

# 追従ロボットとユーザの位置関係が 及ぼす心理的影響の調査

前原 啓太<sup>1,a)</sup> 藤波 香織<sup>2,b)</sup>

**概要:** 近年、ロボティクス技術の進歩に伴い、日常生活の中で人間と密接に関わり合うロボットシステムが増加している。自律移動ロボットが人間の社会空間に浸透するために、人間の挙動を認識し適切な追従行動を行うことは極めて重要である。ここで、人同士のコミュニケーションにパーソナルスペースと呼ばれる快適に対話するための距離感が存在するように、人とロボットのインタラクションにおいてもパーソナルスペースが存在することが分かっている。そこで、距離と角度のパラメータを変化させることで任意の位置で追従を行う人物追従ロボットシステムを開発した。本研究では、追従ロボットがユーザとの位置関係によって与える心理的影響を理解し、ユーザにとって最適な追従位置を明らかにした。

**キーワード:** 自律移動ロボット, 追従制御, 因子分析, ROS

MAEHARA KEITA<sup>1,a)</sup> FUJINAMI KAORI<sup>2,b)</sup>

## 1. はじめに

近年、自律移動可能な警備用ロボットや家庭用掃除ロボットなどの開発が盛んに行われている。これらは主に人間の仕事や生活を補助し、日常生活の支援を行うことを目的としている。そのような日常生活の場面において自律移動ロボットに求められる機能の1つに人物追従が挙げられる。自律移動ロボットが人間の挙動を認識し適切な追従行動を行うことは、日常生活の中にロボットが浸透するために極めて重要といえる。このようなロボットが対象人物を追跡する研究はこれまでに数多く行われているが、それらの多くはロボットとセンサの新たな組み合わせによる追跡方法に関する研究 [1] や独自の追従アルゴリズムを評価する研究 [2] [3] であり、追従ロボットの性能向上に焦点が置かれている。このため、追従される人間の感情的作用に関しては明らかになっていない。

人同士のコミュニケーションにはパーソナルスペースと

いう快適に対話を行うための距離感が存在するように、人とロボットのインタラクションに関してもパーソナルスペースが存在することが分かっている [5]。今後、人とロボットが共存する社会がより一般的になると考えられる中で、人間の社会環境でロボットが共存するためには、ロボットと人との間に適切な身体的・心理的距離を確立する必要があると考えられる。

本研究では実際に人物追従可能な移動ロボットを用いて、追従ロボットがユーザを追従する際の追従距離と追従角度を変化させることで、追従ロボットがユーザに与える心理的影響を理解し、追従時のユーザにとって最適な追従距離と追従角度を明らかにすることを目指す。そして、高齢者の見守り [6] やショッピングモールやスーパーマーケットなどで利用可能な追従運搬ロボット [7] のような日常生活に浸透する追従ロボットを開発することを目的とする。

本論文の構成について説明する。2節では、本研究に関連のある先行研究について述べ、3節では開発した追従ロボットシステムについて述べる。続く4節では追従ロボットの性能評価を行い、実験の精度を検証する。また、5節ではロボットを主観的に評価するために因子分析によってロボットの評価項目を決定する。6節ではユーザ評価実験を行い、その結果について7節で考察を行う。最後に8節で本論文のまとめを行なう。

<sup>1</sup> 東京農工大学大学院 工学府 情報工学専攻  
Department of Computer and Information Sciences, Tokyo  
University of Agriculture and Technology

<sup>2</sup> 東京農工大学大学院 工学研究院 先端情報科学部門  
Department of Computer and Information Sciences, Tokyo  
University of Agriculture and Technology

a) s183708x@st.go.tuat.ac.jp

b) fujinami@cc.tuat.ac.jp

## 2. 関連研究

Obaid らは、ロボットや人の姿勢が個体距離に及ぼす影響について調査した [4]。直立・着座した状態の人やロボットにもう一方が接近する実験を 4 条件について行った。その結果、座っているロボットに人間が接近する場合、ロボットが立っている時と比較して人の個体距離が短くなることが明らかになった。したがって、今後の研究ではロボットの姿勢を考慮して対人距離を検討する必要がある。しかし、この実験で用いられたロボットが高さ 58 cm の小型ヒューマノイドロボットであることから、全てのロボットに対して姿勢が個体距離に影響を及ぼすとは言い難いと考えられる。

