

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

本研究は、接近～接触の極近距離において複数の人間とロボットが協調的な心理的・物理的インタラクションを安全・安心・円滑に達成するための、協調技術を開発する。これまでに、人とロボットが相互に働きかけることで両者の行動に影響を与えつつ協調的に干渉回避する「働きかけを含む干渉回避行動計画」を開発してきた。協調的に人に回避を促すには、ロボットの行動意図を伝える必要があるため、ロボットには相手の行動を変化させる働きかけ行動をとること、さらに有効に働きかけるために周囲の状況や相手の状態を推定することが求められる。ロボットから人への働きかけ行動を含む移動制御の研究として、人状態予測に基づいた連続的な働きかけ行動の決定手法を開発した。さらに、さまざまな方向からの移動体に対して、加減速を含めた軌道計画を実現するために、Dynamic Waypoint Navigation (DWN)を開発した。上記のシステムでは、はじめの働きかけ行動が失敗した場合は人を優先してロボットが回避していた。しかし、人と協調するロボットには、人への回避の度合いを譲り合い度として推定し、状況に応じて調整できる方法論が必要となる。以上より、両者の位置関係や人の状態推定により導出した譲り合い度から、主張的に働きかけ行動を選択、もしくは同調的に人を避けることを可能とする「主張・同調的軌道計画手法」を構築する。

2. 主な研究成果

本研究では、相手の行動を変化させる働きかけ行動をとるための、譲り合い度の推定や加減速を含めた軌道計画を行えるシステムを開発した。

2. 1. 働きかけ・譲り合い行動に係る領域

ロボットと人の相対位置関係や干渉までの時間が、ロボットの主張/同調を決める主要因になる。そこで、図1に示す3つの働きかけ領域を定義した。

- 働きかけ無効域(R_n)：距離が遠く働きかけの効果が期待できない領域。
- 遠方働きかけ域(R_f)：何回か働きかけをする機会のある領域。
- 接近働きかけ域(R_p)：遠方域よりも即時的で明確な働きかけを行う領域。

さらに、領域に付随した地点を以下のように定義する。

- 最遠働きかけ点(P_l)：働きかけが影響を及ぼす最遠点。
- 最短回避点(P_s)：接近移動(接触移動)を行うか、迂回を選ぶかの判断を行う点。
- 臨界回避点(P_l)：ロボットがパーソナルエリア(PA)（これ以上近づいてほしくない、という心理的な距離）に入らない迂回移動が可能な回避臨界距離。
- 接近準備点(P_r)：PA 臨界点までに接近働きかけ(アームを構える、減速など)を完了させる時間

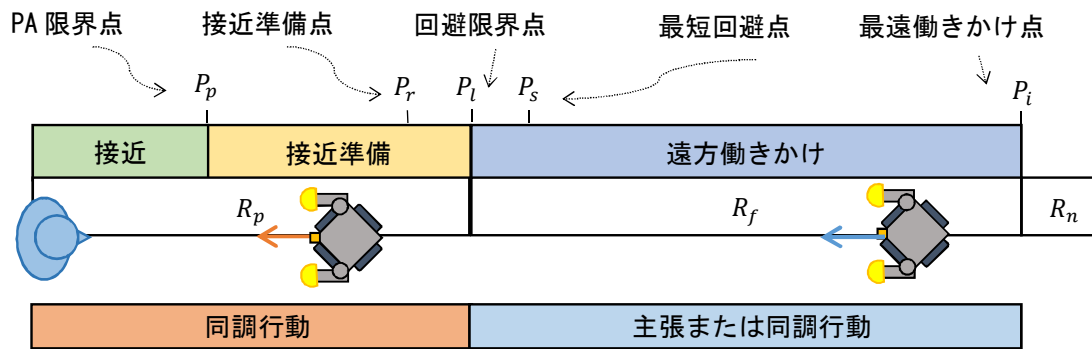


図1 領域の定義と働きかけ内容(主張・同調)

を確保できる距離。

- PA 臨界点(P_p): 人とロボットが持っている PS が重ならない端点までの距離(ここでは, 1[m])。

2. 2. 主張・同調軌道計画手法

(1)Dynamic Waypoint Navigation (DWN): さまざまな方向からの移動体に対して, 加減速を含めた効率的な軌道計画を行うため, Dynamic Waypoint Navigation (DWN)を用いる。DWN では, まず, センサ情報から得られた位置から推定速度を算出し, ロボットと人の干渉可能性を推定する。干渉が推定された場合, 干渉を回避する軌道を3つの経由点で生成する。はじめに, 定常速度の回避軌道を人の左右に生成し, その後, 干渉点を刻み幅 d でずらしていくことで, 加速・減速状態での軌道を生成する。最後に, 導出した複数の軌道の中からロボットにとって最も良い(コストの低い)軌道を選択する。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。以上の軌道探索は進行方向および加減速に対して反復的に探索を行うため, 軌道探索の範囲と計算精度を適切に設定しなければ計算量が膨大になってしまう。そこで, ロボットの行動生成にかかる上限時間を 0.5[s]とし, 以下のヒューリスティックスを適用することで計算量を削減した。

