

# 研究終了報告書

## 「同調と主張に基づく接近・接触状態での人共存型モビリティの協調移動技術」

研究期間：2017年10月～2021年3月

(新型コロナウイルス感染症の影響を受け2021年9月まで延長)

研究者：亀崎 允啓

### 1. 研究のねらい

#### ■研究の目的

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、「人間作業の支援や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。本研究では、人と共有した空間を自由に動けるモビリティ(搭乗型パーソナルモビリティや自律移動ロボット)「Human Symbiotic Mobility (HSM)」のための社会システムデザインを目的とする。HSMには、駅構内や空港など人が密集した場所でも制約を受けずに移動することが求められるが、従前より提案されてきた「回避と停止」のみによる制御側では、根本的にこれを実現できない。人共存ロボットにおけるモビリティ技術は、高齢者移動支援や物流サービスだけでなく、次世代産業において不可欠な要素である。そこで、本提案では、ロボットの主体的な判断の導入と、人や環境から(へ)の接触の許容を核に据えた、安全・安心な協調移動技術を開発し、人とロボットが譲り合いながら安全・安心に移動する方法を提案する。

#### ■研究のねらい

本研究のねらいは、次世代モビリティ社会における「人とロボットの新しい関係をデザイン」することである。最近では、安全柵による人ロボットの完全分離ではなく、人との作業空間を共有する協調ロボットの導入が検討されつつある。ロボットが人共存環境で人と調和しながら自身のタスクを遂行するためには、従来のような常に「人優先とする同調技術」だけではなく、状況に応じた「ロボットからの主張技術」により人との譲り合い関係の構築を目指すことが効果的と考える。そこで、これまでに未整備であった「人への接近過程および接触状態におけるロボットの同調—主張型移動技術のための情報処理基盤」を構築する。本研究課題により創出される情報基盤技術は、以下の3つで構成される。

【情報取得: 観察する・測る技術】 人の視線、人の反応、接触力、軌道等

【情報処理: 洞察する・図る技術】 ロボットの意図表出、人の意図・動作推定、協調モデル

【実体制御: 行動する・成す技術】 非接触/接触型制御、働きかけを踏まえた局所的経路計画

人がロボットの存在に対して抱く印象は、個々人の価値観に依存する。例えば、好奇心旺盛な人は喜んでロボットに近づいてしまい、逆に機械に警戒感を抱く人は自ら遠ざかる行動をとる。実験を進めていく中で、HSM がどのように人に受容されていくかも評価する。

## 2. 研究成果

### (1) 概要

Human-Aware Interactive Navigation (HAIV)の構築には、接近から接触状態に至るまでのシームレスな人の**【研究項目1】観察機能**と内部状態を推し量る**【研究項目2】洞察機能**、それらに基づく**【研究項目3】実体制御**の構築、そして、**【研究項目4】動作評価**が重要となる。

「観察技術」では、実体制御の入力として重要な人の速度ベクトル推定の高精度・低遅延化に取り組んだ。「洞察技術」では、人との社会的な距離規範や認知状態等に基づく接近時の移動予測手法、移動時のリスク(衝突)とベネフィット(移動効率)規範に基づく軌道計画モデル、さらに、干渉時の位置関係等から優先関係を定義する譲り合い度推定技術を開発した。「制御技術」では、近接移動を可能にする新たな基盤的軌道計画手法である Dynamic Waypoint Navigation (DWN)、混雑環境でのロバストな移動を可能とする inducible Social Force Model (iSFM)に基づく人混み移動手法を開発した。「評価実験」では、開発した HAIV を自律移動ロボットに実装し、実験環境で各技術の基礎検証を行った結果、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、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上で、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。以上より、**推定した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せること、ロボットの移動可能範囲や人の受容性を高められることが確認された**。最後に、不特定多数の人とロボットが通路をすれ違う大学構内へ導入し、約2週間の評価実験を行った結果、ロボットはスタックせずに、自身の移動効率を大きく改善させられること、ロボットが人の近くを移動したりや声がけや身体的接触等の働きかけを用いたにも関わらず、従来の停止・回避のみを行う軌道計画手法と比べて、不快感を生じる通行人の割合は増加しないことが確認された。

