

知能ロボットと人間との相互誘導に関する研究

研究代表者 菅野 重樹
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

自律移動ロボットには、人共存空間でサービス等を行うことが期待されている。現在の移動ロボットの多くは、人が通り過ぎるまで停止したり、大きく回避を行う移動戦略を取っているため、移動効率が著しく低下してしまうおそれがある。そこで、ロボットからの能動的な働きかけによる人とロボットの譲り合いに基づく協調移動手法を提案しており、これまでに、接触に対する移動傾向に基づき、ロボットが状況に応じて接触方法を使い分けて移動を行う研究、接触・接近のリスクとロボットの移動効率から経路を生成する研究を行っている。これまでの研究は、比較的少人数を対象とした動的・静的環境を対象としていたが、人が多く存在する(特に)静的環境下での移動(混雑した展示会場での移動など)については検討が進んでいなかった。複数の人が密に存在する混雑環境下では、働きかけの対象やその意図が伝わりにくい声かけやジェスチャーではなく、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。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。このことから、観測可能な複数人の移動予測を行う必要がある。混雑環境下での人の移動予測モデルとして、ポテンシャル法やマルチエージェントシステムなどが挙げられる。しかし、これらの手法は近接時にエージェント間で行われる意図的な物理的接触を含むことが難しい。そこで、本研究では混雑状況下での人の動きの再現性が高く、心理・物理的作用を力の授受として扱える Social Force Model (SFM) を元に、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) を新たに開発する(図 1)。複数人環境ではロボットの経路候補は多数存在するため、適切な経路生成とその選択手法の構築が求められる。以上より、本研究では混雑環境下でのロボットの移動を可能とするために、複数人の移動予測、複数経路候補生成および移動効率と人への影響を考慮した経路決定を実時間で制御するナビゲーション手法の構築を目的とする。

2. 主な研究成果

2. 1. Inducible Social Force Model (i-SFM)

近接移動に不可欠な人との相互作用を考慮した複数人移動予測モデル i-SFM について説明する。

(1) 基本的な引力と斥力：対象エージェント(ロボット)が i-SFM で移動する場面を考える。通常の SFM と同様に、ゴール(図 1 の水色丸印)から引力ベクトル $\mathbf{F}^G$ (図 1 の青線)、他のエージェント(人) i からの斥力ベクトル $\mathbf{F}_i^H$ (図 1 の緑線)、壁などの障害物 j からの斥力ベクトル $\mathbf{F}_j^O$ (図 1 の黄線) をロボットに仮想的に作用させ、それらの合力 $\mathbf{F}$ にしたがって動作させるものである。合力 $\mathbf{F}$ は、

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^G + \sum \mathbf{F}_i^H + \sum \mathbf{F}_j^O \quad (1)$$

(2) 拡張要素：通常の SFM ではエージェントの後方から接近する物体からも斥力を受けて移動を

する．実空間では人が後方の人を認知して避けるという行動は不自然であるため，エージェントに視野角(図1の半円)を与え，視野角外からの物体から斥力を受けないように拡張した．また，従来のSFMでは，ロボットが移動している際，エージェントや目的地の配置によって人・障害物から受ける斥力とゴールからの引力が釣り合い，立ち往生してしまう場合がある．そこで，ロボットは立ち往生した際にロボットが最も力を受けているエージェントに対して接触を用いて移動を促す．人に加わる力は F_i^C (図1(b)の黒線)とし，従来研究で得られた接触に対する人の移動傾向から決定した．移動予測では，一定時間の力に加わるものとする．これらにより，i-SFMでは(2)が得られる．

$$F' = F^G + \sum F_i^{H'} + \sum F_j^{O'} + F_k^C \quad (2)$$

2. 2. 経路計画と人移動予測

混雑状況下でロボットの移動効率のみを考慮した経路を進むと，周囲にいる人の被移動量が大きくなってしまう可能性がある．そのため，ロボットが作った経路に対して，人がどのように動くかを予測し，場にどれだけの影響を与えるのか，動くことによって周囲の人に不快感を与えないかを判断したうえでロボットは経路を選択する．