ロボットの接近による心理的影響に関する研究として中島らは、対面した移動ロボットが人間に接近する速度を変えた時の心理的影響を調べる実験を行った [5]。この実験では、被験者に「これ以上近づいて欲しくない」と感じた距離の申告と被験者の心拍数の変化から個体距離の導出を試みている。実験結果から、個体距離は個人によって差が大きいものの、移動速度に比例して大きくなる傾向が全ての被験者に共通してあることを示した。この実験では、正面方向に限定したものであるが、今後の展望として人間の左右方向あるいは後方からロボットが接近した場合についても検討を行う必要があると述べている。

次に、ロボットの人物追従による心理的影響に関する研究について述べる。移動ロボットの追従方式としてユーザに向って進む方向追従と、ユーザの通り道をなぞるように追従する経路追従が一般的に用いられている。Gockley らは、人間と背後にいるロボットの動きによる社会的認識を調査するために、レーザによる人物追従装置を利用して方向追従と経路追従を行った [8]。その結果、被験者は方向追従行動が自然で人間的であると感じることがわかった。これにより、人間は社会的習慣に従い、ロボットも人間のように行動することを期待しているのではないかと考察している。また、中島らの調査では正面からの接近に限定されていたが、Dautenhahn らは正面から接近する場合に比べて角度をつけて接近した場合の方がロボットに対する恐怖感が少ないことを示唆している [9]。

これらの知見により、人間に対するロボットの接近角度が重要だと考え、Shanee らは、ロボットが人間を追従する角度が人間に与える心理的影響について調査した [10]。実験では、ロボットの角度条件 ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ) を変化させて評価を行う。この時、人間のロボットに対する関心を高めるために貴重品であるサイフをロボットに預けて追従実験を行った。実験結果から  $0^\circ$  (真後ろ) での追従が最も評価が高く、次いで  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  となった。しかし、 $60^\circ$  での追従性能が著しく低かったため、しばしば追従に失敗していたことが原因の 1 つだと考えられる。

## 3. 人物追従ロボット

### 3.1 要件定義

研究目的を満たす機能に加え、事前調査によって得られた知見から追従ロボットに必要なとされる要件を定義する。本システムに望まれる要件は以下の 3 点である。

- (1) 任意位置での追従可能
- (2) ユーザとのインタラクション
- (3) 遠隔制御

#### (1) 任意位置での追従可能

本システムは、ロボットの追従方式や使用するセンサなどに制限されず、様々な追従位置に対応出来なければならない。またユーザの背面だけではなく、側面での並走も行えるシステムを実現する。ここで、ユーザの背面に対する垂線方向とロボットとの角度を追従角度、ユーザとロボットの直線距離を追従距離と定義し、詳細は??項で述べる。

#### (2) ユーザとのインタラクション

日常生活で利用するロボットに必要な機能に関する調査結果より、ユーザがロボットを気にした場合に限りロボットからのフィードバックを求めることが分かった。そこで、ロボットはユーザの顔の振り向きを検出した際にフィードバックを返す機能を実装する。これはロボットを気にかける場合、一般的にユーザは追従するロボットを振り向いて確認すると考えられるためである。

#### (3) 遠隔制御

日常生活で追従ロボットを利用する場合、常にロボットがユーザを追従している場面だけとは限らない。また、追従時のロボットが何らかのトラブルで緊急停止を行いたい場合に、遠隔からロボットに対して操作を行う必要がある。そこで、コントローラを用いてロボットと通信を行い、ユーザの意思で追従状態を制御出来る機能を実装する。