- 刻み幅 d を人が軌道の差を体感的に感じられる数値と仮定して, 10[cm]とする。
- 歩行者の進行方向前方を減速して通過する軌道と, 後方を加速して通過する軌道はコストが高くなることが自明なため, 軌道候補の探索を行わない。

(2)主張・同調選択: 同調軌道ではWaypointを人に干渉しない位置(PA端)に設置するが, 主張軌道の場合はPA内に設置することで生成する。PA端からの侵入距離は, ロボットと人の干渉角度(θ_r, θ_h)から定めた譲り合い度(P_R, P_H)から決める。干渉角度は, 干渉時の自身の進行方向と干渉点のなす角である。干渉角度の差が大きい場合は, ロボット・人ともに左避けしたほうがよいと判断できる。しかし, 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(ここでは 30° 以上), 譲り合い度は等しい(50:50)が, 差がない場合は, 人にわかりやすく動くためロボットの方が少し多め(75:25)に譲る。働きかけ後には, 働きかけ意図が伝わったかを示す達成度を判定する。主張軌道による働きかけは, 自分が $P_R\%$ 分回避した軌道により, 人に $P_H\%$ 分回避してもらうことを意図している。そこで, ロボットと人の最接近距離がPSより短ければ, 干渉を意味するので達成度なし, PSより大きい場合(ここでは1.5倍)は, 人が大きく回避しているの

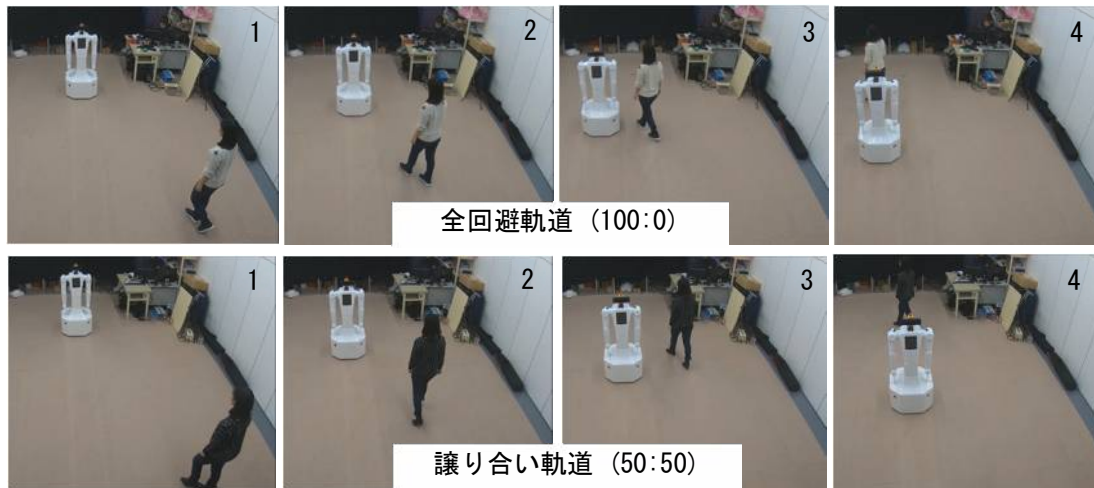


図2 ロボットと人のすれ違いの様子

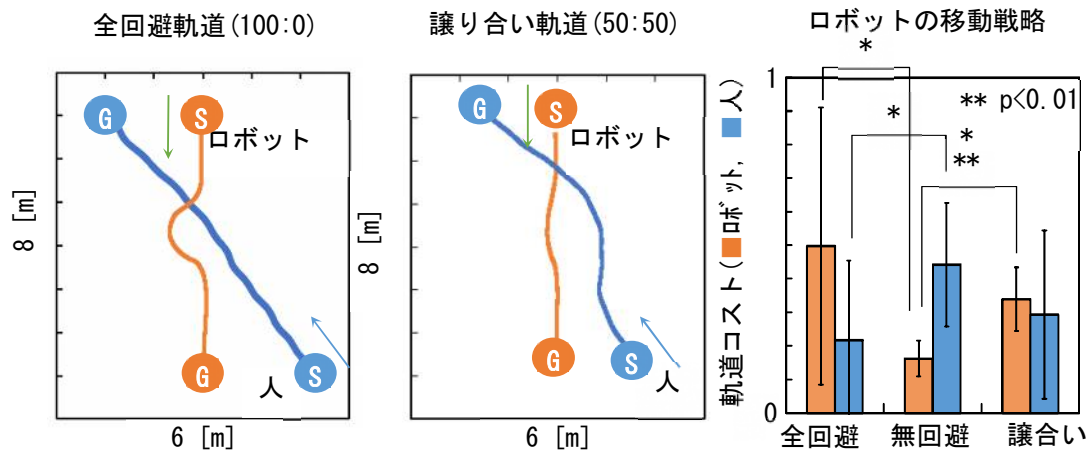


図3 人・ロボットの軌道および移動コスト

で極有, それ以外は有となる. 達成度なしの場合, 主張行動が相手に伝わらず干渉状態が継続しているので, ロボットは引き続き働きかけを行う.