(1) 経路生成：従来の移動ロボットでは人に対する近接移動を行えないため，パーソナルエリア(PA)に入らない経路のみが生成されてしまう．本研究では，Dynamic Waypoint Navigation (DWN)を用いて経路候補を複数生成する．DWNでは，ロボットが目的地まで経路を引いた際に，人と干渉がある場合には人の左右にWaypointを配置し，経路候補を新しく生成する．その経路に干渉があった場合には同様に干渉がある人の横にwaypointを配置，経路候補を増やしていく手法である．

(2) i-SFMを用いた人移動予測シミュレーション：ロボットが生成した複数の各経路候補を，i-SFMを用いて移動予測シミュレーションを行う．Waypoint(水色の点)をロボットの目的地として設定し，i-SFMに従って移動を行う．目標のWaypointに到達したら次のWaypointに目的地を更新し，移動を行う．これを繰り返すことでロボットは目的地まで移動を行う．

(3) 経路選択：複数生成された経路候補の中から，予測シミュレーションの結果をもとに，ロボットの移動効率とその経路を通った際の周囲への影響を指標として最適経路を選択する．ロボットが一定速度で直進し続ける行動を最もコストの低い行動とし，進行方向への加減速度をコストの増減パラメータとした．また，ロボットは干渉回避を行う際に回避幅が大きいほど移動効率が悪くなることから，ロボットの進行方向の垂直方向への移動もコストの増減パラメータとした．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，各方向における差分をスタートからゴ

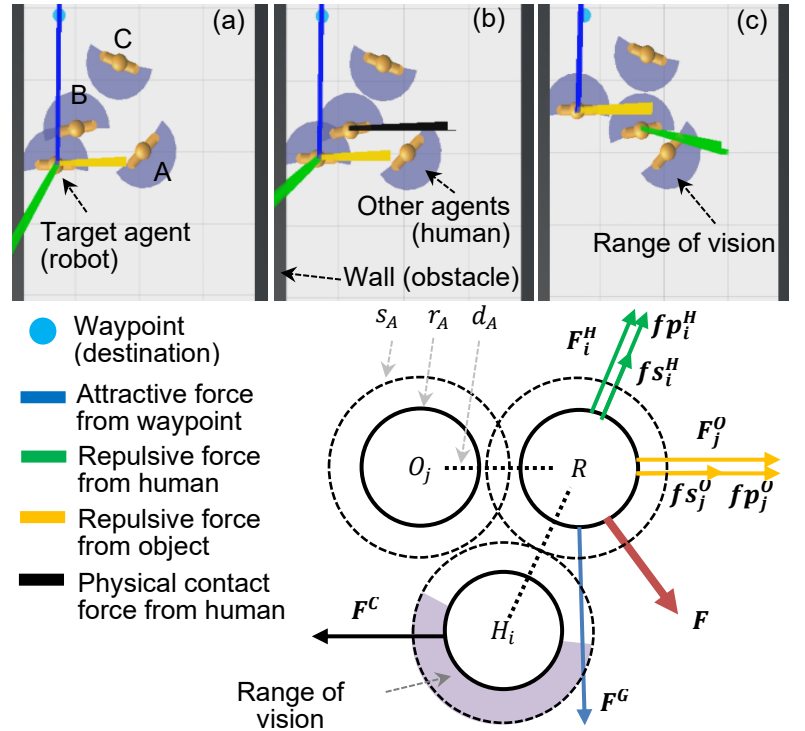


Fig. 1 Proximal navigation with contact based on i-SFM

ールまでの積分する．さらに，ロボットは，周囲の人に影響を与えない経路を選択する必要があることから，人移動予測での各経路候補において，ロボットがスタートからゴールに到達するまでに発生した斥力 F^H ， F^O ，接触力 F^C の和を人への影響として考える．移動効率と影響度に重み係数(a ， b)をかけて足したものを各経路のコスト $Cost$ とし， $Cost$ が最も低い経路を選択する．

