眼部に迫る鋭利な機械的危険源を対象とした 眼部衝突基礎実験による重篤度調査

伊 藤 聡一郎* 山 田 陽 滋* 服 部 貴 政*
岡 本 正 吾* 原 進*

Basic Eye Part Collision Experiments against Sharp Mechanical Hazards for Severity Investigation

Soichiro Ito*, Yoji Yamada*, Takamasa Hattori*,
Shogo Okamoto* and Susumu Hara*

This study deals with the avoidance/mitigation possibility in severity estimation of harm from a mechanical hazard when a sharp-edged object approaches to a human eye part. We assume that a sharp end effector of a robot approaches the eye of a human in a human-robot coexistence system. We conduct a static eye part collision experiment and dynamic eye part collision experiment taking human avoidance/mitigation actions into consideration. Three conditions, open/close eyelid, collision positions, and collision angles, are changed in the static collision experiment. Consequently, it is confirmed that differences in severity come out from the changes in the experimental conditions. In the dynamic collision experiment, Bell's phenomenon, which is an upward rotation of the eyeball at the time of closing the eyelid, is taken into consideration and two conditions, collision positions and angles, are changed. Through the experiments, we find that Bell's phenomenon plays an important role for risk estimation. Although the avoidance/mitigation possibility has not been taken into consideration in eye part collision experiments, we consider that it is indispensable to risk estimation.

Key Words: Human-robot Coexistence System, Risk Estimation, Eye Injury, Avoidance/Mitigation Action, Severity of Harm, Sharp Trauma

1. 緒 言

1.1 背景

人間の身体部位のなかでも、眼部は、他の部位と比べて、機械的危険源によって受傷したときの重篤度が特異に高くなる。Haddadin ら [1] は、ロボットに装着された鋭利な道具による、豚の脚の柔らかい皮膚における受傷具合が、ロボットのトルクを制限することで軽減されることを示した。しかし、ロボットに対する人間の安全を考えるうえでは、むしろ眼部を重視したリスク見積もりが必要である。眼部は、特に鋭利な機械刺激に対しては、これが軽微な外力を伴うだけであっても、接触した場合には容易に重傷となりうる。ロボット本体が本質的安全設計の原則に従って、突き刺しなどの機械的危険源を取り除いた設計がなされても、ロボットの把持部や把持対象物は、アプリケーションによっては本質安全化を達成できない可能性がある。

本研究ではこのような場合を対象として、重篤度の観点におけるリスク見積もりの達成を目指す。

具体的には、機械部品を組み立てるための上体ヒューマノイドロボットを対象とし、その鋭利なエンドエフェクタが作業者の眼部を襲う状況を想定する。ロボット側に突き刺しなどの機械的危険源が同定される場合に、人間との共存を図るためには、人間側が防護メガネを着用するといった安全防護策を講じることを前提としなければならないという評価結果が、これまでリスクアセスメントによって結論づけられていた。しかしながら、人間とロボットの位置関係などの共存形態によっては、眼部受傷時の重篤度に変化が表れる。すなわち、眼部への衝突が必ずしも失明などの重傷に至らない可能性がある。

物体の衝突による眼部受傷に関する研究として、Kennedy ら [2] は、人間の遺体の眼部への衝突実験などを参考に、衝突実験用の人工の眼球や眼窩を製作した。Weaver ら [3] は、プラスチック棒や BB 弾など、様々な物体を眼球に衝突させるシミュレーションを行い、眼球破裂に至る、衝突時に角膜 (cornea) に加わる応力や硝子体 (vitreous) の圧力を調査した (Fig. 1)。しかしながら、これらの研究では、人間の閉瞼や、衝突時の衝

