解 説

同調と主張に基づく人共存型モビリティの協調移動技術

Interactive Proximal Navigation for Human-Symbiotic Mobility

亀 崎 允 啓* *早稲田大学/科学技術振興機構さきがけ
Mitsuhiro Kamezaki* *Waseda University/JST PRESTO

1. は じ め に

日常生活支援・医療・介護・福祉・公共サービス等の分野における社会システム基盤として、「人間作業の支援または代替が可能なロボットシステム」の早期普及が期待されている[1]。このようなロボットは、人とロボットが混在して空間を共有する環境において、安全性と作業性を両立して運用される必要がある。ここで、活動空間の特性上、ロボットは人の近接・密接距離において移動および作業を行うことが求められる。しかし、接近から接触にかけての近距離における人とロボットのインタラクションに関する研究はこれまで限られてきた。その背景には、「絶対安全」を実現するために、図1左のように、ロボットの人への接近・接触を禁忌とし徹底的な回避を行動原理とする考え方が、従来の産業分野に端を発して根強く浸透していたことが挙げられる。このようなロボットは、安全であっても作業効率を著しく低減する実用上の問題がある。一方、高齢者や障害者のアクセシビリティの拡大等の期待から、総務省等によるパーソナルモビリティの社会実装が重要な政策として進められている[2]。自律移動ロボットやパーソナルモビリティが、人共存環境で自身のタスクを制約なく遂行するためには、人と近い空間をたとえ混雑した環境であっても安全に動けることが求められるが、現状のモビリティが「制約なく」人と活動空間を共有できているとはいえない。そこで、接近・接触状態におけるモビリティ自身の作業性と安全性を両立させる協調移動のための技術的基盤が新たに必要と考えるに至った。

ロボットに人と移動空間を共有させる場合、従来技術の多くは「人が最優先でロボットを人に接触させない」という原則に基づき、人とロボットの進路が干渉する場合には、ロボットに回避や迂回を行わせていた。このとき、人の不意な動きにも対応できる低速度と大きな安全距離が設定されていた。さらに、駅構内等の混雑環境では、人との接近状態や進路干渉が継続して発生するため、ロボットは移動すらできなくなってしまう。以上から、「完全な回避」という行動原理は、ロボットの運用上極めて非現実的である。

図1 人共存型モビリティ

図1右のように、タスクによっては人と密接した状態まで近づく必要があること、状況によっては接触が避けられないという前提に立ち、接近・接触状態における移動技術の構築を行う点が、本研究のポイントといえる。ハグ・握手や移乗介助に代表される従来のヒューマンロボットインタラクション(HRI)の多くは、インタラクションが前提とされているため、双方の目的は共通で互いの意図は推定しやすいものであった。一方、移動におけるインタラクションは、そもそもが望まれるものではなく、接近自体が不快感を与え、衝突の危険性も生じる。つまり、進路の干渉があった場合、インタラクションを最小限にしながら双方が安全に通り抜ける方法論の構築が必要となる。そのためには、人とロボットの関係を「対等」とするところから出発し、人の観察と洞察に基づきロボットの行動を人に同調させるか主張するかを適応的に判断し、実行する一連の情報処理技術の開発がポイントとなる。この視点での技術開発は、従来にない物理的ヒューマンロボットインタラクション(pHRI)の新領域を開拓するものである。本研究は、産業機械に代表される「人ロボット完全分離による安全・安心」から、「働きかけと協調動作による安全・安心」へのパラダイムシフトを提起するものであり、ロボットが人の活動空間に入る際に問題となる「近接・接触状態における安全性と安心感」が工学的な保障を伴い実現されることが期待できる。

以降、第2章では、インタラクションを前提としたマルチモーダルな働きかけ、第3章では、人とロボットの相互譲り合い手法、第4章では、軽接触を使った移動誘導技術、第5章では、リスクとベネフィットに基づく接近・接触移動について解説する。最終の第6章では、今後の展望についてまとめる。

原稿受付 2019年9月19日

キーワード: Human-symbiotic Mobility, Mutual Concessions, Interactive Proximal Navigation