2. 3. 実験結果とまとめ

(1) 比較実験：図2に示す通路内に4人を配置し，提案した接近・接触を用いる提案手法とPAに侵入しない従来手法の比較を行った．提案手法より，ロボットが接触を行うことによって直接的に接触された人だけではなく，ロボットが予測している周囲の人への波及効果も実際に表れていることがわかった．従来手法の場合，ロボットはPAに侵入できないため，集団の外側を通る経路が最もコストが低くなる．提案手法の場合，ロボットは直線状にいる人に対して横方向に接触を行う経路のコストが最も低くなった．従来手法と比べ提案手法でロボットが生成した経路の数が大幅に増えたことがわかった．接触対象者に対しての心理アンケートから，「不快感」「自然さ」「恐怖感」の項目で，提案手法が劣っていることがわかる．一方，第三者による俯瞰視点の実験動画を見た後の心理アンケートでは「自然さ」の項目で提案手法が優れているという結果が得られた．これは全体の場の状況を考慮すると，ロボットの取った経路・行動が自然であったということが示唆される．

(2) 実証実験：ロボットが提案手法を用いることで実際に混雑状況下において移動が行えるかを確認した．横幅4.8m縦幅7mの部屋の中に複数の人をランダムに配置する(向きや多少の位置変更は許容する)．ロボットは，部屋の隅のゴールを順々に目指し，様々な場所，角度で人と干渉する状況を作り出す．ロボットが予測した動きよりも，立っている人が大きく動いたとしても，ロボットはiSFMMにより生成した斥力・引力によって自動的に速度および経路を調整しながら動くことができる．提案手法を用いることで様々な混雑環境において移動が行えることが確認できた．

