

## 個人に着目した眼に迫る機械的危険源に対する 回避動作特性に関する研究

服部 貴政<sup>\*1</sup>, 山田 陽滋<sup>\*1</sup>, 岡本 正吾<sup>\*1</sup>, 森 周司<sup>\*2</sup>, 原 進<sup>\*1</sup>, 山田 峻輔<sup>\*3</sup>

### A Study on Avoidance Action Characteristics against a Mechanical Hazard Approaching Eyes Focusing on Individuals

Takamasa HATTORI<sup>\*1</sup>, Yoji YAMADA<sup>\*1</sup>, Shogo OKAMOTO<sup>\*1</sup>,  
Shuji MORI<sup>\*2</sup>, Susumu HARA<sup>\*1</sup> and Shunsuke YAMADA<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603 Japan

<sup>\*2</sup> Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University  
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395 Japan

<sup>\*3</sup> Mitsui Chemicals, Inc.

In this paper, a psychological experiment was conducted to investigate human avoidance action characteristics in a phase where harm almost reached human eyes in a human-robot coexistence system. A situation was set up where a sharp end-effector tip of a robot suddenly approached the eyes of a participant sitting in front of the robot. In the analysis of the experimental results, avoidance reaction time was defined as the time interval from the moment when the end effector began to approach the participant's eyes until the time when the participant began to move the head for avoiding the harm due to the end-effector tip. The results suggested that avoidance action characteristics depended on the initial distance between the eyes of a human and an approaching object. The results also sought to capture the fact that avoidance reaction time was significantly different among participants. A human-robot collision simulation was carried out focusing on a participant who had a tendency that his/her avoidance reaction time was longer.

**Key Words:** Human-robot coexistence system, Risk estimation, Avoidance action, Psychological experiment, Reaction time

### 1. 緒 言

機械安全の分野において、リスクアセスメントは必要不可欠なプロセスである。国際安全規格 ISO 12100:2010<sup>(1)</sup>の規定によると、リスクアセスメントにおいて、危険源の同定過程のうち、危険源に対応するリスクは、危害の重篤度と危害の発生確率という二つの要素によって見積もられる。このうち、危害の発生確率は、暴露頻度、危険事象の発生確率、回避可能性を考慮して見積もられる。

ところが、人間の危害回避行動に関する研究分野がヒューマンファクタとして未開拓であるために、回避可能性に関するデータが不足している現状にある。このため、回避可能性はアセッサにより直感的に見積も

られる傾向にある。これにより、リスク見積もりの結果は、一般に、必ずしも正確なものとはなっていない。

近年、ロボット安全の分野において、とくに危害の重篤度に重きを置いて多くの研究がなされてきた。Oberer & Schraft<sup>(2)</sup>は、ダミーの頭部、胸部、腰部に対するロボットの衝突を、有限要素モデルを用いてシミュレートすることにより、傷害の程度を調査した。Haddadin ら<sup>(3)</sup>は、ロボットをダミーの頭部や胸部に衝突させる実験を行うことにより、傷害の程度を調査した。

しかしながら、人間は、傷害を被る危機的な局面を迎える前に、通性として危害回避行動をとろうとする、という事実がこれらの研究の中では議論されていない。また、眼は、身体の他の部位と比べて、重篤な危害を負いやすい特異な部位である。このため、眼に関するリスクの見積もり、とくに回避可能性の見積もりが行われるべきである。しかし、このような研究は過去に報告されていない。

<sup>\*1</sup> 名古屋大学大学院工学研究科 (〒 464-8603 名古屋市千種区不老町) hattori.takamasa@e.nagoya-u.jp, {yamada-yoji, okamoto-shogo, haras}@mech.nagoya-u.ac.jp

<sup>\*2</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究科 (〒 819-0395 福岡市西区元岡 744) mori@inf.kyushu-u.ac.jp

