

解説

人間-ロボット協働作業系の安全

Safety of Human-Robot Collaborative Operation Systems

金 唯 眞* 山 田 陽 滋* 岡 本 正 吾* *名古屋大学大学院工学研究科

Eugene Kim*, Yoji Yamada* and Shogo Okamoto* *Department of Mechanical Systems Engineering, Nagoya University

1. はじめに

現在のセル生産現場では自動化に伴う教示作業の不効率や品質の低下の課題をもっている。そこで、ロボットの自動運転中もこれに安全柵を設けることなく、その稼働空間に人間が侵入し、ロボットと共存作業ができないか、という検討が数多くみられる。IFR (International Federation of Robotics) は、現在の人間・ロボット協働作業形態の多くは、協働作業空間とよばれるロボットの作業空間に人間が侵入するものの、空間的に交わる場所がない (coexistence)、あるいは両者が交互にシーケンス作業を行う (sequential collaboration) 水準にある、としている [1]。このような段階の協働作業において人間の安全性を確保するためには、実用的な観点ではまず C 規格とよばれる産業用ロボットに関する国際安全規格 ISO 10218-1, -2 [2] や技術仕様書 ISO/TS15066 [3] を理解しなければならない。加えて、これらの要求事項から引用される安全にかかわる要素技術や人間の標準的なデータの掲載された、いわゆる B 規格レベルの規格群についても、体系的に理解する必要がある。まず前提になるのが、以下の安全性である。すなわち、人間との協働作業が許されるために、ロボットは、本質安全設計に則って製造されないかぎり、上記の ISO 規格で要求される安全度水準を有する制御系が作り込まれていなければならない [2]。国内でも、労働安全の枠組みで労働安全規則に準拠する必要があるが、安衛則第 150 条の 4 (運転中の危険の防止) の施行通達 (改正後) [4] に上記の規格群が参照されており、製造者やインテグレータを中心に国際安全規格の要求事項に準拠する努力が払われている。

人間がロボットと安全に共存するための研究は、これまで Post-collision safety と Pre-collision safety の大きく二つの流れの安全戦略に分類されてきた [5]。これらは、ロボティクス一般の研究の枠組みの中でも、衝突回避問題あるいは人間検出技術として数多く存在する。別の規制観点でこれらの研究領域をとらえると、現在の規格体系の中では、ロボット接触時に人間が痛みを感じ始めるまでを安全規範として制御を行う Power and force limiting (PFL) と、

非接触状態にあつて不安全的な接触を回避するための速度制御を規定した Speed and separation monitoring (SSM) の二つの要求事項に対応づけることができる [3]。本稿では特にロボット安全を目的とする後者の規制観点でのこれまでの研究事例を解説する。

2. 接触安全の規範

人間とロボットの間の協調作業を可能にするために、ロボット周りのフェンスやライトカーテンのような古典的な安全柵をなくすことには大きな関心が持たれている。Yamada らはこの議論を、ロボットと人間の接触がどの程度まで許容されるか、という問題に置き換え、許容すべき最小の面積を規定したうえで、剛体と接触したときの人間の痛みの許容限界、すなわち痛覚耐性値を身体上の 12 か所に対して求めた [6]。また、これを規範として機械的に制限された保護空間での人間とロボットの接触動作を可能にする人間ロボット (H-R) 共存システムを提案した [7]。その後、斎藤らによって人間の全身に対して網羅的に調査が行われた [8]。一方で、Povse らや Desmoulin らは接触力だけでなく衝突の間のエネルギー密度を利用して、接触時の重篤度との関連性について、分析を行った [10] [11]。他方、Haddadin らは衝撃のストレスと関連する皮膚の損傷を調査するため人間の接触部位による衝突の重篤度を見積もる方法を拡張した [12]。また、Fujikawa と Sugiura らによって、人間とロボットの相互作用におけるロボット設計の安全基準を得るために、衝撃による打撲耐性の主要なパラメータとして、最大衝撃力を接触面積で除した平均接触圧力と総移動エネルギーが議論された [13] [14]。一般に、傷害の重篤度を見積もる場合に、最悪の状態として、挟まれを対象とする。しかし、ロボットとの接触は、動的な接触も多いことから、PFL 規範の場合は、準静的接触に加え、動的接触と呼ばれる過渡的接触の二つに分類して、それぞれの場合に対する標準的な値が用意されている。

