

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いる。従来の自律移動理論では、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おらず、不自然な行動が生じる場合があった。ポスター鑑賞を行う状況を例にとると、指定ゴール上に人が既にいる場合、ロボットは人がいなくなるまで待機する、または、人に働きかけて移動を促すことでゴール地点に到着するという方策である。しかし、「ポスターが適切に見えればよい」のであれば、ゴール位置を少し横にずらすことが自然である。これらのことから、実環境でロボットがタスクを実行するためには、ロボットのタスクや環境の変化に応じた適切なゴール探索を行う機能が必要となる。ロボットのゴール位置探索の研究として、商品を説明するロボットの立ち位置決定、会話中の客への接近時の目的地決定等があるが、人への配慮やタスクの実行しやすさ等を総合的に考慮したゴール探索手法は提案されていない。そこで、昨年度は、目的地周辺の状況とタスクの内容に応じてロボットのゴール位置を動的に探索する手法を開発した。

本研究では、他者の移動を考慮した譲り合いやゴールまでの移動コストの加味した「タスク内容と人・環境との相互作用の予測」に基づくロボットの適切なゴール位置を探索する Adaptive Goal Finder (AGF) を新たに開発したので報告する。

2. 主な研究成果

2. 1. Adaptive Goal Finder (AGF)

対象領域の各座標をゴールに設定した際のコストを評価し、重みづけ和を総合コストとして比較することで、最もコストの低い位置をゴールとして決定する。これらの操作を 0.5 秒おきに行い、実時間の環境変化に対応したゴールを探索する。以下ではポスター鑑賞タスクを例にとり、詳細な処理について述べる。

(1) ゴール位置探索のためのコスト要素： ゴール評価に用いるコスト要素を、人を参考にして分析する。何らかのタスクを行うために目的地を目指すことが想定されるため、まず、(a) 当該タスクの実行しやすさが挙げられる。続いて、(b) 社会規範、(c) 障害物との位置関係、(d) 移動の労力、(e) 他者との譲り合いが考えられる。この5つの要素がゴール位置探索に共通して考慮すべき項目と考えられる。処理の流れを説明する。

(2) コストマップ生成とゴール候補の選出： 座標ごとの評価のために、ゴール探索を行う範囲を一定サイズのセルに分割し、各セルの中心座標を代表値としたコストマップを生成する。

- **タスクコスト C_{task} ：** タスクの実行しやすさを評価したコストであり、目標物との距離や角度が要素となる。ポスター鑑賞では、セルと目標ポスターの距離、ポスター正面からの角度、を必要な解像度を撮影できる最大距離から算出する。
- **社会規範コスト C_{social} ：** 社会規範に配慮したコストで、本タスクでは他者との距離とポスター

からの距離を要素とする。他者との距離コスト C_{human} は他者に過度に接近して不快感を与えないためのコストであり、Social Force Model で用いられる他者のPS内進入によって生じる心理的斥力から、他者と体幹接触する距離で1、他者がPSに入らない位置で0になるように設定した。ポスターからの距離コスト C_{sp} は、ポスターを至近距離から鑑賞して他者の邪魔とならないように配慮するためのコストであり、ポスターの至近距離で値が大きくなるように設定した。

- **障害物コスト C_0** ：衝突の危険がある障害物に近づかないためのコストである。 C_{human} のコスト式における他者との距離を障害物との距離に置き換えたものである。

上記3種類のコストの重みづけ和をとり、各セルのコストマップ値 C_m を、 $C_m = k_{task}C_{human} + k_{social}C_{social} + k_0C_0$ で計算する。ただし、 k_{task} 、 k_{social} 、 k_0 は重みづけ係数である。そして、 C_m が8近傍のセルの中で唯一の最小値となるセルをゴール候補として選出する。

(3) 経路計画と移動コストの算出：各ゴール候補までの最適な移動経路をDWNを用いて計画し、その移動の手間(移動コスト)を算出する。DWNは、回避対象者の横に経由点を配置しする軌道生成手法であり、ロボットから人への接近、声掛け・接触等の働きかけを状況に応じて行うことで高効率かつ社会受容性の高い移動が可能である。移動コストは、移動の道のりと加減速、人への接触による影響度を考慮して算出する。

(4) 最適ゴールの決定：各ゴール候補について、移動コストの重みづけ係数 k_{path} を用いて、総合コスト C を次式で算出し、ゴール候補の中で C が最小の位置を最適なゴールとして決定する。

$$C = C_m + k_{path}C_{path} \quad . (1)$$

2. 2. 他者のゴール予測と譲り合い

(1) 他者のゴール予測とそれに伴うゴール候補：人がロボットの目指すポスターと同じポスターへ向かっている場合を考える。この条件は、人が0.1 m/s以上の速度を持ち、速度方向とポスター方向の角度が90度以下の場合とした。この条件を満たす人(以下、譲り合い対象者)についてゴール位置予測を行う。ロボットは、対象者の現在速度方向となす角が $\pm\theta_{HG}$ の領域内で最もコストマップ値の低いセルを探索し、その位置を対象者の予測ゴール位置として推定する。予測ゴールに対象者が到着すると、その周囲には C_{human} が生じる。そこで、予測ゴールに人がいると仮定した C_{human} を C_m に加えた C'_m を算出する。