<sup>\*3</sup> 三井化学株式会社

われわれは、人間・ロボット共存系において、眼に危害が及びそうになる局面を陽に考慮して、人間の回避動作の特性を調査する心理学実験に着手した<sup>(4)</sup>。本稿では、文献<sup>(5)~(7)</sup>で報告した心理学実験の内容と結果について述べたうえで、回避動作の特性に関して参加者個人に着目して解析した結果を報告する。心理学実験の実施に当たっては、名古屋大学工学部倫理部会の承認を得た。

## 2. 反応時間分布の推定法

人間の回避動作の特性を表すパラメータの一つとして、反応時間を取り上げる。本研究では、実験で得られる反応時間データから、カーネル密度推定法<sup>(8)</sup>を用いて、反応時間の確率分布、すなわち反応時間分布を推定する。カーネル密度推定値は、

$$\hat{f}(t) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{t-T_i}{h}\right) \quad (1)$$

で求められる。ここで、 $t$ は反応時間、 $n$ は反応時間の全データ数、 $h$ はバンド幅、 $T_i$ は*i*番目のデータの反応時間、 $K(t)$ はカーネル関数である。本研究では、カーネル関数として、標準正規確率密度関数を用いる。よって、 $K(t)$ は、

$$K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (2)$$

で与えられる。本研究では、バンド幅をSilverman<sup>(9)</sup>の方法により求める。この方法は、

$$h = \frac{0.9}{n^{1/5}} \min\left(s, \frac{Q_3 - Q_1}{1.34}\right) \quad (3)$$

で表される。ここで、 $s$ は反応時間データの標準偏差、 $Q_1$ は反応時間データの第1四分位点、 $Q_3$ は反応時間データの第3四分位点である。よって、 $Q_3 - Q_1$ は反応時間データの四分位範囲を表す。

## 3. 心理学実験

本研究では、人間との共存が望まれている次世代ロボットの把持部や把持対象物が危険源となる、一般的な状況を考えている。本研究では、その典型的な例として、実用化研究<sup>(10)</sup>を参考に、「生産現場において、ロボットの鋭利なエンドエフェクタ先端が、ロボットの正面に座っている作業者の眼を襲う」という状況を想定する。

この想定状況において、作業者は、突然接近してくるエンドエフェクタに対して、本来は視覚情報と聴覚情報に基づいて危害回避行動をとる。しかしながら、実際の生産現場における作業環境では、作業者にとっ

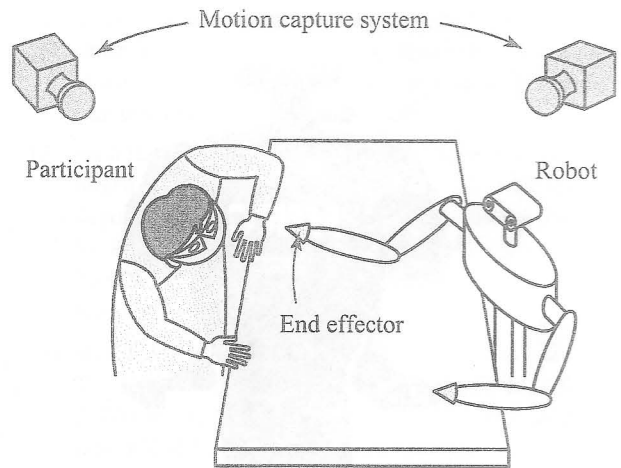


Fig. 1 Illustrative diagram of the psychological experiment

て、共存しているロボットに装備されているモータの音が必ずしも常に聞こえているわけではない。このため、本研究では、より危険な状況として、視覚情報のみが作業者に与えられる状況に着目する。

人間・ロボット共存系であるこのような状況を設定し、人間の回避動作の特性を調査する心理学実験を実施した。心理学実験の概念図を図1に示す。同図は、ロボットのエンドエフェクタが参加者の眼部に向かって接近し、参加者がエンドエフェクタ先端による危害を回避しようと頭部を動かす回避動作をとる様子を示している。

