

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*

池田博康**, 杉本 旭**

Evaluation of Human Pain Tolerance for Human-Oriented Robot Design*

by Hiroyasu IKEDA** and Noboru SUGIMOTO**

Abstract: Domestic and international standards or regulations for industrial robots strictly recommend that these robots should be isolated from operators and other workers. However, there will be many fields in the future where humans will have to allow robots to work besides them. One typical application will be a robot usage in labor assistance and rehabilitation for the aged people or with disabilities. Other applications may include a non-autonomous robotic system designed for cooperative tasks with a human operator.

This paper describes human pain tolerance for the design standard of a human-robot coexistence system. Among human sensations, somatic pain is like an emergency call. It is regarded as a stable sensation having neither individual variations nor adaptations. Therefore, somatic pain which can tolerate repeated mechanical stimuli is adopted.

This study carries out following experiments to measure the threshold of human pain tolerance using a biomechanical method and statistical analysis.

- 1) 16 subjects for the experiment are arranged, and 12 measurement points on their bodies which are considered to have a high possibility of contacts in human-robot coexistence environment are selected.
- 2) A pneumatic cylinder with a contact disc prove of 10 mm diameter is used as an actuator to give mechanical stimuli to the subjects.
- 3) The mechanical stimuli applied to the subjects are divided into two categories: static and dynamic forces.

The values of the human pain tolerance are given as tolerable limit of these mechanical stimuli. The mean value of the pain tolerance in terms of a static force ranges from 65N to 146N, while the minimum value ranges from 13N to 46N, depending on the measurement point. As a result of applying dynamic force, the dynamic human pain tolerance relates to a mean impact force and an impact time. Human pain tolerance is characterized uniformly in terms of the pain intensity curve which is fitted to the minimum values of both the static and dynamic pain tolerance. Moreover, this paper investigates the relationship between the deformation and velocity of some human sections, when the human subjects feel somatic pain.

Human pain tolerance needs to be analyzed further, but it will be a trigger to build up an advanced safety design standard.

Keywords; Safety, Human tolerance, Sensory pain, Biomechanical method, Human-robot coexistence

* 本報は日本機械学会論文集 (Vol. 63, No. 612, C) に掲載されたものに加筆したものである。

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

1. 緒 言

現在の産業用ロボットは、人間と空間的に隔離することによって安全を確保することが基本とされている¹⁾。そして、これまでのロボットの安全性に関する研究は、ロボット用フェールセーフシステムを始めとして、信頼性、保全や教示等の非定常作業時における作業者の安全確保、および事故解析に関するものが中心であった^{2),3)}。

しかし、今後人間と同じ環境に共存し、人間とロボットが互いに作業を分担する生産システム⁴⁾や高齢者や障害者に対する生活支援、さらにはホームオートメーションや就労支援・生産活動支援などの多岐にわたる分野へのパーソナルロボットが必要になると予想される⁵⁾。このような人間と共存できるロボット実現のために、マン・マシンインタフェースに関する研究⁶⁾やパーソナルロボットの標準化が検討されており⁵⁾、特に共存時の安全確保が重要な課題となることが指摘されている^{5),7)}。

自動車における安全技術を考える場合、未然に事故を防ぐための予防安全と、事故による人間の傷害を最小限に抑えようとする衝突安全とに分類されており⁸⁾、共存ロボットにおいてもまず予防安全が優先される。しかし、頻繁な人間とロボットとの干渉を想定せざるをえない共存状態では、人間側の安全空間を定義して予防安全することは困難となる。

ロボットの接近速度、加速度から発生する人間の恐怖心を解析した研究等^{9),10)}もあるが、ロボットによる周囲状況との干渉をチェックするための外界センサについて現状の技術レベルを踏まえると、人間がやむを得ずロボットと接触する状況を考慮する必要がある。

本報では、このような人間とロボットが共存する場合、人間が不安とはならず、かつ、最悪ロボットに接触しても傷害とならないレベルの耐性値を人間の痛覚を利用して求め、この耐性値を満足する安全な空間での共存を提案する。そして、安全な共存型ロボットの設計指標を提供することを目的とし、人間の痛覚耐性値とその記述方法を被験者を用いた人間工学に基づく実験から明らかにする。