### 3.2 システム概要

述べた要件定義から導かれたシステムの概要を図 1 に示す。本システムは、移動ロボット、測域センサ、RGB カメラ、PC、コントローラにより構成される。

#### 3.2.1 任意位置での追従 (要件 (1))

本システムでは、ユーザの背面方向に加え、広角度となる並走においても精確に追従を行う必要がある。したがって、高速かつ幅広い範囲での追従制御を行う場合、カメラ画像での人物検出では撮影範囲が狭いため、ユーザを見失う可能性が高い。そこで、広範囲の距離を高速に測定することが可能な測域センサを利用する。これにより、ロボットの側面にユーザがいる場合においても、ユーザを検出することが可能となる。

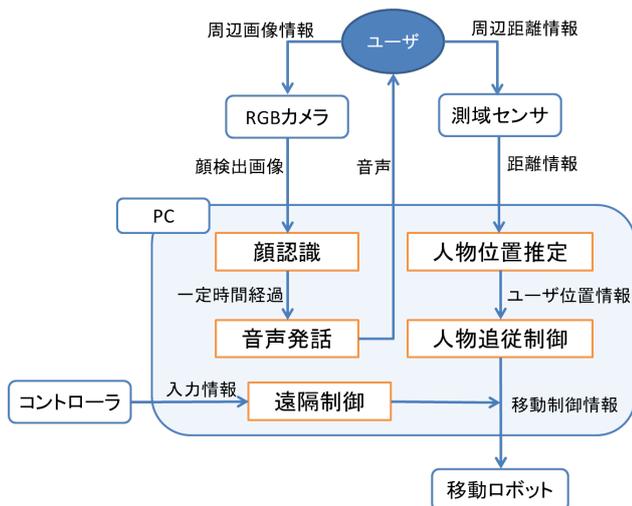


図 1 システム概要

### 3.2.2 ユーザとのインタラクション (要件 (2))

ユーザの顔の振り向きを検出するために、顔認識に使用するセンサには Kinect の RGB カメラを利用する。ここで、ロボットからユーザに対して行うフィードバック方法として、接触による方法と非接触による方法が考えられるが、追従ロボットであることから非接触による手法を選択する。また、ロボットが人に対して名前を呼ぶことや相手を気遣う声かけを行うことで、ユーザの好感度が増し、よりロボットと関わりたいと感じることが分かっている [11] [12] ことから、ロボットがユーザに対して喋りかけるインタラクションを実装する。

### 3.2.3 遠隔制御 (要件 (3))

ユーザが実際に追従ロボットを利用する場合の安全性や利便性を考慮し、移動ロボットに対し遠隔操作を行う必要がある。そこで、制御が容易な PS4 コントローラを使用し、Bluetooth 通信によって遠隔操作を行う。この時、コントローラから自律追従状態、待機状態、遠隔制御状態の 3 つの状態の切り替えを行なえるようにする。

## 3.3 システム構成

開発した追従ロボットの外観を図 2 に示す。Turtlebot2 の台座上に直接センサ類を設置した場合、生活空間上の障害物によって追従制御に支障が出るため、Turtlebot2 上に台を搭載させることで測域センサと Kinect を地面から約 1m の高さに設置することが可能となる。Kinect の電源は Turtlebot2 の電源コネクタ (12V /5A) から供給を行う。これにより、追従ロボットはコードレスで完全に独立して動作を行うことが出来る。Turtlebot2 の開発には ROS (Robot Operating System) を用いる。ROS を利用する利点として、簡単に分散型システムを構築出来ることや rviz と呼ばれるソフトウェア状態の可視化ツールが提供されていることが挙げられる。



図 2 追従ロボット

## 3.4 追従制御

この節では、追従ロボットの人物位置推定方法および人物追従アルゴリズムについて説明を行う。追従はプログラム内で追従距離と追従角度のパラメータを設定し、設定した距離と角度になるようにユーザとの位置関係を保ちながら追従を行う。距離パラメータは、ウェーバー・フェヒナー則を参考に、2 の指数の値を取るように 0.5, 1.0, 2.0m とした。実環境での利用を想定した場合、ユーザとロボットの距離が 4.0m 以上離れる可能性は少ないため除外した。角度パラメータは、先行研究 [5] [10] を参考に -90, -60, -45, -30, 0, 30, 45, 60, 90° とする。この時のユーザとロボットとの位置関係を図 3 に示す。