*〒162-0044 新宿区喜久井町17

*Shinjuku-ku, Tokyo

図2 状況に応じて働きかけを選択する Interactive human-aware navigation framework

2. 人へのマルチモーダルな働きかけ

自身の移動目的を達成させながら人と協調的に行動するには、ロボット自身の行動意図を人に伝達すること、すなわち、アイコンタクトや声かけ、接触などに代表される「能動的に人に働きかける機能」が必要だと考えられる。適切な働きかけは、当該環境における人の状態に大きく依存する。ここでは、働きかけを用いたロボットの協調移動行動の基本戦略を構築することを目的に、必要な機能モジュール群を開発・統合し、実機実験を通じた評価結果[3]について紹介する。

2.1 働きかけの種類

人どうしの観察から七つの働きかけ手法を案出した。人への介入度の強さの順に、(1) 迂回、(2) 経路示唆、(3) 腕の引き込み(身体収縮)、(4) 減速、(5) 声掛け、(6) 気づかせのための接触、そして、(7) 受動接触である。経路示唆は、ロボットの進路を自身の動きにて示唆し、ロボットの動きを読み取りやすくすること、受動接触とは、人がロボットの体幹に衝突する前にロボットの腕で接触させることで衝撃を吸収し、自発的な停止や回避を促すものである。ロボット独自の働きかけ手法としてモニタ表示やプロジェクションなどが考えられる。これまでに進路示唆に特化した遠方からの意思伝達システムを開発しているが本稿では省略する(詳細は、例えば文献[4][5]を参照されたい)。

2.2 協調移動行動の基本戦略

ロボットの構成に大きく依存しない汎用性を考慮して、入力(計画)・処理(働きかけ・経路計画)・出力(制御)の機能モジュール群を基本戦略として整理し、典型的な通路でのすれ違いを対象とした軌道計画手法を実装した(図2)。はじめに、環境における人の存在・位置・向き、空間幅を計測する。最大幅をもつ空間の大きさに応じて、選択すべき経路や働きかけが変わるため、空間幅を四つに分類する。Wideでは、何もせずに移動軌跡上を通常速度で移動する。Sufficientでは、腕を引き込みながら減速して通り抜ける。人の前方を通る場合、「すみません」と謝意を伝えて通る。Narrowでは、「通ります」と通ることを伝えたいので、大きく減速し、受動接触体勢をとりながら通り抜ける。Too narrowでは、減速し、まず「すみません」と発話をする。人がロボットに反応しない場合、当該人の直前で停止し、気づかせのための接触、「通して下さい」という要求発話、空

図3 通路での人とロボットのすれ違いシーン(左:従来システム、右:提案システム)

間生成のための人を移動させる接触の順で、働きかけを行う。選択した空間の中心点を通り抜け点とし、そこを通過するように前後に通過点を設け、通り抜け軌跡を設定する。詳細な説明については、文献[3]を参照されたい。

2.3 実験結果とまとめ

人の立ち位置や人どうしの関係性に応じて、適切に働きかけが選択できること、さらに、ロボットからの働きかけに対する人の受容性について評価を行った。ここでは、典型的な結果のみを紹介する。人への接触ができない従来手法では、最大空間である人A(被験者)の後ろを通過しようとする。しかし、空間幅が小さく立ち往生してしまう(図3(a)左)。一方、提案手法では、腕を用いて気づかせ接触を行うことで、ロボットの存在に気付いた被験者が、道を空ける行動が確認された(図3(a)右)。接触をされたにもかかわらず、自身が道を塞いでいたという事実から「合理的」といった印象が多く、否定的な意見は少なかった。図3(b)の状況は、AとB(実験者)の間の空間が最大幅である状況である。従来手法では、AとBの間に会話が行われているが、最大空間であるA-Bを通り抜けている。このため、「気が利かない」といった否定的な感情が多く確認された。一方、提案手法では心理配慮のため最大幅空間ではないAと壁の間を通り抜けている。これにより、否定的な感情は大きく減ることが分かった。以上より、人や環境情報に応じて適切に働きかけを行うことで、ロボット自らが人に変化を