原稿受付 2011 年 12 月 10 日

*名古屋大学大学院工学研究科

*Graduate School of Engineering, Nagoya University

■ 本論文は提案性で評価されました。

Fig. 1 Structure of an eyeball

突物体の位置や角度の変化など、回避・軽減動作の影響は考慮されていない。

1.2 本研究の目的と位置づけ

本研究では、機械的な危険源である鋭利なエンドエフェクタの接近方向と、眼部における衝突位置に変化を与えた場合について、眼部衝突実験を行う。

眼部に対するエンドエフェクタの衝突のタイミングは、大きく三つに分けられる。すなわち、開眼時、閉眼途中、閉眼時である。エンドエフェクタの動作が非常に速かったり、人間がその接近に気づかなかつたりした場合には、開眼時に衝突が発生する。エンドエフェクタの接近に人間が気づけば、エンドエフェクタの速度や気づくタイミングによって、閉眼途中か、閉眼を終えた状態で衝突する。さらに、閉眼途中に衝突する場合には、閉眼運動とそれに伴って眼球が上転する Bell 現象 [4] を考慮する必要がある。なぜなら、眼瞼や眼球が運動する場合としない場合で、重篤度に差異が生じるかもしれないからである。

上述した三つの衝突タイミングのなかで、開眼時および閉眼時の衝突においては眼球は運動しないため、眼球運動を考慮しない静的な眼部衝突実験を実施すればよい。一方、閉眼途中の衝突においては Bell 現象が発現するため、眼球運動を考慮した動的な眼部衝突実験を実施する必要がある。本研究では、人間の回避・軽減動作を考慮して設定した衝突条件のもと、首頭部を固定した基礎実験という位置づけで、静的および動的な眼部衝突実験を行い、衝突条件の違いが重篤度にどのような影響を及ぼすかを検討する。

1.3 リスクアセスメント

本研究では、最終的に、人間・ロボット共存系における合理的なリスクアセスメントを達成することを目標の一つとしている。機械安全の分野におけるリスクアセスメントにおいて見積もられるリスク要素は、国際安全規格 ISO 12100:2010 [5] に規定されているように、危害の重篤度と危害の発生確率である。危害の発生確率はさらに、暴露頻度、危険事象の発生確率、回避可能性の三つに分けられる。これらをまとめると以下ようになる。

- 危害の重篤度
- 危害の発生確率
 - － 暴露頻度
 - － 危険事象の発生確率
 - － 回避可能性

危害の重篤度、暴露頻度、危険事象の発生確率、回避可能性をすべて見積もることができれば、リスクアセスメントが可能になる。本研究では様々な方向からのエンドエフェクタの衝突に

EA : End effector attacks
SA : Succeed in avoiding, FA : Fail in avoiding
MC : Mitigated condition, SC : Severe condition

Fig. 2 Event tree on an eye part collision with end effector

対する重篤度を調査している。また、本研究の想定状況においては、暴露頻度と危険事象の発生確率は、繰り返し作業であるので統計的に算出可能である。さらに、同著者グループの服部ら [6]、砂田ら [7] は、人間の正面に配置されたロボットのエンドエフェクタの接近に対する回避可能性を調査している。今後は、ロボットの配置を変え、接近条件を変化させて回避可能性の調査を進める予定である。したがって、これらを合わせれば、想定状況におけるリスク見積もりが可能になると考えられる。

1.4 研究対象

エンドエフェクタが作業者の眼部を襲うときの、眼部衝突に関する事象木を Fig. 2 に示す。はじめに、起因事故として、エンドエフェクタが作業者の眼部に接近する (EA: End effector attacks)。これに対し、作業者はまず、体幹をのけぞらせたり、首頭部をそむけたりすることでエンドエフェクタを避けようとすると考えられる。エンドエフェクタを避けるか、あるいは眼部以外の部位にエンドエフェクタが衝突すれば、眼部に受傷することはない (EA・SA: Succeed in avoiding)。逆に、眼部に衝突する場合には (EA・FA: Fail in avoiding)、眼部に何らかの受傷をすることになる。体幹・首頭部での回避による衝突時のエンドエフェクタの位置、角度の変化や、閉眼が間に合うことで、眼部における衝突条件が緩くなれば、受傷時の重篤度は低くなると考えられる (EA・FA・MC: Mitigated condition)。そうでなければ、衝突条件は厳しくなり、重篤度が高くなると考えられる (EA・FA・SC: Severe condition)。重篤度の高低の基準としては、例えば、職業復帰が困難になるような、著しい視力低下などに至る場合を重傷、そうでなければ軽傷と見なす、などが考えられる。Fig. 2 において、体幹・首頭部での回避は、エンドエフェクタが眼部に衝突することを避けられるかどうかであるのに対し、眼部の衝突条件は重篤度を左右する。本研究は、眼部における衝突条件の変化が重篤度に影響を及ぼす部分を研究対象とする。