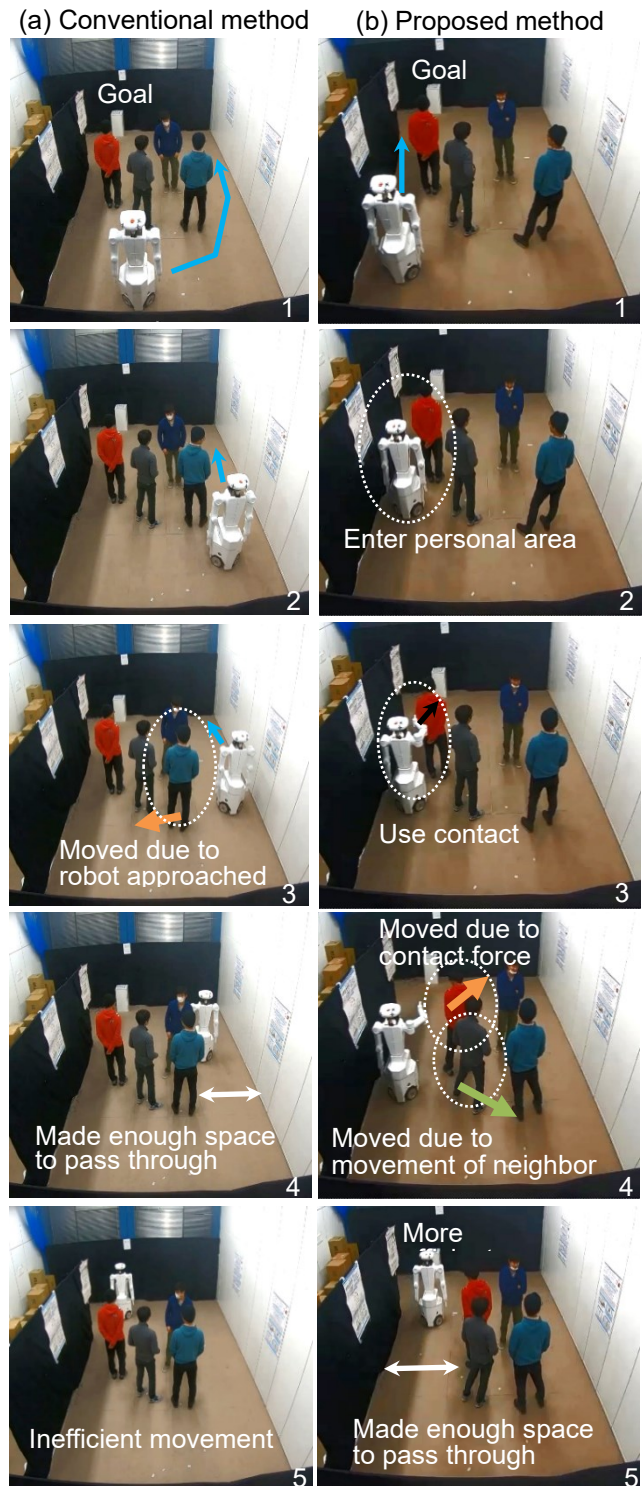


Fig. 2 Trajectory selection of robot in human-crowded space

3. 共同研究者

亀崎 允啓（理工学術院総合研究所・主任研究員）

4. 研究業績

4. 1. 学術論文

- [1] M. Kamezaki, R. Ong, and S. Sugano, “Acquisition of Inducing Policy in Collaborative Robot Navigation Based on Multiagent Deep Reinforcement Learning,” IEEE Access, vol. 11, pp. 23946-23955, March 6, 2023.
- [2] M. Kamezaki, R. Konoe, A. Kobayashi, H. Yanagawa, T. Onishi, Y. Tsuburaya, M. Shrestha, and S. Sugano, “Error-Tolerant Robot Navigation with Sequential Inducement Based on Intent Conveyance from Robot to Human and Its Achievement,” Int. J. Social Robotics, vol. 15, pp. 293-316, Jan. 27, 2023.
- [3] 今治諭志, 亀崎允啓, 金田太智, 濱田太郎, 斎藤喬介, 櫻井絵梨子, 菅野重樹, “待機・迂回を含む後退的行動と接近・接触を含む前進的行動を併せ持つ自律移動ロボットの統合的軌道計画”, 第40回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2022), paper no. 2I2-07, 2022年9月.
- [4] 亀崎允啓, 山口皓大, 和田智博, 菅野重樹, “人存在領域推定に基づく動的制限空間による人-ロボット協調安全システムの提案”, 第40回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2022), paper no. 2C1-09, 2022年9月.
- [5] M. Hayashi, T. Miyake, M. Kamezaki, J. Yamato, K. Saito, T. Hamada, E. Sakurai, S. Sugano, and J. Ohya, “Preliminary Investigation of Collision Risk Assessment with Vision for Selecting Targets Paid Attention to by Mobile Robot,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Robot and Human Interactive Communication, pp. 624-629, Aug. 2022.
- [6] M. Kamezaki, A. Kobayashi, R. Kono, M. Hirayama, and S. Sugano, “Dynamic Waypoint Navigation: Model-based Adaptive Trajectory Planner for Human-Symbiotic Mobile Robots,” IEEE Access, vol. 10, pp. 81546-81555, July 27, 2022.
- [7] M. Kamezaki, T. Yusuke, T. Kanada, M. Hirayama, and S. Sugano, “Reactive, Proactive, and Inducible Proximal Crowd Robot Navigation based on Inducible Social Force Model,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1-8, May 2022.

4. 2. 総説・著書

4. 3. 招待講演

4. 4. 受賞・表彰

- [1] 2022年9月7日：第39回日本ロボット学会 優秀研究・技術賞, 日本ロボット学会

4. 5. 学会および社会的活動

5. 研究活動の課題と展望

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ロボットの移動を実現できることがわかった。今後は i-SFM 内のパラメータを移動する環境に合わせてロボット自身で調整できるシステムを構築する予定である。