

熱拡散モデルに基づく心理空間と軌道生成 Heat diffusion model for personal space and trajectory generation

小林眞丈¹⁾ Apichaya Mongkolphinyopas²⁾ 三枝 亮¹⁾
Masatake Kobayashi Apichaya Mongkolphinyopas Ryo Saegusa

1 はじめに

少子高齢化に伴い、介護職の需要が増加している。その一方で介護従事者の現役世代(20~64歳)の減少が大きな問題となっている。対策としてAIやロボットを用いたサービス改革が期待されているが、ヘルスケアロボットは入居者に不安や抵抗感を与える可能性がある。なかでも自律移動ロボットが対人業務を行う際には、接近時に与える心理的な抵抗感を考慮する必要がある。この問題を解決するにあたり、パーソナルスペース(以降PSと記す)に着目する。PSは人が他人とコミュニケーションをする際に無意識的にとる空間であり、他人に侵入されると不快な感情を抱く領域である。このPSは様々な要因により個人差がある。また、前方に比べ後方のPSが大きくなるという共通の傾向がみられる。本研究では、ロボットが個人と相互作用する際の最適な接近経路を見つけ、不快感を最小限に抑え、親しみやすさを最大化することを目的とする。これを実現するため、ロボットが移動する際にPS、視野、接近速度などの要素を考慮する。

PSは人間の心理学や社会学に深く根差した概念であり、社会的相互作用の中で個人が自分の周囲に保つ物理的、心理的な境界線を与える。PSの距離は個人差や状況など様々な要因に影響される。個人間の空間的な距離の研究である近接学では、PSを4つのゾーンに分け、それぞれ親密距離、個体距離、社会距離、公的距離と定めている。これらのゾーンは相手との関係性により決定され、例えば親密距離は家族や恋人等の親しい相手ととる距離であり最も近い距離である。一方で公的距離は一切関係性のない相手ととる距離であり最も遠い距離である。一般に、他人と一対一でのコミュニケーションを行う際にとる距離は1~2mと言われている。一方で、ロボットを相手とした際にとる距離は人間と比べて距離が短くなると言われているが、これはロボットのサイズやデザイン、状況、個人差によって変動するとされている。また、前方に比べ後方のPSが大きい、すなわち最近接距離が遠いということが確認されている。

2 提案手法

2.1 軌道生成手法

経路計画方法は大きく分けてクラシックな手法とヒューリスティックな手法の2種類に分かれる。クラシックな手法はダイクストラ法のような決定論的なアルゴリズムに基づいて軌道を求める方法である、目標地点への経路が存在する場合確実に最短経路を生成するという特徴を持つ。一方でヒューリスティックな手法は、ヒューリスティック関数を用いて推定を行うA*アルゴ

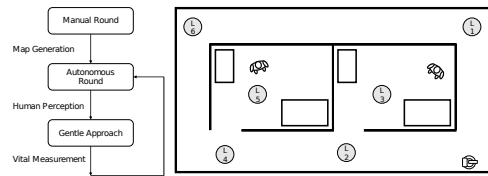


図1 環境マップと巡回アルゴリズムの概要

リズムのような最短経路を予測して生成する手法である。推定のため最短ではない可能性を持つが、生成にかかる時間が少ないという特徴を持つ。クラシックな手法の中の一つに人工ポテンシャル法がある。これは障害物に斥力のポテンシャルを、目標地点に引力のポテンシャルを設定し、それを足し合わせたポテンシャルフィールドでロボットの経路を作成する方法である。

2.2 環境マップと巡回アルゴリズム

自律移動ロボットの巡回には、巡回の目的に基づいた環境のマップが必要である。今回は病院や介護施設の室内環境を仮定し、図1に示すようにいくつかの部屋を含む。巡回の目的は、居住者及び入居者に対して、インタラクションを行うことである。ロボットの巡回は(1)手動巡回、(2)自律巡回、(3)接近の3つのステップで実現される。