2. 静的眼部衝突実験

2.1 実験目的

本実験では、開眼・閉眼に加え、衝突位置、衝突角度の三つの条件を変化させて、重篤度を調査する。開眼時と閉眼時の衝突の比較は、眼瞼が眼球をエンドエフェクタから守り、重篤度を軽減しうるかどうかなを知るために重要である。また、人間の顔をそむけるなどの回避・軽減動作が、衝突位置や衝突角度を変化させ、重篤度に影響を及ぼすことも考えられるため、これ

Fig. 3 Dummy eye without eyelid

Fig. 4 Dummy eye with eyelid

Fig. 5 End effector

Fig. 6 External dimensions of end effector

らの条件も考慮する。

2.2 実験装置

被衝突体として、豚の眼球と人工眼瞼、およびこれらを固定し、眼球周囲の軟部組織の弾性を表現する機構からなるダミー眼を用いた。ダミー眼の外観を **Fig. 3** および **Fig. 4** に、また、仕様を **Table 1** に示す。豚の眼球は、人間の眼球と構造や大きさがよく似ており、比較的容易に入手できるため、眼球の衝突実験において、しばしば人間の眼球の代わりとして用いられてきた[8]。軟部組織の弾性を表現するため、眼球の後部にばねを2本並列に設置した。Schutteらの論文[9]では、軟部組織のヤング率は300 [Pa]とされており、これに相当するばね定数として19.9 [N/mm]を仮定した。

衝突体は、ピンセットの形状を持つアルミ (YH75) 製のエンドエフェクタとした。外観および寸法をそれぞれ **Fig. 5**, **Fig. 6** に示す。形状は、実際に生産現場で部品を把持するために開発されたものと同様である。このエンドエフェクタを上体ヒューマノイドロボット (HIRO, 川田工業 (株))[10][11] に装着して動作させた。

2.3 実験条件

ロボットとダミー眼は、**Fig. 7** に示すように、互いに向き合

Table 1 Specification of dummy eye

Eyeball	<ul style="list-style-type: none"> ・ Porcine eyeball ・ Elliptical ball ・ Diameters: 25 [mm], 24 [mm], 22 [mm]
Eyelid	<ul style="list-style-type: none"> ・ Silicon series rubber material ・ Thickness: 1 [mm] ・ Stab strength: 22.3–31.2 [N] ・ Tensile strength: 0–4.9 [N/mm²]
Soft tissue	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1 DOF in the direction of optical axis ・ Spring constant: 19.9 [N/mm]

Fig. 7 Eye part collision experiments

Fig. 8 Experimental condition for static collision experiment

うように配置した。ダミー眼は、机上の台の上に万力で固定した。本来は、万力で固定せず、人間の体幹や首頭部の回避・軽減動作を考慮する必要があるが、現時点では詳しく分かっていないため、体幹や首頭部が動かない最悪の場合と位置づけて万力による固定をした。ロボットの右腕を直線的に動作させ、エンドエフェクタをダミー眼に衝突させた。エンドエフェクタは、法線方向の衝突のときに、眼球の表面からおよそ10 [mm] 内部に突き刺さるように動作させた。10 [mm] より大きくすると、ほとんどの場合は眼球に穿孔し、硝子体が脱出するなどして重傷になるため、重傷となるか軽傷で済むかといった受傷具合を議論できる10 [mm] 程度を設定した。衝突時のエンドエフェクタの速さは、およそ280 [mm/s]であった。これは、ロボットが出力できる最大の速さで右腕を動作させたときの、眼球表面に到達したエンドエフェクタ先端の速さである。想定状況における最も危険な運動条件である場合を調査するために、この速さを設定した。

ロボットの動作条件は一定であるのに対し、ダミー眼については、開瞼・閉瞼、衝突位置、衝突角度の三つの条件を設定した。条件は、開瞼・閉瞼の2とおり、衝突位置については2とおり、衝突角度は3とおりとし、合計12とおりを設定した。こ