ISO/TS 15066 の PFL 機能は、C 規格レベルでまさに人間とロボットの間の許容できる機械的接触を動力と力の制限として規定した安全技術開発のベースになる要求事項である。そして、以上で紹介した PFL の規範を満たす、製品化されているロボットとしては、人間と衝突する最悪の場合でもその重篤度が許容できるように、産業用ロボットの範疇であっても比較的軽く、定格出力が小さく抑えられるように設計されているものがまず存在する。これらは、い

原稿受付 2019 年 10 月 10 日

キーワード: Human-robot Collaboration, Potential Runaway Motion in Task Space, Safety-related Sensor

*〒464-8603 名古屋市千種区不老町

*Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi

いわゆる本質安全設計を指向したロボットとして分類される。

まず、リスクアセスメントの結果、接触力やこれを与える運動量の変化、あるいはロボットから人間に供給されるエネルギーが大きいと判断された場合に、ロボットのトルクや動力等を制限する制御系を設計する必要がある。先の文献 [7] は、接触力が超えないようにロボットを停止するには、ロボット表面の被覆をどのように設計するか議論を行ったものであるが、Haddadin らは、衝突時の傷害の重篤度を低減するための速度制御として、以下の提案を行っている [12]。すなわち、ロボットエンドエフェクタの最大速度 (の大きさ) v_{\max} は、任意の \mathbf{u} 方向への有効質量 $m_{\mathbf{u}}$ に対して次のように置くことができるというものである。

$$v_{\max}(m_{\mathbf{u}}) = \mathbf{reg.lim}[c_1(i, \mathbf{a}_i)m_{\mathbf{u}} + c_2(i, \mathbf{a}_i), v_1, v_2] \quad (1)$$

ただし、 $c_1(i, \mathbf{a}_i) \leq 0$ と $c_2(i, \mathbf{a}_i)$ はエンドエフェクタの種類 \mathbf{a} とそれらが持つ接触ハザードの形状の個数 i によって決まる係数であり、 v_1 と v_2 はそれぞれ最小と最大の速度を意味する。同研究では、豚皮膚を用いて典型的なエンドエフェクタの形状と速度に対する皮膚組織の傷害の程度に従って c_1 と c_2 を決めるとしている。次に、エンドエフェクタの速度を \mathbf{v} に対して、 v_{\max} と \mathbf{u} 方向へのエンドエフェクタの速度 $\mathbf{v}_{\mathbf{u}}$ との比較で新しい速度 \mathbf{v}' を計算する。

$$\mathbf{v}' = \begin{cases} \mathbf{v} & \text{if } \|\mathbf{v}_{\mathbf{u}}\| \leq v_{\max} \\ \mathbf{v} \frac{v_{\max}}{\|\mathbf{v}_{\mathbf{u}}\|} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

最後にエンドエフェクタのすべてのリスクの存在する部位に対して上記の反復的に行い、最も低い速度を最終的な手先の速度として採択するというものである。

3. 潜在暴走空間

冒頭の、Yamada ら [7] の議論を、ロボットの故障耐性を考慮し、これに人間の接近がどの程度まで許容されるか、という問題に置き換えた場合の規範が、潜在暴走空間である [15]。製造環境において、ロボットの制御系に要求される安全度水準は、単一故障に対して耐性を持つことである。これは、(多重でない) 単一の故障が起きても、ロボットが安全要求仕様として備えている自己診断機能によってこれを検出することができ、あらかじめ用意された安全な状態に移行することができる安全性能を意味する。いま、ロボットのジョイント角ベクトルを \mathbf{q} 、エンドエフェクタの速度を $\mathbf{v}(\mathbf{q})$ 、さらにヤコビ行列を $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ でそれぞれ表したとき、ロボットのエンドエフェクタの加速度 $\dot{\mathbf{v}}$ は

$$\dot{\mathbf{v}}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}(\mathbf{q})\tilde{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{q})\tilde{\boldsymbol{\tau}}(\mathbf{q}) \quad (3)$$

