

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

人が存在する複雑な環境下でサービスを提供する自律移動ロボットへの期待が高まっており、ロボットの移動理論の研究が進められてきた。しかし、従来の移動理論ではロボットのゴール位置がタスク実行に適した位置であるかが考慮されていないため、不自然な行動が生じてしまう場合がある。例えばポスター鑑賞を行う場合、従来の移動理論では指定されたゴール上に人がいる場合、ロボットは人がいなくなるまで待機する必要がある。人に回避を促すことでその地点に到着することも可能だが、ポスターを見ることを目的とするのであれば、その点にこだわらず、ゴール位置を変更するという選択肢も有効である。加えて、このような状況で人に回避を促すことは、人に不快感を与えかねない。このため、人の位置やタスクに応じてゴール位置を適切に変更する理論が必要である。ロボットのゴールを変更する研究としては、商品を説明するロボットの立ち位置の研究や会話中の客への接近時の目的地の決定の研究があるが、人への配慮やタスクの実行しやすさや等を総合的に考慮したゴール変更の手法は提案されていない。

そこで、本研究では目的地周辺の人の位置やロボットのタスク内容等に合わせた適切なゴール位置を動的に探索する手法として、Potential-Based Goal Finder (PBGF)を開発した。

2. 主な研究成果

2. 1. Potential-Based Goal Finder (PBGF)

PBGF では、環境内の各座標をゴールに設定したときにかかるコストを表すコストマップを生成し、最もコストが低い位置を適切なゴールとして選択する(図 1)。この操作を一定時間おきに行うことで、動的に変化する環境に対応する適切なゴール探索を行う。本章では、ポスター鑑賞タスクを行うエージェントを例にとり、コストマップの生成方法を説明する。

(1) コストマップの生成：コストマップを生成する際は、ゴール探索を行う範囲を一定サイズのグリッドに分割したうえで、各セルの中心座標を代表値として計算する。人がタスクを行う場合、障害物位置、タスクの実行しやすさ、他者への配慮、他者との位置関係、移動しやすさを基にゴールを決定すると考え、ロボットも同様に図 1(1)–(5)の手順でゴール導出を行う。詳細は割愛する。

- 障害物付近のコスト：障害物に過度に近い位置をゴールとして選択すると、壁に衝突してしまう危険があるため、壁付近がゴールとして選ばれづらいようコストを追加する。グリッドの k 行 l 列目のセルの中心座標 $\mathbf{x}_{kl}$ における壁からの斥力ポテンシャル $p_{\mathbf{x}_{kl}}^{Rep(W)}$ を、セルと最も近い壁との距離 $d_{W,\mathbf{x}_{kl}}$ を用いて定義する。
- 目標物との距離：タスクを行う際には、タスクを行う対象となる目標物が存在する。ポスター鑑賞タスクでは、ポスターが目標物に該当し、目標物に近いほどタスクを達成しやすい。このことから、 $\mathbf{x}_{kl}$ とポスターの距離コスト $p_{\mathbf{x}_{kl}}^{Att(P)}$ を定義する。
- 目標物を共有する人への配慮：複数の人が同じタスクを行っている場合、他者のタスクを阻害

しない配慮が必要となる。ポスター鑑賞では、他者の邪魔にならないよう、ポスターから一定距離をあけた位置に人の列が形成される。このときのポスターから先頭の列までの距離を r_{LG} とし、半径 r_{LG} の円弧を理想ゴール領域とする。これより内側にエージェントが侵入しづらいよう、ポスターからの斥力ポテンシャル $p_{x_{kl}}^{Rep(P)}$ を定義する。

- 人との距離：ゴールを他者付近に設定すると、他者のパーソナルスペース(PS)に侵入し不快感を与えるほか、衝突の危険が生じることがあるため、他者の位置とゴールが重ならないよう、人 A_j との距離を用いた $p_{x_{kl}}^{Rep(A_j)}$ を設定する。
- 軌道コスト：エージェントから x_{kl} への移動にかかる手間を軌道コスト $p_{x_{kl}}^{Rep(Path)}$ として加算する。エージェントの位置からポスター方向へのベクトルに垂直に分布させ、エージェントから最も近い理想ゴール領域上でコストが 0、最も遠い理想ゴール領域上で 1 となるように設定する。

