

# 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。移動ロボットに関する研究の多くは、人の安全を第一に考え、ロボットと人が接触しないように回避させるような行動制御を採用している。例えば、人とすれ違う際には、検出した人とすれ違うタイミングの位置を予測してその領域を回避する経路を選択するといったものである。この戦略では、ロボットがいったん停止して人をやり過ぎたり、大きく人間を避けて移動したりするため、時間を要する上に広いスペースが必要になる。ロボットの効率的な作業遂行のためには、お互いのパーソナルスペース(Personal Space: PS)内の移動を行うための接近・接触移動(以下、近接移動)の実現が不可欠と考えられる。接触移動を実現するには、ロボット自身が人の近くを通る際の「接近のリスク」を推定しつつ、「近接移動によって効率の良い移動が行えるベネフィット」を加味した総合的な経路選択機能が必要となる。これまでに、人・ロボットの速度・位置を用いて算出した接触可能性と接触による被害程度から推定したリスクに基づく接近移動が提案されている。一方、リスク推定という観点では、リスクは人がロボットに気付いているか否かによっても変化すること、リスク調整という観点では、ロボットから人への働きかけが効果的と考えられることから、本年度は、リスクおよびベネフィットを推定し、必要に応じてリスクを調整できる近接移動フレームワークを開発した。

## 2. 主な研究成果

### 2. 1. 予定外近接移動

実環境では、人に接近するまでに時間的余裕がある場合だけでなく、ロボットの認識範囲外から突然人が現れ、その時点ですでに近接状態である場面も考えられる。この状態では取るべきロボットの行動に考慮が必要なため、人とロボットの相対距離により「計画的近接移動」と「予定外近接移動」を定義する(図1)。計画的にリスクを推定・調節した移動を行えるのは $P_r$ より外側であり、その状況を「計画的」、内側の緊急的行動を取るべき状況を「予定外」と定義した。予定外近接移動時のロボットの行動計画は、人とロボットの相対関係から以下の3種類に変化する。既にPSに入ってしまった場合は、最短時間で抜けられるように人との干渉点に対して垂直方向に移動する。次に、現在の移動を続けると体幹接触を起こすか否かを判断する。体幹接触が不可避な状況では直ちに停止を行う。停止後は人のいない方向へ回避する。最後に、予定外近接移動においても、接近リスクを既に調整していた場合は、接近移動を行えるものとした。

### 2. 2. 計画的近接移動

(1) リスク式: PS 侵入経路を生成することで選択肢が増え、迂回経路よりも移動効率の良い経路を生成できる「ベネフィット」が創出される。一方で、PSに入ってから接触などの働きかけを行うこと