ロボットは人による操作や先導によって巡回を行い、環境マップを生成する。ウェイポイントはその際に人から教示される。教示による巡回の後、ロボットはウェイポイントを使用してマップを利用し、自律的に巡回する。ロボットが自律巡回中に人を見つけた場合、接近して作業を行う。環境マップは教示による巡回中にSLAMアルゴリズム(同時定位と地図作成)を用いて作成できる。ウェイポイントは人がその場で手動で指定する他に、生成されたマップ上に後でマークすることもできる。例えば図1では、ランドマークL1, L2, L3, L2, L4, L5, L4, L6, L1を設定しており、この順番でランドマークを通るように巡回を行う。ロボットが巡回中に人を見つけた場合、ロボットは接近する人の位置に一時的なウェイポイントを挿入する。ロボットは顔認識や骨格認識を用いて人を検出し、人体の向きを推定できるものと仮定する。人とのコミュニケーションの後、ロボットは元の巡回経路に戻り、巡回を再開する。

2.3 熱拡散とポテンシャル

本稿で提案する軌道生成の原理は、物質中に熱が拡散する過程から着想を得ている。障害物を低温の物質、目標地点を高温の物質として表現し、低温から高温の領域へとロボットが移動するような軌道を生成する。熱拡散の原理によってポテンシャルフィールドを生成する利点として、障害物が最も高いポテンシャル、目標地点が最も低いポテンシャルであることが保証される。このため、障害物の付近を常に回避し目標に到達する経路が得

1) Dept. of Information Systems, Kanagawa Institute of Technology

2) Dept. of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University

られる。熱拡散は以下の式で定義される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + q \quad (1)$$

$$= k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q \quad (2)$$

ここで、 T は温度、 q は熱、 k は熱伝導率とする。
次に式 (2) の離散化を行う。

$$T(x, y, t) = T(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) = T_{i,j,n} \quad (3)$$

ここで、 Δx と Δy は空間の刻み幅、 Δt は時間の刻み幅、 i, j, n はそれぞれ空間 x, y と時間 t の離散インデックスである。次に、離散化された空間における温度の変化を表す。 $(x + \Delta, y, t)$ における温度は次のように表現される。

$$\begin{aligned} T(x + \Delta x, y, t) &= T(i\Delta x + \Delta x, j\Delta y, n\Delta t) \\ &= T((i + 1)\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) \\ &= T_{i+1,j,n} \end{aligned} \quad (4)$$

同様に、 $(x, y + \Delta y, t), (x, y, t + \Delta t)$ における温度は次のように表現される。

$$T(x, y + \Delta y, t) = T_{i,j+1,n} \quad (6)$$

$$T(x, y, t + \Delta t) = T_{i,j,n+1} \quad (7)$$

次に、連続表現から離散表現への変換を適用することにより次のようになる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j,n+1} - T_{i,j,n}}{\Delta t} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i+1,j,n} + T_{i-1,j,n} - 2T_{i,j,n}}{(\Delta x)^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{i,j+1,n} + T_{i,j-1,n} - 2T_{i,j,n}}{(\Delta y)^2} \quad (10)$$

簡略化のため、同じグリッドサイズを以下のように定義する。

$$\Delta x = \Delta y = \Delta h \quad (11)$$

また周囲の 4 つのグリッドポイントの温度の平均を次のように定義する。

$$k' = \frac{4k\Delta t}{(\Delta h)^2}, \quad (12)$$

$$\bar{T}_{i,j,n} = \frac{T_{i+1,j,n} + T_{i,j+1,n} + T_{i,j-1,n} + T_{i-1,j,n}}{4} \quad (13)$$

これらの離散化式を用いることで、次の漸近式を得る。

$$T_{i,j,n+1} = k'(\bar{T}_{i,j,n} - T_{i,j,n}) + q_{i,j,n} \quad (14)$$

この式は現在の温度と熱から次の時間ステップの温度を与える。

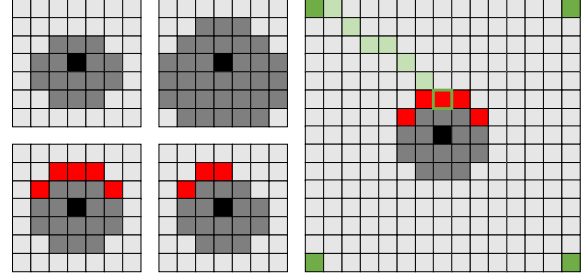


図 2 個人に対応したグリッドパターン。(左上) 立位、(中央上) 車いす、(左下) 立位 (両眼視野)、(中央下) 立位 (単眼視野)、(右) 4 か所の出発地点と立位 (両眼視野) の個人への経路生成。