で表される。ここで、重力とコリオリ力を考慮して定義した関節駆動トルク $\tilde{\boldsymbol{\tau}} = [\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2, \dots, \tilde{\tau}_n]^T$ ($\tilde{\tau}_i = \tau_i/\tau_{i\max}$) を用いて正規化された慣性行列 $\tilde{\mathbf{M}}$ を以下のように示すことができる

$$\tilde{\mathbf{M}} = \mathbf{T}_{\tau}\mathbf{M} \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{T}_{\tau} = \text{diag}\left(\frac{1}{\tau_{1\max}}, \frac{1}{\tau_{2\max}}, \dots, \frac{1}{\tau_{m\max}}\right)$ である。すると、ジョイントトルクから求まるロボットのエンドエフェクタの加速度の円体は、主軸を $\sigma_{di}\mathbf{u}_{di}$ とすると、 $\mathbf{J}(\mathbf{q})\tilde{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{q})$ を特異値分解して得られる、 \mathbf{u}_{di} ($i = 1, \dots, m$)、 $m \leq 3$ で張られる空間を近似的に潜在暴走空間として見積もることができる。あとは、その定量化の際に、ロボットの反応時間 T_r の間の暴走中の速度 $\mathbf{v}(t)$ のうち、最も接近している人間の部位の方向成分を用い、動的に可操作円体によって得られる加速度をもって移動する距離を計算する。

4. 非接触の人間存在検知技術

先に述べた、本質安全設計に基づいていない、あるいは PFL 規範を満たしていない産業用ロボットでも、その安全関連制御系が要求される安全度水準を満たし、SSM 要求を満たすロボットシステムを構築することができれば、人間との協働作業が許される。この場合には、通常の運転時に、人間との物理的な接触を想定しない保護装置、いわゆる非接触の人間存在検知技術を搭載する方法を考える。

従来は、ISO 13855 で規定する機械全般に適用可能な Minimum distance とよばれる安全距離が存在したが、2016 年に正式にロボットに対する保護間隔距離として SSM の機能が ISO/TS 15066 にてその姿を現した [3]。この安全手法はロボットシステムと作業者が同時に作業空間内で作業を許し、両者間の分離距離が保護間隔距離以上を常に維持することによってリスク低減を達成する安全機能である。また、分離距離が最低の保護間隔距離を違反する場合、ロボットは保護停止を実行するが、分離距離が保護間隔距離より遠くなるとただちにロボットの動きは再開できる。以降、SSM の機能は安全性評価、生産性などの多様な観点から研究されており、ここでは実際の安全規範に準拠して検証された研究を以下に簡単に紹介する。

Szabo らはレーザスキャナを用いて人の位置を特定し、SSM 機能を搭載したロボットの速度を制御することで保護間隔距離を維持する再現プラットフォームを報告した [16]。これを受けて、Jeremy らはロボット可動範囲および位置決め誤差の推定から衝突確率と重篤度を求め、そのリスクに関する検討を行い評価した [17]。一方で、Petersen らはクラウドベースのプラットフォームを使用し、ロボットの経路計画ツールを提案し、ロボットと人間間の最小保護間隔距離を計算する方法を紹介した [18]。さらに、Byner らはロボットと人間の幾何学的な動きを考慮し、より正確な保護間隔距離を計算するための Dynamic SSM を提案した [19]。最後に、Kim らは作業設計段階で保護間隔距離への侵入を確率的に見積る方法を提案し、実験とシミュレーション結果との比較を行い、その活用方法を議論した [20]。

上記の研究はすべて、より安全で生産性の高い協調作業プロセスを構築するためには、危険区域に対する人の存在検出のみならず、人間の運動状態も精度高く検出できる機

能を備えることが重要であるとする共通の見解に支えられている。従来のライトカーテンやレーザスキャナ類の安全関連センサはロボット周りのフェンスを除去できて、比較的设置が簡単な利点があったが、検出範囲の技術的な制約から、安全距離の増加により生産性が損なわれる問題点があった。本稿では、近來に報告された安全用途として提案、もしくは開発されているセンサ動向を簡略に紹介をする。

5. 安全関連センサシステム

2019年に、安全関連センサ（システム）の設計、開発、実装と妥当性確認を目的とする IEC/TS 62998 という新しい技術仕様書が出版された。この安全規格では、非接触の人間検出原理やそのための媒体を明示的に限定しない。したがって、ライトカーテンやレーザスキャナのような、既存の電氣的検知保護装置の技術要求事項を規定した国際安全規格 IEC 61496[†] シリーズに準拠しない仕様の装置であっても、非接触の人間存在検知を目的とする安全関連センサ（SRS: Safety-related sensor）あるいは安全関連センサシステム（SRSS: Safety-related sensor system）として導入することが可能になったことを意味する。本章では人の安全を目的とするセンサの研究とすでに製品化された安全関連センサを紹介する。