2. 人間の痛覚による安全空間の表現

これまで、安全の観点から機械的刺激に対する人間の耐性値の研究例として、自動車の衝突時の乗員の生存限界等の研究が行われてきた^{11),12)}。しかしながら、これらの研究は衝突安全に注目して、人間の耐性値を中等傷レベルに設定しており、そのまま共存のための安全指標には適用できない。

これに対して、予防安全の立場から人間の耐性値を評価する試みはほとんど行われていなかったが、最近になって、ドアによる指の静的な挟まれ限界を検討したり¹³⁾、脳震盪発生限界に十分な安全率を加味した安全レベルを定めて、人間とロボットとの干渉時の衝撃力をそれ以下に抑えようとする研究¹⁴⁾が報告され始めている。また、ロボットの場合には、比較的低速な動作制御や外界認識用センサのフィードバック制御により、人間とロボットとの接触が即人間の傷害とならずに済む¹⁵⁾可能性も指摘されている。

安全と傷害事故の間に介在し、潜在的あるいは実質的に傷害と結びつく不快な感情的・情動的体験が痛みである¹⁶⁾。そこで、人間がロボットから機械的刺激を直接受ける際、圧覚を通り越して痛みが感じられるまでを「安全を保証する空間の及ぶ範囲」と定義し、人間とロボット間の干渉をチェックする動的なバリアとして機能させることで、このバリアが共存ロボットの予防安全のための設計基準となる可能性がある。

また、痛覚の形成に関与する侵害受容器の分布は体性感覚受容器の中で最も密であり¹⁷⁾、痛覚閾値は個人差が少なく安定した感覚で¹⁸⁾、繰り返し刺激に対する順応もほとんどない¹⁹⁾という点も、痛覚をバリアとして利用できる可能性がある。

一般に痛覚は、人間の皮膚に機械を押し込む際の変位量と速度に依存して発生すると指摘されており²⁰⁾、また、接触圧力値によっても痛覚耐性を表現することも可能である。しかし、人間とロボットの接触時に、ロボット自らが人間の皮膚変位や接触面積を時々刻々高精度に測定することは困難であり、ロボット側で痛覚耐性を有効な情報として捉えることはできないと考えられる。

したがって、ロボット側で抽出される情報によらず、結果的に発生する力に基づいて痛覚耐性値を表現することとし、これを人間側から形成する安全空間の最大範囲を示す基準として採用する。

3. 実験方法の検討

3.1 痛覚レベルの耐性値

痛覚レベルの反応の計測対象は、痛覚が発生する閾値と発生後の強さ、そして痛覚に対する我慢限界である耐性が考えられる¹⁸⁾。安全空間の限界は、これらの中で、人体各部位の痛覚の耐性を求めることに対応する。

本研究では、被験者の代表的な部位に機械的刺激量を徐々に増加させ、被験者が痛みの主観的限界を感じた場合の機械的刺激量を痛覚耐性値とする方法を用いる。また、被験者への機械的刺激を静的な場合と動的

な場合に分けて実験するため、与える機械的刺激量としてそれぞれ挟圧力と衝撃力を採用する。

さらに後述するように、静的および動的な機械的刺激を統一的に表現するため、動的機械刺激に対しては測定パラメータとして衝撃時間を加え、さらに被験者が痛みの限界を感じた時点の皮膚変形量と変形速度を併せて測定する。これにより、衝撃時間と力による記述方法、あるいは人間の皮膚変形量と変形速度による記述方法によって、人間側から見た痛覚耐性を表すことを試みる。

3.2 測定装置と手順

痛覚耐性値を測定する実験システムの構成を Fig. 1 に示す。このシステムは、機械的刺激量を与えるためのアクチュエータとして空気圧シリンダを利用し、ピストンロッド先端に接触プローブを取り付け、同軸上にロードセルを設置してある。空気圧シリンダは一定空気圧で駆動され、被験者へ機械的刺激量である力を与えながら、その力 $F(t)$ とピストンロッドの変位 $\delta(t)$ をサンプリング時間 5 ms で同時に測定した。また、速度 $V(t)$ は変位 $\delta(t)$ から求めた。