2.4 目標と障害物の設定

本稿では目標物を熱 $q = 1$ 、回避すべき障害物を温度 $T = 0$ と定義する。

$$q_{i,j,n} = 1 \quad \text{for } \forall n \wedge (i, j) \in D_t \quad (15)$$

$$T_{i,j,n} = 0 \quad \text{for } \forall n \wedge (i, j) \in D_o \quad (16)$$

ここで、 D_t と D_o はそれぞれ目標と障害物の空間領域を表す。さらに、図 2 に示されるように、個人に対応したグリッドパターンを導入する。図の赤色の領域は目標点、灰色と黒色の領域は回避点を表す。目標点は熱 $q = 1$ を持ち、回避点は温度 $T = 0$ を持つ。このようなグリッドパターンを用いることで、ロボットの接近経路を人の PS や視野に適した経路に設定することができる。例えば、右側視野の人の場合、右側の視野寄りにロボットは接近する。対照的に、両目視野の人の場合、視野中心に向けてロボットは接近する。回避点の領域を確保することでロボットが人の体の中心から適切に離れて接近するように設定できる。例えば、立位の場合、車椅子に座っている場合と比べてパーソナルスペースが小さく設定できる。車椅子に座っている場合は車椅子の形状に合わせて回避領域を広く設定できる。

シミュレーションによる左眼視野と両眼視野の接近軌道を図 3 に示す。図に示されるようにロボットが視野に配慮して回り込んで人に接近することができる。

障害物がある場合の接近軌道について、図 4 にシミュレーションの結果を示す。このシミュレーションでは、ロボットの初期位置を (10, 10)、目標の位置を (35, 35) とし、対象が +Y 軸方向に向くように設定した。また、障害物は (15, 20) と (33, 33) に配置した。図 4(b) には、左眼視野の移動経路を示す。グリッドベースでの熱拡散では移動経路が上下左右の 4 方向のみの移動となるため、実際のロボットが滑らかに移動できるように、三次元スプライン補間によって軌道の補正を行った。補正の結果、図 4(c)(d) のような滑らかな軌道が得られた。

3 シミュレーション実験

3.1 実験概要

対人実験の予備実験として最適な移動経路を検討するために、CoppeliaSim に基づいた 3D シミュレータを実装した。CoppeliaSim は物理エンジンを用いたシミュレーションを実現するツールであり、シミュレーションの現実感を大幅に向上させる。本シミュレータを用いて、生成された経路が実際の状況で使用可能か、あるいは改良が必要かを評価できる。シミュレーションでは、ター