さきがけで設定した問いは適切に解明され、提案した「Human-Aware Interactive Navigation」の有用性は実験より確認された。本研究は、人に納得感をもってもらいながら、「人とロボットの距離を短くすること」をねらいとしていた。**適切な状況で適切なふるまいを行うことでロボットからの主張的行動が受容されることが確認されたことは、さきがけの最重要成果であり、申請者が考える社会システムとしての人共存ロボットの在り方を推し進めるものになる**。

新型コロナウイルス感染症の影響を受け6ヶ月間研究期間を延長し、人骨格認識に基づき人への接触方法を調整する適応的接触技術を開発し、実機実験にて評価を行った。

### (2) 詳細

#### 研究項目1「観察技術」

**A. 可変窓長型人速度ベクトル推定手法：**人混みにおける自律移動ロボットの軌道計画には、人の速度ベクトル推定は極めて重要となる。人の歩行が前後だけでなく左右にも周期的に変動すること、推定に用いるセンサ自身も移動することから、推定値には大きな推定誤差が生じてしまう。一方、移動ベクトル推定においては、一般的にカルマンフィルタが用いられるが、精度と遅延は相反する関係にある。素早い軌道調整が求められる自律移動ロボットには、高精度・低遅延の推定が求められることから、フィルタの窓長を調整可能な拡張カルマンフィルタを用いたバランシング手法を新たに提案した。実験の結果、精度と遅延を考慮した人の移動ベクトルが推定できることが確認された。

**B. 人の速度ベクトルの保持可能性および測定誤差の推定：** 働きかけを含む軌道計画をより汎用的かつ高精度なものとするため、人の速度ベクトル推定結果がシステムに及ぼす外乱に着目し、軌道計画のロバスト化を行った。具体的には、カルマンフィルタを用いた人の速度ベクトル推定における「測定誤差」および「保持可能性」に基づき、人の予測領域を、進行方向と回転方向に関する二変量ガウス分布で表現し、その領域を考慮して「働きかけのタイミング」を決定し、「回避量の調整」を行うものである。提案手法の有無による軌道計画の比較実験の結果、本手法を用いることで、人の速度ベクトルの変化に対して不必要な回避が減少し、軌道の再計画回数が低減し、ロボットの移動効率が向上することが確認された。

### **研究項目2「洞察技術」**

**A. 譲り合い度推定：** 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するために、人への回避(主張)の度合いを示す「譲り合い度」を新たに定義した。具体的には、人とロボットの未来時刻における干渉時の自身の進行方向と干渉点のなす角度(干渉確度)から人とロボットそれぞれの譲り合い度を算出する。干渉角度の差が大きい場合は、ロボット・人ともに回避方向の判断が容易だが、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、譲り合い度は同等(50:50)とし、差がない場合は、人に対して明確な意図表出を行うため、ロボットの方が少し多め(例:75:25)に譲る。実験の結果、提案する譲り合い手法は、全回避手法や回避なし手法に比べて、人とロボットの移動効率の低減量が抑えられ、印象アンケート評価では、ロボットの行動意図が汲み取れ、譲り合いを感じられたため、3つの中で最も選好されるという結果となった[成果2]。

**B. inducible Social Force Model を用いた複数人移動予測：** 混雑環境下では複数の人が密に存在するため、声かけやジェスチャーなどの働きかけは、働きかけの対象者や、その意図が伝わりにくい。そこで、対象の特定と意図の伝達がしやすい「接触」が有効になると考えられる[成果3]。また、複数人環境下でのロボットの行動は、ロボットが接近・接触を行う対象者 A へ影響を与えるだけでなく、A からその周囲の B や C へとその影響が伝搬していく。そこで、混雑状況下での人の動きの再現性が高く、心理的・物理的作用を力の授受として扱える Social Force Model (SFM)をベースに、人との相互作用を考慮した複数人移動予測モデル Inducible Social Force Model (i-SFM)を新たに開発した。実験の結果、従来手法(SFM)と比較して、より移動効率のよい移動経路を選択できていること、従来手法では立ち往生してしまう混雑状況でも適切に接近・接触経路を生成して、人に働きかけながら移動が成立することを確認した[成果2]。