**3.1 実験の概要** われわれのこれまでの実験において、参加者の前後方向の姿勢における試行間の違いが、回避動作の特性に影響することが示唆された<sup>(6)</sup>。このことから、回避動作の特性は、人間の眼部とロボットのエンドエフェクタ先端との初期距離に依存することが予想される。そこで、心理学実験では、参加者の眼部とエンドエフェクタ先端との初期距離が異なる3パターンのエンドエフェクタの初期位置を設定した。このパターンにより回避動作の特性が影響されるかを調査することが、本実験の目的である。

**3.1.1 実験装置** ロボットとして、人間・ロボット共存系における協調作業のために設計された上体ヒューマノイドロボット (HIRO, 川田工業 (株))<sup>(10)(11)</sup>を使用した。ロボットの写真を図2に示す。参加者は防護メガネを装着した。また、参加者とロボットの間は、作業台により隔てた。さらに、ロボットの手先については、万が一参加者の防護メガネに衝突しても危害が及ばないように、機械部品をピックアンドプレースするために本来取り付けられていたエンドエフェクタを取り外し、四角錐型の軟質ポリウレタンフォームで代



Fig. 2 Upper-body humanoid robot

替した。

**3.1.2 参加者** 男性5名, 女性4名の計9名が本実験に参加した。年齢は, 18歳以上28歳以下であった。全参加者は健康であり, 視力が良好であった。また, いずれの参加者も先端恐怖症ではないと自己申告した。

**3.1.3 実験の設定** 参加者は, モーションキャプチャシステムのマーカが取り付けられた帽子を装着し, ロボットの正面において, 背もたれのないイスに座った。また, 参加者は, 外部からの聴覚情報を得ないように, ノイズキャンセリングイヤホンを装着し, 工場内で録音された音を聞いた。そして, 参加者は, ロボットの作業エリアに身をさらして, ピンセットを用いてベアリングのリング間にローラとリテーナの2種類の機械部品を挿入する課題を行った。なお, この課題の作業方法は, ベアリングの生産現場において実際に行われている方法と同様である。

参加者がこの課題を行っているときに, ロボットの腕の先端に取り付けられた二つのエンドエフェクタのうち, どちらか一つを参加者の眼部に向かって突然接近させた。このときの参加者の頭部の運動をモーションキャプチャシステムで捉えた。また, 参加者とロボットの運動をビデオカメラで撮影した。

**3.2 実験条件** 参加者が刺激呈示のタイミングを予想しないために, 刺激前間隔 (foreperiod) の確率分布として, 指数分布がよく用いられる<sup>(12)</sup>。これに倣い, 本実験では, 平均15sの指数乱数値と10sとの和をとり, このうち60s以下のものを統計的にランダ

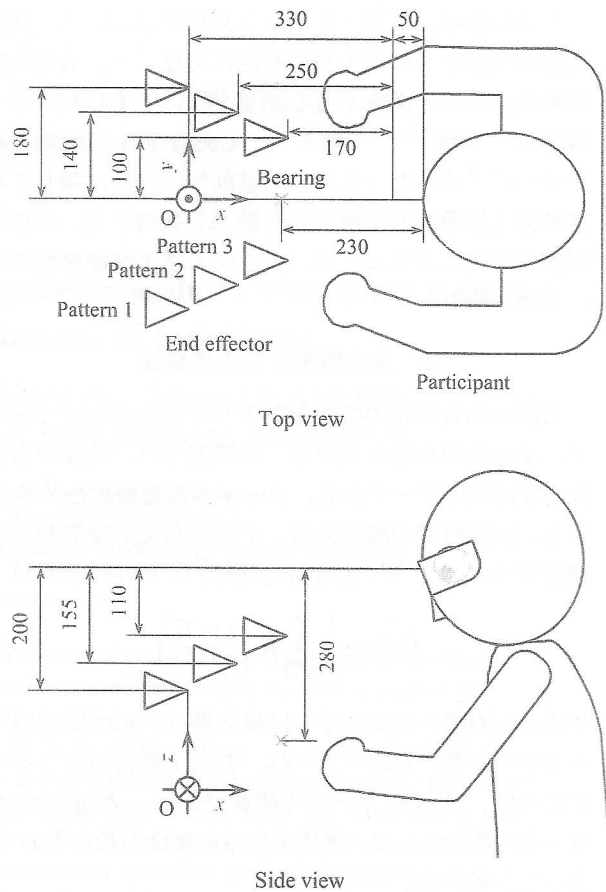


Fig. 3 Schematic diagram of the human-robot interactive locations in the psychological experiment (Unit: mm)