接触プローブの選定については、皮膚の粘弾性定数の測定において接触面積 $\phi 10$ mm の場合が最もバラツキが少ないことが実験的に示されていること²¹⁾、そして人間に接触するロボットは一般に剛体であることから、 $\phi 10$ mm の真鍮製円板を採用した。この実験システムの仕様を Table 1 に示す。

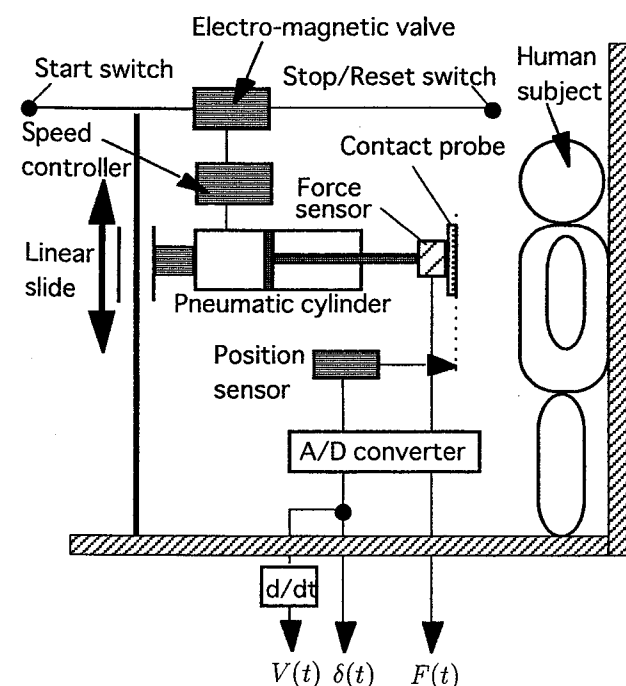


Fig. 1 Arrangement of experimental equipment.
実験装置の構成

測定手順は、まず基本的に第三者がスタートスイッチを操作することにより、空気圧シリンダのピストンロッドが伸長して、接触プローブが被験者に接触する。接触後、機械的刺激量を徐々に増加させ、被験者が痛覚を感じると同時に停止スイッチを押すことで初期状態に復帰するものである。

被験者は 10～50 代の男女合計 16 名で、衣服による測定誤差を避けるため、上半身はシャツ 1 枚の上に薄手の長袖作業服、下半身は作業ズボンに統一した。

Table 1 Specifications of experimental equipment.
実験装置の仕様

Applied element	Specification
1. Pneumatic cylinder	Piston diameter $\phi 30$, Piston stroke 150 mm
2. Supply pressure	59N/cm ² : Velocity control in exhaust site
3. Electro-magnetic valve	5 ports with reset control by a spring
4. Load cell	Capacity 490N, Compression type
5. Displacement sensor	Wire drive with analog output type (Range: 2m)
6. A/D converter	12 bits with amplifier type
7. Computer	PC9801: Sampling time = 5 ms

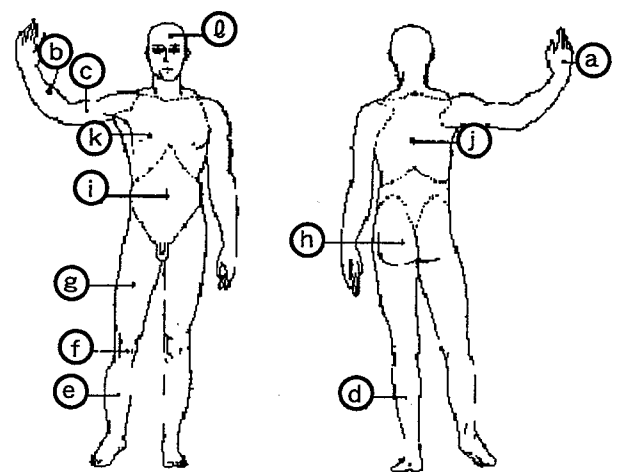


Fig. 2 Measurement points for evaluating human pain tolerance.
痛覚耐性値評価のための測定部位

測定部位は、Fig. 2 に示すように、ロボットと人間が接触する可能性の高いかあるいは痛みを感じやすいと想定される a~l の 12 部位を選定した。なお、a と l の部位については、プローブを直接皮膚に接触させた。

