

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。今年度は、ロボットから人への意図伝達度に着目した人状態推定技術を開発し、連続的な働きかけによる協調移動手法を提案した。自律移動ロボットが、人混みのように人が多く存在する環境で人と安全、安心に活動するためには、人の動きや環境状況に配慮し、人に対して協調的な移動を行う必要がある。そのためには、従来から提案されている回避や停止といった「人に対する受動的な行動」だけでなく、ロボットの行動を通じてロボット自身の行動意図を人に伝達すること、すなわち、声掛けや軽い接触などの「能動的に人に働きかける機能」が必要だと考えられる。これまでに、人共存環境で起こるさまざまな状況を切り出し、必要な能動的働きかけに基づく行動制御を整理した。さらに、ロボットの移動効率と人の心理面に配慮した協調移動のフレームワークを提案し、実機を用いた実験からその有用性を評価した。ここで、通路を移動中、正面から歩いてくる人と経路干渉が起こる状況を想定し、ロボットからの働きかけを行う場合を考える。ロボットがより自然かつ効率的に振舞うためには、働きかけが人に伝わる状態であるか、また、ロボットによる働きかけが伝わったのかを読み取り、それらに応じた行動選択を行う機能が必要と考えた。つまり、人がロボットの働きかけを受け取れる状態であるかどうか、そして、ロボットの働きかけを受け容れたのかを判断する「ロボットから人への意図伝達度に着目した人の状態」を逐次推定するということである。以上より、本年度は、働きかけの前後で意図伝達度を推定し、それに基づき、人の動的な移動行動にも対応可能な連続的な働きかけの実現を目指す。

2. 主な研究成果

実機実験を行った結果、ロボットの働きかけがどの程度達成されたかの度合いを示す「達成度」を導入することで、人の動きがスムーズになり、また、人の心象も良くなることがわかった。

2. 1. 人状態システムの要求仕様導出

人の意図を推定し、自身の行動予定を相手に伝える機能、相手に自身の行動意図を伝えるために、相手の状態に応じた働きかけを選択する機能、意図の伝達度合いを推定する機能が不可欠である。そこで、以下のような協調移動技術を考案する。(1)干渉度判定機能：環境(通路や障害物)や人の情報を取得し、算出経路において人との干渉が生じるか否かを判定する。干渉(有)では、ロボットか人のどちらか(または双方)の行動変化が求められる。(2)認知度推定機能：干渉(有)では人への働きかけが必要となるが、ロボットに対する視覚的認知の有無に応じて働きかけの戦略が大きく異

なることから、人の顔の向きを用いた認知度を推定する。(3)達成度推定機能：干渉(有)では認知度に応じて働きかけが実行される。この働きかけによる人の反応行動を測定しその動作に応じて、働きかけ(ロボットの意図)が人に伝わったか否かを判断する。(4)働きかけ選択機能：認知度や1つ前の働きかけに対する人の反応行動に応じて、働きかけを選択する。本移動戦略で対象とする働きかけは、(a)移動方向の変更：自身の移動による進路示唆、迂回、(b)声掛け：気付かせるために利用、(c)能動接触：移動空間確保のための、気付かせ接触、移動を促す接触、(d)許容接触：人との接近時に不意な衝突を受け止めるための接触の4種類とした。弱い働きかけ(進路示唆)から徐々に強い働きかけ(接触)に移行する。接触でも干渉が解消されない場合は、経路の再選択を行う。

2. 2. 人状態推定システムの開発

(1)干渉度判定：人とロボットが現在の進路を維持した場合の干渉の可能性を計算し、働きかけの必要性を「有、無」の2つで判断する。人とロボットの座標[m]を (x_H, y_H) , (x_R, y_R) , 速度[m/s]と進行方向[rad]を (V_H, θ_H) , (V_R, θ_R) , 通路に沿った方向における人とロボットの相対距離(x方向)を l_{HR} [m]とする。まず、人とロボットの現速度ベクトルから、人とロボットが横並びになるまでの時間 S_t [s]を $l_{HR}/|V_H \sin \theta_H - V_R \sin \theta_R|$ で計算する。次に、横並びになった際の人とロボットの体幹中心の距離(y方向) D_{HR} [m]を $|(x_H - x_R) + S_t(V_H \cos \theta_H - V_R \cos \theta_R)|$ で計算する。最後に、回避行動が必要とならないマージン D_L を閾値として D_{HR} が閾値より大きいかどうかを判断する。マージンは肩幅の1.3倍とした。人とロボットの肩幅をそれぞれ SL_H , SL_R [m]とすると、 $D_L = [(SL_H + SL_R) \times 1.3]/2$ となるため、 $D_{HR} > D_L$ のとき干渉あり、 $D_{HR} \leq D_L$ のとき干渉なしとする。