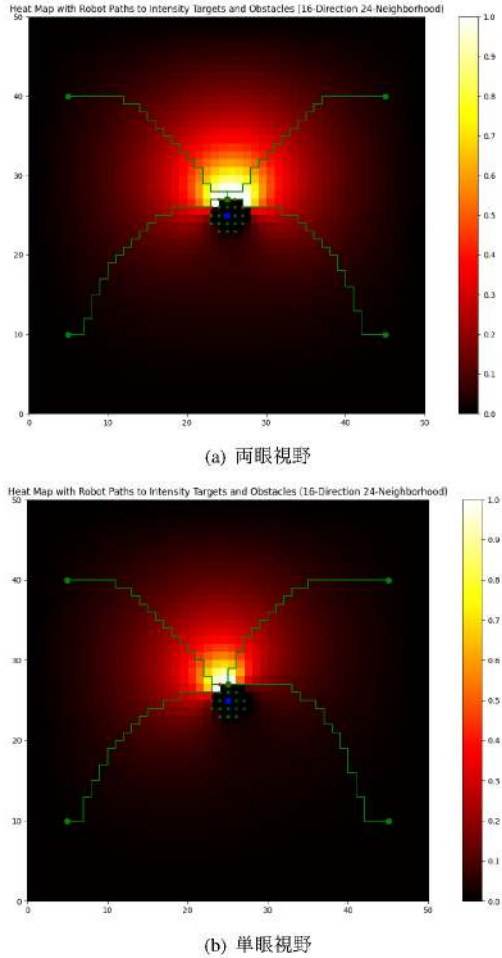


図 3 単眼、両眼視野での温度分布と接近軌道

ゲット 個体とベッド、キャビネット、テーブル、椅子などの多様な障害物が配置されており、ロボットは 0.8m/s の速度で移動する。これは人間への接近に最適な速度である。この実験では、立位状態と座位状態の 2 パターンの状態で実験を行った。

被験者が注視するモニタ画面は主に 2 つのウィンドウで構成されている。部屋全体のカメラビューと、実験協力者の視界を表示する右上のウィンドウである。協力者の視界は 60 度の視野角を持つ。このウィンドウは、立位座位それぞれのシミュレーション結果を表示し、それぞれ双眼と単眼の条件を示している。図 5 は、両方の視野角条件を示している。

3.2 実験条件

実験では、協力者の視界画面に 3D シミュレーションを使用し、対象人物に接近するための最も適した距離を調査した。接近距離は 0.8m、1.2m、1.6m、および 2.0m とし、立位、座位状態の 2*4 の計 8 パターンで実験を行った。また、実験協力者には 60~80 歳の、計 5 人に参加していただいた。実験後、協力者に対してアンケートを行い、0~5 のスケールで記入を依頼した。0 は極端な不快感、1 は非常に不快、2 は不快、3 は中立、4 は快適、5 は最大の快適さを示す。また実験に関する所感も回答してもらった。

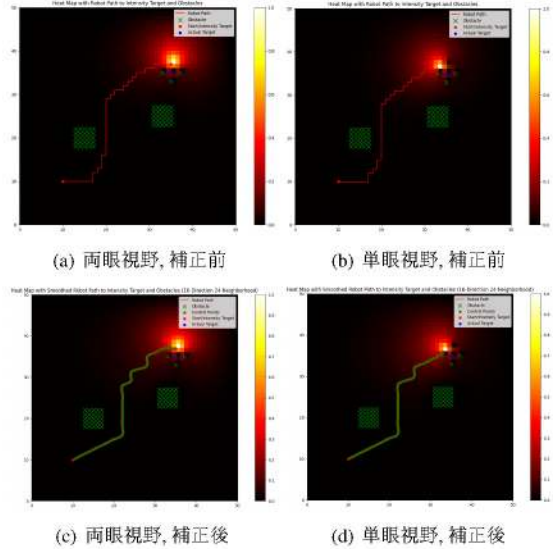


図 4 単眼視野、両眼視野への 4 方向および補正後の移動経路

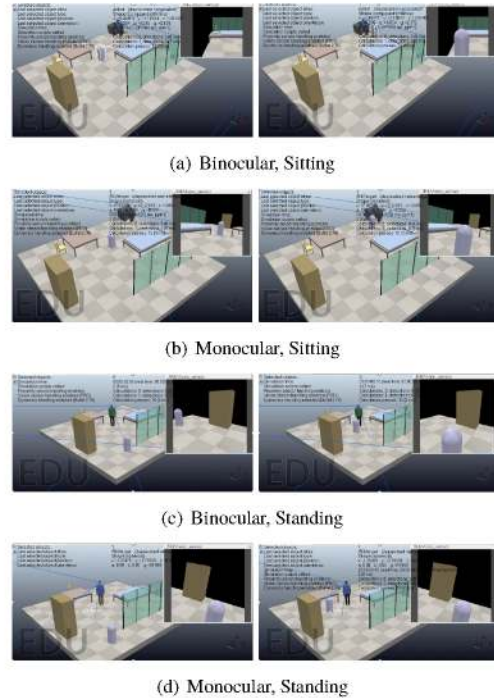
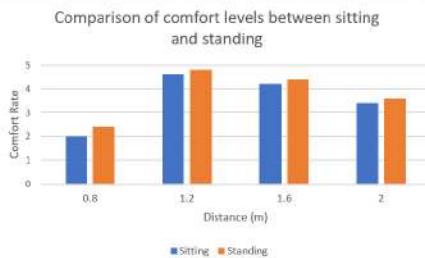
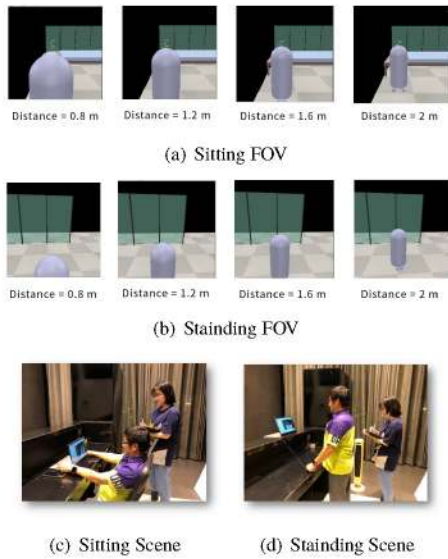