2. 2. 経路計画システム

PBGF によるゴール位置決定後は、ゴールまでの経路計画を行う。ロボットの経路計画手法には A*等の手法があるが、これらは人に対して近接した移動を行えないという問題がある。このため、本研究では inducible Social Force Model (iSFM) を用いてゴールまでの軌道計画を行う。iSFM は、ロボットの現在位置から目的地まで経路探索した際に、干渉がある人の左右に Waypoint を配置して経路候補を生成する手法である。ここで、ロボットは (a) PS に侵入しない回避経路、(b) PS に侵入するが、ロボットの体幹と人の体幹がぶつからない接近経路、(c) 人への接触によって回避を促す経路の 3 種類の経路を生成する。人との干渉判定は 0.5 秒おきに行うため、再度干渉が発生した場合でも、リプランをして再度経路を作ることができる。生成した経路候補について、移動コストを比較したうえで最適な経路を選択する。このとき、ポスターとの距離が r_{LG} 以内の位置を通過する経路には追加のコストを加えることで、ポスターの前を横切る経路が選ばれにくくなるようにする。

2. 3. 評価実験および考察

(1) 実験条件：図 2 に示すポスター会場を模したシミュレータ空間に 17 人の人モデルとロボットモデルを配置し、ポスター鑑賞タスクを実行させた。ロボットが PBGF を用いるパターン(R_{AG})と用いないパターン(R_{FG})、人が PBGF を用いるパターン(H_{AG})と用いないパターン(H_{FG})の組み合わせの計 4 パターンの比較を行った。PBGF を用いない場合は、理想ゴール領域のうち壁から 0.6[m]以上離れた領域上で、エージェントから最も近い点をゴールとして設定した。1 時間シミュレーションを行い、エージェントのポスター鑑賞回数、接近による他者への影響、ゴール到達時の理想ゴールからの平均距離、ロボットから人への平均接触回数を比較した。接近による他者への影響とは、エージェントが 1 回のゴール到達までに他のエージェントに接近することで与えた心理的な斥力 $f_{so}^{A_i}$ の平均値とする(SFM の斥力式から算出)。ポスターは 4 か所に設置し、各エージェントは直前ま

