

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

近年、人・ロボット共存環境下においてサービスを行う移動ロボットが注目されており、自律移動ロボットの軌道計画の研究が盛んとなっている。これまでに研究代表者らは、人への意図的な接近や双腕アームによる接触等の働きかけを含む近接移動と、進路示唆により相互に譲り合う回避移動を合わせた統合的軌道計画システムを開発し、人共存環境下で社会的受容性を維持しつつ、高効率な移動を実現できることを示した。前述の理論は、接近・接触等の能動的働きかけを駆使して「何とかして」目的地に向かって「前進し続ける」ことを基本原理としているが、戦略的に待機や迂回をして「いったん」目標地から「遠ざかる」行動原理も持ち合わせる必要がある。前者の行動を「前進的行動」、後者を「後退的行動」と呼ぶ。これまでに後退的行動の研究として、待機位置をグリッド探索する研究や、1人しか通過できない横幅の道にどちらのエージェントが先に侵入するかを確率的意図モデルによって決定する研究がある。また、迂回に関する研究として、2体のロボット間で情報共有し、譲り合う軌道を生成する研究や、ゴール方向に対して反対方向に進む行動を選択肢として与える研究がある。しかし、前進的行動と後退的行動を同一指標で評価・選択し、行動する統合的軌道計画システムは提案されていない。

本研究では、戦略的な待機や迂回といった後退的行動と能動的働きかけを駆使する前進的行動を必用に応じて使い分けられる統合的軌道計画システムを新たに開発したので報告する。

2. 主な研究成果

軌道計画の自由度や実時間制御、ロボットの行動明確化の観点から、動的・静的複数人歩行者回避軌道計画手法「Iterative Dynamic Way-point Navigation」(IDWN)を用いた軌道計画を行う。IDWN同様、測域センサを用いて得られる周囲の点群情報から人情報を取得し、複数人に対する干渉判定を行い、「前進的行動」である目的地に対して前進し続ける定常速度・加減速・接近・接触軌道をDWNによって生成する。その後、「後退的行動」である待機・迂回のための軌道を生成する。これらすべての軌道の移動効率をコスト式によって計算・比較し、最小コスト軌道を選択し移動を行う。

2. 1. 後退的行動

(1) **待機**：待機を行うためのプロセスとして、「自分自身が通行人(待機対象者)の妨げになっていることに気づく」、「待機対象者が通り過ぎるまで、避けて待つことができる位置・領域を探す」、「探した位置・領域まで移動し、その場で停止して対象者が通り過ぎるのを待つ」が挙げられる。上記のプロセスを達成するために、以下の(1)~(4)の行動を行う。図1を用いて説明する。

- **干渉判定**：干渉判定システムは、IDWNで用いたものと同様である。歩行者とロボット共に等速直線運動をすると仮定し、測域センサから得られた位置・速度情報からお互いのパーソナルスペース(PS)(半径0.5m)の干渉有無を推定し、干渉がある場合、干渉時刻および位置を算出する。
- **待機サブゴール探索**：待機位置を全探索するのではなく、高効率な経路生成のため、以下のル

ールに基づき探索する。ロボットと歩行者の干渉が予測されたとき、ロボットはその歩行者を待機対象者とし、待機地点を探索する。まず相手の速度ベクトルを延長させ、ロボットが停止した際にお互いの PS が干渉しない領域を探索する(図1 黄領域)。次に、待機対象者以外の人(図1 青領域)や障害物(壁)と PS が重複しないように考慮し、待機位置候補領域(図1 緑領域)を算出する。待機位置候補領域内においてロボットに最も近い辺(赤線)に着目する。待機後の元軌道への効率的な復帰を容易にするため、赤線端点の緑点を待機サブゴールとする。

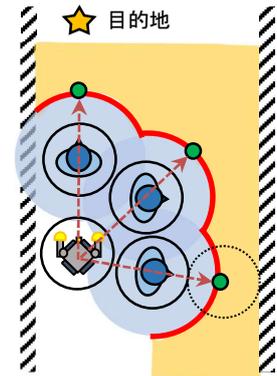
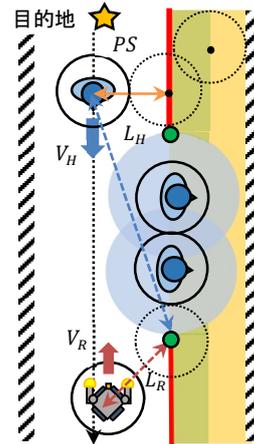


