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*

山田 陽 滋^{*1}, 吹田 和 嗣^{*2} 池田 博 康^{*3}
杉本 旭^{*3}, 三浦 洋 憲^{*4}, 中村 尚 範^{*4}

Evaluation of Pain Tolerance Based on a Biomechanical Method for Human-Robot Coexistence

Yoji YAMADA, Kazutsugu SUITA, Hiroyasu IKEDA,
Noboru SUGIMOTO, Hironori MIURA and Hisanori NAKAMURA

In this paper, we discuss 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, we adopt somatic pain which can tolerate repeated mechanical stimuli. We carry out experiments to measure the threshold of human pain tolerance using a biomechanical method and statistical analysis. Moreover, we clarify human pain tolerance when a static or dynamic stimulus is applied. Human pain tolerance is characterized uniformly in terms of the pain intensity curve (PIC) which is fitted to the minimum values of both the static and the dynamic pain tolerance. Moreover, we investigated the relationship between the deformation and velocity of the human sections of our interest, when the human subjects felt somatic pain. Human pain tolerance will be a trigger to build up an advanced safety design standard.

Key Words: Satety, Human Tolerance, Human-Robot Coexistence, Biomechanical Method, Sensory Pain

1. 緒 言

1・1 共存のための予防安全 現在の産業用ロボットは、ヒトと空間的に隔離することで安全を確保している⁽¹⁾。そして、これまでのロボットの安全に関する研究はロボットの信頼性、保全者の安全確保、及び事故解析に関する研究が中心であった⁽²⁾⁽³⁾。

しかし今後、ヒトと同じ環境で共存し、ヒトとロボットが互いに得意な作業を分担する生産システム⁽⁴⁾⁽⁵⁾、高齢者や障害者に対するサービスロボット、さらには家庭内で家事補助を実行するホームロボットが必要になると予測される⁽⁶⁾。

このような共存ロボット実現のための技術としてマン・マシンインターフェイスに関する研究などが紹介されており⁽⁷⁾、特に共存時の安全の確保が重要な課題となることが指摘されている⁽⁸⁾。

自動車の安全技術を取り上げた場合、未然に事故を防ぐための予防安全と事故によるヒトの傷害を最小限に抑えようとする衝突安全に分類できる⁽⁹⁾。ここで、共存ロボットにおいても前者の予防安全が優先されるが、頻繁なヒトとロボット間の干渉を想定せねばならない共存状態においてヒト側の安全空間⁽¹⁰⁾を定義し、

予防安全することは困難であることが予測される。

一方で、ロボットの接近速度、加速度から発生するヒトの恐怖心を解析した研究等⁽¹¹⁾⁽¹²⁾があるが、ロボットによる周囲状況との干渉チェックを対象とした外界センサの現状の技術レベルを踏まえると、ヒト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。

1・2 安全空間としての痛覚 安全の分野における機械刺激に対するヒトの耐性値の研究例として、高速(たとえば35mile/h)で運転される自動車の衝突時の乗員の生存限界等の研究が紹介されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。しかしながら、これらの研究は衝突安全に注目しヒト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ヒトの耐性値を評価する試みはほとんどない状況である⁽¹⁵⁾。

ロボットの場合は、比較的低速な動作制御や外界認識のためのセンサフィードバック等の有効性が見込まれ、ヒトとの接触がヒト側の傷害とならずに済む⁽¹⁶⁾可能性がある。

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⁽¹⁷⁾。そこで、この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、ヒト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

* 原稿受付 1996年4月30日。

*1 豊田工業大学 (〒468 名古屋市天白区久方2-12-1)。

*2 正員、トヨタ自動車(株) (〒471 豊田市元町1)。

*3 正員、労働省産業安全研究所 (〒204 清瀬市梅園1-4-6)。

*4 (株)BPA (〒471 豊田市元町1)。

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⁽¹⁸⁾、痛覚閾値は個人差が少なく安定した感覚で⁽¹⁹⁾、順応もほとんどない⁽²⁰⁾⁽²¹⁾という点も、痛覚をバリアとして利用できる可能性を与えるものである。

そこで本稿では、ヒト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解明し、安全な共存ロボットの設計指標を提供することを目的とする。