図 5 3D シミュレーションを用いた立位、座位に対する接近

3.3 実験結果

実験の結果、ロボットが人間に接近するための最適な距離は 1.2m であることが判明した。また、立位、座位の両方で同様の結果が得られた。また参加者から得たコメントには以下のようなものがあった。

- 1.6m を超える距離でロボットが停止した場合、ロボットと快適にコミュニケーションが取れるかどうかについて不安がある。
- 表示された画面では視点を調整できないため、実際のロボットを使用した場合に快適度が異なると思われる。



(e) Comfort Levels

図 6 実験結果

4 実機実験

4.1 実験概要

ヘルスケアロボット Lucia (ルチア) を用いた実機実験を行った。ルチアを図 7 に示す。本機は主に病院や介護施設等での運用を目的とした自律移動ロボットであり、バイタル計測装置や 2DLidar 等を備える。前章のシミュレーション実験で使用したロボットはこの機体をモデルとして再現したものである。本実験の目的はシミュレーション実験の際に得られた『実環境では快適に感じる距離が変わる可能性がある』という意見を検証し、その結果をシステムに反映させることである。

本実験では前章のシミュレーション実験で行った実験内容を実環境で再現した。実験協力者は立位、座位の 2 パターンで実験を行い、距離 0.8m、1.2m、1.6m、および 2.0m までロボットを接近させる。また、ロボットの速度はシミュレーションと同様に 0.8m/s とし、協力者から見えない位置から開始するものとする。軌道については、直線移動とその場旋回で構成される簡単な接近軌道を用いた。ロボットへの指令値に用いた軌道軌道を図 8 に示す。なお、実環境ではロボットの指令値による軌道と実際に移動した軌道、及び、最接近距離には多少の誤差が含まれる。

4.2 実験条件

実機実験の条件はシミュレーション実験の条件に加えて、ロボット接近時に視野を固定したパターンと、視野を自由に動かして良いパターンを追加する。前者は同条件におけるシミュレーション環境と実環境の差を確認す



図 7 ヘルスケアロボット Lucia (ルチア)

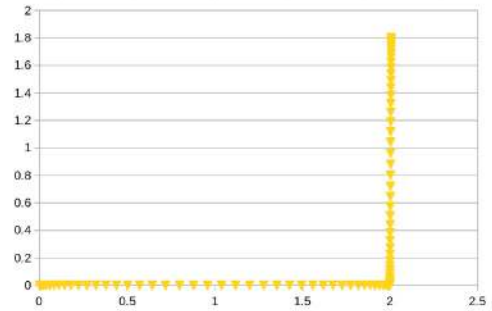


図 8 実機実験での接近軌道 (指令値)

る目的があり、視野を動かすことのできないモニタ画面の注視と同条件を再現するためのものである。後者は実際のロボットでなければ実現できない条件であり、視野の調整の有無による快適度の差について調査するものである。