図1 待機サブゴール生成法 図2 迂回サブゴール生成法

- **待機時間の計算と待機**：待機位置で待つ時間を計算し軌道情報の一部とする。ロボットの現在位置から待機位置までの距離 L_R と走行速度 V_R により、待機位置に着くまでの時間 $T_R (= L_R/V_R)$ を求める。待機対象者がロボットの待機位置を通り過ぎるまでの時間から時間 T_R を引くことにより、待機時間 T_W を求める。 T_W の間、待機位置で停止することで、待機が完了する。

$$T_W = \frac{L_H + (PS_H + PS_R)}{V_H} - T_R. \quad (1)$$

- (2) **迂回**：迂回を行う場面は大きく分けて、「人や障害物に周囲を囲まれている場所に入り、そこから動き出す場面」、「ロボットが停止・移動中に突然囲まれる場面」の2種類考えられる。両場面共に、目的地方向に進む軌道ではなく、囲まれている状況から離脱する軌道を生成する必要がある。360° 囲まれている場合は、周囲の人達に対して能動的に働きかける選択肢も必要となる。

- **干渉判定**：同様の方法で実施する。
- **迂回サブゴール探索**：迂回を行うには、ロボットと周囲の人の PS が干渉せず、かつ、周囲の人の外側に迂回サブゴールを設定する必要がある。迂回サブゴール探索には、前進的行動や待機のように具体的な対象者を1人に絞るのではなく、ロボットの周囲を囲んでいる人全員を迂回対象者とする必要がある。図2を用いて迂回サブゴール生成法について説明する。図2 青領域はロボットと人の PS が重複する領域、黄領域は迂回が成立する領域である。待機位置探索同様に、迂回が成立する領域内を全探索するのではなく、青領域と黄領域の境界(赤線)とロボットと人を直線で結んだ交点(緑点)を迂回サブゴールとする。

2. 2. 軌道生成と軌道コスト計算

(1) **軌道生成**：後退的行動のために生成したサブゴールまでの軌道を IDWN によって生成する。前進的行動的軌道と同じ指標で比較するため、後退的行動のための待機または迂回サブゴールまでの軌道を生成後、当該サブゴールから最終目的地までの軌道を生成する。前進的行動、後退的行動を含めて、以下5の軌道を生成する。

- **前進**：ロボット現在位置(P_0)～最終ゴール(P_F)
- **後退(待機)**： P_0 ～待機サブゴール候補+待機サブゴール候補～ P_F
- **後退(迂回)**： P_0 ～迂回サブゴール候補+迂回サブゴール候補～ P_F

(2) **軌道のコスト計算**：後退的行動は、前進的行動とは異なり、効率的な移動のための指標だけでは測ることができず、社会的受容性を考慮する必要がある。以上のことから、各WP区間の速度変

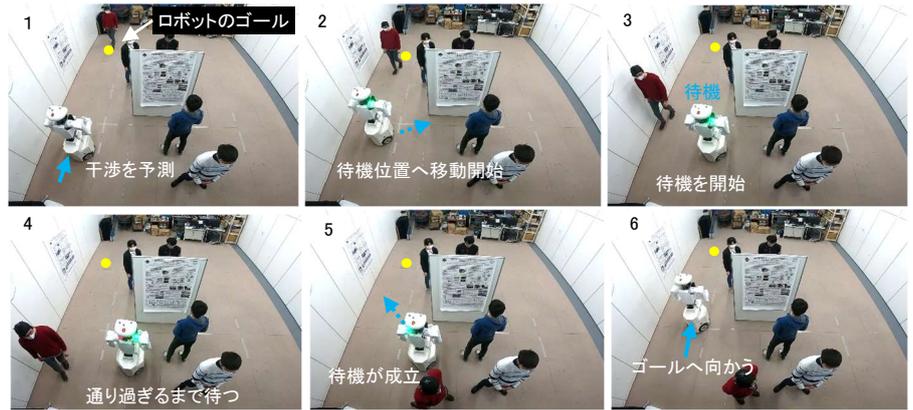


図3 待機行動の様子

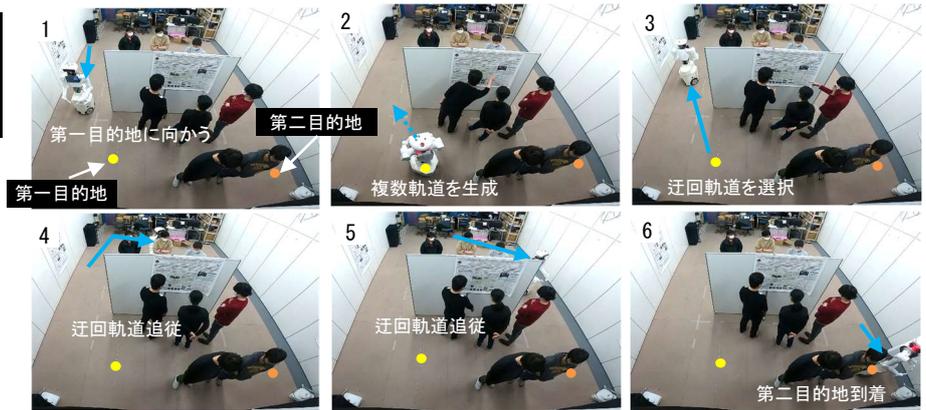
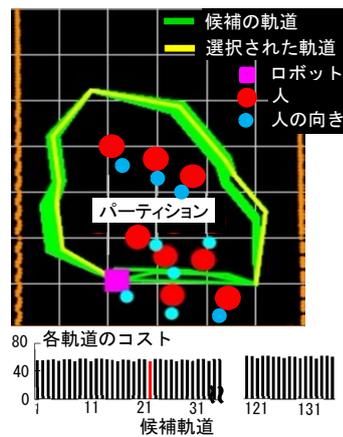