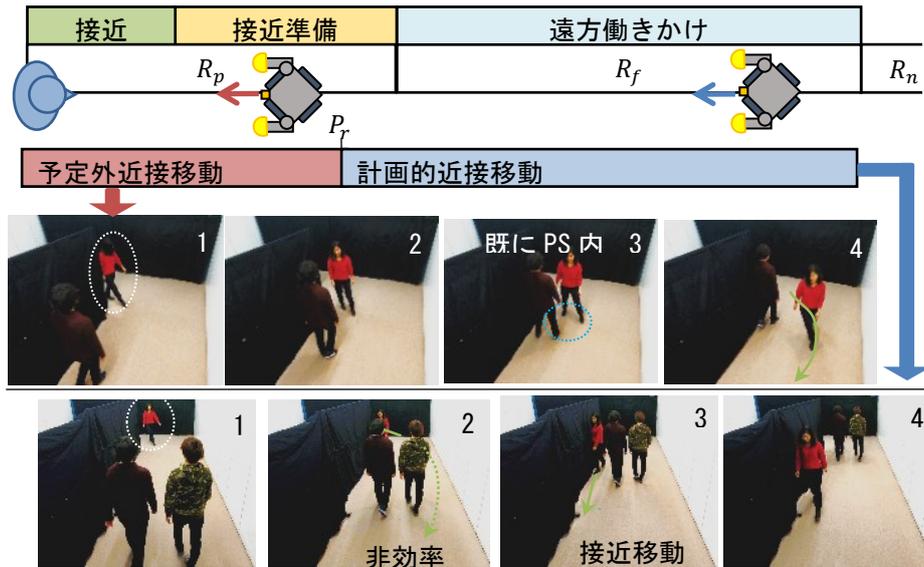


図1 近接移動フレームワーク

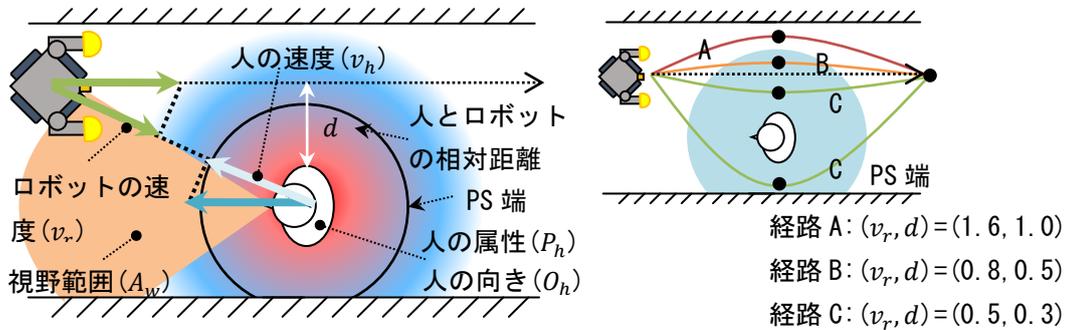


図2 近接リスク推定パラメータおよび経路生成

で衝突や許容できない不快感が生じる「リスク」があることから、まず、リスクを接近エネルギーとして定義する。接近時の不快感・リスクは短い相対距離，大きな相対速度ほど，指数関数的に大きくなる。接近リスクの基本的な要素は，接触可能性・接触リスクであるため，距離と速度のエネルギーをベースに，接近エネルギーを定義した(図2左)。

(2) リスク調整： 働きかけを用いて接近のリスクを低減させる。まず，近くを通る意思を表出するとともに，人との接触時の衝撃および接近時の人に与える恐怖感を低減するため，減速を行う。次に，不意の接触の可能性を考慮し，受動接触制御を行う。最後に，人に対して「すみません/通ります」などの発話をし，ロボットの存在を気付かせ接触の可能性を低下させる。また，謝意等を伝え心理的不快感を軽減させる。

(3) 近接経路生成： DWN を用いて経路を生成する。経路は PS 端を基準速度で進む場合と同じ接近エネルギーを持ち，また，働きかけによってリスク調節された経路である。同エネルギー経路では，ロボットと人の相対距離が短くなるにつれて位置エネルギーが増大するため，速度を小さくすることで運動エネルギーを小さくし，総和が等しくなるように制御される(図2右)。接近リスクが同じ経路を複数パターン作成したのち，ベネフィットを計算し，最良の経路を決定する。時刻  $t$  における進行方向速度を  $v_{yt}$ ，進行方向の基準速度を  $v_{y0}$ ，回避方向速度を  $v_{xt}$ ，1ステップ前の回避方向速度を  $v_{xt-1}$  とし，各方向における差分をスタート(S)からゴール(G)までの積分する。接触による