なお、痛覚耐性は感情的な痛みの修飾を受けやすいとされ¹⁸⁾、これを完全に取り除くことはできないものの、接触プローブを注視しないこと、極力、筋肉を緊張させないこと、痛覚の水準を保つことなどと併せて、感情的な要因を排除するよう事前に被験者に指示している。

4. 痛覚耐性値の測定

4.1 許容挾圧力の測定

静的な機械的刺激に対する痛覚耐性値のこれまでの評価は、指しか対象としていない^{13), 20)}。人間とロボットが接触する可能性のある部位は全身に及ぶため、これら全てを対象とした静的な機械的刺激による痛覚耐性値の評価が必要である。

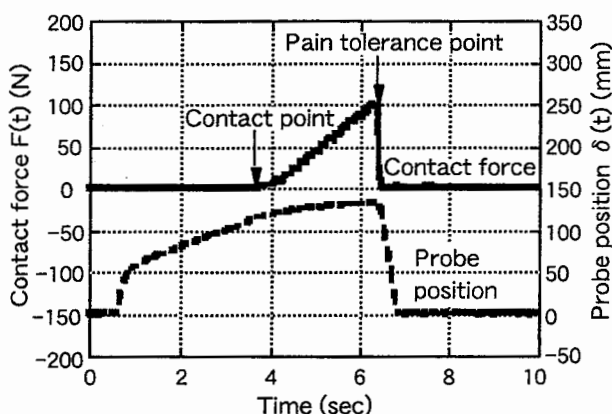


Fig. 3 Transient characteristics of static pain tolerance.
静的痛覚耐性値の測定波形

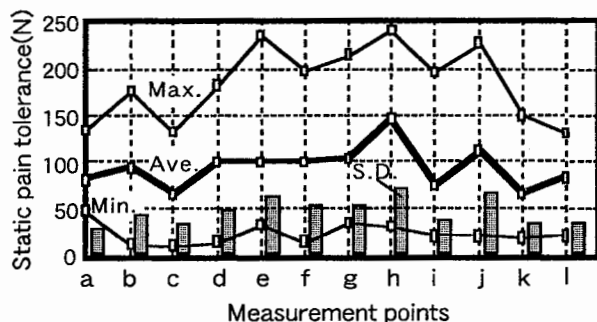


Fig. 4 Experimental results of static pain tolerance.
静的痛覚耐性値の測定結果

本研究では、挾圧力を非常にゆっくりと (0.13 m/s) 加える過程で、各部位に痛覚が発生する時点の接触力を測定し、このときの力を許容される痛みの限界値と見なして、静的痛覚耐性値として整理した。

挾圧力を各測定部位に加えた場合、力と位置の推移の例を Fig. 3 に示す。空気圧シリンダはほぼ一定の推力を出力しており、接触プローブが被験者に接触後、被験者は徐々に挾圧力を受け続け、それが耐えられる限界で自らがリセットすると、シリンダが急速に戻るという過程が分かる。ここでは、被験者がリセットをかけた瞬間の接触力を痛覚の静的耐性値とした。

Fig. 4 は 16 名の被験者に対して静的耐性値を測定し、各部位の耐性値の最小、最大、平均値、標準偏差に整理した結果である。それによると、耐性値の最小値は 13~46N、平均値は 65~146N、最大値は 133~245N、標準偏差は 28~68N であることが判明した。これらは部位毎で比較的変動が少ないことから、主観的な痛覚が客観的な侵害受容感覚として評価できる可能性を示唆している。

