解説：特集
ロボット・ICT を活用した
高齢者のコミュニケーション・ケア支援

健康寿命を延伸する共生型ロボット AI

三　枝　亮*

* 神奈川工科大学，神奈川県厚木市下荻野 1030
*Kanagawa Institute of Technology, Shimoogino 1030, Atsugi, Kanagawa Japan
*E-mail: ryo.saegusa@syblab.org

キーワード：健康寿命 (healthy life expectancy)，人間機械共生 (human machine symbiosis)
JL 0009/24/6309–XXXX ©2024 SICE

1. はじめに

1.1 少子高齢の時代

少子高齢の時代を迎えた日本は 2014 年に “国民の健康寿命が延伸する社会” を提唱し，2025 年の完成を目標とした “高齢者の介護予防”，“現役世代からの健康づくり対策”，“医療資源の有効活用に向けた取組” に関する施策を推進してきた[1]．また，同時期の諸外国においても，人々の心身機能，栄養状態，社会参加を改善することで健康寿命を延伸させようとする取り組みが幅広く行われてきた[2]．内閣府の平均寿命と健康寿命の推移に関する統計によると，2016 年と 2019 年の比較では平均寿命と健康寿命が男女ともに延伸し，同時にこれらの差は男女ともに減少していることから，健康寿命の延伸に関するこれまでの施策には一定の効果があったと考えられる[3]．一方で，この 10 年間に “自己肯定感” や “自己効力感” などの概念が社会的に注目され，健康に生き続けるための意欲を保つ方法論について議論されてきたが，生活者の自己肯定感や自己効力感を効果的に高める技術は確立されていない．当事者の健康状態への意識や認知が高まり，健康に至る行動や意欲が自然と生まれるような方法は未知である．今後，これらの問いを科学的に解明し，少子高齢社会を支える技術基盤を整備していく必要がある．

1.2 本研究の目的

本稿で述べる共生型ロボット AI は生活者の行動を適応的に学習して介入し，個人に内在する健康特性の強化を試みるロボットや AI システムの総称である．筆者は介護・医療・福祉施設での聞き取り調査や実証試験の経験から，生活者と相互作用する共生型ロボット AI には生活者の認知や行動を変容させ，自己肯定感や自己効力感を高める力があると感じている．たとえば，介護施設内で生活する認知症患者に付き添って徘徊を見守ると，夜間の不眠や不穏行動が改善することがある．また，排泄する可能性が高い時間帯に高齢者をトイレへ誘導することで排泄の習慣や排泄の知覚が戻ることがある．多忙な介護職員がこのような支援を日常的に行うことは困難であるが，共生型ロボット AI がこれらの支援の一部を代替的に担うことは可能である．本人の気が済むまで追従して徘徊を見守ることや，排泄センサと連動して予測的にトイレへ誘導することなど，時間やジェンダーによる理由で人間には難しい作業が，共生型ロボット AI の得意とする作業である場合がある．人間とは異なるロボットや AI システムの特性を活かすことで，これまでになかった新しい方法による健康寿命の延伸が期待できる．

2. 共生型ロボット AI

2.1 研究開始当初の構想

本研究では共生型ロボット AI が生活者と相互作用する場面として，“歩行”，“会話”，“食事” の 3 つの場面を想定し，研究計画を策定した．**図 1(a)** に研究開始当初に構想した研究概要を示す．これらの場面に対応した開発ターゲットを設定し，生活者に同調して介入する要素システムを試作した．**図 1(b)** に開発ターゲットを示す．開発したシステムの一部は介護施設，デイサービス施設，病院，在宅環境などの現場で機能評価を実施し，現在も断続的に継続している．**図 1(c)** に研究開始当初の研究基盤システムを示す．研究開発の実施体制として，医科大学と社会福祉法人が実験評価に協力し，設備機器メーカと試作加工メーカが研究成果物の知財化や実利用化に協力する体制を整えている．