(2)認知度推定：人の顔の向きをもとに、人のロボットへの視覚的認知の度合いを「無、小、大」の3種類で出力する。認知度は人の中心視野と周辺視野を閾値として分類し、ロボットを人が中心視野で捉えている場合は認知度(大)、周辺視野の場合は認知度(小)、周辺視野外の場合は認知度(無)に分類する。中心視野を水平方向に約30°, 周辺視野を水平方向に最大200°とした。

(3)達成度推定：人の回避量から、ロボットの働きかけの意図が人に対して伝達された度合い「小、大」で出力し、再度の働きかけの必要性を判断する。働きかけには、人の期待する行動変化(特に回避量)が紐付けられている。人に期待する回避量 A_{HP} と実際の回避量 A_{HA} を比較し、 $A_{HP} \leq A_{HA}$ のときは、意図が伝達されたとして達成度(大)、 $A_{HP} > A_{HA}$ でありかつ、ロボットの回避角度が自然に回避可能な臨界角度よりも大きい場合に、未伝達と判断して達成度(小)とする。臨界角度は、ブレ実験結果より30°に設定した。達成度の計算方法を以下に説明する。働きかけ前の幅を D_{HR} 、働きかけによるロボット自身の回避量を A_{RA} 、働きかけ後の(人の反応行動も加味した)幅を D_{HR}' [m]とすると、人の実際の回避量 A_{HA} は、 $A_{HA} = D_{HR}' - D_{HR} - A_{RA}$ で算出される。期待回避量 A_{HP} [m]は以下のように設定する。回避(小)の場合、ロボットが人に対し避けてほしい幅は回避に必要な最低限の通路幅 D_L [m]の半分の $0.5D_L$ [m]、回避(大)の場合、ロボットが D_L [m]を満たすように動くため、人が避ける必要はなく0[m]となる。ロボットが進行方向に対して臨界角度で回避したときの D_{HR} を、特に D_{HRL} [m]とすると達成度は、 $A_{HP} \leq A_{HA}$ のとき、大、 $(0 < A_{HA} < A_{HP}) \& (D_{HRL} < D_L)$ や $A_{HA} < 0$ のとき、小と算出される。達成度が低い場合、ロボットは前回の行動を踏まえて新たな行動を選択する。そこで、できる限り人とロボットの双方が譲り合うよう移動、つまり、回避(小)を選択する。Aが行えない場合、ロボットは最も大きい空間を移動、つまり、回避(大)を行う。認知(小)の場合には、気付かせのための声掛けを行った上で、回避(大)を行う。

2. 3. 評価実験

(1)実験内容：実験環境は通路を想定し幅は3[m]とした。被験者は10人、年齢は20代とした。人に

は通路の中心でロボットと5.5[m]の距離で正面に向き合った状態で待機してもらう。被験者にはロボットによる働きかけが必要な状況、つまり干渉(有)と判断される状況において、認知度(大/小)の2つの条件を変更し、達成度を導入する場合としない場合を比較した(合計4パターン)。認知度(大)の条件では、被験者にはロボットを見ながら歩く。途中でロボットが働きかけとして進路変更を行う。被験者はそれを確認したら、ロボットの進路を妨害するように同方向に同量だけ移動する。その後はロボットの様子を見ながら、自然に振舞うように指示をした。認知度(小)では、被験者は余所見をしながら歩き始める。ロボットは、進路変更時に声掛けを行うのでそのタイミングでロボットへ顔を向ける。その後は上述のものと同じである。実験終了後、不自然さ、不快感、恐怖感を項目とする7段階のアンケートを実施した。

(2) **実験結果**：達成度無の場合、ロボットは同じ方向に進み続けており、人はそれに対処するため大きな迂回を強いられている(図1a)。一方、達成度有の場合、ロボットは人が自身の同じ方向へ移動したことを認識し、スムーズに反対方向へ進路をとり直している(図1b)。回避移動中の速度ベクトルの変化量の時間積分を移動効率が失われる指標として定義したところ、認知度(大・小)ともに達成度有のほうが無と比べて損失が小さくなっていた。また、認知度(大・小)ともに、不自然さ、不快感、恐怖感の評価項目すべてで、達成度有のほうが無と比較してよい結果であることがわかった。以上より、達成度の導入により速度ベクトルの変化量が小さくなり、人の動きがスムーズになり、人の心象をよくできる可能性があることがわかった。