Table 2 Results of static collision experiment with cornea

	0°	30°	45°
Open eyelid	×	△	△
Closed eyelid	×	△	○

Table 3 Results of static collision experiment with sclera

	0°	30°	45°
Open eyelid	△	○	○
Closed eyelid	○	○	○

れを **Fig. 8** に示す。開眼時には、エンドエフェクタを眼球に直接衝突させ、閉眼時には眼球の前に人工眼瞼を設け、その上から衝突させた。衝突位置は、眼球の角膜と、角膜付近の強膜 (sclera) とした。強膜は、眼球中心と角膜を結ぶ直線と同じ水平面で、直線から 45° の位置とした。角膜と目尻の間の強膜を突くため、この角度を選択した。角膜と強膜は、それぞれ構成する組織が異なるため、衝突時の重篤度も異なると予想した。衝突角度は、眼球の法線方向、法線方向から 30°、法線方向から 45° の 3 とおとした。法線方向から 30°、45° の衝突は、人間がエンドエフェクタから顔をそむけるなどの回避・軽減動作を行ったときの衝突を想定した一例である。法線方向以外の角度を 2 とおし設定したのは、衝突角度の大きさによる重篤度への影響を確認するためである。

2.4 実験結果

角膜および強膜への衝突実験の結果を、それぞれ **Table 2**、**Table 3** に示す。ただし、表中の○は、肉眼では眼球に傷を確認できないことを示す。△は、眼球の表面に傷を受けたことを示す。この場合には、視力障害を来す可能性がある。×は、エンドエフェクタが眼球に穿孔して、硝子体が脱出したことを示す。最悪の場合、失明に至る可能性もある。

角膜への法線方向からの衝突では、開眼・閉眼にかかわらず眼球に穿孔した。開眼状態で衝突し、穿孔した眼球の写真を **Fig. 9 (a)** に示す。角膜にエンドエフェクタによる穿孔が見られた。これに対し、閉眼状態で衝突し、穿孔した眼瞼を **Fig. 9 (b)** に示す。エンドエフェクタの衝突した部分が裂けていることが確認された。また、角膜に法線方向以外から斜めに衝突したときには、穿孔には至らなかったものの、閉眼状態における法線方向から 45° の衝突を除いて、角膜の表面に擦過創が確認された。

強膜への衝突では、開眼状態における法線方向からの衝突で、表面に受傷が確認されたものの、それ以外の場合には受傷を確認できなかった。

2.5 考察

まず、衝突位置の差異の影響について考察する。角膜への衝突では、眼球に穿孔したり、擦過創を受けたりすることが多かったのに対し、強膜への衝突では、受傷状態はより軽度であった。よって、本実験の条件下では、角膜に衝突する場合のほうが重篤度が高く見積もられ、場合によっては失明の可能性も考えられる。逆に、強膜に衝突した場合には、重篤度は低く見積もられるという結果となった。

次に、衝突角度の影響について考察する。角膜への法線方向の衝突では、はじめに眼球がへこみ、後にエンドエフェクタが眼球に穿孔する場合が多かったのに対し、法線方向以外の斜め

Fig. 9 Injured eye

からの衝突では、眼球がへこむことはあっても、穿孔には至らなかった。法線方向からの角度が大きくなると、エンドエフェクタが眼球や眼瞼に対して滑ったり、眼球が回転してエンドエフェクタを後方にそらしたりするようになった。したがって、エンドエフェクタが人間の眼部を襲うとき、人間が顔をそむけるなどの回避・軽減動作をとり、法線方向の衝突を避けることができれば、重篤度はより低く見積もられる。

さらに、開眼時の衝突と、閉眼時の衝突における重篤度の違いについて考察する。角膜への法線方向の衝突では、開眼・閉眼にかかわらず眼球に穿孔した。法線方向以外の衝突では、開眼状態では表面に受傷したのに対し、閉眼状態では眼瞼に受傷したものの、眼球は受傷しないという例が見られた。したがって、法線方向付近からの衝突を除けば、閉眼することで重篤度はより低く見積もられる。