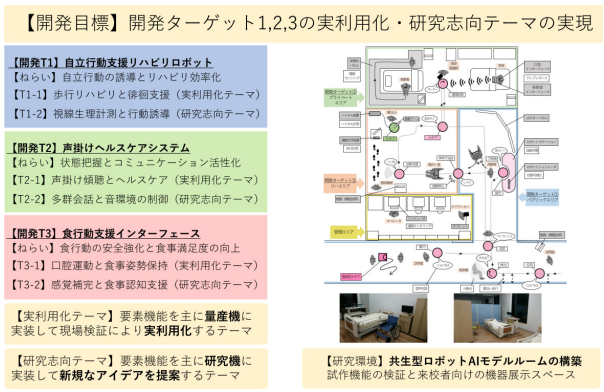
2.2 研究開発の現在状況

研究開発を推進する過程で技術が分化し，現在ではそれぞれが要素技術として発展しつつある．**表 1** に本研究の要素技術とそれに対応する現場の要求を “シーズ技術および試作機”，“現場ニーズ” として示し，これらの試作機の機能概要を以下に列挙する．また，これらの試作機の外観を**図 2** に示す (左上から右下の順に Lucia, Spina, Mani, Cibo, Camina, Memoria, Occhi, Parla, Orale, Mano)．試作機の詳細については個々の文献を参照されたい．

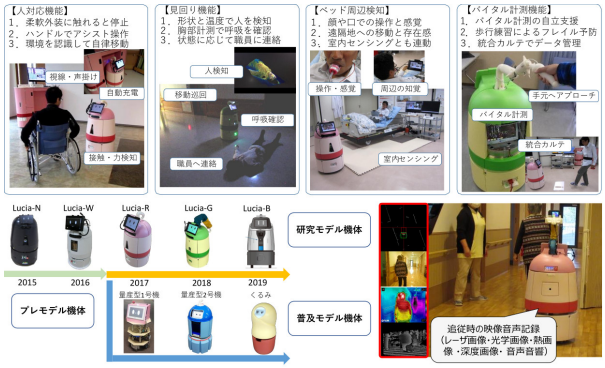
- Lucia (ルチア) : 移動巡回による見守り，徘徊検知の通知，障害者用テレプレゼンス，生理計測，歩行計測を行うヘルスケアロボット[4),5)]．
- Spina (スピナ) : 脊椎構造を工学的に再構成したモジュール型ロボット．各モジュールは CAN 通信で連携し，協調動作や補償動作を行う[6),7)]．
- Mani (マーニ) : 食物や飲み物を口元や手元に運ぶロボット．カトラリーを用いて食物を運び，食物の形状と体積を判定して提供する[8)]．



(a) 研究概要



(b) 開発ターゲット



(c) 研究基盤システム

図 1　共生型ロボット AI の概要

- Cibo (チーボ)：食事動作と食卓状態を認識するシステム．咀嚼を検出して声がけで誤嚥を防止する．視覚障害者に食事を音声案内する[9]．
- Camina (カミーナ)：理学療法の歩行テストを計測し，歩行動作を評価するシステム．要素動作を区分化して歩行の可視化や判定，予測を行う[10]．
- Memoria (メモリア)：日常の出来事の写真や感想から生成されるクイズに回答して思い出を維持する．未来の出来事を予感させて活力を高める．
- Occhi (オッキ)：眼精疲労による視力低下の回復や奥行き知覚の低下を予防する注視訓練システム．注視移動で眼筋をストレッチする[11]．
- Parla (パルラ)：説明文章を含むプレゼン資料から視聴覚情報を保証した説明や質問対応を行うシステム．説明動画を生成する[12),13)]．
- Orale (オラーレ)：舌を用いて機器を操作するインターフェイス．舌の状態を光学的な像として計測する．疑似中心窩で繊細な操作ができる．
- Mano (マーノ)：同心円状チェーン関節とプッシュプルケーブルによる動力伝達で指の屈曲伸展を補助する．ミラーセラピーを実現する[14)]．

表 1　現場ニーズとシーズ技術および試作機

現場ニーズ	シーズ技術及び試作機
夜勤の巡回業務	徘徊検知システム Lucia
日勤の測定業務	生理計測システム Lucia & Spina
嚥下事故の防止	食事認識システム Mani & Cibo
フレイルの予防	歩行計測システム Camina
記憶維持の支援	記憶支援システム Memoria
運転事故の予防	注視訓練システム Occhi
親なき後の自立	説明生成システム Parla
機器操作の支援	口腔検知システム Orale
リハビリの支援	手指動作システム Mano