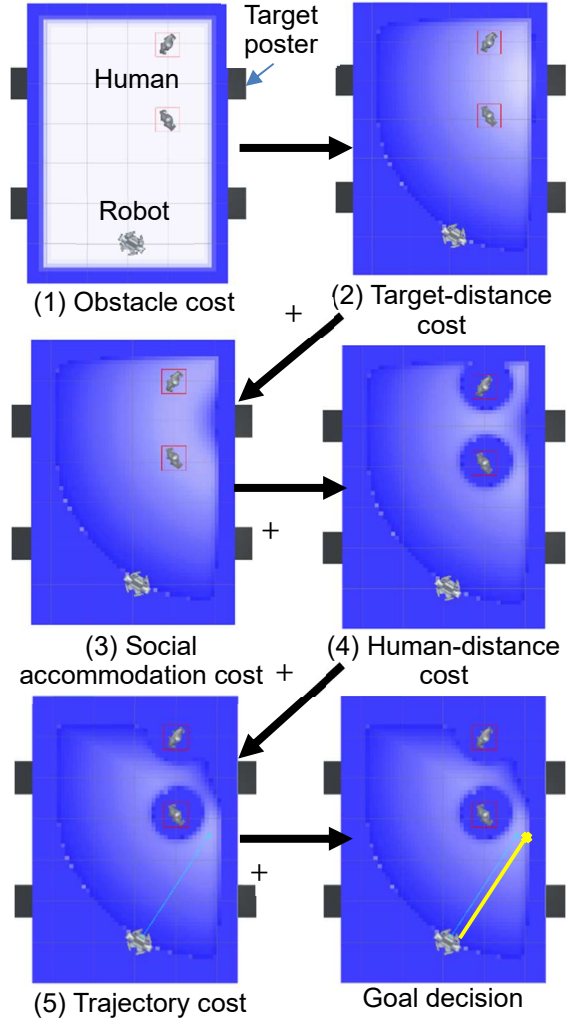


Fig. 1 Cost map

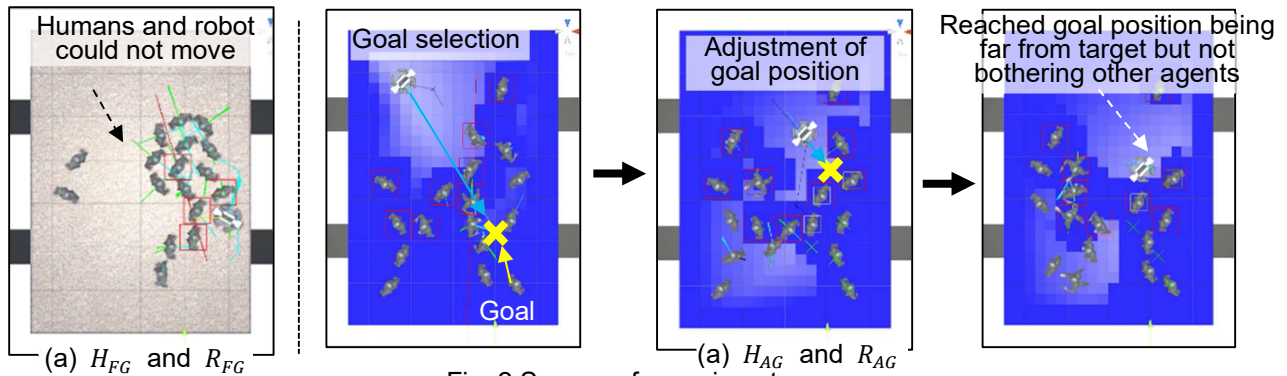


Fig. 2 Scenes of experiments

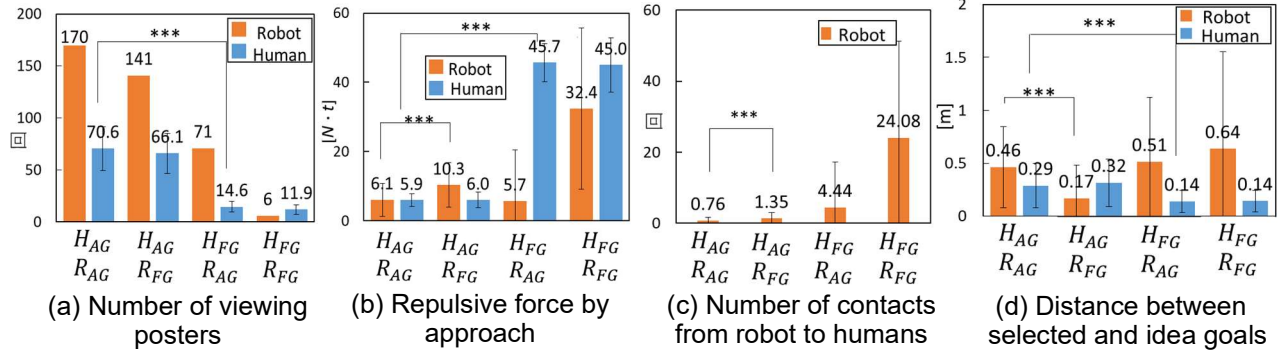


Fig. 3 Experimental results

で見ていたポスター以外からランダムに次のポスターを選択する。人の移動は、移動をゴールへの引力や他者からの斥力等の合力で表現した SFM に基づいて行う。人は目的地に到着後、5 秒間ポスターを鑑賞したのち、移動しているエージェントが全体の 15%未満である場合に限り移動する。ロボットは移動者割合に関わらず、ゴール到着後ポスターを 5 秒間見たのち別のポスターに移動する。