4.2 許容衝撃力の測定

衝撃力の耐性値の研究例としては、人体の中等傷の傷害レベルの発生限界の定量化を目的とした Wayne の耐性値曲線²²⁾がある。この研究では、頭部衝撃耐性曲線が報告されており、衝突時の加速度波形面積を衝撃持続時間で割った平均値 (有効加速度) と衝撃持続時間 Δt が評価パラメータに用いられている。

本研究においても、同様に動的な場合の機械的刺激量として衝撃力を取り上げ、ロボットは自動車と比較して低速で運転されるものとして、衝撃力をそのまま評価パラメータとして採用した。すなわち、衝撃持続時間 Δt と衝撃力の時間平均 F_{ave} で耐性値を整理した。

衝撃力を与える方法は、Fig. 5 に示すように、接近速度は人間が精神的に恐怖心を感じさせない程度の 0.35 m/s に設定して、被験者への動的刺激は自動的に 1s 毎に繰返し、その刺激を徐々に増加させる方法を採用した。このとき、耐えられる限界の衝撃力を許容衝撃力と見なして動的な耐性値に採用した。

ここで、衝撃持続時間 Δt はプローブを含めた空気圧シリンダの機械的インピーダンスに依存するため、衝撃持続時間 Δt が 0.1s 以上では、電磁弁で空気圧シリンダからの排気流量を調整することで Δt を制御した。また、 Δt が 0.05s 以下の刺激を与えるためには生体側の機械的インピーダンスが制約されているため、プローブ側の機械的インピーダンスを増加させる必要がある。しかしながら、空気圧シリンダを用いたシステムでは、その動作流体の圧縮性から Δt が 0.05s 以下の衝撃力を

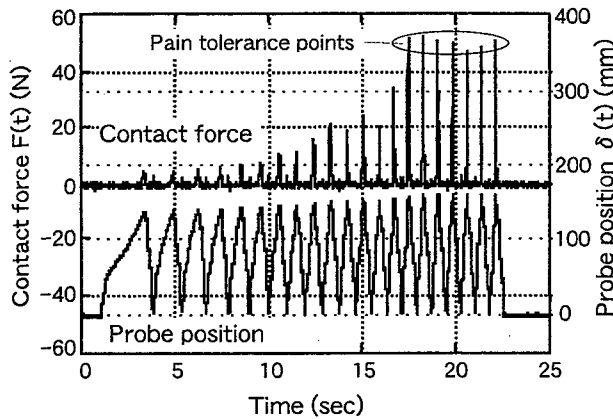


Fig. 5 Measurement of dynamic pain tolerance.
動的痛覚耐性値の測定

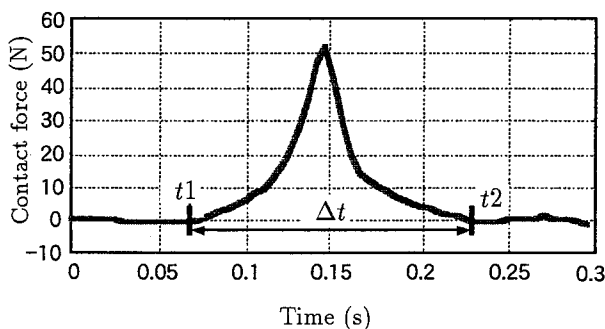


Fig. 6 Example of dynamic impact stimulus.
衝撃力波形の例

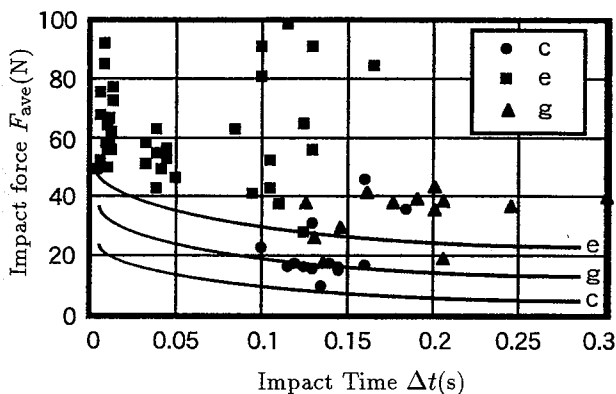


Fig. 7 Experimental results of dynamic pain tolerance.
動的痛覚耐性値の測定結果

発生することができないため、ハンマーの運動エネルギーを利用することにした。

実際には、インパクトハンマーを自由振り子落下運動させ、Fig. 6 に示すような短時間の衝撃力を被験者へ与えた。そして、力 $F(t)$ が 0.02s 以上正となる時刻 t_1 から 0.02s 以上負となる時刻 t_2 までの時間を衝撃持続時間 Δt と定義し、この Δt と衝撃力の時間平均 F_{ave} の関係を調べた。