2. 実験方法

2・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⁽²²⁾。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。

そこで筆者らは、被験者の代表的な部位に機械的刺激量を加え、耐えられる限界を痛覚耐性値とみなすアプローチを提案し、痛覚耐性値の測定例を既に報告した⁽²³⁾。

本研究でも同じ方法を採用し、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耐性値とする方法を用いた。

また、被験者への機械的刺激を静的、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した。

さらに後述する4章では、静的及び動的な機械的刺激を統一的に表現する方法として衝撃時間と力による記述方法、及びヒトの皮膚変形量、変形速度による耐性値記述方法を提案する。

2・2 実験方法の検討 実験システムの構成を図1に示す。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た。ピストンロッド先端にプローブを取り付け、同軸上にロードセルを設置した。与えた機械的刺激量である力 $F(t)$ とあわせてピストンロッドの変位 $\delta(t)$ をサンプリング時間5msで同時に測定した。また、速度 $V(t)$ は変位 $\delta(t)$ から求めた。

ここで、皮膚の粘弾性定数測定において接触面積 ϕ 10mm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⁽²⁴⁾、そして人間とロボットの接触を想定していることから、接触プローブとして ϕ 10mmの真鍮製円板を採用した。

第3者がスタートスイッチを操作し、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実験システム構成とした。この実験システムの仕様を表1に示す。

Fig.1 Arrangement of experimental equipment

Table.1 Specification of experimental equipment

Applied element	Specification
1.Pneumatic cylinder	Piston diameter ϕ 30, Piston stroke 150mm
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=5ms

被験者に対しては、衣服による測定誤差を避けるため、上半身はシャツ1枚の上に薄手の作業服、下半身は作業ズボンに統一した。

測定部位は、図2に示す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。

痛覚耐性においては、感情的な痛みの修飾を受けやすく⁽²²⁾、これを完全に取り除くことはできないものの、極力、筋肉の緊張をさせないこと、痛覚の水準を保つことなどとあわせ、感情的な要因を排除するよう事前に被験者に指示した。

Fig.2 Measurement points for evaluating human pain tolerance

3. 痛覚耐性値の測定

3・1 静的な実験—許容挾圧力の測定 これまで、静的な力を刺激量として考え、耐性値を測定した例として、自動ドアの挟まれ防止装置に関して手指が圧せられた場合の痛覚耐性値評価が報告されている⁽¹⁵⁾。ロボットの場合では、ヒトがロボットと接触する部位は全身に及ぶが、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は、筆者らによる報告例⁽²³⁾以外に見いだせない。

本研究では、挾圧力を非常にゆっくりと (0.13m/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耐性値として求め、このときの力を耐性値として整理することにした。

挾圧力を各測定部位に適用した場合の力と位置の過渡現象を図3に示す。実験方法は第3者がアクチュエータをスタートさせ、耐えられる限界で被験者自らがリセットする構成とす。本研究ではその耐性限界を静的耐性値とした。

Fig.3 Transient characteristics of static pain tolerance

10～50代の男女合計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を図4に示す。

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。

Fig.4 Experimental results of static pain tolerance

3・2 動的な実験—許容衝撃力の測定 衝撃力の耐性値の研究例として、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⁽²⁵⁾が有名である。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の方法を採用し、動的な場合の機械的刺激量として衝撃力を取り上げ、衝撃持続時間 Δt と衝撃力の時間平均 F_{ave} で耐性値を整理することにした。

衝撃力の与える方法を図5に示す。接近速度はヒトが精神的に恐怖心を感じさせない程度の 0.35m/s に設定した。被験者への動的刺激は自動的に1s毎に繰り返し、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アクチュエータ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アクチュエータの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は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、エア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した実験装置⁽²⁶⁾を採用した。

Fig.5 Measurement of dynamic pain tolerance

図6は耐性値における衝撃力の波形例である。ここで、力 $F(t)$ が 0.02s 以上正となる観測がされた場合の開始時刻を t_1 、力 $F(t)$ が 0.02s 以上負となる観測がされた場合の開始時刻を t_2 と定義し、その立ち上がり t_1 から立ち下がり t_2 までの衝撃持続時間 Δt と衝撃力の時間平均 F_{ave} の関係を調べた。