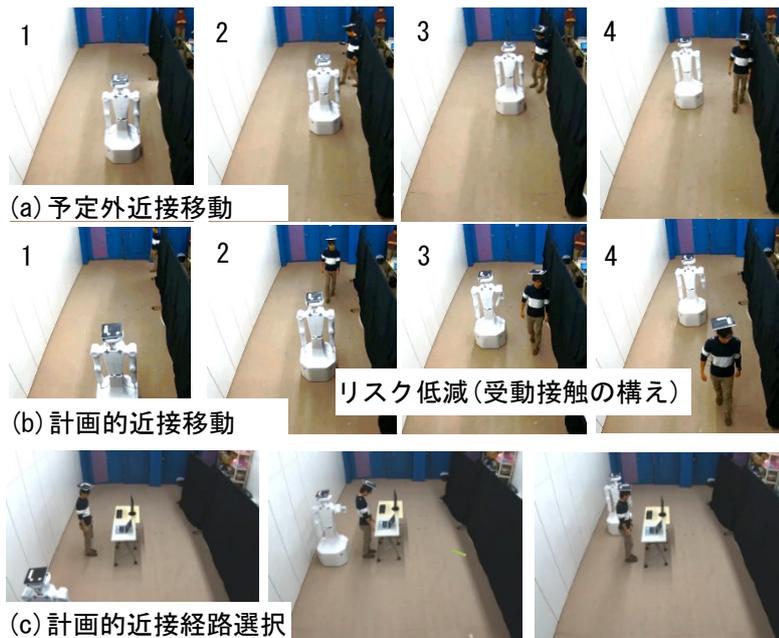


図3 ロボットの動作

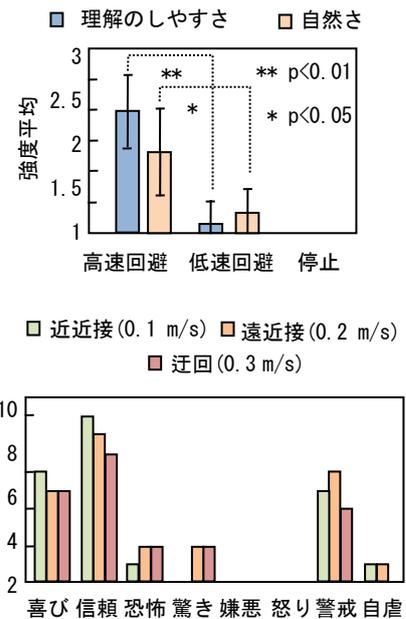


図4 ロボットの動作に対する受容性

影響が小さいほどよいと考え、接触による人の移動距離  $r$  を導入する。移動コスト  $E_T$  は次式となる。

$$E_T = \int_S^G X |v_{yt}^2 - v_{y0}^2| dt + \int_S^G Y |v_{xt}^2 - v_{xt-1}^2| dt + Zr \quad (1)$$

ただし、 $X$  は速度進行方向の重み係数、 $Y$  は回避方向の重み係数、 $Z$  は人干渉係数である。

### 2. 3. 実験結果とまとめ

近接移動手法の評価として以下の3点について確認した。

(1) 予定外近接移動：通路をロボットが進んでいる際に人が横道から現れるが、人を認知した際には既にPSに入っている状況である(図3(a))。PS内で停止する従来移動、提案手法であるPSからの高速または低速回避の3種類で比較した結果、高速回避が最も自然であるとの回答が得られた(図4上)。停止動作に対しては「わかりにくい/不自然/気が利かない」といったマイナスの意見が多かった。突発的なすれ違いの状況では、素早く避けるなどの分かりやすい動作が求められる。

(2) 計画的近接移動：ロボットが人を認知した際には十分な距離があり、回避を行える状況である(図3(b))。PS外移動(従来)、提案手法として遠いまたは近い接近移動を比較した結果、従来・提案手法ともに負の印象が得られなかった(図4下)。近い接近移動では、「注意深い/信頼できる」、一番適しているという意見も多かった。その理由として、ロボットが人とすれ違う際に、接触可能性を考慮して腕を上げ、声掛けを行ったうえで減速しながら移動をしたと考えられる。