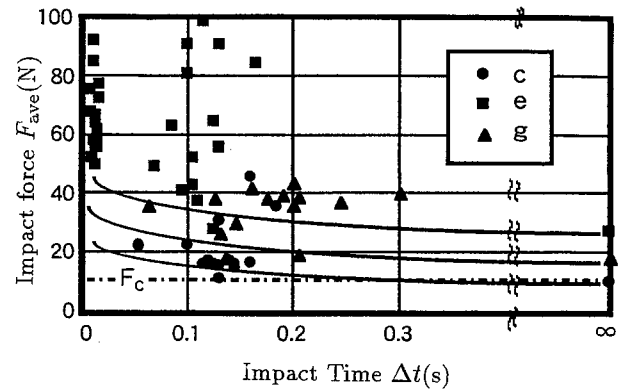


Fig. 8 Extended results of pain intensity curve based on impact duration time and mean impact force.
衝撃時間と衝撃力に基づく痛覚耐性曲線

10～50 代の男性被験者 13 名に対して、Fig. 2 における各測定部位の内、比較的静的痛覚耐性値が低くてロボットとの接触頻度が高いと想定される c (右上腕内側の中央)、e (右臍中央)、g (右大腿部正面中央) について許容衝撃力を測定した結果を Fig. 7 に示す。なお、図中の曲線は耐性値の下限を外挿したものである。

5. 痛覚耐性値の記述方法と評価

5.1 衝撃時間と衝撃力に基づく統一的記述方法

Fig. 4 で示した静的な痛覚耐性値は、衝撃持続時間 Δt が無限大になった場合と解釈できる。そこで、Fig. 4 の結果を Fig. 7 で示した動的な痛覚耐性値と合わせて整理したものを Fig. 8 に示す。図中の曲線は静的と動的な場合の痛覚耐性値を考慮し、それぞれの耐性値の下限を外挿したものであり、これを痛覚耐性曲線と定義する。

この結果から、静的及び動的な痛覚耐性値が衝撃時間と衝撃力という物理量に基づき、痛覚耐性曲線を用いて統一的に記述できた。また、 $\Delta t \ll 0.1s$ の領域では力積がほぼ一定と見なして表現できる可能性もある。なお、Fig. 8 の F_c は、各部位の下限值から得られる痛覚耐性曲線を Δt に依存せずに満足するための痛覚耐性値として利用することができる。

5.2 変形速度と変形量に基づく統一的記述方法

生体の機械的インピーダンスの定量化の観点から、動的刺激に対する等価的な質量項は十分小さいと考えられる。すなわち、生体の機械的インピーダンスは等価的な粘性項とバネ項のみに注目すればよく、動的な痛覚耐性値 $F(t)$ は生体の機械的インピーダンスが規定できる場合、変形量 $\delta(t)$ と変形速度 $V(t)$ の 2 つの物理パ