3.　ヘルスケアロボット Lucia

共生型ロボット AI の開発事例として，ヘルスケアロボット Lucia について紹介する．Lucia は筆者らが共生型ロボット AI として開発したロボットシリーズである．Lucia は 2015 年より累計で 5 種類の機体が開発され，2017 年からはこれと並行して巡回見守りの機能に絞り込んだ 3 種類の量産試作機が開発された．量産試作機の 3 号機は “くるみ” として製品化されている．くるみを除く量産試作機と Lucia の研究機はそれぞれ 1 機ずつ合計 7 機，くるみは合計で 10 機製作された．いずれの機体も研究機関や介護施設が保有し，生活支援機能の検証試験などに利用されている．本稿では Lucia の主要機能である施設利用者のバイタル測定に関して，パーソナルスペースを考慮した人への接近方法とバイタル測定を行うアーム機構について述べる．

3.1　パーソナルスペースを考慮した軌道生成

介護施設内を移動して人に接触するヘルスケアロボットには，施設利用者や入院患者に不快感を与えないように穏やかに接近する能力が求められる．本研究では接近対象者の知覚や運動に関する空間的な特性を考慮したロボットの接近方法を提案する．接近対象者にとってロボットが視認しやすく，接触しやすいような接近軌道を実現するために，パーソナルスペースの概念に基づいたポテンシャルフィールドを生成する．また，ポテンシャルフィールドに障害物の配置に関する情報を含めることで，障害物への衝突を合わせて回避する．

ロボットがパーソナルスペースに侵入する際の心理的な影響は，ロボットの外観や大きさ，接近速度などによっ



図 2　共生型ロボット AI の試作機

て変動することが示されている[15)~18)]．ロボットが接近する際の心理的な影響は，接近対象者の体位や認知運動的な特性，疾患や障害の有無などにも影響されると考えられるが，これらの因子を考慮したロボットの接近方法は十分に検討されていない．特に介護施設内では立位，椅子座位，車椅子座位，ベッド座位など複数の体位が想定されるため，これらの体位にある接近対象者を目標として接近移動する機能を Lucia に実装した．接近移動のようすを**図 3(a)** に示す．Lucia は接近対象者の心理的な特性と障害物の物理的な特性を統合して熱拡散型のポテンシャルフィールドを構成し，その温度勾配に基づいて軌道を生成して対象者に接近する[19)~21)]．具体的には人のパーソナルスペースと障害物を低温領域に設定し，目標地点に熱源を配置して熱を拡散させた後，温度の最急勾配方向への移動を繰り返す．両眼視野または片眼視野をもつ立位状態にある接近対象者を想定したポテンシャルフィールドと接近軌道を**図 3(b)** に示す[22), 23)]．なお，接近対象者の前方は図の上向きとし，片眼視野は左眼が可視とする．図に示されるように両眼視野の対象者への接近軌道は左右対称形となるが，片眼視野の接近軌道は左側に偏るため，片眼視野の接近対象者にとって接近するロボットが視認しやすくなる．

3.2　脊椎型モジュールアーム

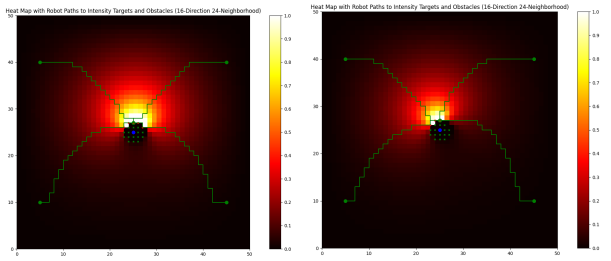
介護施設や病院では施設利用者や患者の体温や血圧などのバイタル情報を蓄積して電子管理するが，バイタル測定は接触を伴う作業のため職員が行うことが多く，ロボットによる測定の自動化は確立されていない[24)~26)]．本研究では施設利用者や入院患者が Lucia と協調して自助的にバイタル測定を行う方法を提案する．提案方法により現場職員の業務負担を軽減し，当事者の健康管理の意識を高める．Lucia によるバイタル測定は頭部に装備された脊椎型モジュールアーム (**図 3(c)**) とバイタル測定ハンドル (**図 3(d)**) により実現される．脊椎型モジュールアームはバイタル測定ハンドルをユーザの手元に到達させる．バイタル測定ハンドルはユーザが把持する際の圧力と脈波を測定する．Lucia が測定対象者に接近してハンドルを差し出し，測定対象者がハンドルを握ることで自助的なバイタル測定を実現する．