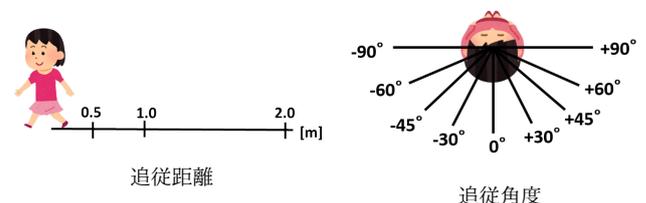


図 3 追従パラメータ

### 3.4.1 人物位置推定

人物位置の推定は測域センサによる距離情報のみを用いて行なう。ROS で測域センサを使用するために、urg\_node パッケージを利用し、前方約 240° の範囲における距離情報を取得する。今回の実験では、障害物の回避を行なわないため、追従時に障害物が存在しない環境で行なう。したがって、測域センサで取得した距離が最も近い位置にユーザが存在することになる。ただし、この条件ではロボットと壁の距離がロボットと人の距離よりも短くなった場合、壁に向かって追従してしまい失敗する可能性が高い。

ここで、測域センサは 10Hz で動作するため、ユーザが 0.1 秒間に移動する距離には制限があることを利用し、前回の計測位置から一定の範囲内に必ずユーザが存在すると仮定する。ユーザの存在範囲を狭く設定する場合、ユーザを見失う可能性が高くなる。また存在範囲を広く設定する場合は、ユーザの周囲にある障害物をユーザと誤認識する頻度が増えることが予想されるため、ユーザの存在範囲を

±20°とする。これにより、実際の距離が人より壁の方が近い場合でも、範囲内に存在する人物を追従できる。この時の様子を図4に示す。左図では、ユーザの存在範囲を仮定しない場合を表している。この時、障害物がユーザよりロボットに近い位置に存在すると、ロボットは障害物に向かって追従してしまうが、右図のようにユーザの存在範囲を仮定した場合、単純に距離の近い障害物ではなく、ユーザを追従出来ることが分かる。塗りつぶした部分が前回の計測位置から±20°の範囲内を表している。

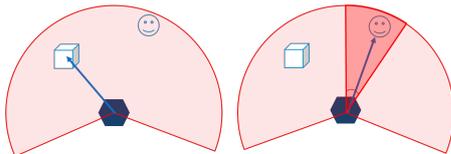


図4 人物検出アルゴリズム

### 3.4.2 人物追従

推定したユーザと位置関係から追従ロボットの移動すべき距離と角度を算出する。図5に示すような追従モデルを考える。目標の追従距離をD, 角度をA, 推定したユーザの位置をd, 角度をaとすると、移動距離 (moveDistance) と移動角度 (moveAngle) は、以下の式で表される。

$$\text{moveDistance} = d \cos a - D \cos A \quad (1)$$

$$\text{moveAngle} = \tan^{-1} \frac{d \sin a}{d \cos a - \text{moveDistance}} - A \quad (2)$$

しかし、この追従モデルにおいて追従角度A=90°とした場合、 $\text{moveDistance} = d \cos a$ ,  $\text{moveAngle} = 0$  になってしまう。これにより、ユーザ・ロボット間の距離と目標追従距離の差分のみを移動することになるため、実際の追従距離が目標追従距離よりも確実に小さい値と取ってしまう。そこで、90°の追従を行う場合には、moveDistanceに定数値を加えて調整を行った。

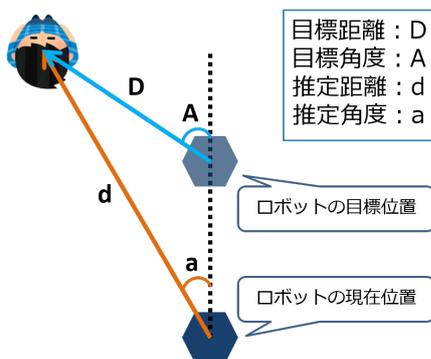


図5 人物追従モデル

### 3.5 顔認識

3.1項で述べた顔認識ではROSのパッケージであるface\_detectorを利用する。前回の顔検出から3秒以上経過していた場合、Turtlebot2と接続したノートPCからユーザに対して音声発話を行う。音声発話には日本語テキストに基づいて自由な音声を生成可能なOpenJTalkを利用する。発話内容としては、「どうかなさいましたか?」と相手を気遣うように喋りかける。