ムな刺激前間隔として用いた。

心理学実験において, 参加者に対してロボットのエンドエフェクタが接近する状況における位置関係の概略図を図3に示す。ベアリングのリングは, 同図のバツ印で示した位置に置かれた。エンドエフェクタの初期位置を3パターン設定した。参加者の眼部に対するエンドエフェクタ先端の近さが異なり, パターン1は最も遠い位置であり, パターン3は最も近い位置であった。参加者の眼部とエンドエフェクタ先端との初期距離は, パターン1, 2, 3においてそれぞれ約470mm, 約370mm, 約270mmに設定した。エンドエフェクタ先端は, 参加者がベアリングのリングを注視している際に, 参加者の周辺視野内で認識されるように, 参加者本人に確認したうえで初期的に位置づけられた。具体的には, 課題の位置を視野の中心として, 3パターンとも視角約30°に初期的に位置づけられた。また, エンドエフェクタ先端は, 各試行におけるロボットの運動終了時に, 参加者の眼部の初期位置から約50mm前方に到達するようにした。

心理学実験におけるロボットのエンドエフェクタ先

Table 1 Motion parameters of the robot's end-effector tip in the psychological experiment

Pattern	Maximum speed [mm/s]	Initial acceleration [mm/s <sup>2</sup> ]
1	Approx. 1330	Approx. 8900
2	Approx. 1180	Approx. 7500
3	Approx. 990	Approx. 6800

端の運動パラメータを表1に示す。ロボットの暴走状態を想定した速さとして、エンドエフェクタ先端の最大速さを、各パターンにおいて、それぞれ同表の値に設定した。エンドエフェクタ先端の初期加速度は、それぞれ同表の値に設定した。左右二つのエンドエフェクタの接近経路は互いに対称であり、エンドエフェクタの接近運動軌跡は、各パターンで同じとした。

**3.3 実験の手続き** 参加者は、60試行を行った。各パターンの出現は、ランダムに設定した。ロボットの左右二つのエンドエフェクタのうち、どちらが参加者の眼部に向かって接近するかは、各試行でランダムに設定した。

### 3.4 実験結果

**3.4.1 パターン別の回避反応時間分布** 本研究では、ロボットのエンドエフェクタが参加者の眼部に向かって接近し始めてから、参加者がエンドエフェクタ先端による危害を回避しようと頭部を動かし始めるまでの時間を、「回避反応時間」と定義した。

全参加者の回避反応時間データを一つにまとめ、そこからパターン別に推定した分布を図4に示す。同図より、回避反応時間分布のピークの位置が、互いに異なっていることがわかる。また、参加者の眼部とロボットのエンドエフェクタ先端との初期距離が短いほど、回避反応時間が短い傾向が見られる。これは、回避動作の特性が、人間の眼部とエンドエフェクタ先端との初期距離に依存することを示唆する結果である。

**3.4.2 パターン間の回避反応時間に対する検定** 回避反応時間がパターンにより変化するかを調査するために、三つ以上の群のうち2群間に有意差があるかを調査するノンパラメトリック検定である Steel-Dwass 検定<sup>(13)(14)</sup>を実施した。帰無仮説は、「2種類のパターンに対する回避反応時間には差がない」とした。全参加者の回避反応時間データを一つにまとめ、パターン間に対して Steel-Dwass 検定を行った結果を表2に示す。同表より、パターン1とパターン2の間の差は、有意傾向にある。パターン1とパターン3の間には、有意水準  $\alpha = 0.001$  で有意差があると考えら