本実験で得られた結果については、同じ材質、形状のエンドエフェクタおよび運動特性を持つロボットであれば、同様の議論が可能であると考えられる。それ以外の場合については、必ずしもその限りではない。ピンセットは有用なツールのなかで最も鋭利な部類に入るため、これ以外の丸みを帯びたものなどが衝突した場合には、重篤度はより低くなると考えられる。

3. 動的眼部衝突実験

3.1 実験目的

人間が閉眼するときには、眼球が上転する Bell 現象 [4] が発現するという報告がなされている。瀬尾ら [12] は、サーコイル法を用いてこの Bell 現象を調査した。人によって、単純に上転だけでなく、わずかに外転を伴う上外転、内転を伴う上内転をするなど個人差があるようである。本実験では、簡単のため、閉眼状態での単純な上転を考える。具体的には、閉眼状態で眼球が上転しているときに、衝突位置、衝突角度を変化させて、重篤度を調査する。危害を軽減する動作である閉眼に伴って発現する眼球の上転が、重篤度にどのような影響を及ぼすかを知ることが、本実験の目的である。

3.2 実験装置

実験装置については、基本的に静的衝突実験と同様である。異なるのは眼球が回転する点である。眼球は、ギヤやプーリ、ベルト等を介して接続されているモータ (RE16, Maxon Motor ag) で回転させた。

3.3 実験条件

ロボットの動作条件は、静的衝突実験と同様である。ダミー

Fig. 10 Upward rotation of eyeball driven by motor

Fig. 11 Collision positions in dynamic collision experiment

眼には、静的衝突実験とは異なり、人間の眼球運動と同等の動作をさせた。具体的には、眼球の初期角度を正面視となる角度とし、エンドエフェクタが眼球の表面に到達するタイミングで眼球が上転を始め、瀬尾ら [12] の計測した Bell 現象を参考に、200 [ms] で 20° 上転するように設定した。モータで回転させた眼球の上転動作パターンを Fig. 10 に示す。

ダミー眼は閉瞼状態とし、衝突位置を 3 とおり、衝突角度を 3 とおり設定した。衝突位置は、眼球が上転する前の初期状態における眼球の角膜と眼球上部および眼球下部の強膜とした。衝突位置を Fig. 11 に示す。眼球上部と眼球下部は、それぞれ角膜中心から約 7 [mm] 上部、約 7 [mm] 下部の位置とした。これは、眼球が回転することによる衝突位置の変化が受傷具合に影響する可能性を考えて設定した。例えば、眼球上部への衝突は、眼球が動かなければ強膜に衝突するのに対し、上転することで角膜にも衝突の影響が及ぶ可能性があると考えた。衝突角度は、静的衝突実験と同様に、眼球の法線方向、法線方向から 30°、法線方向から 45° の 3 とおりとした。

3.4 実験結果

実験結果を Table 4 に示す。ただし、表中の○は、肉眼では眼球に傷を確認できないことを示す。△は、眼球の表面に傷を受けたことを示す。—は、実験を行わなかったことを示す。

角膜および眼球上部への衝突では、法線方向から 45° の衝突を除いて、角膜の表面に擦過創が確認された。法線方向から 45° の衝突では、傷は確認されなかった。また、眼球下部への衝突においても受傷は確認できなかった。

3.5 考察

はじめに、衝突角度の違いの影響について考察する。Table 4 から分かるように、静的衝突実験の場合と同様、法線方向からの角度が大きいほうが重篤度がより低く見積もられる。

次に、衝突位置の違いの影響について考察する。角膜への衝

Table 4 Results of dynamic collision experiment

	0°	30°	45°
Cornea	△	△	○
Upper part of eyeball	△	△	○
Lower part of eyeball	○	—	—

Fig. 12 Slight scratch

突のうち、法線方向からの衝突において、静的衝突実験では眼球に穿孔したのに対し、本実験では表面に受傷が確認される程度にとどまった。眼球が上転することによって、衝突位置が角膜の中心から外れたために、このような結果になった可能性がある。眼球上部への衝突は、眼球が上転することを除けば、静的衝突実験における、閉瞼時の斜めからの強膜への衝突に近い条件である。静的衝突実験では、受傷が確認されなかったのに対し、動的衝突実験では、法線方向および法線方向から 30° の衝突で角膜に傷を受けた。また、その傷は、長細いものとなった場合も確認された。その傷の様子を Fig. 12 に示す。眼球が上転することによって、受傷具合に変化が見られたといえる。眼球下部への衝突では、眼球が上転しても強膜に衝突することには変わりはないため、受傷が確認されなかったと考えられる。