5.1 近接領域での人間存在検知センサ

ロボットの衝突回避のための初期の研究は、まずは衝突回避だけを目的とするロボットを取り巻く至近領域の情報を取得することに重点を置いた。特に、赤外線を利用した人間の位置検出方法は、長い間ロボットと人間の回避のために注目されてきた[21]。また、低価格の超音波センサを利用することで、実用的な回避システムの構築したり、静電容量式センサやレーザを用いた至近距離センシング方法を提案するなど様々な検出原理を利用した研究がされてきた[22]~[25]。以降、至近距離センサの研究は安全の観点まで拡張され、人の手の検出を目的とする静電容量式センサの提案と評価や、複数の赤外線センサを用いた最適配置方法などが議論された[26][27]。しかし、これらのセンサは、ロボットのごく近傍での限られた領域内での距離検出のみ可能であり、人間の安全を確保するための計測性能面での要求レベルを満足するには困難があった。

5.2 カメラビジョンセンシング

カメラを用いたビジョンセンシングの長所は色や位置関係から得られる人間と環境の区別が比較的容易であることである。カメラビジョンを用いた初期の研究として、簡単な背景イメージと RGB 情報上の差を見ることで人間を認識するアプローチがあった[28]。また、複数の単眼カメラを用いて作業者の姿勢と位置を計測するマーカトラッキン

グビジョンセンサシステムが提案された[29]。以降、複数のカメラで 3D イメージを構築し、水平面に投影した監視対象の領域に高さを有する人間が侵入したか否かの判断によって、ハザードエリアにおける人間の存在検知を達成する Safety-Eye が安全関連センサとして商用化された[30]。しかし、カメラビジョンは外乱の影響に左右されない人間検出性能を備えようとする、大型で高価になり、さらに、オクルージョンの問題が解決できないために、使用例は限定されているのが現状である。

5.3 レーザスキャナ

レーザスキャナは、固定式、もしくは移動式として産業現場で人の位置検出のために用いられる最も代表的な安全関連センサである。特に、Szabo ら[16]や Jeremy [17]らの研究のように、ペイロードの大きいロボットでも SSM 機能を発揮できるように、レーザスキャナを搭載した事例がすでに数多く報告されている[31]。ただし最近の研究動向は、レーザスキャナが単体の使用されることは少なく、de Gea ら[32]や Safeea ら[33]の研究のように人の存在検出のために画像センサや IMU センサを補助する位置付けにされており、センサフュージョンの分野で幅広く使用されている。しかし、レーザスキャナもまた周りの強い光や、表面反射、ほこりなどの環境要素によって検出の信頼度が低下したり、センサ内部の鏡が振動や衝撃に弱いという点はレーザスキャナの性能を損なう理由として指摘されている[35]。

5.4 電波式センサ

電波式センサは対象物体までの距離によって変わる位相の遅れを検知することで距離を測る Time of Flight (TOF) 式センサである。電波式センサは、すでに自動車業界や医療分野等で活用されており、光学技術を使用するレーザスキャナやカメラセンサより太陽光や照明に影響されることがないため、次世代の安全関連センサとして注目されている。特に、Kim ら[34]と Zlatanski ら[35]によって、電波を使用する安全センサとしての提案とその性能評価方法が報告されている。また、最近では世界初の電波式安全関連センサとして、周波数変調を行う FM-CW 原理を使用し、作業者の動きを検出する LBK System が公開されている[36]。しかし、電波レーダを用いた安全技術は、従来の安全関連センサと比較して計算の複雑さが増え、空間分解能が低下するほか、視野が狭くなる問題点を抱えている。電波式センサ技術は高度な機能のため大きな可能性があると思われるが、検出されたターゲットに関していかに豊富な情報を受信信号から抽出することができるかが当面の課題である。

6. おわりに

以上、本稿ではセル生産現場において、昨今導入事例が増えていると想到される人間とロボットの協働作業に伴う安全性確保の方法について、現行の国際安全規格に規定される以下の二つの要求事項に沿った技術に関する研究を解説した。1) 接触安全の PFL (Power and Force Limiting) 規範では、リスクとして許容される危害の程度とこの規範