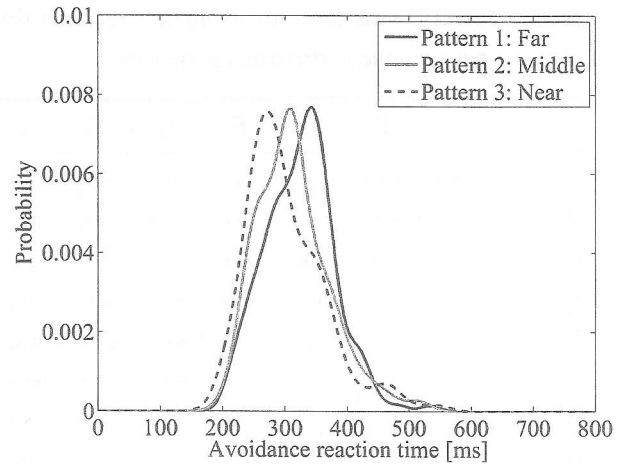


Fig. 4 Probability distributions of avoidance reaction time for all types of the patterns

Table 2 Steel-Dwass tests for avoidance reaction time between the patterns

Patterns	Range of two-sided $p$ -value
1 & 2	$0.05 < p < 0.10$
1 & 3	$p < 0.0001$
2 & 3	$0.025 < p < 0.05$

れる。パターン2とパターン3の間には、 $\alpha = 0.05$  で有意差があると考えられる。以上により、回避動作の特性は、人間の眼部とロボットのエンドエフェクタ先端との初期距離に依存することが示唆された。

**3.4.3 回避反応時間における個人差の調査** 回避反応時間に個人差があるかを調査するために、Steel-Dwass 検定を実施した。帰無仮説は、「2名の参加者に対する回避反応時間には差がない」とした。パターン1, 2, 3における参加者間の回避反応時間に対して Steel-Dwass 検定を行った結果を表3, 4, 5に示す。ここで、A~Iは参加者を表し、\*, \*\*, \*\*\*は有意水準  $\alpha = 0.05$ ,  $\alpha = 0.01$ ,  $\alpha = 0.001$  で有意であることを、+は有意傾向にあることを、n.s.は有意でないことを示す。表3~5より、回避反応時間には有意に個人差が認められる。

## 4. 特定個人・ロボット衝突シミュレーション

心理学実験の結果、回避反応時間には有意に個人差が認められた。ここで、より危険であると考えられる、回避反応時間が長い傾向にある参加者に着目する。9名の参加者のうち、すべてのパターンにおいて回避反応時間が長い傾向にあったのは、参加者Gである。このため、参加者Gに着目して特定個人・ロボット衝突

Table 3 Steel-Dwass tests for avoidance reaction time between the participants in pattern 1

	B	C	D	E	F	G	H	I
A	**	***	***	*	*	***	n.S.	**
B		+	n.S.	n.S.	***	***	n.S.	n.S.
C			**	**	***	*	*	**
D				n.S.	***	***	n.S.	n.S.
E					***	***	n.S.	n.S.
F						***	***	***
G							***	***
H								n.S.

Table 4 Steel-Dwass tests for avoidance reaction time between the participants in pattern 2

	B	C	D	E	F	G	H	I
A	+	***	**	+	n.S.	***	n.S.	**
B		**	n.S.	n.S.	***	***	n.S.	n.S.
C			**	***	***	n.S.	***	*
D				n.S.	***	***	n.S.	n.S.
E					***	***	n.S.	n.S.
F						***	***	***
G							***	***
H								*

Table 5 Steel-Dwass tests for avoidance reaction time between the participants in pattern 3

	B	C	D	E	F	G	H	I
A	***	***	***	*	+	***	*	***
B		n.S.	n.S.	n.S.	***	***	n.S.	n.S.
C			n.S.	**	***	*	*	n.S.
D				+	***	***	n.S.	n.S.
E					***	***	n.S.	*
F						***	***	***
G							***	***
H								n.S.