2. 4. 実験結果とまとめ

被験者実験では, 提案する譲り合い度の推定に基づき相互の譲り合いができること, また, 主張を含む譲り合い行動の受容性について評価を行った. ロボットの移動戦略として, 全回避(従来の常に同調的回避をする移動戦略), 回避なし(常に主張的に目的地へ進む移動戦略), 譲り合い(提案の状況に応じて主張・同調を切り替える移動戦略)を用意し, 一連のすれ違いタスクを実施した. 図2にすれ違いの様子, 図3にロボット・人の軌道, および速度ベクトルの変化度合いを積算した軌道コスト(低いほうがよい)をそれぞれ示す. 全回避では人を完全に回避するためロボットのコストが高く, 回避なしではロボットは直線的に目的地へ向かうためコストが低い. 一方, 譲り合いでは, ロボット(人)は, 全回避(回避なし)よりコストが小さく, 回避なし(全回避)よりコストが大きくなっており, 人とロボットが適切に譲り合えたことが確認された. さらに, アンケートに基づく印象評価を行った結果, ロボットの行動意図が汲み取れ, 譲り合いを感じることもできた, 自然な動きであった, 必要に応じて主張的行動をとる譲り合いであったが, 心理的負担を感じず, 自然な動きであったという意見が多く, 3つの中で最も選好された移動戦略であることもわかった.

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] N. Imaoka, K. Kitazawa, M. Kamezaki, S. Sugano, and T. Ando, “Autonomous Mobile Robot Moving Through Static Crowd: Arm with One-DOF and Hand with Involute Shape to Maneuver Human Position,” J. Rob. & Mechatronics, vol. 32, no. 1, pp. 59-67, Feb. 20, 2020.
- [2] M. Kamezaki, A. Kobayashi, Y. Yokoyama, H. Yanagawa, M. Shrestha, and S. Sugano, “A Preliminary Study of Interactive Navigation Framework with Situation-Adaptive Multimodal Inducement: Pass-by Scenario,” Int. J. Social Robotics, pp. 1-22, July 2019.
- [3] 森大河, 亀崎允啓, 黄逸凡, ナワドウウダーラ, 石原達也, 中野将尚, 越地弘順, 肥後直樹, 椿俊光, 菅野重樹, “操作特微量のみを用いた機械学習に基づく電動車いす操作者の基本操作技能レベル判定手法の提案”, 福祉工学シンポジウム 2019 (LIFE2019), 2019 年 9 月.
- [4] 亀崎允啓, 小林彩乃, 河野遼介, 菅野重樹, “人・ロボット系における相互の譲り合いを考慮した主張・同調的軌道計画手法”, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会論文集 (RSJ2019), paper no. 3N1-02, 2019 年 9 月.
- [5] 亀崎允啓, 金田太智, 平山三千昭, 小林彩乃, 河野遼介, 菅野重樹, “反復的行動探索の効率化による複数移動障害物の回避軌道計画”, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会論文集 (RSJ2019), paper no. 3N1-03, 2019 年 9 月.
- [6] 今岡紀章, 北澤一磨, 亀崎允啓, 菅野重樹, 安藤健, “インボリユート形状を有する 1 自由度アームによる接触働きかけを行う人ごみ内自律移動ロボットの開発, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会論文集 (RSJ2019), pp. 3N1-01, 2019 年 9 月.
- [7] 亀崎允啓, 金田太智, 大西智也, 円谷優佑, 小林彩乃, 河野遼介, シュレスタ ムーンディプ, 菅野重樹, “リスク・ベネフィットの推定と調整に基づく接近・接触移動フレームワークに関する研究”, 日本機械学会 Robomech' 19, paper no. 2P1-K10, 2019 年 6 月.

4. 2. 総説・著書

4. 3. 招待講演

4. 4. 受賞・表彰

- [1] 2019 年 9 月：バリアフリーシステム開発財団奨励賞, ライフサポート学会大会 (学生)

4. 5. 学会および社会的活動

5. 研究活動の課題と展望

提案したシステムによって, 人間・ロボット系における相互の譲り合いを考慮した主張・同調的軌道計画が実現された. 今後はより状況に応じた譲り合い戦略について検討していく予定である.