促し、ロボットの移動可能範囲および人の受容性を高められることが示唆された。

3. 相互の譲り合いに基づく協調移動

第2章では状況に応じたマルチモーダルな働きかけの重要性について述べた。人と協調するロボットには、第1章で述べたように、譲り合いの概念形成およびその実機実装が重要になる。ここでは、人への回避（主張）の度合いを示す「譲り合い度」を推定し、それに応じて、主張的働きかけ行動、または同調的回避行動をシームレスに選択可能な協調移動手法[6]を紹介する。

3.1 働きかけ・譲り合い行動に関連する領域

ロボットと人の相対位置関係や干渉までの時間が、ロボットの主張／同調を決める主要因になる。そこで、図4に示す三つの働きかけ領域を定義した。

- 働きかけ無効域 (R_n)：距離が遠く働きかけの効果が期待できない領域。基本的に働きかけをしない。
- 遠方働きかけ域 (R_f)：何回か働きかけをする機会のある領域。小さい労力で相手を誘導できる可能性がある。
- 接近働きかけ域 (R_p)：遠方域よりも即時的で明確な働きかけを行う領域。内容がより直接的に相手に影響する。

さらに、領域に付随した地点を以下のように定義する。

- 最遠働きかけ点 (P_i)：働きかけが影響を及ぼす最遠点。
- 最短回避点 (P_s)：接近移動（接触移動）を行うか、迂回を選ぶかの判断を行う点。
- 臨界回避点 (P_l)：ロボットがパーソナルスペース (PS) [7] に入らない迂回移動が可能な回避臨界距離。
- 接近準備点 (P_r)：PS 臨界点までに接近働きかけ（アームを構える、減速など）を完了させる時間を確保できる距離。
- PS 臨界点 (P_p)：人とロボットが持っている PS が重ならない端点までの距離。ここでは、1[m]とした。

3.2 主張・同調軌道計画手法

様々な方向からの移動体に対して、加減速を含めた効率的な軌道計画を行うため、Dynamic Waypoint Navigation (DWN) を用いる（詳細アルゴリズムは文献[8]を参照されたい）。同調軌道では Waypoint を人に干渉しない位置 (PS 端) に設置するが、主張軌道の場合は PS 内に設置することで生成する。PS 端からの侵入距離は、ロボットと人の干渉角度 (θ_r, θ_h) から定めた譲り合い度 (P_R, P_H) から決める。干渉角度は、干渉時の自身の進行方向と干渉点のなす角である。干渉角度の差が大きい場合（図5左図）は、ロボット・人ともに左避けしたほうがよいと判断できる。しかし、干渉角度にあまり差がない場合は、避けるべき方向が分かりにくい。そこで、角度に差がある場合（ここでは 30° 以上）、譲り合い度は等しい (50:50) が、差がない場合は、人に分かりやすく動くためロボットのほうが少し多め (75:25) に譲る。働きかけ後には、働きかけ意図が伝わったかを示す達成度を判定する。主張軌道による働きかけは、自分が $P_R\%$ 分回避した軌道により、人に $P_H\%$ 分

図4 領域の定義と働きかけ内容（主張・同調）

図5 譲り合い度の推定

図6 ロボットと人のすれ違いの様子

回避してもらおうことを意図している。そこで、ロボットと人の最接近距離が PS より短ければ、干渉を意味するので達成度なし、PS より大きい場合（ここでは1.5倍）は、人が大きく回避しているので極有、それ以外は有となる。達成度なしの場合、主張行動が相手に伝わらず干渉状態が継続しているので、ロボットは引き続き働きかけを行う。