本実験は、すべて閉瞼状態における衝突実験であった。眼球は、眼瞼に守られており、そのために眼球に穿孔することがなかったと考えられる。このように、閉瞼によってある程度重篤度が軽減される一方で、閉瞼に伴う眼球運動が重篤度に影響を及ぼすことが分かった。エンドエフェクタの衝突前に閉瞼できても、それに伴って眼球が回転し、衝突した眼瞼の裏に角膜が位置すると、強膜への衝突の場合より、重篤度は高く見積もられる。眼部に物体が衝突してくるのに対して閉瞼することは、危害を軽減する動作の一つであるが、それに伴う眼球運動によっては、必ずしも危害を十分に軽減できない場合があると考えられる。したがって、眼部の重篤度調査では、衝突時の角膜の位置が重要となる。

ただし、ロボットのエンドエフェクタの材質、形状および運動特性が異なる場合には、以上と同様の議論が成り立つとは限らない。

4. 結 言

本研究では、人間とロボットが共存する場面で、機械的危険源である鋭利なエンドエフェクタが眼部を襲う状況を想定し、人間の回避・軽減動作を考慮して設定した衝突条件のもと、基礎的な眼部衝突実験を行った。そして、衝突条件の違いが重篤度にどのような影響を及ぼすかを検討した。静的眼部衝突実験では、閉瞼・閉瞼、衝突位置、衝突角度の三つの条件を変化させ

た。実験の結果、三つの条件はいずれも、受傷時の重篤度に差異をもたらすことが確認された。具体的には、まず、眼瞼が安全防護に寄与することが分かった。また、衝突位置については、強膜の場合のほうが、角膜の場合よりも重篤度は低く見積もられた。衝突角度については、眼球の法線方向からの角度が大きいほど重篤度が低く見積もられた。これは、どの方向からのエンドエフェクタの接近に対しても、人間が回避できる確率が同じであるとすれば、エンドエフェクタの衝突に対するリスクは、人間の顔の横方向からの衝突のほうが、正面からの衝突よりも低く見積もられるという興味深い結果である。動的眼部衝突実験では、閉瞼に伴って眼球が上転する Bell 現象を考慮し、衝突位置、衝突角度の二つの条件を変化させた。実験の結果、眼球運動が、重篤度に影響を及ぼす重要なファクターの一つであることが分かった。回避・軽減動作は、これまでの眼部衝突実験では考慮されてこなかったが、リスク見積もりのためには必要不可欠であると判断される。

今後は、さらに衝突角度のパターンや試行回数を増やして、重篤度ごとに危害の発生確率を統計的に見積もる必要がある。特に、共存系において、ロボットを人間の前に配置するのがよいか、横に配置するのがよいかといった、人間とロボットの安全な位置関係などの議論に資することが期待される。

謝 辞 名古屋大学大学院医学系研究科准教授の伊藤逸毅先生には、眼球の受傷状態と視機能の関係等について何度もご助言をいただいた。また、水野技術研究所の水野剛氏には、実験装置の設計製作の段階でご支援をいただいた。さらに、名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程学生の砂田宏二氏には、実験の協力をいただいた。ここに感謝の意を表す。本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究（A）「人間の危険源回避行動に着目した正味リスクの評価に関する研究」（21246041）の支援を受けた。

参 考 文 献

- [1] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, A.D. Luca and G. Hirzinger: "Evaluation of collision detection and reaction for a human-