### **研究項目3「制御技術」**

**A. Dynamic Waypoint Navigation：** 自律移動ロボットにおける人の回避軌道計画はさまざまに提案されているが、方向転換・減速・停止をするものがほとんどであった。しかしながら、状況によっては加速を行うことが双方の効率的な移動に有効な場面が存在することから、方向転換や加減速をパラメータとした複数の軌道候補から適切な軌道を選択することが重要である。さらに、同調・主張行動を使い分けるには、人への接近の度合いを任意に調整できる軌道計画手法が必要となる。そこで、任意の速度ベクトル候補で複数個算出し、状況に適した軌道を実時間で選択する Dynamic Waypoint Navigation (DWN)を開発した。DWN では、予測干渉地点に基づき経路点を設置するシンプルな方法であるが、人の近くに設置することで主張的接近移動

を容易に実現できる点が特徴である。実機実験の結果、DWN を用いることで、状況に適した軌道を実時間で選択できること、同調・主張的軌道を使い分けられることが確認された[成果2]。

**B. リスクとベネフィットを考慮した接近・接触移動フレームワーク:** 自律移動ロボットの基本移動戦略は、人およびロボットの周りにパーソナルエリア (PA) を定義し、過度に人に近づかない移動を行っている。しかしながら、人の密度が高く、狭い場所では PA への進入をせずに移動することが困難である。PA に入らない移動が困難であり、気づいたときには人が既に PA に入っている状況も存在することから、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上で、ベネフィット (移動効率) を考慮した経路選択を総合的に行うことのできる近接移動フレームワークを提案した。通過速度や通過位置等をパラメータとした接近エネルギーをベースにコスト計算を行う。実機実験から、提案手法により自然かつ安全にスタックをせずに人・ロボット双方の移動を実現できることがわかり、ロボット自身が移動リスクや効率性を把握しながら移動できるようになることが確認された[成果2]。

#### 研究項目4「評価実験」

**A. Human-Aware Interactive Navigation System として統合および実環境で実証実験:** これまでに開発してきた各要素技術を「Human-Aware Interactive Navigation System」として統合し、狭路・広路、静的・動的環境が生じる早稲田大学構内での移動実験を行った。ここでは、「接近や接触を用いる提案手法」と、従来手法に位置付けられる「人の移動を優先としてロボットが必ず停止・迂回を行う移動手法」を比較した。その結果、接触を含むロボットからの能動的な働きかけを行う提案手法では、従来手法と比べて、ロボットの移動効率が上昇することが確認された。一方、接近や接触によって、心理的な不快感の上昇が懸念されたが、不快と感じる通行者の割合は、接触や接近を利用しない従来移動手法と比べて、ほとんど変わらないという結果が得られた。また、実環境で実サービスタスクとして、対象者を一定の距離で追従しながら人混みを移動する「案内タスク」や、対象者との距離間隔を保ちながら人混みを移動する「運搬タスク」を実施した結果、ロボットはスタックせずにサービスを提供できることが確認された[成果1]。

