

人とロボットが共存するコミュニティにおける
対人距離の規範を考慮して移動するロボットモデルの評価
Evaluation of Robotic Navigation Model
Considering Group Norms of Personal Space in Human-robot Communities

布施 陽太郎[†]
Yotaro Fuse

竹之内 宏[‡]
Hiroshi Takenouchi

徳丸 正孝[§]
Masataka Tokumaru

1. はじめに

今日、少子高齢社会の到来による労働人口減少に伴いロボットへの期待が高まっており、人がロボットと共生する社会の到来が予想される[1]。今後ロボットが活用されていく中、ロボットには人間に親しみを与えられるような人間らしい振舞いが求められ、ロボットの感情表現やジェスチャーを用いたやり取りといった社会的な振舞いについて研究されている[2]。加えて、パーソナルスペースを考慮することによって、人間に威圧感を与えずに移動するロボットの開発もなされている[3]。

人間が近づかれない距離を考慮するナビゲーションロボットの研究や、人の振舞いに適応するためのパーソナルスペースを考慮した立ち位置モデルの提案されている[3]。ロボット移動に伴う人間の不快感を低減させるため、従来ロボット移動に関する研究は対人距離を概ね 4 つのゾーンに分類して行われている[3]。

上記に加えて、社会的なロボットは表情や動作以外に集団内の和を保って振舞おうとする性質を考慮する必要がある。人間社会を生きる人間はその場に現れるその集団特有の暗黙のルールを感じ取ったうえで振舞う。そうして集団で共有される価値判断や行動様式の規準は集団規範と呼ばれ、集団規範の共有はメンバー間の情報交換に流動性を与え、他者の行動を予測しやすくする[4]。ロボットが人間社会に一層参入するためには人々が守る暗黙のルールを学習することは重要であり、ロボットが人間の作り出す集団規範を学習して振舞うための行動モデルが提案されている[5]。

人間社会のコミュニティの集団規範の具体例として、人と人が集団内で保つ距離感があげられる。人はパーソナルスペースと呼ばれる他者に近づかれて不快に感じる空間を持ち、その空間を常に保ちながら集団内で自らの立ち位置を決めている[6]。加えて、パーソナルスペースはその場の状況や環境といった社会的文脈に依存して動的に変動するが、人間はその変動に臨機応変に適応して移動可能である。

従来のロボットの移動に関する研究では対人距離を概ね 4 つのゾーンに分類することによって、ロボットは他者との保つべき距離感を考慮して移動している[3]。しかしながら、人とロボットが共存する社会では自律して移動するロボットが生活空間に現れると考えられる。したがって、共生するロボットに対する人々の不快感を減らし、他者と衝突せず効率良く移動するためには、自然にその場の距離感を守ることが必要不可欠である。人間集団内の対人距離は動的に変動し[6,7]、ロボットに対する人間の対人距離が変動するという報告があるが[8,9]、人間集団を取り巻く状況に依存して動的に対人距離を変動するロボットは未報告である。よって、ロボットが人のコミュニティに能動的に参

加する場合、コミュニティメンバが保ちたいと感じる距離に合わせて自らの立ち位置を決める必要がある。

そこで本研究では、先行研究[5]での提案モデルを利用し、ロボットが参加する人のコミュニティ内で、その場の人々の位置からその場に合った距離感をリアルタイムで学習し、自らの位置を決定する立ち位置決定モデルを提案する。提案モデルを搭載したロボットは自身とコミュニティ内の人々の位置情報のみを取得し、現在の適切な距離感を学習し、人々が持つ距離感に合うように自らの立ち位置を決定する。本研究では提案モデルが適切な立ち位置を発見可能かシミュレーションで検証する。シミュレーション内の人間に設定されたパーソナルスペースがコミュニティ内のメンバー間の親密さが深まるにつれ変化中、ロボットがパーソナルスペースを侵害する割合を計測する。

2. 提案手法

提案モデルは、人間のコミュニティ内のロボットがそのコミュニティのメンバが保ちたい距離をリアルタイムで学習し、自らの物理的な立ち位置を決定することを強化学習的手法において実現することを目的としている。