3.3 実験結果とまとめ

提案する譲り合い度の推定に基づき相互の譲り合いができること、また、主張を含む譲り合い行動の受容性について評価を行った。ロボットのとりうる移動戦略として、全回避（従来の常に同調的回避をする移動戦略）、回避なし（常に主張的に目的地へ進む移動戦略）、譲り合い（提案の譲り合いを推定し状況に応じて主張・同調を切り替える移動戦略）を用意し、一連のすれ違いタスクを実施した。図6にすれ違いの様子、図7にロボット・人の軌道、および速度ベクトルの変化度合いを積算した軌道コスト（低いほうがよい）をそれぞれ示す。全回避では人を完全に回避するためロボットのコストが高く、回避なしではロボットは直線的に目的地へ向かうためコストが低い。一方、譲り合いでは、ロボット（人）は、全回避（回避なし）よりコストが小さく、回避なし（全回避）よりコストが大きくなっており、人とロボットが適切に譲り合えたことが確認された。さらに、アンケートに基づく印象評価を行った結果、ロボットの

行動意図が汲み取れ、譲り合いを感じることができた、自然な動きであったという意見が多く、三つの中で最も選ばれた。以上より、提案手法により、人・ロボット系における相互の譲り合いを考慮した主張・同調的移動行動が実現されることが分かった。

4. 軽接触による人の移動誘導

第3章では、PSに侵入しない軌道計画を紹介した。第2章で述べたように通路幅がない場合は、働きかけによる移動誘導を行う必要がある。ここでは、軽接触を利用して人の移動を促しながら自身の移動を完遂させる移動制御手法[9]を紹介する。接触される人の安全性や不快感を考慮しつつ、状況に適した接触（能動接触，受動接触）を行うことがポイントである。

4.1 接触の状況と分類

働きかけの手段の一つである接触により、人の移動誘導を促せる。雑音の多い場所で人が通路を塞いでいる場合には、声がけが上手くいかないため、気付かせ接触をしたり、発声することが相応しくない場所では、軽く触れて移動を促したりすることができる。また、狭い通路では、人がよるめいたりしてロボットが接触される場合も考えられる。つまり、進路を塞いでいる人に移動を促すためにロボットから人へ接触する「能動接触」と、人から接触してきた際に衝撃緩衝を行う「受動接触」に分類できる。ここで、接触のためのいくつかの条件を考える。まず、接触を行う状況には、人がロボットの存在に気付いていないという前提があるため、人がロボットを視認可能な $135\sim 315^\circ$ （図8に示すように、ロボットと同方向を向いている場合を 0° ）では接触を行わない。また、心理面から胸や腹などへの接触は避け、移動誘導しやすい背中と肩を接触箇所とした。

4.2 移動性評価マップと接触制御システム

ロボットが通路を通り抜けるには、自身が通り抜けに必要な幅と、通路を塞いでいる人が移動すべき位置・向きを認識している必要がある。そこで、まず、人の向き（ 45° 刻み5とおり）、接触部位（肩・背中）、接触力方向（人を自然に誘導可能なものを選定）をパラメータとして、人に 10 [N] の接触力を加えた際の人の移動量 $[\text{cm}]$ を算出した（詳細は文献[10]を参照されたい）。図8に示すように、人を移動させるには多くの場合で 90° 方向へ接触が有効であり、人が 45° 方向を向いている場合には 45° 方向への接触が有効であることが分かった。接触の形態は、算出した空間幅 W

図8 移動性評価マップ（無印：肩接触，下線：背中接触）

図9 軽接触制御システムおよび能動接触制御

図10 実験シーン（受動接触→能動接触→通り抜け）

に基づき選択する。人の移動がなく W がロボット幅 W_R より小さい場合は能動接触、 W が W_R の1.3倍まであれば受動接触、それ以上であれば、接触せずに通り抜ける（図9左）。能動接触では、通り抜け通路幅の確保のため、人の移動目標値の算出、そのための接触手法（図8の移動性評価マップに基づき決定）の導出を行う（図9右）。アームは一定の低速度で動作し、人が接触の途中で動いた場合は停止、接触力がある一定値（ 25 [N] ）を超えた場合には、転倒危険性が高いと判断し接触を中断する。受動接触においても、人から加えられる力が一定値（ 25 [N] ）を超えた場合やアームを押し込まれ量が一定値を超えた場合には、人からの能動的接触と判断し、アームを固定し後退する。