- friendly robot on biological tissues," Proc. of the Sixth IARP-IEEE/RAS-EURON Joint Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments, 2008.
- [2] E.A. Kennedy, J.A. Inzana, C. McNally, S.M. Duma, P.J. Depinet, K.H. Sullenberger, C.R. Morgan and F.T. Brozoski: "Development and validation of a synthetic eye and orbit for estimating the potential for globe rupture due to specific impact conditions," Stapp Car Crash J., vol.51, pp.381-400, 2007.
- [3] A.A. Weaver, E.A. Kennedy, S.M. Duma and J.D. Stitzel: "Evaluation of different projectiles in matched experimental eye impact simulations," J. of Biomechanical Engineering, vol.133, no.3, 031002, 2011.
- [4] C. Bell: "On the motions of the eye, in illustration of the uses of the muscles and nerves of the orbit," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol.113, pp.166-186, 1823.
- [5] Safety of Machinery—General Principles for Design—Risk Assessment and Risk Reduction, ISO 12100:2010, 2010.
- [6] 服部, 山田, 森, 岡本, 原: "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, pp.132-135, 2011.
- [7] 砂田, 山田, 服部, 岡本, 原: "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予稿集 DVD-ROM, 1N1-6, 2011.
- [8] W.R. Scott, W.C. Lloyd, J.V. Benedict and R. Meredith: "Ocular injuries due to projectile impacts," Annual Proc. of the Association for the Advancement of Automotive Medicine, vol.44, iss.11, pp.205-217, 2000.
- [9] S. Schutte, S.P.W. van den Bedem, F. van Keulen, F.C.T. van der Helm and H.J. Simonsz: "A finite-element analysis model of orbital biomechanics," Vision Research, vol.46, pp.1724-1731, 2006.
- [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] T. Ogure, Y. Nakabo, S. Jeong and Y. Yamada: "Hazard analysis of an industrial upper-body humanoid," Industrial Robot: An International J., vol.36, no.5, pp.469-476, 2009.
- [12] 瀬尾, 池田, 雲井: "閉眼時に於ける眼球運動の記録—サーチコイル法による—", Equilibrium Research, vol.49, no.2, pp.185-191, 1990.

伊藤聡一郎 (Soichiro Ito)

2011 年 3 月名古屋大学工学部機械・航空工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科機械理工学専攻博士課程前期課程入学。現在に至る。人間・ロボット共存系におけるリスク見積もりに関する研究に従事。
(日本ロボット学会学生会員)

服部貴政 (Takamasa Hattori)

2011 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻博士課程前期課程修了。同年 4 月同専攻博士課程後期課程入学。現在に至る。人間・ロボット共存系におけるリスク見積もりに関する研究に従事。
(日本ロボット学会学生会員)

原 進 (Susumu Hara)

1992 年 3 月慶應義塾大学理工学部卒業。1996 年 9 月同大学大学院工学研究科後期博士課程修了。1995 年 4 月より 2000 年 3 月まで日本学術振興会特別研究員。1998 年 5 月より 1999 年 2 月までカリフォルニア大学バークレー校機械工学科訪問研究員。2000 年 4 月より 2008 年 9 月まで豊田工業大学。同年 10 月より名古屋大学に勤務。現在同大学大学院工学研究科機械理工学専攻准教授。主に機械構造物の運動と振動の制御、人間機械系の制御の研究に従事。2004 年度日本機械学会奨励賞 (研究)、計測自動制御学会中部支部第 38 期中部支部賞・研究賞などを受賞。日本機械学会、計測自動制御学会、電気学会、精密工学会、IEEE の会員。博士 (工学)。
(日本ロボット学会正会員)

山田陽滋 (Yoji Yamada)

1983 年 3 月名古屋大学大学院博士前期課程修了。同年 4 月豊田工業大学助手勤務。1992 年工学博士 (東京工業大学)。1993 年豊田工業大学助教授。同年 Stanford University 客員研究員。2004 年 4 月産業技術総合研究所知能システム研究部門安全知能研究グループ長。2008 年 4 月より名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻教授。これまで、ロボットのセンサ・通信・知的制御に関する研究、および人間・ロボット共存系の研究に従事。近年は、安全知能が主題。
(日本ロボット学会正会員)

岡本正吾 (Shogo Okamoto)

2010 年東北大学大学院情報科学研究科博士課程後期 3 年の課程修了。同年より名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻助教。現在に至る。主としてハプティクスに関する研究に従事。博士 (情報科学)。
(日本ロボット学会正会員)