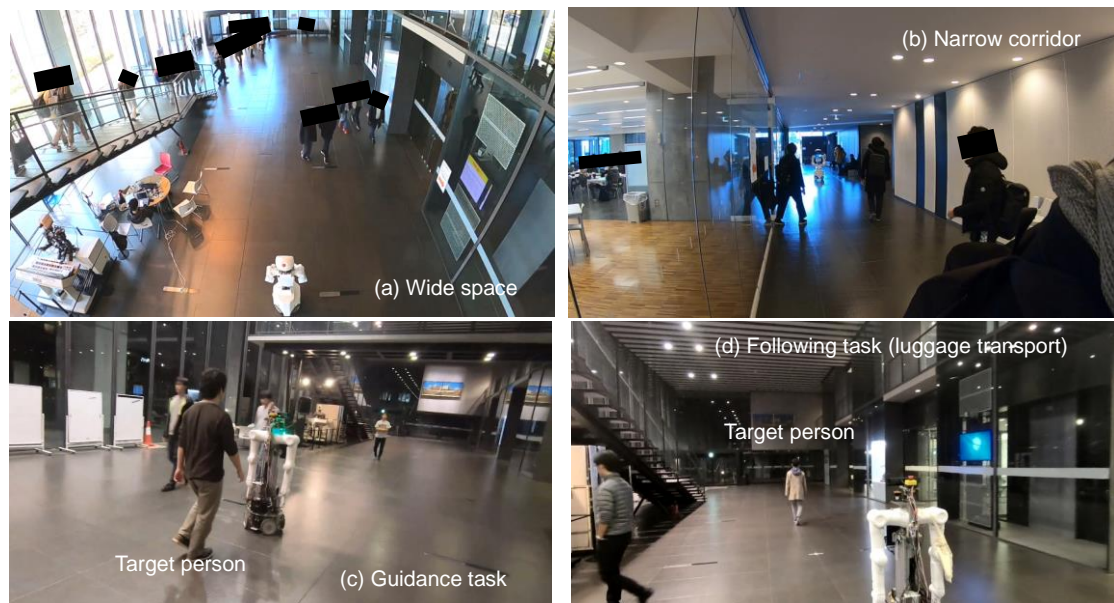


Fig. 1 Scenes of experiments

### 3. 今後の展開

**A. 現場でのサービス試験運用:** 本課題で研究対象とした「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・不信感)からのスタートとなるため、技術的論理の説明だけでは受容にたる情報となりえないと考えている。社会に受け入れられていく様子を、時間軸に意識した段取りとして明確にし、社会システムとして、認知・受容してもらう仕掛けについてさらに検討していく必要がある。そのためには、研究期間後半で実施したような**現場での試験運用を小規模であっても継続的に続けていく**必要があると考えている。特に、案内や運搬といった特定のサービス等を実施していくことで有用性を感じてもらえることになれば、ロボットに対する見方も変わってくると考えている。

**B. コンテキストの理解と適応:** 実環境では、病院や駅、ショッピングモールや、スポーツ競技場など、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渡る。今後は、このような**コンテキストの理解とその情報に基づくロボットの行動変容が必要となる**が、そのためには、まず、環境認識技術の強化が必要である。人の属性認識や行動クラス認識、セマンティックな地図情報やIoTによるインフラや他のモビリティ・ロボットの情報共有による場面理解などに取り組む。また、得られた情報から応じたロボットの動作パラメータ調整手法についても検討を進めていく。

### 4. 自己評価

**■研究目的の達成状況:** 不特定多数の人とロボットが通路をすれ違う大学構内へ導入し、約2週間の評価実験を行った結果、ロボットはスタックせずに、自身の移動効率を大きく改善させられること、ロボットが人の近くを移動したりや声かけや身体的接触等の働きかけを用いたにも関わらず、従来の停止・回避のみを行う軌道計画手法と比べて、不快感を生じる通行人の割合は増加しないことが確認された。以上のことから、当初に設定したさきがけの問いは適切に解明され、提案した「Human-Aware Interactive Navigation」の有用性は実験より確認された。本研究は、人に納得感をもってもらいながら、「人とロボットの距離を短くすること」をねらいとしていた。適切な状況で適切なふるまいを行うことでロボットからの主張的行動が受容されることが確認されたことは、さきがけの最重要成果であり、申請者が考える社会システムとしての人共存ロボットの在り方を推し進めるものになる。また、主要成果要素である、「観測技術」、「洞察技術」、「制御技術」は、パーソナルモビリティやヒューマンセンシングの分野への応用でき、その一部は、さきがけ研究期間後も産学連携体制を維持予定であることから、当初の予定を超える世界の先駆けた成果が得られたと考えている。

**■研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況):** 申請者と4~5名の学生(修士、学部)という体制を構築しており、この体制により研究は大いに進んだものと考えている。観測技術、洞察技術、制御技術、評価実験という4つの研究テーマを設定したが、年度ごとに、これらの4つの課題に横断的に取り組みシステムとして組み上げ評価することを繰り返したことで、出戻りがなく確実に技術が積みあがったものと認識している。2020年度の大半は、新型コロナウイルスの影響により、実機を用いた開発・実験ができない状況であったが、上述したヒューマンセンシング等の関連技術開発をブラッシュアップすることで、図らずも成果の幅を広げられる結果となった。2020年度上期に新型ロボットアームを購入する予定であったが、こちらも調達が遅れたが、年度内にシステム構築でき実験を実施できる予定である。ただし、最終評