計測後にはアンケートを実施した。このアンケートでは各接近を比較し、1~4 の順位を記入するように依頼した。実験協力者に配布した実験説明書を図 9 に、アンケートを図 10 に示す。ロボットは実験協力者とやり取りをするために接近し、その時の快適性を評価するという想定で実験を行った。また、本実験では快適性の定義を『ちょうど良いロボットとの距離である』と説明した。接近の目的を曖昧にした理由として、本システムは対人の会話やバイタル計測等のための接触を行う前段階の接近であり、本実験では具体的な接近理由による実験結果への影響を回避するためである。今回の実験は 20~24 歳の男子及び大学生 5 名に対して実施した。

実験風景を図 11 に示す。ロボットは被験者から 3.6m 程度離れた位置から接近する。ロボットの移動開始地点は接近距離に応じて 0.2~0.6m 程度変動する。また、協力者から見て左奥には撮影用のカメラ、およびカメラ操作のための協力者が存在していた。視野の固定のため、立位状態では図 12 のようにテーブルの上に頭部固定用の器材を設置したものを使用した。座位状態では視野の固定にヘッドレスト付きの椅子を使用した。

4.3 実験結果

立位及び座位と視野移動の有無に関する 4 パターンの結果を図 13 に示す。視野を固定した立位状態では 1.6m、それ以外の状態では 1.2m が最も快適であるという結果が得られた。また、「2.0m は遠すぎる」「0.8m は近すぎる」「目線が合うと、ロボットの距離が多少近くても気にならない」「0.8m と 1.2m でどちらがちょうどいい距離か迷った」「何をするか分からないので、少し遠めの位置で停止してほしい」等のコメントが得られた。

各パターンでの距離に対する快適性をまとめたグラ

実験概要

- ・今回の実験は、ロボットが各距離にまで接近した際の心理的変化を調査する実験です。
- ・距離は0.8, 1.2m, 1.6m, 2.0mの4種類です
- ・立位、座位の2種類の姿勢と、視野の移動の可否、計4パターンで実験を行います。
- ・ロボットの接近中は移動しないでください。
- ・ロボットが停止したら、担当者が今回の接近距離を伝えます。すべての接近距離を体験後、2枚目のアンケートに従って記入してください。

図 9 実験説明書

実験アンケート

各パターンの状態で、接近する各距離の快適性を比較し、最も快適だと思う距離に「1」を、次に快適だと思う距離に「2」を、というように順位を4までつけてください。

姿勢/距離	0.8m	1.2m	1.6m	2.0m
パターン1 立位 (視野固定)				
パターン2 座位 (視野固定)				
パターン3 立位 (視点移動可)				
パターン4 座位 (視点移動可)				

感想、意見があれば以下にお書きください

ID: _____

図 10 アンケート

フを図 ??に示す。シミュレーション実験を再現した視野固定の条件では、座位状態では 1.2m、立位状態では 1.6m が最も快適な距離と判断された。この結果はシミュレーション実験とは異なっていた。この条件ではロボットとの距離が近づくほどロボットの全容が分かりづらくなっており、ロボットの全容が把握できる 1.6m 以上が快適な距離と判断されたと考えられる。同様の理由により、視界の端でしかロボットを捉えられない立位での視野固定の条件では、0.8m 接近では全パターンでの全距離と比較して最も快適性が低いという結果となった。シミュレーション実験では、0.8m よりも 2.0m のほうが快適であるという結果が示唆されたが、実機実験では立位で視野固定の条件以外は逆の結果が得られた。しかしこれら 2 つの距離は標準偏差が大きく、特に 0.8m では低く評価した実験協力者と高く評価した実験協力者に分かれた。これには事前に接近意図を曖昧にしたためと考えられる。例えば 0.8m では接触するのにちょうど良い距離であるという印象を受けるが、その一方で会話には少し近いという印象を受ける可能性がある。接近理由を被験者の想像に委ねたための結果と考えられる。2.0m では一部を除き低く評価されているが、2m の距離