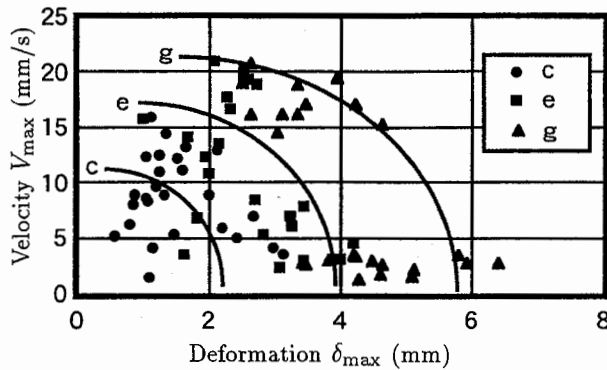


Fig. 9 Relationship between human deformation and velocity.
人体の変形量と変形速度の関係

Table 2 Estimated Stevens parameter.
スティブンス則のパラメータ

	c	e	g
α	1.5	1.5	1.5
K_{s1}/K_{s2}	5.5	4.7	4.3

ラメータでも記述できることが予測される。

また一方で、痛みを評価する侵害受容器に刺激を与える立場からも、痛覚の支配的な刺激量が変形量 $\delta(t)$ と変形速度 $V(t)$ で記述できることが指摘されており²³⁾、変形量 $\delta(t)$ と変形速度 $V(t)$ の2つの物理パラメータで記述できる可能性がある。

したがって、痛覚耐性値を統一的に記述するアプローチにおいて、前述した衝撃時間と衝撃力に基づく記述方法と、変形速度と変形量に基づく記述は表裏の関係であり、両方の記述方法での検討が考えられる。

そこで、今回の実験で得られた動的な痛覚耐性値 $F(t)$ と変形量 $\delta(t)$ のデータをもとに、測定部位 c, e, g について最大変形量 δ_{\max} と最大変形速度 V_{\max} で整理した結果を Fig. 9 に示す。

ここで、生体の刺激量 X_i と感覚量 Y の関係として Stevens のべき法則があり、式 (1) で表現できることが知られている²³⁾。

$$Y = K_{s1}X_1^\alpha + K_{s2}X_2^\alpha + \dots = \sum K_{si}X_i^\alpha \quad (1)$$

ここで、 K_{si} , α は定数である。

これを痛覚の場合に適用すると、痛覚の刺激量として皮膚の最大変形量と変形速度が指摘されている²⁰⁾ため、最大変形量 δ_{\max} と変形速度 V_{\max} に対する痛覚強度

Y_{pain} の関係は、式 (2) で表現できる。

$$Y_{\text{pain}} = (K_{s1}/K_{s2})\delta_{\max}^\alpha + V_{\max}^\alpha \quad (2)$$

Fig. 9 のデータは、プローブの材質を考慮すると、 δ_{\max} と V_{\max} はそれぞれ人体の皮膚変形量と変形速度と見なすことができる。そこで、各被験者の感覚量である痛覚強度 Y_{pain} を1と仮定し、式 (2) に示すモデルで各部位のデータを非線形最小二乗法で同定すると、Fig. 9 の曲線を得ることができる。同定したパラメータを Table 2 に示すが、Stevens のべき法則の指数 α は、皮膚感覚で 0.6~1.6、深部感覚で 1.5~1.7 とされている²⁴⁾ことから、痛覚の刺激量を δ_{\max} , V_{\max} としたとき両者間には Stevens のべき法則が成立していると言える。

この結果から、静的、動的な場合の耐性値が皮膚変形量と変形速度でも統一的に記述できる可能性があることが明らかとなった。

6. 結 言

人間の痛覚がロボットに対する予防安全の及ぶ限界を知らせる役割を担っているという観点から、痛覚耐性値の評価の必要性を指摘して、痛覚耐性値の測定実験の概要を示した。さらに、痛覚耐性値を静的な場合と動的な場合に分けて、それぞれ静的許容接触力と痛覚耐性曲線を求め、侵害受容感覚としての客観性を示唆する評価結果が得られた。

その概要を以下に示す。

- 1) 静的な場合の痛覚耐性値は挟圧力で記述でき、その痛覚耐性値の平均値は 65~146N、最小値は 13~46N であった。
- 2) 動的な場合の痛覚耐性値は、衝撃持続時間と衝撃力の実効値（時間平均値）をパラメータにした痛覚耐性曲線として表現できる。
- 3) 静的、動的な場合の痛覚耐性値を衝撃持続時間と力をパラメータにとり、統一的に痛覚耐性曲線で記述した。
- 4) 痛覚の支配的な刺激量と予測される皮膚の変形量、皮膚の変形速度をパラメータに用いて、痛覚耐性値を記述できることを明らかにした。
- 5) 力の次元及び位置・速度の次元で記述した場合の両方の痛覚耐性値を示すことで、適用にあわせた柔軟な安全設計指標を示すことができた。