(2) 実験結果：(a)鑑賞回数： H_{FG} の場合、多くの人と同じ位置を目指して押し合うことで、ポスターの前に人が固まって動けなくなってしまう(図 2(a))。これに対し H_{AG} の場合は 1 か所に固まることなくポスターを鑑賞できた。これは、図 3(a)の人とロボットのポスター鑑賞回数にも表れており、 H_{FG} の場合は H_{AG} の場合と比較してロボット・人双方の鑑賞回数が著しく少ない。また、ロボットの鑑賞回数は人の行動に関わらず R_{AG} の方が R_{FG} よりも大幅に多い。人の鑑賞回数も R_{AG} の方が R_{FG} よりも増加し、ロボットの PBGF により人の効率も向上した。(b)接近による力：人の他者への接近による力は H_{FG} の方が H_{AG} より著しく大きく、ロボットの行動には影響を受けなかった(図 3(b))。ロボットの場合、 R_{FG} では、 H_{FG} より H_{RG} の方が小さかった。 R_{AG} では、人の行動によらず、 R_{FG} よりも小さい結果となった。PBGF を用いることで他者への影響が少ない移動が行えたことを示す。(c)ロボットから人への接触回数： H_{FG} より H_{RG} の方が少なく、 R_{FG} よりも R_{AG} の方が少なかった(図 3(c))。これは H_{RG} では人が固まらずロボットが通行しやすかったことと、 R_{AG} ではロボットが人のいる場所を避けたゴール選択をしたことが要因である。実際、 R_{FG} では人に接触していた場面と同様の状況でも、 R_{AG} では接触をせずに遠くからポスターを鑑賞した(図 2(b))。PBGF を用いることでより他者への影響が少ない移動が行えたことが分かる。(d)理想ゴールからの距離：人・ロボットともに自身が PBGF を用いた場合に増加する傾向があった(図 3(d))。これは、PBGF によりポスターから遠いゴールで妥協する選択肢も生じたためであり、妥当な結果である。また、人・ロボット共に相手の行動が変化した場合、理想ゴールとの距離は変化しない傾向があった。 H_{FG} かつ R_{FG} の条件ではロボットがほとんど目的のポスターに近づけなかったため、これらの傾向とは違い理想ゴールとの距離が増加した。以上より、PBGF を用いることでポスターを鑑賞する際の距離は増加するが、より効率的に移動でき他者への影響が少ないゴールを選択できることがわかった。

3. 共同研究者

亀崎 允啓（次世代ロボット研究機構・客員上級研究員）

4. 研究業績

4. 1. 学術論文

- [1] 山口皓大, 亀崎允啓, 櫻井絵梨子, 三宅太文, 山口皓大, 今治諭志, 菅野重樹, “協働作業者の行動推定と譲り合いに基づく協働作業ロボットの適応的行動決定システム”, 第41回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2023), paper no. 3F3-02, 2023年9月.
- [2] 岩崎陽馬, 亀崎允啓, 林弘昭, 菅野重樹, “多次元 LSTM と GMM を用いた教師無し学習による特徴量間の関係を考慮した運転行動評価システム”, 第41回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2023), paper no. 3K1-01, 2023年9月.
- [3] 今西優登, 亀崎允啓, 今治諭志, 山口皓大, 櫻井絵梨子, 三宅太文, 菅野重樹, “解析解と数値解を用いた Dynamic Waypoint Navigation の軌道計画高速化に関する研究”, 第41回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2023), paper no. 1H4-08, 2023年9月.
- [4] Catherine Lollett, Mitsuhiro Kamezaki, and Shigeki Sugano, “Normalized Facial Features-based DNN for a Driver’s Gaze Zone Classifier using a Single Camera Robust to Various Highly Challenging Driving Scenarios,” Proceedings of 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2023), pp. 1-8, June 2023.
- [5] 林弘昭, 亀崎允啓, 岡直樹, 菅野重樹, “時系列クラスタリング手法を用いた実環境下での運転行動評価に関する研究〜時系列の形状的・時間的成分を反映した類似度計算〜”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023 (Robomech’23), paper no. 2A2-C24, 2023年6月.
- [6] 今中康暉, 神田浩希, 亀崎允啓, 瀬尾燦振, 大和淳司, 葛西優介, 大谷淳, “パーソナルモビリティのための三次元点群データを利用した通行容易性推定に基づく運転者の支援システムの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023 (Robomech’23), paper no. 2A1-G11, 2023年6月.

4. 2. 総説・著書

4. 3. 招待講演

4. 4. 受賞・表彰

4. 5. 学会および社会的活動

5. 研究活動の課題と展望

本研究では, ロボットがタスクを行うのに適したゴールを周囲への影響や環境変化等を考慮したうえで探索する PBGF を開発した. シミュレータ上でロボットと人がポスターを鑑賞する実験を行ったところ, PBGF によってロボットがより短時間でタスク実行可能かつ他者への影響が少ないゴールを選択できることを示せた. 今後は, 現実の環境で実験を行い, PBGF が実環境でも有効であることや, 周囲の人の心象評価が改善することを確認する予定である.