図 1 に立ち位置決定モデルを搭載したロボットの概念図を示す。ロボットは他者の位置情報を常に取得し、その場の最適な距離感を位置情報から導き出し、ロボットが移動可能な範囲内でメンバが保ちたい距離感を最も満たす位置に移動する、という一連の動作を繰り返す。

図 2 に x-y 平面上に存在する人とロボットの立ち位置の例を示す。図 2 において、H は人間、R はロボットを表している。図 2 左は各 H, R の距離感が遠いため、コミュニティの親密さがまだ低いことを表している。一方、親密さが徐々に深まった結果、図 2 右は互いの距離感が縮まり、物理的な小さい輪を形成している様子を示している。ロボットは人間たちが徐々に距離を詰めていく中、同様に人間から見て近すぎず遠すぎない立ち位置を発見し移動する必要がある。

2.1 観測する環境と選択できる行動

図 2 に示すような x-y 平面をロボットが観測する環境とし、ステップ t において人もしくはロボットが点 (x, y) 上に存在するという状態を s^t として表す。ロボットは自らの状態 s^t と他者の状態 s^t を観測して距離感を学習することにより、次ステップにおいて適切だと思われる状態 s^{t+1} に遷移する。ロボットが x 軸方向に n 、y 軸方向に m 移動した場合、それは行動 a_{nm} を実行したとみなす。つまり、ロボットは

[†] 関西大学大学院 Graduate School of Kansai University

[‡] 福岡工業大学 Fukuoka Institute of Technology

[§] 関西大学 Kansai University

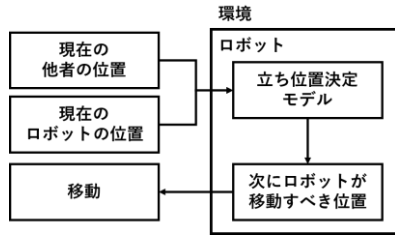


図 1 ロボット移動モデル図

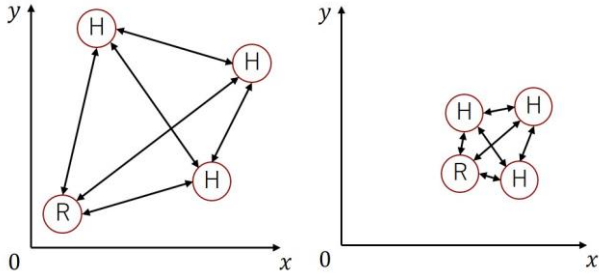


図 2 x-y 平面における人とロボットの立ち位置

任意の状態 s において、どの行動 a を実行するかを各ステップにおいて決定することにより移動する。

2.2 距離感の学習

本モデルの目的は人間が保つ距離に合わせてロボットが自らの立ち位置を決めることである。その時保たれている距離感を学習するために、ロボットは他者の位置情報 s^t から任意の 2 人の間の距離 d を導出し、どの程度の距離が現在最もコミュニティ内で保たれているかを判断する。ロボットの判断が周囲の人間が保ちたい距離に準じて行われるために、提案モデルでは価値関数 $V(d)$ と報酬関数 $R(d)$ が定義されている。 d はコミュニティ内の他者間の距離を表す。価値関数 $V(d)$ は距離 d を保つことの価値、報酬関数 $R(d)$ はあるステップにおける他者が保っていた距離感を保つことに対する報酬を表す。任意の距離 d' を入力とし、価値関数 $V(d)$ に代入したときに出力される値は、ステップ t において任意の距離 d' をロボットが人々と保つ価値を示している。時々刻々と変化するコミュニティ内で保たれる距離感を学習するための各ステップにおける更新式を式(1)、(2)、(3)に示す。

$$V(d) \leftarrow (1 - \alpha)V(d) + \alpha \left(R(d) + \gamma \max_{d'} V(d') \right) \dots \dots (1)$$

$$R(d) = \sum_i u(d - d_i) * \exp\left(-\frac{(d_i - d)^2}{2\sigma^2}\right) \dots \dots (2)$$

$$u(d_i - d) = \begin{cases} 0 & (d < d_i) \\ 1 & (d \geq d_i) \end{cases} \dots \dots (3)$$