脊椎型モジュールアームは，脊椎型腱駆動モジュール “Spina” を 6 機連結した構造をもつ．脊椎動物の脊椎には身体を堅牢に支持しながらも柔軟な可動域を確保できるという特徴があり，この構造をロボットアームに取り入れることで堅牢性と柔軟性を両立することができる[27), 28)]．また，これまでに多くのモジュール型ロボットが提案されているが，生理計測を目的とする例は稀有である[29), 30)]．本研究のモジュールは ABS 樹脂製の円盤 2 枚が中心部に配置した引きバネを挟み込む構造をもつ．2 機のモータが円盤間に通されたワイヤを巻き取ることで引きバネを屈曲させて 2 自由度の姿勢変化を実現する．モジュールは 1 機で ±30 deg の可動域をもち，6 機連結によって ±180 deg の広可動域を実現する．脊椎型モジュールアームの伸展状態 (0 deg) と屈曲状態 (180 deg) を図 3(c) に示す．図に示されるように，脊椎型モジュールアームは Lucia との固定部に対してバイタル測定ハンドルの先端部の姿勢を反対向きにまで屈曲させることが可能である．モジュールには制御用のコントローラと各種センサが搭載され，モジュール単体で自身の姿勢を推定して制御することができる．モジュールは IMU，エンコーダ，近接覚センサを搭載し，モジュール間の CAN バスラインで相互に通信しながら協調動作を行うことができる．

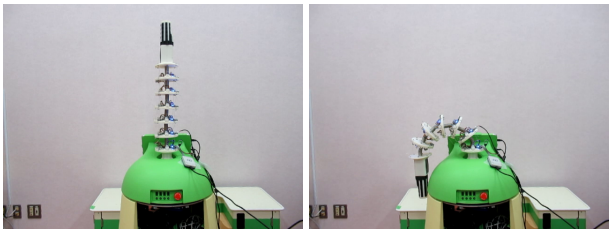
介護医療福祉の現場において施設入居者や患者のバイタルサイン（脈拍，血圧，体温，呼吸，意識レベル）の測定は欠くことのできない業務である．体温や呼吸は非接触式で測定する技術が多く報告されているが[26)]，血圧



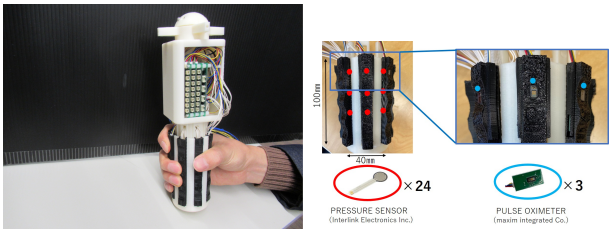
(a) 接近移動 (立位，椅子座位，車椅子座位，ベッド座位)



(b) 熱拡散型ポテンシャルフィールド (両眼視野，片眼視野)



(c) 脊椎型モジュールアーム (0[deg],180[deg])



(d) バイタル測定ハンドル (圧力センサ，脈波センサ)

図 3　ヘルスケアロボット Lucia

や酸素飽和度 (Saturation of Percutaneous Oxygen, 以下, SpO_2) は接触式の測定が一般的であり，測定の自動化が確立されていない．SpO_2 の測定手段として普及している透過型のパルスオキシメータは指先を挟み込む必要があり，認知症等の患者には測定が難しい場合がある．一方で反射型のパルスオキシメータは指先を接触させるだけで測定可能であり，測定時の拘束感が小さい．本研究では反射型パルスオキシメータを採用し，簡易な握り動作でバイタル測定が可能なハンドル型のバイタル測定デバイスを製作して，脊椎型モジュールアームの先端部に実装した．