シミュレーションを行った。

**4.1 シミュレーションの方法** 参加者 G の回避反応時間のうち、各パターンにおいて最も長い回避反応時間を取り上げた。この値は、パターン 1, 2, 3 においてそれぞれ 534 ms, 517 ms, 550 ms であった。ここで、簡略化のために、図 5 に示すように、ロボット

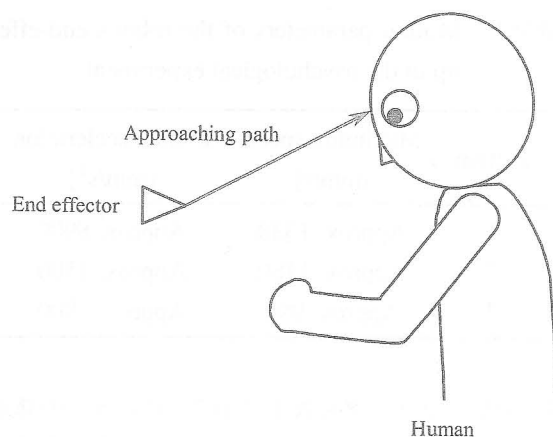


Fig. 5 Approaching path of the robot's end-effector tip in the simulation (Side view)

のエンドエフェクタ先端は人間の眼部に向かって直線的に運動すると仮定した。そして、心理学実験におけるエンドエフェクタの運動を合理的に外挿する<sup>(15)</sup>ことにより、エンドエフェクタ先端が人間の眼部に衝突してしまう状況をシミュレートし、各パターンにおける最も長い回避反応時間である場合に、回避動作の開始前に衝突が発生しないか調査した。

**4.2 シミュレーションの条件** 心理学実験の結果、回避動作の特性は、人間の眼部とロボットのエンドエフェクタ先端との初期距離に依存することが示唆された。また、回避動作を誘発する外部刺激は、エンドエフェクタの初期の接近運動であると考えられる。このため、人間の眼部とエンドエフェクタ先端との初期距離、およびエンドエフェクタ先端の初期の接近速度は心理学実験と同じにした。

人間の眼部とロボットのエンドエフェクタ先端との初期距離を、パターン 1, 2, 3 においてそれぞれ 470 mm, 370 mm, 270 mm に設定した。一方、エンドエフェクタ先端の接近速度を図 6 に示す。各パターンとも、初期の接近速度は心理学実験と同じであり、定められた値に達すると、エンドエフェクタが外挿的に等速運動を行うようにした。この値は、パターン 1, 2, 3 においてそれぞれ 1350 mm/s, 1200 mm/s, 1000 mm/s に設定した。

**4.3 シミュレーションの結果** シミュレーションを行った結果、各パターンにおける最も長い回避反応時間である場合には、いずれのパターンにおいても回避動作の開始前に人間の眼部とロボットのエンドエフェクタ先端との衝突が発生することがわかった。したがって、参加者 G にとって、本シミュレーションで設定したエンドエフェクタ先端の接近速度は、回避動作をとることができない可能性のある危険な速さで

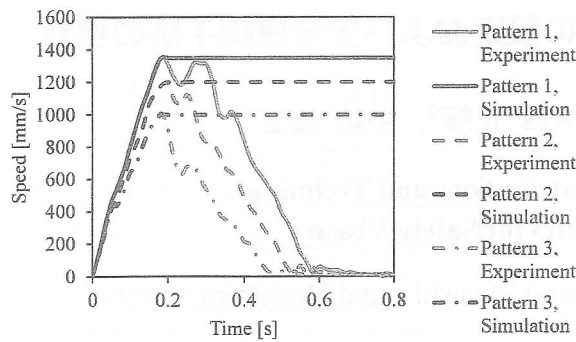


Fig. 6 Approaching speed of the robot's end-effector tip

あると考えられる。各パターンにおける最も長い回避反応時間である場合であっても衝突発生前に回避動作をとることができるためには、等速運動時の接近速度が、パターン 1, 2, 3 においてそれぞれ 970 mm/s 以下, 780 mm/s 以下, 515 mm/s 以下である必要がある。