式(1)中の α と γ は強化学習におけるパラメータであり、 α が学習率、 γ が割引率である。

コミュニティ内に n 人の人間のメンバが存在する場合、人間と人間間の距離 d は $n(n-1)/2$ 種類存在する。各距離を $\{d_i | i = 1, 2, \dots, n(n-1)/2\}$ とし、任意の距離 d_i において $R(d_i) = 1$ となるような報酬が足しあわされたものが価値関数 $V(d)$ の更新時に使用される。

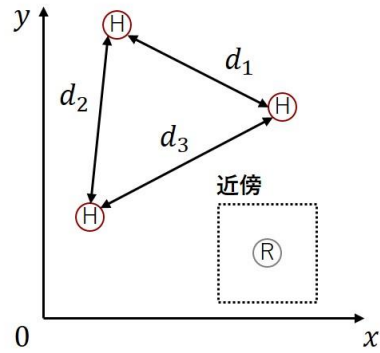


図 3 人が保つ距離 d_i とロボットの移動可能範囲

2.3 次の状態への遷移のための意思決定基準

状態 s であるロボットが人々から遠すぎたり近すぎたりする場合、ロボットは他者とほどよい距離感を保つために移動する必要がある。そこで、ロボットは自らの周囲に存在する近傍範囲のいずれかの点へ移動する価値 $Q(s, a)$ を基に、どの行動 a を実行し次の状態へ遷移するかを選択する。 Q 値は状態 s において行動 a を実行する価値を示している。したがって、 Q 値は図 3 に示される近傍範囲の中にある各点に、点 (x, y) を占有しているロボットが移動することの価値を表す。式(4)にステップ t における Q 値の導出式を示す。

$$Q(s, a) = \sum_i \exp\left(-\left(d_i - \operatorname{argmax}_{d'} V(d')\right)^2 / 2\sigma^2\right) \dots \dots (4)$$

価値関数 $V(d)$ において最も価値の高い出力が $\operatorname{argmax}_{d'} V(d')$ である。最も高い価値の値を持つ距離に近い距離 d' ほど 1 に近い値となるようなガウス関数が $n(n-1)/2$ 回足し合わせられることによって、任意の状態 s における任意の行動 a を実行する価値である Q 値は導出される。ロボットは導出された中で最も高い値を持つ Q 値の行動 a を選択し、次のステップにおける状態 s^{t+1} へと移動する。 Q 値を基にした意思決定によって、 s^t において (x, y) を占有していたロボットは s^{t+1} において $(x+n, y+m)$ を占有することになり、ロボットは移動を完了したことになる。

3. シミュレーションと評価実験

本シミュレーションの目的は、コミュニティ内の人々の間の親密さが高まり距離感が縮まっていく中で、ロボットも同様に距離感を保って自らの立ち位置を見つけながら移動可能か検証することである。また、シミュレーションでの移動経路を動画にしたものを観察する被験者による移動経路の評価実験を実施する。

本シミュレーションのシナリオでは、環境内のある位置に存在する人間に向かって複数の人間とロボットが近づいていくことでコミュニティが形成される場面を想定する。シミュレーション内の人間を模したエージェントを HA(Human Agent)、ロボットを模したエージェントを RA(Robot Agent)とする。そのシナリオにおいて、RA が複数の HA の保ちたい距離感を侵害する回数を計測する。

加えて、シミュレーションにおいて提案モデルを搭載したロボットが選択した経路を評価するアンケート実験を実施する。人間の被験者はシミュレーションのエージェントの移動経路を示す動画を観察し、どのエージェントがロボ

表 1. シミュレーション条件

環境	200*200 マス
エージェント数	4 種類(HA_1, HA_2, HA_3, RA)
エージェント移動範囲	5*5
ステップ数	300
エージェント初期位置	20 パターン
σ^2	100
α	0.1
γ	0.9