バイタル測定ハンドルの把持部には円筒形状の基部表面に 8 列の短冊形状のグリップを等間隔に配置した．各グリップには 3 個の窪みを設け，窪みの下には圧力センサを配置した．把持部の表面に現れる 3 列の同心円上の窪みはそれぞれ母指と示指，中指，環指と小指の接触を誘導する．母指と示指が接触する 8 個の窪みの内，3 個の窪みの下にバイタルセンサを配置した．把持部全体では 24 個の圧力センサと 3 個のバイタルセンサが配置されており，把持状態の検知と共に，酸素飽和度 (SpO_2)，心拍数 (HR)，血圧 (BP) を同時に測定できる．図 3(d) にバイタル測定ハンドルの外観とセンサ部を示す．

4.　おわりに

4.1　今現場で求められていること

介護医療福祉の現場で今求められていることは何か，また，それにどう応えていくべきかについて，改めて論考する．筆者らが行った介護施設や障害者施設の現場職員への聞き取り調査によると，今現場で求められている項目として，“高齢者，障害者，患者の認知運動とコミュニケーションの活性化” が挙げられる．自身の心身の状態やその変化を意識すること，また，人とのやりとりを深めることで，自分の価値を自然に自覚する機会が生まれる．自己肯定感や自己効力感が高まれば，生きる意欲を保つことができ，健康寿命の延伸につながると期待できる．一方で，このような現場からの要求に対し，工学分野に従事する研究者の責務として，被介助者と介助者をつなぐロボットや AI システムの実現を提唱したい．人間と共生型ロボット AI が協働する現場環境を構築し，共生型ロボット AI が人間よりも優位となる作業を一つでも多く発見して現場の作業を適切に分担していくことが，今後重要になると考えられる．共生型ロボット AI が優位となる可能性がある役割とその背景について，例を挙げる．

- 被介助者の精神負担を和らげる（頼む負担の低減・同性介護の代替）
- 介助者の精神負担を和らげる（聴く負担の低減・認知症への対応）
- 被介助者の安全安心を守る（虐待の防止･感染の防止）
- 介助者の安全安心を守る（カスハラの防止・介助行為の正当性の立証）
- 被介助者と介助者をつなぐ（関係の固定化防止・予測不能な面白さや話題の提供）

4.2　工学研究者の社会的使命

健康寿命の延伸のために工学分野に従事する研究者が今後果たすべき，社会的使命は何であろうか．筆者はこ

れまでに行政や産業に携わる協力者と連携して，人間と共生するロボットや AI システムの普及導入に取り組んできた．人間同士の共生社会の枠組みを超え，人間と機械が互いに学習して補い合う人間機械の共生社会を構築することが取り組みのねらいである．人間機械の共生に向けて社会実装を推進する際の課題に，共生型ロボット AI の行動責任の問題がある．製造者や運用者が負うべき責任がリスクと見なされ，現実に共生型ロボット AI の製造販売や現場導入の妨げとなっている．一方で，現場では特定技能外国人として入職する外国籍の介護職員や海外研修生が増加している．現場の声によれば，外国籍の職員は言葉が通じづらい反面，感情表現が豊かでコミュニケーションを十分に取ってくれると施設利用者からの評価が高い．同様に人間と機械の共生にも利点があるはずであり，国籍を超えた人間同士の共生を参考に人間機械の相利的な共生を導く姿勢が大切であると考えられる．共生型ロボット AI が多様性への対応や安全安心を担保する存在として認知され，現場への普及導入が進展することを望む．