図4 迂回行動の様子

化量，各WP区間の所要時間，働きかけによる接触対象者の移動距離を考慮する．ロボットのWP(n-1)-WP(n)間の速度を $v_{W_{n-1} \rightarrow W_n}^R$ ，WP(n-1)-WP(n)間をロボットが移動する所要時間を $t_{W_n}^R$ ，接触対象者を移動させなければならない距離を r とすると，コスト式は以下の式となる．

$$E = \sum_{n=1}^N \left\{ A \left(\left| v_{W_{n-1} \rightarrow W_n}^R \right|^2 - v_{W_{n-2} \rightarrow W_{n-1}}^R \right|^2 \right) + B \left(\overline{t_{W_n}^R} - \overline{t_{W_{n-1}}^R} \right) \right\} + Cr. \quad (2)$$

A ， B ， C の各係数は，ロボットを実際に実験環境内で動かし，行動として違和感がないか，不自然でないかという観点から $A=15$ ， $B=1$ ， $C=25$ とした(要素間の正規化は行っていない)．

2. 3. 評価実験

(1) 検証実験

ポスターなどが壁やパーティションに貼られている会場を想定した横 5.5m，縦 6.5m の部屋に複数人いる環境でロボットが指定された場所を往来する実験を行い，後退の行動が複数生成されること，コスト式によって1つの経路が実時間内に選択されること，コスト式(要素・係数)が妥当であり，人が選択する経路と似たものが選択されること，を評価した．

- 待機：図3は待機行動を選択した場面である．ロボットの目的地は黄色点にあり，ロボットの向かいから人が歩いてくる場面を想定した．パーティションと壁の間には十分なすれ違い幅がないため，ロボットは，待機対象者の通行の邪魔にならない位置で待機し，待機対象者が通った後，動きだすことが確認された．図3左に計画経路と選択経路を示す．ここではパーティションを迂回する経路も計画できており，その中から最もコストの低い黄色の待機経路(図3左下コスト図の経路1)が選択されていることがわかる．

- **迂回**：図4は迂回行動を選択した場面である。ロボットの第一目的地が黄色点、第二目的地が橙点の位置である。黄色点から橙点に向かう際、パーティションの前には5人もの人がいるため、声掛けや接触等を用いた前進的行動ではなく、パーティションの裏から迂回する後退的行動を選択することが確認された。図4左図より、迂回軌道だけでなく、接近・接触を行う前進的行動も生成されている。当該環境では最もコストの低い迂回経路(図4左下図の経路22)が選択されていることがわかる。

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] Reon Hayami, Bill Falk, Takuya Sasatani, Shigeki Sugano, and Mitsuhiro Kamezaki, "Proposal of an Embodied Airbag-Pressure-Based Control Interface for Inflatable Personal Mobility Devices," IEEE Int. Conf. Rob. Autom. (ICRA2026), June 1-5, 2026. (accepted)
- [2] 西山太智, 今西優登, 三宅太文, 菅野重樹, 亀崎允啓, "基盤モデルの常識的知識と状況理解能力を活用したロボットの自発的行動生成に関する研究", 第43回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2025), paper no. 1M2-04, 2025年9月.
- [3] 速見玲雄, 葛西優介, 倉林岳, 林弘昭, 菅野重樹, 亀崎允啓, "複数歩行者の将来的な位置を考慮したスマートモビリティのための仮想レーン型局所軌道計画手法の開発", 第43回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2025), paper no. 1C1-01, 2025年9月.
- [4] 大石雄暉, 山口皓大, 三宅太文, 今西優登, 菅野重樹, 亀崎允啓, "動的タスク割り振りと協働者の意図推定に基づく譲り合いを考慮した協働ロボットの行動決定システム", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2025(Robomech'25), paper no. 2A2-T01, 2025年6月.
- [5] 林弘昭, 植田歴, 速見玲雄, 菅野重樹, 亀崎允啓, "領域分類と物体検知を用いたパーソナルモビリティの通行容易性推定および情報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2025(Robomech'25), paper no. 2A1-L01, 2025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

戦略的な待機や迂回といった後退的行動と能動的働きかけを駆使する前進的行動を含めた統合的軌道計画システムを開発した。前進的行動と後退的行動を使い分けることで、より社会受容性の高い行動を選択できることを示せた。今後は、カメラやマイクを用いて人の視線や会話から人同士の関係性やコンテキストを理解し、より自然な行動を選択できシステムの開発を行う予定である。