4.3 実験結果とまとめ

状況に応じて接触形態・手法を使い分け、適切に移動誘導ができること、接触に対する受容性について評価を行った。ここでは、典型的な例を紹介する。図10に示すように、はじめは通路幅が狭いため受動接触制御を行っていたが、人がさらに後退して道を塞いでしまったため能動接触を行い、移動誘導により通路幅を確保できていることが分かる。アンケートの結果、能動接触を用いた場合には、通り抜けの際の不自然さや不快感は能動接触を用いない場合と比較して多少大きくなったが、恐怖感に関しては大きな差

異は見られなかった。以上より、ロボットが通路幅によって適した接触形態・手法を判別し、能動・受動接触を切り替え用いつつすり抜けを行う軽接触移動制御システムの有用性が確認された。

5. リスクとベネフィットに基づく近接移動

PS 内の移動を行うための接近・接触移動（以下、近接移動）の実現には、「接近のリスク」を推定し、「近接移動によって効率の良い移動が行えるベネフィット」を加味した総合的な経路選択機能が必要となる。人・ロボットの速度・位置を用いて算出した接触可能性と接触による被害程度から推定したリスクに基づく接近移動[11][12]が提案されているが、リスク推定という観点では、リスクは人がロボットに気付いているか否かによっても変化する。また、リスク調整という観点では、ロボットから人への働きかけ[3]が効果的と考えられる。以上より、リスクおよびベネフィットを推定し、必要に応じてリスクを調整可能な近接移動フレームワーク[13]を紹介する。

5.1 予定外近接移動

実環境では、人に接近するまでに時間的余裕がある場合だけでなく、ロボットの認識範囲外から突然人が現れ、その時点ですでに近接状態である場面も考えられる。この状態では取るべきロボットの行動に考慮が必要なため、人とロボットの相対距離により「計画的近接移動」と「予定外近接移動」を定義する（図 11）。第 3 章で定義した 3 領域の中で、計画的にリスクを推定・調節した移動を行えるのは P_r より外側であり、その状況を「計画的」、内側の緊急的行動を取るべき状況を「予定外」と定義する。予定外近接移動時のロボットの行動計画は、人とロボットの相対関係から以下の 3 種類に変化する。

- PS 内侵入の有無：すでに PS に入っているか否かで行動を変更する。入ってしまった場合は、最短時間で抜けられるように人との干渉点に対して垂直方向に移動する。
- 体幹接触可能性の有無：現在の移動を続けると体幹接触を起こすか否かを判断する。体幹接触が不可避な状況ではただちに停止を行う。停止後は人のいない方向へ回避する。
- 接触準備の有無：PS には接触のリスク調節なしでは入ってはいけない。予定外近接移動においても、接近リスクをすでに調整していた場合は、接近移動を行えるものとした。

5.2 計画的近接移動

(1) リスク式：PS 侵入経路を生成することで選択肢が増え、迂回経路よりも移動効率の良い経路を生成できる「ベネフィット」が創出される。一方で、PS に入って接触などの働きかけを行うことで衝突や許容できない不快感が生じる「リスク」があることから、まず、リスク式を接近エネルギーとして定義する。接近時の不快感・リスクは短い相対距離、大きな相対速度ほど、指数関数的に大きくなる。接近リスクの基本的な要素は、接触可能性・接触リスクであ

図 11 近接移動フレームワーク

図 12 近接リスク推定パラメータおよび経路生成

るため、距離と速度のエネルギーをベースに、接近エネルギーを式 (1) で算出する（図 12 左）。

$$E_A = O_h \times P_h \times A_w \times (D \times V). \quad (1)$$

ただし、 D は、ロボットからの距離 d に応じた位置エネルギー、 V は、ロボットと人の速度に応じた運動エネルギー、 A_w は、認知度に伴うリスク係数（認知有：1，無：1.1）、 O_h は、人の向きに起因するリスク係数（ロボットが人の前方にいる場合は 1.0，後方に行くにつれて 1.2 倍になるように設定）、 P_h は、人の属性に基づくリスク係数（1.0～1.2，本研究では、1.0）である。

