボットシステムセンター)主任研究者, 1989年東京大学工学部計数工学科専任講師, 1990年九州工業大学情報工学部機械システム工学科助教授, 1994年より名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻教授, 現在に至る。形状記憶合金, 圧電素子を中心とした新原理アクチュエータ, 化学集積回路をはじめとする医用マイクロマシン, 医用福祉ロボティクスなど, 人間のための新しい工学体系の構築に興味を持つ。最近では日本学術振興会未来開拓学術推進プロジェクトの遂行と同時に「物づくり」を通じた創造性教育にも力を入れている。1989年日本機械学会奨励賞受賞, 1995, 97, 98年日本機械学会ROBOMECE賞受賞, 1997, 98年ロボティクスシンポジウム論文賞受賞, IEEE ASME, 日本機械学会, 日本ME学会, 日本コンピュータ外科学会等会員。(日本ロボット学会正会員)

野方 誠(Makoto Nokata)

1970年4月21日生。1995年九州工業大学大学院情報工学研究科博士前期課程修了, 1998年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。同年4月から日本学術振興会未来開拓学術推進プロジェクト特別研究員(リサーチ・アソシエイト), 現在に至る。医用福祉ロボット関連の研究に従事。安全性を重視した医用福祉ロボティクスやメカトロニクスに興味を持つ。1993年日本機械学会畠山賞受賞, 1995年日本機械学会ROBOMECE賞受賞, 1998年ロボティクスシンポジウム論文賞受賞。日本機械学会, 日本コンピュータ外科学会, ライフサポート学会等会員。(日本ロボット学会正会員)