本研究により明らかにした痛覚耐性値は制約された条件下におけるものであり、適用範囲は限定されることが予測される。しかし、これまで耐性値を共存型機械の安全設計指標に取り入れるための適用研究は事例が乏しく、今後、より詳細な検討が必要となる。本研究の成果を安全設計指標としてより信頼できるものに

するためには、さらなるデータの蓄積と共に、皮膚深部における痛覚も考慮した上で痛覚耐性の記述方法を明確にする必要がある。

さらに、ロボットシステム側でも、本研究で得られた痛覚耐性値を踏まえた制御方式、ロボットの材質、構造、アクチュエータ機能などの開発、適用等の多くの解決すべき課題が残されており、今後の研究が期待される。

謝 辞

本研究は、豊田工業大学の山田陽滋教授とトヨタ自動車（株）の吹田和嗣氏との協力により実現されたものであり、ここで両氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Manipulating Industrial Robots, ISO 10218, (1992).
- 2) 杉本, 池田, 産業用ロボットの安全性と高信頼性技術, 日本ロボット学会誌, 14-6, (1997), 788-791.
- 3) B. S. Dhillon and O. C. Anude, Robot Safety and Reliability, A Review, Microelectron. Reliab., 33-3, (1993), 413.
- 4) 白水, 新高齢化社会対話, 日本機械学会誌, 96-898, (1993), 86.
- 5) パーソナルロボットの標準化に関する調査研究成果報告書, 日本ロボット工業会, (1997).
- 6) 人間と共存するロボットの新技术, 計測と制御, 34-4, (1995).
- 7) 堤, 杉友, 人と共生するロボット, Robot, 89, (1993), 114.
- 8) 秋山, 自動車と安全, 自動車技術, 46-7, (1992).
- 9) M. Rahimi and W. Karwowski, Human Perception of Robot Safe Speed and IdleTime, Behav. Inf. Technol., 9-5, (1990), 381.
- 10) 大塚, 池浦, 猪岡, ロボットの動きが人間の心理に及ぼす影響, 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1993), 1209.
- 11) 松野, 衝突に対する人間の生存限界, 日本機械学会誌, 82-726, (1979), 482.
- 12) 佐藤, 人体耐性値確立の方法とその研究動向, 自動車技術, 29-2, (1975), 83.
- 13) 本城, 清水, 梅崎, 挟まれ防止システムの安全性評価に関する研究, 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3, (1993), 1205.
- 14) 森田, 鈴木, 川崎, 菅野, 人間共存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, 16-1, (1998), 102-109.
- 15) 池田, 梅崎, 井上, 玉野, 振動子を用いた触覚センサの構成, 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1991), 703.
- 16) IASP Subcommittee on Taxonomy, Classification of Chronic Pain. Description of Chronic Pain Syndromes and Definition of Pain Terms, Pain Suppl., (1986), 1.
- 17) R. P. Arthur and W. B. Shelley, The Innervation of Human Epidermis, J. Invest. Dermat., 32, (1959), 397.
- 18) 赤松, 痛みと評価, バイオメカニズム学会誌, 14-3, (1990), 151.
- 19) Greene, Hardy, J. Applied Physiology, 17, (1962), 693.
- 20) 赤松, 針の押込み量をパラメータとした痛覚閾値測定, 医用電子と生体工学, 21-6, (1983), 465-471.
- 21) 入江, 岡, 山本, 生体機械インピーダンスの測定値の意味と硬さの指標, 電子情報通信学会誌, J75-D-II-5, (1992), 947.
- 22) L. M. Patrick, Human Tolerance to Impact-Basis for Safety Design, SAE Trans., SAE Paper, 650171, (1964), 785.
- 23) 畠山, 生物サイバネティクス II, 319, (1989), 朝倉書店.
- 24) 樋渡, ヒトと機械はどう対話するか, (1988), 121-124, 講談社.

(平成 10 年 2 月 4 日受理)