（2024 年 7 月 3 日受付）

参 考 文 献

1） 厚生労働省：平成 26 年版厚生労働白書健康長寿社会の実現に向けて〜健康・予防元年〜，132/247 (2014)
2） S. M. Sabri, et al.: Major Trends in Ageing Population Research: A Bibliometric Analysis from 2001 to 2021, *International Academic Symposium of Social Science 2022*, **82**–1 (2022)
3） 内閣府：令和 5 年版高齢社会白書高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況，26/35 (2023)
4） A. Mongkolphinyopas, R. Chancharoen, and R. Saegusa: Gentle Robot Approach Based on Individual Action Perception Fields, *ICRA 2024 Workshop on Nursing Robotics*, **35** (2024)
5） R. Saegusa and R.Okonogi: Interactive Health Care Robot to Measure Vital Signs, *IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics* (印刷中)
6） 須藤，三枝：腱駆動モジュールによる脊椎ロボットの協調制御，第 41 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，RSJ2023AC1B3-04 (2023)
7） R. Sudou and R. Saegusa: Human-Interactive Robotic Arm Based on Spinal Tendon Drive Modules, *The 42nd annual conference of the Robotics Society of Japan* (印刷中)
8） 松田，三枝：ロボット食事介助における声がけの応答検出，情報処理学会アクセシビリティ研究会，2023-AAC-23 (2023)
9） 松田，三枝：エージェントとの対話による食行動の効果，情報処理学会アクセシビリティ研究会，2024-AAC-25 (2024)
10） R. Saegusa: Gait Measurement System toward Robotic Rehabilitation of Locomotive Functions, *IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics*, 1425/1430 (2023)
11） 杉本，三枝：注視動作に基づく眼球運動システムと疲労緩和，情報処理学会第 84 回全国大会講演論文集，**4**, 947/948 (2022)
12） 三枝，前土佐：ともに生きる社会の実現に向けた支援技術の開発，日本機械学会技術と社会部門講演会，69/70 (2023)
13） 三枝，前土佐，小川：動画生成アプリによる視聴覚情報の保障，日本リハビリテーション連携科学学会第 25 回大会，31 (2024)
14） 飯田，三枝：手指アシストデバイスによる自立リハビリ支援，情報処理学会第 86 回全国大会講演論文集，**4**, 677/678 (2024)
15） H. Hecht, et al.: The Shape of Personal Space, Acta psychologica, **193**, 113/122 (2019)
16） M. Neggers, et al: Determining Shape and Size of Personal Space of a Human When Passed by a Robot, *International Journal of Social Robotics*, **14**–2, 561/572 (2022)
17） M. Neggers, et al.: The Effect of Robot Speed on Comfortable Passing Distances, *Frontiers in Robotics and AI*, **9**, 1/15 (2022)
18） J. Michiel, et al.: Making Appearances: How Robots Should Approach People, *ACM Transactions on human-Robot Interaction*, **10**–7, 1/24 (2021)
19） L. Liu, et al.: Path Planning Techniques for Mobile Robots: Review and Prospect, *Expert Systems with Applications*, **227**, 1/30 (2023)
20） Y. Wang and S. C. Gregory: A New Potential Field Method for Robot Path Planning, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 977/982 (2000)
21） J. Hills and Y. Zhong: Heat Diffusion Method for Intelligent Robotic Path Planning, *20th ISPE International Conference on Concurrent Engineering*, 588/602 (2013)
22） I. P. Howard and B. J. Rogers: Binocular Vision and Stereopsis, Oxford University Press, USA (1995)
23） A. Shaqiri, et al.: Gender Differences in Visual Perception, *Journal of Vision*, **16**–12, 207/207 (2016)
24） 山田 憲嗣：介護ロボットの現状と課題，日本老年医学，**52**, 322/327 (2015)
25） 伊藤 正：医療用ロボットとアクチュエータ，日本ロボット学会誌，**33**–9, 677/679 (2015)
26） 伊東 美奈子，他：看護職が行うバイタルサイン測定の実態：2012 年と 2001 年調査の比較をふまえた考察，聖路加看護学会誌，**19**–1, 27/35 (2015)
27） H. Tomislav, et al.: Inverse Kinematics and Reflex Based Controller for Body-Limb Coordination of a Salamander- Like Robot Walking on Uneven Terrain, *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 195/201 (2015)
28） 浅野 悠紀，他：実世界での環境接触動作に向けた人体模倣筋骨格ヒューマノイド腱悟郎の開発，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集，2A1–13a2 (2016)
29） T. Fukuda and Y. Kawauchi: Cellular Robotic System (CEBOT) as One of the Realization of Self-Organizing Intelligent Universal Manipulator, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 662/667 (1990)
30） H. Kurokawa, et al: Self-Reconfigurable Modular Robot (MTRAN) and Its Motion Design, *7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, 51/56 (2002)

［著 者 紹 介］

三枝（さえぐさ） 亮（りょう） 君(正会員)

1999 年早稲田大学理工学部応用物理学科卒．2005 年早稲田大学大学院学位取得．博士（工学）．2004 年早稲田大学理工学部助手，2007 年 Istituto Italiano di Tecnologia 研究員，2012 年豊橋技術科学大学特任准教授を経て，2018 年神奈川工科大学准教授．情報工学およびロボット工学の研究に従事．米国電気電子学会，情報処理学会，電子情報通信学会などの会員．