ットであるかを回答する。この時、被験者はどのエージェントがロボットであるかは知らされない。被験者がロボットの移動経路を見破れるかどうかを基に、ロボットの経路選択の人間らしさの評価を実施する。

3.1 シミュレーション環境と条件

表 1 にシミュレーション条件を示す。HA と RA を初期状態として $\{x, y | 0 < x \leq 200, 0 < y \leq 200, x \in \mathbb{Z}, y \in \mathbb{Z}\}$ の x - y 平面上に設定する。これは現実世界における $20m \times 20m$ の正方形の平面に相当する。エージェントは 4 体とし、それらの初期位置はお互いのパーソナルスペースを侵害しないよう実世界における $7.5m$ 以上離れた場所に配置されるように設定する。RA, HA は共に近傍を $5 * 5$ マスとし、1 ステップにおいて各エージェントの近傍内のどこにでも移動可能である。各エージェントは 1 ステップに 1 回移動可能であり、1 回のシミュレーションにおけるステップ数は 300 とする。また、エージェントの初期位置は 20 パターン用意して、種々の立ち位置パターンであってもロボットが変動するパーソナルスペースを考慮して移動可能か検証する。

3.2 人間エージェント(HA)の親密さと移動方法

人間とロボットのコミュニティが生まれ親密さが深まっていく流れをシミュレーションにおいて実現するために、親密度 *Closeness* というパラメータを全ての HA に共通する値として定義する。人間の見知らぬ人に対して保ちたいと感じる距離は $7.5m$ であることを考慮し、全ての HA が保ちたい距離が $7.5m$ から $1.0m$ の間で減少していくように親密度が上昇するように設定した。また、HA は保ちたい距離感を侵害しない場所、かつ最も既存コミュニティである HA に近くなるような近傍内の場所に移動するように設定した。

また、各ステップにおいて $[0.0, 1.0]$ の一様乱数が加算されることによって、親密度 *Closeness* は常に非線形的に増加し、徐々にコミュニティ内の親密さが向上していく様子を表現する。ステップ 0 において、親密度は *Closeness* = 0.0 で設定され、最大値を 100 とする。親密度が最大値をとった後は、これ以上親密度を増加させず、一様乱数の加算を行わない。また、各ステップにおける親密度から各 HA が保ちたい距離感の導出方法を式(5)に示す。

$$d_{HA} = 7.5 + ((1.0 - 7.5) * Closeness) / 10 \dots \dots (5)$$

人間の公的距離は $7.5m$ であることを考慮し、全ての HA が保ちたい距離は $7.5m$ から $1.0m$ の間で減少していくように設定した。そのような条件のもとで、HA は保ちたい距離感を侵害しない場所、かつ最も既存コミュニティである HA に近くなるような近傍内の場所に移動する。

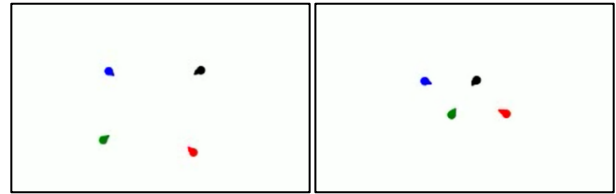


図 4 アンケート用動画の遷移

3.3 評価実験方法

図 4 にエージェントの移動経路評価アンケートに用いた動画の一例を切り取ったものを示す。各エージェントはしずく型で表現されており、それぞれに黒、赤、青、緑で着色している。エージェントは 4 体でそのうちの 1 体は移動しない黒色のしずく型エージェントとなっている。黒いしずく型エージェントに赤色、青色、緑色のエージェントが接近する中で、人間の被験者は 3 体の内のどのしずくが提案モデルを搭載したロボットエージェントであるかを回答する。

動画は 20 本用意しており、31 人の被験者(平均年齢 21.7 歳)は HA と RA が移動する方法を理解したうえでアンケートに答える。そういった条件のもとで、人間の被験者がロボットの移動経路を正確に把握できないのであれば、RA は人間らしい経路を選択できているとの仮定の下でアンケートを実施する。