(2) リスク調整：働きかけを用いて接近のリスクを低減させる。まず、近くを通る意思を表出するとともに、人との接触時の衝撃および接近時の人に与える恐怖感を低減するため、減速を行う。次に、不意の接触の可能性を考慮し、受動接触制御を行う。最後に、人に対して「すみません／通ります」などの発話をし、ロボットの存在を気付かせ接触の可能性を低下させる。また、謝意等を伝え心理的不快感を軽減させる。

(3) 近接経路生成：DWN を用いて経路を生成する [8]。作成経路は PS 端を基準速度で進む場合と同じ接近エネルギーを持ち、また、働きかけによってリスク調節された経路である。同エネルギー経路では、ロボットと人の相対距離が短くなるにつれて位置エネルギーが増大するため、速度を小さくすることで運動エネルギーを小さくし、総和が等しくなるように制御される（図 12 右）。接近リスクが同じ経路を複数パターン作成したのち、ベネフィットを計算し、最良の経路を決定する。時刻 t における進行方向速度を v_{yt} 、進行方向の基準速度を v_{y0} 、回避方向速度を v_{xt} 、1 ステップ前の回避方向速度を v_{xt-1} とし、各方向における

図 13 ロボットの動作

図 14 ロボットの動作に対する受容性

差分をスタート (S) からゴール (G) までの積分する。接触による影響が小さいほどよいと考え、接触による人の移動距離 r を導入する。以上より、移動コスト E_T は次式となる。

$$E_T = \int_S^G X |v_{yt}^2 - v_{y0}^2| dt + \int_S^G Y |v_{xt}^2 - v_{xt-1}^2| dt + Zr. \quad (2)$$

ただし、 X は速度進行方向の重み係数、 Y は回避方向の重み係数、 Z は人干渉係数である。

5.3 評価実験とまとめ

近接移動手法の評価として以下の3点について確認した。

(1) 予定外近接移動：通路をロボットが進んでいる際に人が横道から現れるが、人を認知した際にはすでに PS に入っている状況である (図 13(a))。PS 内で停止する従来移動、提案手法である PS からの高速または低速回避の3種類で比較した結果、高速回避が最も自然であるとの回答が得られた (図 14 左)。停止動作に対しては「分かりにくい／不自然／気が利かない」といったマイナスの意見が多かった。以上から、突発的なすれ違いの状況では、素早く避けるなどの分かりやすい動作が求められる。

(2) 計画的近接移動：ロボットが人を認知した際には十分な距離があり、回避を行える状況である (図 13(b))。PS 外移動 (従来)、提案手法として遠いまたは近い接近移動を比較した結果、従来・提案手法ともに負の印象が得られなかった (図 14 右)。その中でも、近い接近移動では、「注

意深い／信頼できる」、一番適しているという意見も多かった。その理由として、ロボットが人とすれ違う際に、接触可能性を考慮して腕を上げ、声掛けを行ったうえで減速しながら移動をしたと考えられる。

(3) ロボットの経路選択：人に少し動いてもらわないと通れない経路と大回りになるが誰も邪魔せずに移動できる経路がある (図 13(c))。二つの経路を移動した際の人の印象・感情を分析した結果、どちらの移動に対しても「自然」と感じていたが、提案手法の印象として「怖い」を選択した人もおり、「安全」では迂回移動のほうが優れていることが分かった。しかし、第三者視点では、近接移動のほうが自然との意見も得られた。

以上より、接近移動を行う際には、接近のリスク推定を行い、働きかけにより調節を行ったうえで、ベネフィットを考慮した経路選択を行うことで、人に過剰な不快感を与えることなく近接移動が可能になることが分かった。

6. おわりに

本研究をシンプルに表現すれば、「望まれない状況」で「人とロボットの距離を短くすること」であり、これをロボットの移動において「人に納得感をもってもらいながら」実現することが目標である。本課題で提案する「人との接近・接触を許容するモビリティ」は、人にとってはマイナス (不安・不信心) からのスタートとなるため、技術的論理の説明だけでは不十分である。社会に受け入れられていく様子を、時間軸に意識した段階取りとして明確にし、社会の一部として、システムとして、認知・受容してもらう仕掛けについて検討していかなければならない。実環境では、病院や駅、ショッピングモールや、競技場など、多種多様な空間が存在する。さらに、すれ違う人には、高齢者、子供、運搬中の人、急いでいる人など多岐にわたる。この場合、上記の条件に応じた働きかけ戦略をあらかじめ記述しておくことは難しい。本研究で得られた基本的な働きかけ戦略モデル (グランドルール) を初期値として、外界情報を適切に取得、集積、分析して、ロボットの行動スキーマとして獲得する機能を取り込んでいくことを考えている。