Fig.6 Example of dynamic impact stimulus

10～50代の男性被験者13名に対して、各測定部位 c, e, g について測定した結果を図7に示す。図中の曲線は耐性値の下限を外挿したものである。

Fig.7 Experimental results of dynamic pain tolerance

4. 痛覚耐性値の記述方法

4・1 衝撃時間と衝撃力に基づく統一的記述方法

図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することもできる。そこで図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図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る。この曲線を痛覚耐性曲線と定義し、以下PIC (Pain Intensity Curve) と略記する。

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に基づき、PICを用いて統一的に記述できる可能性がある。

Fig.8 Extended results of pain intensity curve

4・2 変形速度と変形量に基づく統一的記述方法
共存時の安全基準としての痛覚耐性値を衝撃時間と衝撃力という物理量で記述する試みを4・1節で提案した。

ここで、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の指摘⁽²⁴⁾があり、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⁽²⁷⁾、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。

従って、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期待される。

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} で整理した結果を図9に示す。

Fig.9 Relationship between human body deformation and velocity

ここで、刺激量 Y と感覚量 X_i の関係としてStevensのベキ法則があり、式(1)で表現できる⁽²⁷⁾。

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

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⁽²⁸⁾た

め、最大変形量 $\delta_{\max}$ 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。

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

図9のデータはプローブの材質を考慮すると、 $\delta_{\max}$ と $V_{\max}$ はそれぞれヒト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⁽²⁹⁾で同定した曲線を図9に示す。表1に同定したパラメータを示す。

Table.2 Estimated Stevens parameters

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

この結果から、痛覚の刺激量を $\delta_{\max}$, $V_{\max}$ として、両者間にはStevensのベキ法則が成立し、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。

5. 結 言

5・1 まとめ ヒトの痛覚が、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、ヒトの痛覚耐性値の評価の必要性を指摘した。そして、痛覚耐性値測定のための実験の概要を示した。

ヒトの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ることを示した。以下本研究から得られた結果をまとめる。

- 1) 静的な場合の痛覚耐性値は、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、痛覚耐性曲線として衝撃持続時間と衝撃力の実効値をパラメータとして示した。
- 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、統一的に耐性値曲線 (PIC) で記述できることもあわせて示した。
- 4) ヒトの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示した。

- 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した。

5・2 今後の課題 耐性値を共存ロボットの安全設計指標に積極的に取り入れた適用研究として、ヒト側の痛覚レベル⁽³⁰⁾⁽³¹⁾や、脳震盪発生限界に十分な安全率を加味した⁽³²⁾安全レベルを基準として設けて、干渉時の衝撃力をそれら以下に抑えようとする研究は、近年、やっと報告され始めたところである。今後ヒト側の受動特性を十分検討した共存システム開発・研究が望まれる。

更に、ロボットシステム側の研究課題として、本研究で得られた痛覚耐性値を踏まえた安全制御ロジック、ロボットの材質、構造、アクチュエータ機能などの開発、適用が課題である。

今後の痛覚耐性値の解明に対して、体性感覚としての痛覚の発生は、今回選定した部位の表層痛覚に限られない。従って、ロボットとの接触時の状況によっては、筋・腱・関節における深部痛覚を伴う場合も想定でき、これも重要な評価対象となり得る。

しかしながら、深部痛覚は、受容器が無随C線維の自由神経終末であり、slow painとしての特性を示す⁽³³⁾ため、痛覚耐性を求める際に傷害が発生する危険性もあり、志願者による実験は慎重を要する。

また、共存ロボットシステムの適用の可能性が高い高齢者、幼児、障害者などは痛覚耐性値が低いことが容易に予測でき、これらの被験者のデータを測定する必要がある。

以上、今回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、適用できる範囲は限定されることが予測される。今後、安全設計指標としてより信頼できるものにするため、耐性値の測定にとどまらず、耐性値空間を定義することが必要である。そのためには被験者数を増やし、痛覚耐性値とその記述方法を更に明確にする予定である。