(3) ロボットの経路選択：人に少し動いてもらわないと通れない経路と大回りになるが誰も邪魔せずに移動できる経路がある(図3(c))。2つの経路を移動した際の人の印象・感情を分析した結果、どちらの移動に対しても「自然」と感じていたが、提案手法の印象として「怖い」を選択した人もおり、「安全」では迂回移動の方が優れていることが分かった。しかし、第三者視点では、近接移動のほうが自然との意見も得られた。

以上より、接近移動を行う際には、接近のリスク推定を行い、働きかけにより調節を行った上で、ベネフィットを考慮した経路選択を行うことで、人に過剰な不快感を与えることなく近接移動が可能になることが分かった。

### 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] 林正晃, 大谷淳, 大和淳司, 亀崎允啓, 斎藤恭介, 濱田太郎, 櫻井絵梨子, 菅野重樹, “人共存型自律移動ロボットにおけるステレオカメラと機械学習を用いた周辺人物の状態認識および行動予測”, 電子情報通信学会 IE (画像工学) 研究会, 2022年3月.
- [2] M. Kamezaki, T. Yusuke, T. Kanada, M. Hirayama, and S. Sugano, “Reactive, Proactive, and Inducible Proximal Crowd Robot Navigation based on Inducible Social Force Model,” IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), vol. 7, no. 2, pp. 3922-3929, Feb. 2022.
- [3] 櫻井絵梨子, 亀崎允啓, 斎藤恭介, 濱田太郎, 金田太智, 菅野重樹, “タスク内容と人・環境との相互作用の予測に基づく自律移動ロボットの適応的ゴール位置探索手法に関する研究”, 第22回計測自動制御学会 SI 部門講演会論文集(SI2021), pp. 3416-3412, 2021年12月.
- [4] 櫻井絵梨子, 亀崎允啓, 平山三千昭, 斎藤恭介, 濱田太郎, 金田太智, 菅野重樹, “目的地周辺状況とタスク内容に応じた移動ロボットの動的ゴール位置探索手法の開発”, 第39回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2021), paper no. 2J1-05, 2021年9月.
- [5] 濱田太郎, 亀崎允啓, 斎藤喬介, 金田太智, 平山三千昭, オンライアン, 菅野重樹, “近接移動と譲り合い機能を備えた自律移動ロボットにおける移動効率性と社会受容性”, 第39回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2021), paper no. 2J1-04, 2021年9月.
- [6] 斎藤喬介, 亀崎允啓, 濱田太郎, 金田太智, 平山三千昭, オンライアン, 菅野重樹, “人共存型自律移動ロボットの統合的軌道計画システムの構築と実環境での長期間走行評価”, 第39回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2021), paper no. 2J1-03, 2021年9月.
- [7] 平山三千昭, 亀崎允啓, 斎藤喬介, 濱田太郎, 金田太智, 菅野重樹, “人パラメータ推定に基づく移動ロボットの動作パラメータ学習に関する研究”, 第39回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2021), paper no. 1F4-05, 2021年9月.
- [8] R. Ong, M. Kamezaki, Y. Li, and S. Sugano, “Cooperative Movement based Path Planning with a Mobile Robot in a Multi-Agent Environment Using Deep Reinforcement Learning,” Proc. Int. Symp. Swarm Behavior and Bio-Inspired Rob. (SWARM 2021), pp. 49-60, June 2021.

#### 4. 2. 総説・著書

---

#### 4. 3. 招待講演

---

#### 4. 4. 受賞・表彰

- [1] 2021年12月: SI2021 優秀講演賞, 第22回計測自動制御学会 SI 部門講演会

#### 4. 5. 学会および社会的活動

---

### 5. 研究活動の課題と展望

実機実験から, 提案手法により自然かつ安全にスタックをせずに人・ロボット双方の移動を実現できることがわかった. 今後は, ロボットの周辺に複数の人がいる状況で周囲の人に配慮した予定外近接移動を構築していく予定である.