3.4 シミュレーション結果

図 5 に各ステップにおける RA と各 HA の間の距離の平均と HA が持つパーソナルスペースへの侵入の割合を示す。左縦軸はメートル単位の RA から HA への距離を示すのに対し、右縦軸は各ステップにおける RA から最も近い HA が持つパーソナルスペースへの侵入を検知した割合を示す。

Personal Space は HA が保ちたい距離感の平均値の推移を示しており、初期ステップから親密度が向上することにより、各 HA が保ちたいと思う距離感は $7.5m$ から $1.0m$ にまで減少していくことが分かる。減少していく距離感 *Personal space* に対して、RA から 1 番目に近い HA、2 番目に近い HA、3 番目に近い HA と RA との距離の平均が示されている。それらはそれぞれ、「1st Closest HA to RA」「2nd Closest HA to RA」「3rd Closest HA to RA」として数値データが示されている。平均的に見れば、RA は各 HA が保ちたい距離感を守りながら距離を縮めていることが分かる。一方で、*Rate of Encroaching* の数値データは RA による各 HA が持つパーソナルスペースへの侵害が存在することを示している。このことから、平均的に RA はパーソナルスペースを守りながら移動可能であるが、あるステップにおいては HA に設定されたパーソナルスペースを侵害していることが分かる。

ここでパーソナルスペースを侵害している度合いを計測するために、図 6 に RA が最も近い HA の *Personal Space* へどの程度侵害しているのかを示す。図 6 によると全体の約 79% の割合で侵入は起こらず、侵入が起こってもその度合いは $20cm$ 以内に抑えられていることが分かる。

加えて、図 7 は人間と RA の移動経路を観察した人間被験者がロボットの移動経路を見破れるかどうかアンケートによって検証した結果を示している。横軸の respondent が

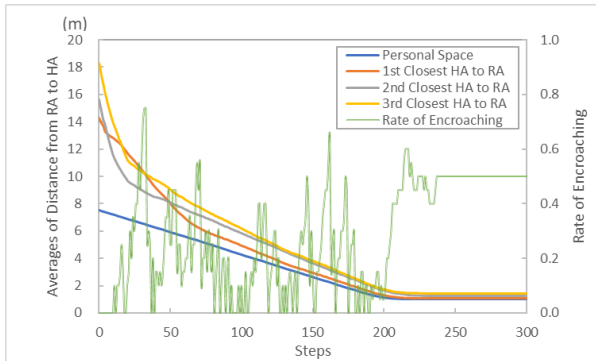


図5 各ステップにおけるRAとHAの間の平均距離とRAによるHAのパーソナルスペースへの侵入割合

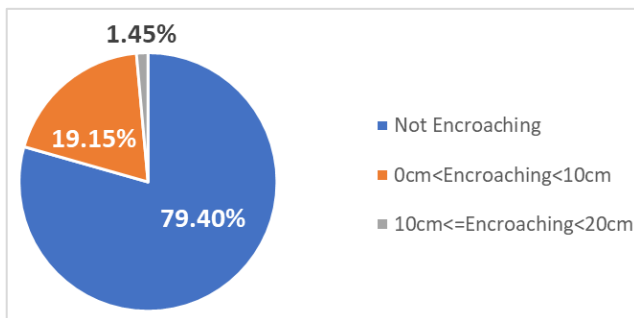


図6 RAのパーソナルスペースへの侵入度合い

各回答者の正答率で、questionnaire が各移動経路の正答率を示しており、人間の被験者はRAがHAの動作を観察することのみによって、自らの立ち位置を決定して移動していることを知らされたうえでアンケートに取り組んだ。各回答者の正解率と各移動経路の正答率も同様に平均正答率は40%前後となっており、人間の被験者はエージェントが移動している動画を観るだけでは、3つのエージェントからロボットエージェントの移動経路を見つけ出すことが難しいことが分かる。