## 5. 結 言

本稿では、人間・ロボット共存系において、眼に危害が及びそうになる局面における人間の回避動作の特性を調査する心理学実験を実施した。ロボットの鋭利なエンドエフェクタ先端が、ロボットの正面に座っている参加者の眼部に向かって突然接近する、という状況を設定した。実験の結果、回避動作の特性は、人間の眼部と接近物体との初期距離に依存することが示唆された。また、回避反応時間には有意に個人差が認められた。そして、回避反応時間が長い傾向にある参加者に着目し、各パターンにおける最も長い回避反応時間である場合について特定個人・ロボット衝突シミュレーションを行った。

今後は、回避動作と接近物体の速度や加速度との関係について調査する心理学実験を実施していくことが考えられる。そして、回避反応時間等の個人差を考慮して、人間と安全に共存できるロボットの運動条件について調査していきたい。

**謝辞** 心理学実験に関してご助言を下された、名古屋大学エコトピア科学研究所客員教授の古賀一男先生に感謝する。心理学実験にご協力くださった、名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程学生の伊藤聡一郎氏および砂田宏二氏に感謝する。本研究は、科研費 21246041 の助成を受けたものである。

## 参 考 文 献

(1) *Safety of Machinery — General Principles for Design — Risk Assessment and Risk Reduction*, ISO 12100:2010, (2010).

(2) Susanne Oberer and Rolf Dieter Schraft, "Robot-Dummy Crash Tests for Robot Safety Assessment", *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2007), pp.2934–2939.

(3) Sami Haddadin, Alin Albu-Schäffer, Mirko Frommberger, Jürgen Rossmann and Gerd Hirzinger, "The "DLR Crash Report": Towards a Standard Crash-Testing Protocol for Robot Safety - Part I: Results", *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2009), pp.272–279.

(4) 服部 貴政, 山田 陽滋, 森 周司, 江崎 翔, 原 進, "人間・ロボット共存系を対象とした心理学実験に基づく危害回避行動特性に関する研究", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.110, No.98 (2010), pp.7–10.

(5) 服部 貴政, 山田 陽滋, 森 周司, 岡本 正吾, 原 進, "危害の回避可能性の見積もりを目的とした回避動作特性解明のための心理学実験", 安全工学シンポジウム 2011 講演予稿集, (2011), pp.132–135.

(6) 服部 貴政, 山田 陽滋, 森 周司, 岡本 正吾, 原 進, "眼に迫る危険源に対する人間の回避動作に関する心理学実験", 日本視覚学会 2011 年夏季大会抄録集, Vision, Vol.23, No.3 (2011), p.169.

(7) 服部 貴政, 山田 陽滋, 森 周司, 岡本 正吾, 原 進, "眼に迫る危険源に対する人間の回避動作に関する反応時間分布の推定とモデリング", 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, (2011), 1N1-5.

(8) Emanuel Parzen, "On Estimation of a Probability Density Function and Mode", *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol.33, No.3 (1962), pp.1065–1076.

(9) Bernard W. Silverman, *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, Chapman and Hall, (1986).

(10) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, "平成 18 年度～平成 20 年度成果報告書「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト 人間・ロボット協調型セル生産組立システム(次世代産業用ロボット分野) コンパクトハンドリングシステムを備えた安全な上体ヒューマノイド」", (2009).

(11) Takuya Ogure, Yoshihiro Nakabo, SeongHee Jeong and Yoji Yamada, "Hazard Analysis of an Industrial Upper-Body Humanoid", *Industrial Robot: An International Journal*, Vol.36, No.5 (2009), pp.469–476.

(12) Robert Duncan Luce, *Response Times: Their Role in Inferring Elementary Mental Organization*, Oxford University Press, (1986).

(13) Robert G. D. Steel, "A Rank Sum Test for Comparing All Pairs of Treatments", *Technometrics*, Vol.2, No.2 (1960), pp.197–207.

(14) Meyer Dwass, "Some  $k$ -Sample Rank-Order Tests", *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*, Stanford University Press, (1960), pp.198–202.

(15) 砂田 宏二, 山田 陽滋, 服部 貴政, 岡本 正吾, 原 進, "人間の回避動作特性を考慮した眼部へのロボット衝突シミュレータ", 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, (2011), 1N1-6.