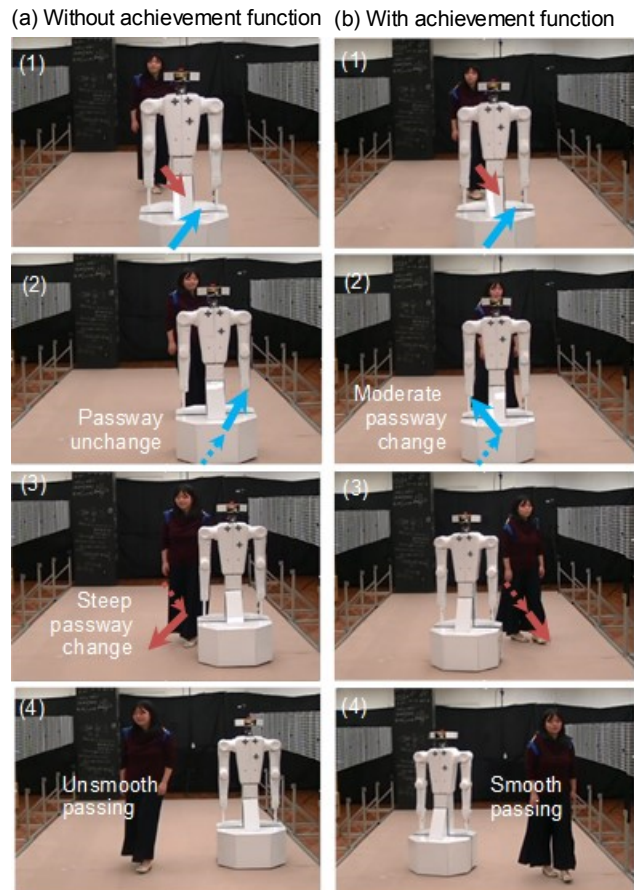


Fig. 1 Human and robot behaviors in passing scenario (Awareness: low)

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] 平山三千昭, 河野遼介, 円谷優佑, 亀崎允啓, 菅野重樹, “カルマンフィルタの誤差分散および近似式窓長の調整に基づく推定精度と実時間性を両立する歩行者の速度ベクトル推定”, 第19回計測自動制御学会S I 部門講演会論文集(SI2018), pp, 2690-2693, 2018年12月.
- [2] 小林彩乃, 河野遼介, 平山三千昭, 亀崎允啓, 菅野重樹, “Dynamic Waypoint Navigation による移動障害物の実時間回避軌道探索手法の提案”, 第19回計測自動制御学会S I 部門講演

会論文集(SI2018), pp. 811-814, 2018 年 12 月.

- [3] M. Kamezaki, M. C. Shrestha, Y. Tsuburaya, R. Kono, and S. Sugano, “Utilizing Robot’s Forearm Contact for Handling Space Constraints in Congested Environment”, Workshop on From freezing to jostling robots: Current challenges and new paradigms for safe robot navigation in dense crowds, 2018 IEEE/RSJ IROS2018, pp. 1-4, Oct. 2018.
- [4] M. C. Shrestha, M. Kamezaki, Y. Tsuburaya, R. Kono, and S. Sugano, “A Preliminary Investigation into Human Motion Reaction Against a Robot’s Forearm Contact”, Workshop on From freezing to jostling robots: Current challenges and new paradigms for safe robot navigation in dense crowds, 2018 IEEE/RSJ IROS2018, pp. 1-4, Oct. 2018.
- [5] M. Shrestha, T. Onishi, A. Kobayashi, M. Kamezaki, and S. Sugano, “A Communicating Directional Intent in Robot Navigation using Projection Indicators,” Proc. 2018 IEEE Int. Symp. Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN2018), pp. 746-751, Aug. 2018.
- [6] M. Shrestha, M. Kamezaki, Y. Tsuburaya, T. Onishi, A. Kobayashi, R. Kono, and S. Sugano, “A Preliminary Study of a Control Framework for Forearm Contact During Robot Navigation,” Proc. 2018 IEEE Int. Symp. Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN2018), pp. 410-415, Aug. 2018.
- [7] 円谷優佑, 亀崎允啓, 大西智也, 柳川勇人, 小林彩乃, 河野遼介, シュレスタ ムーンディプ, 菅野重樹, “人の移動性指標に基づく自律移動ロボットの軽接触移動制御手法の提案”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 論文集 (Robomech’18), paper no. 2A1-B16, 2018 年 6 月.

4. 2. 総説・著書

4. 3. 招待講演

4. 4. 受賞・表彰

- [1] 2019 年 3 月 : 2018 年度大学院研究奨励賞, 自動車技術会 (学生)
- [2] 2018 年 12 月 : SI2018 優秀講演賞, 第 19 回計測自動制御学会 SI 部門講演会
- [3] 2018 年 12 月 : 第 14 回競基弘賞 2018 年レスキュー工学奨励賞ファイナリスト (学生)
- [4] 2018 年 7 月 : 論文賞 (日本ロボット学会誌 Vol. 34, No.1), 日本ロボット学会
- [5] 2018 年 6 月 : 9 Finalists, Autonomous Vehicle, Valeo Innovation Challenge 2018
- [6] 2018 年 6 月 : 日本機械学会 若手優秀講演フェロー賞, ROBOMECH2017, 日本機会学会 (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

本研究では, 提案手法の有効性を確認するため, 人とロボットが 1 対 1 での環境を想定して実験を行った. 今後はより複雑な環境にも対応するため, 複数の人の関係性を考慮した上で人の状態推定を行う予定である.