図 11 実験風景



図 12 立位状態の固定具

で行うタスクが想像できなかったことが要因として考えられる。

5 結論

本研究では個人の空間特性を考慮したロボットの接近方法の実現を目的とし、熱拡散モデルを用いてパーソナルスペースと障害物を統合することで、人が親しみやすい接近軌道の生成を実現した。シミュレーション実験では CG 環境内で立位または座位の視野を被験者に提示し、ロボットの適正距離を評価した。実機実験では視野に自由度がある条件での快適な接近距離について検証した。

シミュレーション実験では 60~80 歳の実験協力者を対象として実施し、人間とロボットの相互作用において好ましい距離についての知見を得た。結果よりロボットが人間に接近するための最適な距離は 1.2m であり、それに続く距離は 1.6m、2.0m、および 0.8m であることが示唆された。立位状態と座位状態では大きな差は見られず、同様の結果が得られた。

実機実験では、20 代学生の実験協力者を対象として実施した。実験協力者のコメントによると、ロボットが 1m 以内に接近すると不快感が生じたとの報告があり、PS の心的傾向を支持する結果であった。一方、1.6m を超えると距離を増やしても快適度は必ずしも向上せず、

パターン/距離	0.8	1.2	1.6	2
パターン①	1.2	3	3.4	2.4
パターン②	2.4	3.2	3	1.4
パターン③	2.6	3.2	2.8	1.4
パターン④	2.4	3.6	2.4	1.6

図 13 快適性の平均

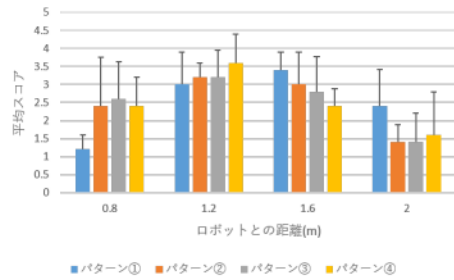


図14 各パターンでの快適性

1.2m から 1.6m で快適度が低下した。コメントによると、1.6m を超えると距離が遠すぎてロボットとの接触が少なく感じる事が示唆されている。

今後ロボットが普及する分野として、レストランや清掃サービス、ホスピタリティ業界などがあり、親しみを持つことができるロボットの存在は重要となる。一方で、ロボットに対する PS はロボットへの慣れも大きく影響していることが考えられ、さらなる調査検証が必要である。

参考文献

- [1] Sabri, Sabiroh Md, et al., *Major Trends in Ageing Population Research: A Bibliometric Analysis from 2001 to 2021*, International Academic Symposium of Social Science 2022, vol.82, no.1, 2022.
- [2] Alvarez, Pablo, *Charted: The World's Aging Population from 1950 to 2100*, Visual Capitalist, 29 May 2023.
- [3] Culbertson, Daniel, *US Healthcare Labor Market Update - 2023 Q2*, Indeed Hiring Lab, 19 July 2023
- [4] Healthcare, Gist, *Shortage of Healthcare Workers amid High Demand for Jobs*, Gist Healthcare, 27 Aug. 2021,
- [5] Liu, Lixing, et al., *Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect*, Expert Systems with Applications, 227 (2023): 1-30
- [6] Wang, Yunfeng, and Gregory S. Chirikjian, *A new potential field method for robot path planning*, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE (2000): 977-982.
- [7] Hills, Jeremy, and Yongmin Zhong, *Heat diffusion method for intelligent robotic path planning*, 20th ISPE International Conference on Concurrent Engineering. IOS Press, (2013)
- [8] Hecht, Heiko, et al., *The shape of personal space*, Acta psychologica 193 (2019): 113-122.
- [9] Neggens, Margot ME, et al., *Determining shape and size of personal space of a human when passed by a robot*, International Journal of Social Robotics 14.2 (2022): 561-572.
- [10] Howard, Ian P., and Brian J. Rogers, *Binocular vision and stereopsis*, Oxford University Press, USA (1995)
- [11] Shaqiri, Albulena, et al., *Gender differences in visual perception*, Journal of Vision 16.12 (2016): 207-207.
- [12] Neggens, Margot ME, et al., *The effect of robot speed on comfortable passing distances*, Frontiers in Robotics and AI 9 (2022): 1-15.