謝辞 本研究の一部は、本研究の一部は、JST さきがけ (JPMJPR1754)、NEDO「次世代ロボット中核技術開発」、JSPS 科研費 (26870656)、ならびに、早稲田大学理工学術院総合研究所の支援を受けて行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 内閣府：Society5.0, https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html
- [2] 総務省：自律型モビリティシステムの開発・実証, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/html/nc267220.html>
- [3] M. Kamezaki, A. Kobayashi, Y. Yokoyama, H. Yanagawa, M. C. Shrestha and S. Sugano: "A preliminary study of interactive navigation framework with situation-adaptive multimodal inducement: pass-by scenario," Int. J Social Robotics, pp.1-22, 2019.
- [4] M. Kamezaki, T. Onishi, A. Kobayashi, M. Kamezaki and S. Sugano: "A communicating directional intent in robot naviga-

- tion using projection indicators,” Proc. IEEE Int. Symp. Robot and Human Interactive Communication, pp.746–751, 2018.
- [5] M. Shrestha, A. Kobayashi, T. Onishi, H. Yanagawa, Y. Yokoyama, E. Uno, A. Schmitz, M. Kamezaki and S. Sugano: “Exploring the use of light and display indicators for communicating directional intent,” Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, pp.1651–1656, 2016.
- [6] 亀崎, 小林, 河野, 菅野: “人・ロボット系における相互の譲り合いを考慮した主張・同調的軌道計画手法”, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3N1-02, 2019.
- [7] 渋谷: “パーソナル・スペースの形態に関する一考察”, 山梨医大紀要, vol.2, pp.41–49, 1985.
- [8] 小林, 河野, 平山, 亀崎, 菅野: “Dynamic Waypoint Navigation による移動障害物の実時間回避軌道探索手法の提案”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.811–814, 2018.
- [9] M. Shrestha, M. Kamezaki, Y. Tsuburaya, T. Onishi, A. Kobayashi, R. Kono and S. Sugano: “A preliminary study of a control framework for forearm contact during robot navigation,” Proc. IEEE Int. Symp. Robot and Human Interactive Communication, pp.410–415, 2018.
- [10] 円谷, 亀崎, 大西, 柳川, 小林, 河野, シュレスタ, 菅野: “自律移動ロボットにおける軽接触を用いた人の移動誘導 ～人の向き・接触部位・方向に応じた人の移動性評価～”, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3G2-01, 2017.
- [11] D. Althof, M. Althof, D. Wallherr and M. Buss: “Probabilistic-collision checker for crowded environments,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1492–1498, 2010.
- [12] P. Patompak, S. Jeong, N.K. Chong and I. Nikhamhang: “Mobile robot navigation for human-robot social interaction,” Proc. Int. Conf. Control, Automation and Systems, pp.1298–1303, 2016.
- [13] 亀崎, 金田, 大西, 円谷, 小林, 河野, シュレスタ, 菅野: “リスク・ベネフィットの推定と調整に基づく接近・接触移動フレームワークに関する研究”, JSME ROBMECH2019 論文集, 2P1-K10, 2019.

亀崎允啓 (Mitsuhiko Kamezaki)

2010 年早稲田大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。2018 年 4 月より早稲田大学理工学術院総合研究所主任研究員 (研究院准教授)。2017 年 10 月より JST さきがけ「社会システムデザイン」研究者。ヒューマンロボットインタラクション, ヒューマンセンシング, 高度知能ロボットシステムの設計に関する研究に従事。2016 年計測自動制御学会論文章受賞, 2018 年 9 月日本ロボット学会論文賞受賞。
(日本ロボット学会正会員)