価実験に関しては、分析を十分な時間を取れなくなる可能性があることから、余裕をみて、6ヶ月間の研究期間延長を申請し、許可頂いている状況である。

■**研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果**：社会システム基盤として、「人間作業の支援や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。このようなロボットは、活動空間の特性上、人と近接した状態で移動や作業を行うことが求められるが、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限られてきた。その背景には、「絶対安全」を実現するために、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浸透していたことが挙げられる。タスクによっては人に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つ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)の新領域の開拓により、「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「近接状態での安全性と安心感」を工学的な保障のもとに実現が期待される。接近・接触状態におけるHRIは、国内では Society5.0、欧州では Horizon2020 や Industry4.0 において、高齢者支援、物流、ものづくり等にイノベーションを起こすコア技術として注目されている技術である。本研究は、国際的な課題を解決するための足掛かりとして世界に先駆けて取り組んだものであり、今後の新産業創出に期待できる価値の高い研究と考えている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数：16件(うち2件はコロナ延長時の成果)

1. **Mitsuhiro Kamezaki**, Ayano Kobayashi, Yuta Yokoyama, Hayato Yanagawa, Moondeep Shrestha, and Shigeki Sugano, “A Preliminary Study of Interactive Navigation Framework with Situation-Adaptive Multimodal Inducement: Pass-by Scenario,” International Journal of Social Robotics, vol. 12, no. 2, pp. 567–588, July 2019.

ロボットからの認知的・身体的・心理的な能動的な働きかけにより、人混み環境でも安全に移動を可能にする「Human-Aware Interactive Navigation のための基本的なフレームワーク」を提唱し、実機実験からその有用性を確認した重要業績である。

2. **亀崎允啓**、“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”、日本ロボット学会学会誌、vol. 37, no. 10, pp. 943–949、2019年12月。

人とロボットの譲り合いに基づく協調的な移動フレームワークについて、それらを構成しているコア機能(リスクとベネフィットに基づく移動経路選択など)や基本となる考え方(ロボットと人の優先関係など)について解説している。

3. Moondeep Shrestha, **Mitsuhiro Kamezaki**, Yusuke Tsuburaya, Tomoya Onishi, Ayano Kobayashi, Ryuosuke Kono, and Shigeki Sugano, “A Preliminary Study of a Control Framework for Forearm Contact During Robot Navigation,” Proc. IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 410–415, Aug. 2018.

ロボットから人への働きかけとして、ロボットの移動意図を身体的な接触により伝える方法である。人を含む環境の計測から、接触の必要性判断、接触部位・接触力・接触方向などを導

出する、本研究開発を構成する重要技術である。

(2)特許出願

研究期間累積件数:4件(特許公開前のもも含む、うち1件はコロナ延長時の成果)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- [1] 【受賞】SICE SI2020 優秀講演賞、21 回計測自動制御学会 SI 部門、深層強化学習シミュレータを用いた人混み環境における移動ロボットの能動的働きかけ効果の検証、2020/12/25
- [2] 【受賞】SICE SI2020 優秀講演賞、21 回計測自動制御学会 SI 部門、異なるコンテキスト下での自律移動ロボットの行動に対する人の行動・心象分析、2020/12/25
- [3] 【受賞】2020 年度、日本機械学会 若手優秀講演フェロー賞、ROBOMECH2019、日本機会学会、テイクオーバー時の認知的関与度の推定に関する研究～基準視線パターンの導出と視線誘導支援システムの評価～、2020/5/28
- [4] 【受賞】2018 年度、亀崎 允啓、SI2018 優秀講演賞、第 19 回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、パーソナルモビリティの運転評価手法に関する研究～操作入力と動作出力に係る調和性指標の提案～、2018/12/10
- [5] 【プレスリリース】WHILL 株式会社、パーソナルモビリティ運転支援システムの開発に関して研究協力、<https://whill.jp/model-cr>、<https://whill.jp/news/11605>