謝 辞

本論で紹介された研究は、産官学の協力により実現されたものであり、本研究の機会及び援助を頂いた日本ロボット工業会：産業用ロボット標準化調査研究専門委員会第3分科会移動ロボットW/Gに対し、改めて謝意を表したい。

文 献

- (1) Manipulating Industrial Robots, ISO 10218:1992(E)
- (2) M.C.Bonny, Y.F.Yong, *Robot Safety*, (1985), IFS Ltd. and Springer-Verlag.
- (3) B. S. Dhillon, O. C. Anude, Robot Safety and Reliability: A Review, *Microelectron. Reliab.*, 33-3, (1993), 413, Pergamon Press.
- (4) 白水, 新高齢化社会対話 (自動車組立工場での), 機誌, 96-898, (1993), 86.
- (5) 吹田, 山田, 土田, 今井, 柔らかい被覆を持つロボットによる人間との接触検出に関する研究, ロボティクスメカトロニクス講演会'94論文集, B(1994), 897.
- (6) J.F.Engelberger, *Robotics in Service*, (1989), Kogan Page Ltd.
- (7) 人間と共存するロボットの新技术, 計測と制御, 34-4, (1995).
- (8) 堤, 杉友, 人と共生するロボット, *Robot*, 89, (1993), 114.
- (9) 秋山, 自動車と安全, 自動車技術, 46-7, (1992).
- (10) 杉本, 蓬原, 安全制御系における安全情報のエネルギー伝達, 機論, 56-530, C (1990), 2658.
- (11) M. Rahimi, W. Karwowski, Human Perception of Robot Safe Speed and Idle Time, *Behav. Inf. Technol.*, 9-5, (1990), 381.
- (12) 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.
- (13) 松野, 衝突に対する人間の生存限界, 機誌, 82-726, (1979), 482.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) IASP Subcommittee on Taxonomy, Classification of Chronic Pain. Description of Chronic Pain Syndromes and Definition of Pain Terms, *Pain Suppl.*, 3, (1986), 1.
- (18) R. P. Arthur, W. B. Shelley, The Innervation of Human Epidermis, *J. Invest. Dermat.*, 32, (1959), 397.
- (19) 赤松, 痛みと評価, バイオメカニズム学会誌, 14-3, (1990), 151.
- (20) Greene, Hardy, J. *Applied Physiology*, 17, (1962), 693.
- (21) R.F.Schmidt, 岩村ら訳, 感覚生理学, (1982), 金芳堂.
- (22) 赤松, 痛みと評価, バイオメカニズム学会誌, 14-3, (1990), 151.
- (23) 三浦, 吹田, 山田, 池田, 杉本, 人・ロボット共存のための人間工学実験による人体耐性値の解明, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1994), 639.
- (24) 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D-II, J75-D-II-5, (1992), 947.
- (25) L.M.Patrick, Human Tolerance to Impact-Basis for Safety Design, *SAE Trans.*, SAE Paper, 650171, (1964), 785.
- (26) 木下良二: 人体の衝撃応答に関する研究, 人間工学, 7-1, (1969), 28.
- (27) 畠山, 生物サイバネティクスII, 319, 1989, 朝倉書店.
- (28) 赤松, 針の押し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), 41.
- (29) 中川, 小柳, 最小二乗法による実験データの解析, (1987), 東京大学出版会.
- (30) K. Suita, Y. Yamada, N. Tsuchida, K. Imai, H. Ikeda, N. Sugimoto, The "Kyozon" System with Simple Contact Detection and Stop Capabilities for Safe Human - Robot Coexistence, *Proc. of IEEE Int. conf. on Robotics and Automation*, C, (1995), 3089.
- (31) 吹田, 山田, 土田, 今井, 池田, 杉本, 安全な接触検出及び停止機能を有する自律共存型フェイルセーフ・ロボットシステムに関する研究, ロボティクスメカトロニクス講演会'95論文集, A(1994), 261.
- (32) 鈴木, 川崎, 本田, 菅野, ヒトと協調作業するロボットの安全機構～素材の検討～, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1994, 127.
- (33) 齊藤, 杉ほか編, 人体機能生理学 - 痛覚, (1985), 225, 南栄堂.