3.5 考察

シミュレーション結果から、コミュニティ内の各HAが親密度0である状況、言い換えると初対面の状況から親密さを深めるに従い、保ちたい距離が縮小する中、RAは約79%の割合でPersonal Spaceを守りながらコミュニティに参加するために移動することが可能であることが分かった。Personal Spaceを守って移動できない場合においても、ロボットは20cm以内の侵害に留めている。したがって、ロボットはコミュニティ内の保たれるべき距離感の変化が起きている中でも人々から遠くも近くもない地点を発見可能である。加えて、図7より人間の被験者は動画の情報を基にロボットエージェントの移動経路を判断することが難しいことがわかる。よって、ロボットは人間らしい違和感のない移動経路を選択して変動するパーソナルスペースを守りながら移動することが可能になっていると言える。

4. まとめ

本研究はロボットが人のコミュニティ内のメンバとして参加する場合、その場の人々の位置からその場に合った距離感を学習し、自らの位置を決定するモデルを提案するも

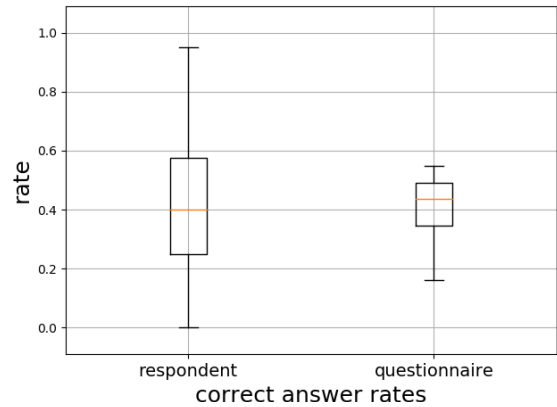


図7 RAの選択経路についてアンケートの正答率

のである。人間はコミュニティ内において他者との距離を親密さや社会的文脈といった構成要素に依存して決定する。そこで、ロボットと人が共存するコミュニティにおいて、ロボットは人々が持つ他者との距離感を学習し、その場の距離感に合わせて自らの立ち位置を決定する必要がある。そのために、本研究は立ち位置決定モデルを提案し、有効性を数値シミュレーションによって検証した。シミュレーションの結果、ロボットはパーソナルスペースを害さずに移動することが可能で、そのロボットが選択した移動経路は人間から見ると不自然に映りにくいと言える。

今後は、立ち位置決定モデルの改良を進めるとともに、提案モデルを実ロボットに搭載し、人とロボットのコミュニティにおいて距離が適切に保たれるか調査する。また、その場合の人々の振舞いにも注目し、ロボットがコミュニティ内の人間の動的な移動の仕方に適応して移動可能か調査する。

参考文献

- [1] Dell Technologies, "The Next Era of Human-Machine Partnerships," 2017. http://www.iftf.org/fileadmin/user_upload/downloads/th/SR1940_IFTFforDellTechnologies_Human-Machine_070717_readerhigh-res.pdf
- [2] F. Hegel et al., "Understanding social robots," 2009 Second International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, pp.169-174, 2009.
- [3] T. Kruse et al. "Human-aware robot navigation: A survey," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 61, No. 12, pp.1726-1743, 2013.
- [4] D. C. Feldman, "The development and enforcement of group norms," Academy of management review, Vol. 9, No. 1, pp. 47-53, 1984.
- [5] Y. Fuse et al., "A Robot Model that Obeys a Norm of a Human Group by Participating in the Group and Interacting with its Members," IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.E102-D, No.1, pp.185-194, 2019-01.
- [6] E. Sundstrom et al., "Interpersonal relationships and personal space: Research review and theoretical model," Human Ecology, Vol.4, No.1, pp.47-67, 1976.
- [7] M. Cristani et al., "Towards computational proxemics: Inferring social relations from interpersonal distances," IEEE Third International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust and IEEE Third International Conference on Social Computing, pp.290-297, 2011.
- [8] K. Tanaka et al., "Change of personal space induced by operation of android robot synchronized with operator," Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2013.
- [9] Y. Kokubo et al. "Influence of approaching patterns of telepresence robot for personal space," 2015 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAD), pp.221-226, 2015.