[†]このシリーズでは IEC 61496-1 の一般要求事項、ESPE: Electro-Sensitive Protective Equipment (電氣的検知保護設備) と題される規格を筆頭にして、能動的電光保護装置 (AOPD): ライトカーテン、拡散反射形能動的電光保護装置 (AOPDDR): レーザスキャナ、そして視覚的保護装置 (VBPD): 画像センサが順番にパート番号 2-4 シリーズにわたって技術的な要求事項を規定している。

を満たすための制御戦略について、2) 非接触安全要求のSSM (Speed and Separation Monitoring) では、安全関連制御系の一部を担う人間存在の検出技術、をそれぞれ紹介した。先に掲げたIFRは、今後両者が協調作業を行うようになり、やがてロボットが人間の意図を汲んで即応作業を行うという近未来指向の人間・ロボット協働系の実現を予言している。Easy-to-Useの観点から、人間・ロボットの共存系には、充実したマン・マシン・インタフェース技術が導入され、教示作業のインテリジェント化が模索されていくものと思われる。安全度の水準が低い確率論をいかにロボット安全に取り込むか、現行規格体系の柔軟な解釈を要求する技術が次々と生まれていくに違いない。

参 考 文 献

- [1] Demystifying Collaborative Industrial Robots, https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Demystifying_Collaborative_Robots.pdf, 2018.
- [2] ISO 10218-1 Robots for industrial environments Safety requirements part 1: Robot, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2011.
- [3] ISO/TS 15066 Robots and robotic devices—Collaborative robots, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2016.
- [4] ロボット革命実現会議：ロボット新戦略 Japan's Robot Strategy-ビジョン・戦略・アクションプラン, 2015/1/23-6.
- [5] D. Kulić and E. Croft: "Pre-collision safety strategies for human-robot interaction," *Autonomous Robots*, vol.22, no.2, pp.149–164, 2007.
- [6] Y. Yamada, K. Suita, K. Imai, H. Ikeda and N. Sugimoto: "A failure-to-safety robot system for human-robot coexistence," *Robotics and Autonomous systems*, vol.18, no.1–2, pp.283–291, 1996.
- [7] Y. Yamada, Y. Hirasawa, S. Huang, Y. Umetani and K. Suita: "Human-robot contact in the safeguarding space," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.2, no.4, pp.230–236, 1997.
- [8] 齋藤剛, 池田博康: "人間協調型ロボットの機械的刺激に対する人体痛覚耐性限界の測定. 産業安全研究所特別研究報告", *NIIS-SRR*, vol.33, 2006.
- [9] K. Ikuta, H. Ishii and M. Nokata: "Safety evaluation method of design and control for human-care robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol.22, no.5, pp.281–297, 2003.
- [10] B. Povse, D. Koritnik, R. Kamnik, T. Bajd and M. Munihi: "Industrial robot and human operator collision," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.2663–2668, 2010.
- [11] G.T. Desmoulin and G.S. Anderson: "Method to investigate contusion mechanics in living humans," *Journal of forensic biomechanics*, vol.2, pp.1–10, 2011.
- [12] S. Haddadin, S. Haddadin, A. Khoury, T. Rokahr, S. Parusel, R. Burgkart and A. Albu-Schäffer: "On making robots understand safety: Embedding injury knowledge into control," *The International Journal of Robotics Research*, vol.31, no.13, pp.1578–1602, 2012.
- [13] T. Fujikawa, R. Sugiura, R. Nishikata and T. Nishimoto: "Critical contact pressure and transferred energy for soft tissue injury by blunt impact in human-robot interaction," *19th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp.867–872, 2017.
- [14] R. Sugiura, T. Fujikawa, R. Nishikata and T. Nishimoto: "Soft Tissue Bruise Injury by Blunt Impact in Human-Robot Interaction - Difference of Tolerance between Chest and Extremities," *19th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp.792–797, 2019.
- [15] Y. Yamada, S. Takeda, T. Nishiyama and S. Okamoto: "Potential Runaway Motion Volume in Task Space for Estimating The Probability of Occurrence of A Human-Robot Collision," *IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics*, pp.34–39, 2018.
- [16] S. Szabo, W. Shackleford, R. Norcross and J.A. Marvel: "A Testbed for Evaluation of Speed and Separation Monitoring in a Human Robot Collaborative Environment," *US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology*, 2012.
- [17] A.M. Jeremy: "Performance metrics of speed and separation monitoring in shared workspaces," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol.10, no.2, pp.405–414, 2013.
- [18] H. Petersen, R. Behrens, J. Saenz, E. Schulenburg, C. Vogel and N. Elkmann: "Reliable Planning of Human-Robot-Collaboration featuring Speed and Separation Monitoring," *9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems*, pp.55–61, 2018.
- [19] C. Byner, B. Matthias and H. Ding: "Dynamic speed and separation monitoring for collaborative robot applications-Concepts and performance," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol.58, pp.239–252, 2019.