(2) 譲り合いを行うゴール候補の選出：譲り合いの検討では、人の予測ゴールをロボットも目指していると仮定し、人とロボット双方が予測ゴールからどれだけ離れた位置をゴールとするのが適切な譲り合いであるかを決定する。適切な譲り合いの決定のために、まず人とロボット双方の予測ゴールへの到着時間の差に基づく優先度を算出する。高優先度側に優先度に応じた譲り合い後のゴール(譲り合い位置)における C_m の上限値を設け、高優先度側の譲り合い位置での C_m が上限値以下であり、かつ双方の譲り合い位置で C_m の優先度での重みづけ和が最小となる譲り合いのパターンを最適な譲り合いとして決定する。これをすべての譲り合い対象者に対して行う。人、ロボットの速度、人、ロボットそれぞれの予測ゴールまでの距離から算出する「予測ゴールへの対象・ロボットそれぞれの到達時間の差」から、人の優先度 P_H とロボットの優先度 P_R を定義する。次に、譲り合いを行う方向を決定する。譲り合いでは C_{task} を重視し、譲り合い位置での双方の C_{task} の差が少ない方向に譲り合う。今回の C_{task} は同心円状であるため、予測ゴールからポスターに垂直な方向を譲り合い方向とする。そして、この方向でロボットと人が心理的に安定したPS分だけ離れた位置となる状況を譲り合い候補とする。優先度が高い側について、譲り合い位置での C_m ($C_{m,tg}$ とする)の上限 $C_{m,L}$ を次式で設定し、これを超える譲り合い候補は除外する。 k_{max} は優先度に応じた許容増加量

の変換係数, P は高優先度側の優先度である.

$$C_{m,L} = C_{m,tg} + k_{max} \times (1 - P) \quad , (2)$$

残った譲り合い候補について, 譲り合い位置での人・ロボットのコスト $C_{m,H}$, $C_{m,R}$ と優先度を用いた重みづけ和 C_{cpos} を次式で算出する.

$$C_{cpos} = C_{m,H}P_H + C_{m,R}P_R \quad , (3)$$

C_{cpos} が最小となる譲り合い候補での人・ロボットの譲り合い位置 x_{cH} , x_{cR} を, 最適な譲り合い位置とする. 譲り合い対象人数を n , k 人目に対する最適なロボットの譲り合い位置を x_{cR}^k とすると, 譲り合いを行うゴール候補座標の集合 \mathbb{P}_C は次式で表せる.

$$\mathbb{P}_C = \{x_{cR}^k | 1 \leq k \leq n\} \quad . (4)$$

2. 3. 最適ゴール決定

選出したゴール候補座標の和集合について, C_{path} を算出したうえで総合コストを算出する. ここで, 人がその譲り合いに従わないリスクを, 人の優先度に応じたコスト上昇量の上限と実際の上昇量の差 $dC_{m,H}$ と人が予測ゴールに到着するまでの時間 T_{PGH} から定義する. そして, 全ゴール候補について, 総合コスト C' を次式で算出する.

$$C' = C_m + k_{risk}C_{risk} + k_{path}C_{path} \quad . (5)$$

k_{risk} は譲り合いのリスク係数であり, 予測ゴールを完全に譲るゴール候補については0とする. C' の算出後は, ゴール候補の中で最も総合コストが低い最適ゴール x'_G を選出する.

2. 4. 動作実験

ロボットの動作を確認するため, ロボットが AGF によるゴール探索を行いながら 2 か所のポスターを順に鑑賞する実験を行った. 図 1-1 でロボットは右側のポスターを鑑賞するため, ポスターの正面をゴールとして目指している. しかし, 左側から同じポスターにロボットよりも速足で向かう人を検出したため, 図 1-2 ではロボットはゴールを再探索し, 完全に人を回避する位置にゴールを設置し直し, 図 1-3 でそのゴールに到着した. 図 1-4 では左側のポスターに目標を切り替え, ポスター正面をゴールとして目指した. そのゴールに到着した後, 左後方から歩いてくる人を検知した. この場面では左側に別の人がおり, 新たに来た人が左側からポスターを鑑賞する余地が無かったため, ロボットが PS の半分程度の幅を回避する譲り合いをすることで左側からポスターを鑑賞できるだけの幅を設けることが適切だと判断した. このため, 図 1-5 でロボットはゴールを右側に更新し, 図 1-6

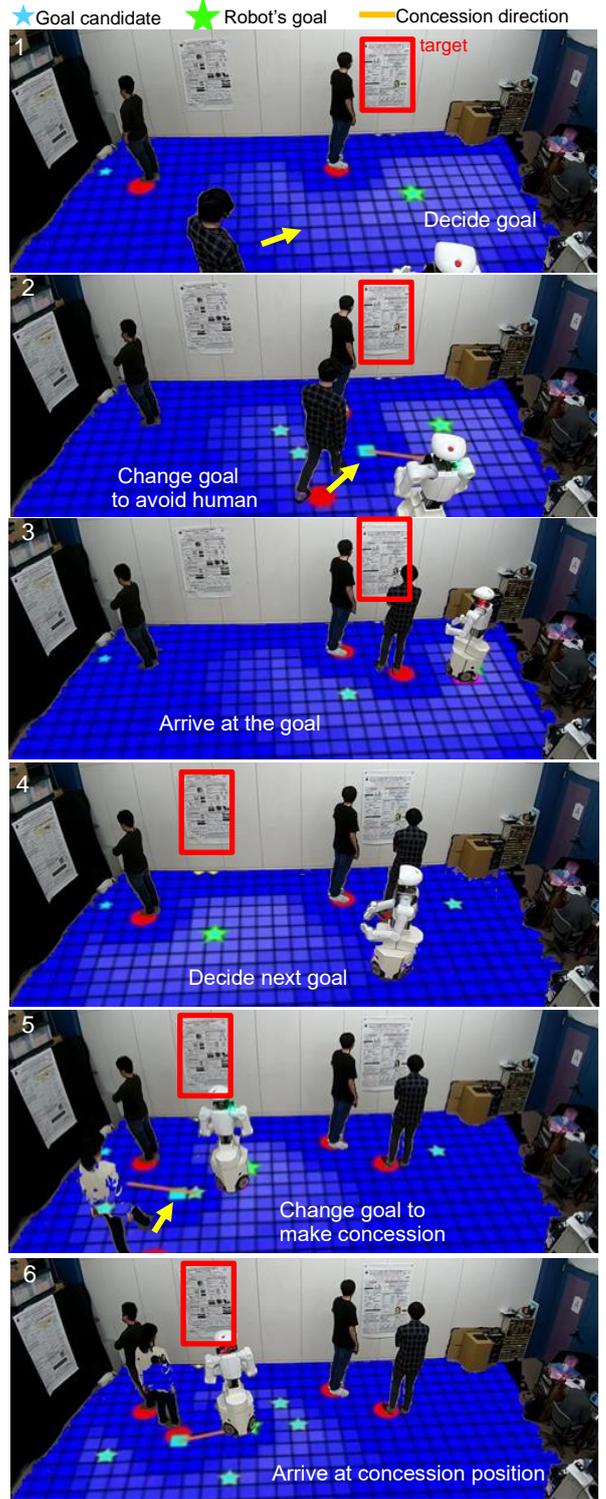


Fig. 1. Robot's motion in experiment.

では人とロボット双方がポスターを鑑賞しやすい位置に到着している。このように、ロボットが周囲の環境の変化に応じて適切にゴールを変更しながら移動できることが確認された。

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] Mitsuhiro Kamezaki, Michiaki Hirayama, Ryosuke Kono, Yusuke Tsuburaya, and Shigeki Sugano, “Human Velocity Estimation Using Kalman Filter and Least Squares with Adjustable Window Sizes for Mobile Robots”, IEEE Access, vol. 12, pp. 103260–103270, July 2024.
- [2] 早崎宗一郎, 亀崎允啓, 今治諭志, 斎藤喬介, 今西優登, 櫻井絵梨子, 三宅太文, 菅野重樹, “予測と実測の差の蓄積に基づく自律移動ロボットの協調移動パラメータ調整手法の検討”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024 論文集, paper no. 2P1-L04, 2024 年 5 月
- [3] 大石雄暉, 山口皓大, 亀崎允啓, 濱田太郎, 三宅太文, 櫻井絵梨子, 菅野重樹, “マニピュレーションを考慮した協働作業ロボットの適応的ゴール位置探索とアーム軌道計画手法の開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024 論文集, paper no. 2P1-C08, 2024 年 5 月.
- [4] 林弘昭, 川合勇輝, 葛西優介, 菅野重樹, 亀崎允啓, “シームレスで柔軟な屋内外走行を実現する人共存型パーソナルモビリティの半自律制御システム”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024 論文集, paper no. 1P2-007, 2024 年 5 月.
- [5] Mitsuhiro Kamezaki, Tomohiro Wada, and Shigeki Sugano, “Dynamic Collaborative Workspace Based on Human Interference Estimation for Safe and Productive Human-Robot Collaboration,” IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), vol. 9, no. 7, pp. 6568–6575, May 24, 2024.
- [6] Catherine Lollett, Advait Sriram, Mitsuhiro Kamezaki, and Shigeki Sugano, “Overcoming Hand and Arm Occlusion in Human-To-Robot Handovers: Predicting Safe Poses with a Multimodal DNN Regression Model,” IEEE Int. Conf. Rob. Autom. (ICRA2024), pp. 13390–13396, May 2024.

5. 研究活動の課題と展望

本研究では、これまでに著者らが開発したロボットのタスクに応じたゴール探索手法をより汎用的で実環境での使用に適したものとするため、コストマップ・経路コスト・譲り合いを考慮した AGF を開発した。今後は、AGF の汎用性を確認するために様々なタスクへの適用を行うほか、より複雑なタスクのゴール探索への拡張や、学習を用いた重みづけパラメータの自動調節機能を開発する。