- [20] E. Kim, R. Kirschner, Y. Yamada and S. Okamoto: "Estimating probability of human hand intrusion for speed and separation monitoring using interference theory," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol.61, p.101819, 2020.
- [21] N.M. Ceriani, G.B. Avanzini, A.M. Zanchettin, L. Bascetta and P. Rocco: "Optimal placement of spots in distributed proximity sensors for safe human-robot interaction," *International Conference on Robotics and Automation*, pp.5858–5863, 2013.
- [22] J.R. Llata, E.G. Sarabia, J. Arce and J.P. Oria: "Fuzzy controller for obstacle avoidance in robotic manipulators using ultrasonic sensors," *5th International Workshop on Advanced Motion Control*, pp.647–652, 1998.
- [23] J.T. Feddema and J.L. Novak: "Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation," pp.3303–3309, 1994.
- [24] Y. Yu and K. Gupta: "Sensor-based roadmaps for motion planning for articulated robots in unknown environments: Some experiments with an eye-in-hand system," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1707–1714, 1999.
- [25] Y. Yamada, N. Tsuchida and M. Ueda: "A proximity-tactile sensor to detect obstacles for a cylindrical arm," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol.6, no.4, pp.292–300, 1987.
- [26] S.E. Navarro, M. Marufo, Y. Ding, S. Puls, D. Göger, B. Hein and H. Wörn: "Methods for safe human-robot-interaction using capacitive tactile proximity sensors," *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1149–1154, 2013.
- [27] G.B. Avanzini, N.M. Ceriani, A.M. Zanchettin, P. Rocco and L. Bascetta: "Safety control of industrial robots based on a distributed distance sensor," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol.22, no.6, pp.2127–2140, 2014.
- [28] A.J. Baerveldt: "Cooperation between man and robot: interface and safety," *International Workshop on Robot and Human Communication*, pp.183–187, 1992.
- [29] J.T.C. Tan, F. Duan, Y. Zhang, K. Watanabe, R. Kato and T. Arai: "Human-robot collaboration in cellular manufacturing: Design and development," *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots System*, pp.29–34, 2009.
- [30] Pilz, Ria, and Robotic Industries Association. The First Safe Camera System SafetyEYE Opens up New Horizons for Safety & Security. [Online]. Available: https://www.robotics.org/new-productdetail.cfm?content_id=751
- [31] Trends in Machine Guarding: Safety Laser Scanners Get Smaller and Smarter (white paper), Sick, 2012.
- [32] J. de Gea Fernández, D. Mronga, M. Günther, T. Knobloch, M. Wirkus, M. Schröer and T. Bänziger: "Multimodal sensor-based whole-body control for human-robot collaboration in industrial settings," *Robotics and Autonomous Systems*, vol.94, pp.102–119, 2017.
- [33] M. Safeea and P. Neto: "Minimum distance calculation using laser scanner and IMUs for safe human-robot inter-

action,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol.58, pp.33-42, 2019.

- [34] E. Kim, Y. Yamada and S. Okamoto: “Improvement of safety integrity level by multiplexing radio wave sensors,” IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.942-947, 2017.

- [35] M. Zlatanski, P. Sommer, F. Zurfluh and G.L. Madonna: “Radar Sensor for Fenceless Machine Guarding and Collaborative Robotics,” IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, pp.19-25, 2018.

- [36] Inxpect S.p.A., The first ever, radar-based volumetric safety barrier., [Online]. Available: <https://inxpect.com/industrial>



金 唯眞 (Eugene Kim)

2018年3月名古屋大学大学院博士前期課程修了。現在名古屋大学大学院工学研究科(機械理工学専攻)博士後期課程在学中。人間・ロボット協働系に関する研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)



岡本正吾 (Shogo Okamoto)

2010年博士(情報科学, 東北大学)。名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻助教を経て、現在機械システム工学専攻准教授。主としてハプティクス, 人支援技術, 感性に関する研究に従事。(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月から、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月から名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻(改組により2017年から機械システム工学専攻)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)