## 4. 性能評価

開発した追従ロボットが任意の距離・角度条件で追従する際の実際の追従精度を評価する。屋内環境において直進するユーザに対しロボットは距離パラメータと角度パラメータを変化させて追従を行う。ロボットが追従動作を開始すると、ユーザまでの距離および角度を測域センサが10Hzで取得して記録し、15秒間追従を行う。

まず初めに、追従距離を変化させた場合の性能評価を行う。角度パラメータを0°で固定した状態で距離パラメータを0.5, 1.0, 2.0mと変化させて実験を行った。実験結果を表1に示す。どの距離条件においても距離の誤差は0.2m以内、角度の誤差も5°以内に収まっている。

表1 距離条件を変化させた追従精度

距離条件 [m]	距離 [m]			角度 [°]		
	平均値	差分	標準偏差	平均値	差分	標準偏差
0.5	0.66	0.16	0.04	0.53	0.53	4.61
1.0	1.17	0.17	0.03	1.72	1.72	2.23
2.0	2.17	0.17	0.06	4.65	4.65	1.92

次に、追従角度を変化させた場合の性能評価を行うため、距離パラメータを1.0mで固定した状態で角度パラメータを0, 30, 45, 60, 90°と変化させて実験を行った。実験結果を表2に示す。

距離の誤差は最大でも0.21mに抑えられており、人物追従には十分な精度があるといえる。また、90°の追従では補正を行っているため、距離の誤差は他の角度と比較して小さい値となっている。

表2 角度条件を変化させた追従精度

角度条件 [°]	距離 [m]			角度 [°]		
	平均値	差分	標準偏差	平均値	差分	標準偏差
0.0	1.18	0.18	0.09	3.96	3.96	2.34
30.0	1.20	0.20	0.05	33.03	3.03	6.80
45.0	1.21	0.21	0.04	45.59	0.59	5.90
60.0	1.19	0.19	0.06	61.58	1.58	7.07
90.0	1.07	0.07	0.07	88.53	-1.47	2.62

## 5. 因子分析

追従ロボットに対する主観的評価を行うためにSD(Semantic Differential)法を用いたアンケート調査を行った。SD法を用いたロボットの主観的評価を行った先行研究 [13] [14] を参考に、24種類の形容詞対を選定した。また、被験者である20代の学生24人に実際の追従ロボットを理解させるために、被験者に10mの距離を歩かせ、その後、追従ロボットを後ろ( $\theta=0^\circ$ )をロボットに追従させた。その後、追従ロボットの印象調査アンケートを行い、24種類の形容詞を用いて7段階で評価した結果を表3示す。

表3 SD法によるアンケート結果

番号	形容詞対	平均	標準偏差
Q1	やさしい	3.7	1.17
Q2	近寄りやすい	4.2	1.26
Q3	自然な	3.4	1.26
Q4	軽やかな	4.1	1.45
Q5	人間的な	2.9	1.50
Q6	感じの良い	4.5	1.00
Q7	扱いやすい	4.2	1.19
Q8	気が利く	4.2	1.18
Q9	丁寧な	4.0	1.27
Q10	簡単な	5.3	0.99
Q11	効率的な	4.0	1.12
Q12	注意深い	4.2	1.03
Q13	便利な	4.0	1.24
Q14	実用的な	4.3	1.21
Q15	しっかりとした	3.5	1.26
Q16	能動的な	4.4	1.60
Q17	素速い	4.0	1.31
Q18	安全な	3.8	1.03
Q19	親しみやすい	4.6	1.49
Q20	分かりやすい	5.8	0.78
Q21	賢い	4.6	1.41
Q22	面白い	5.5	1.12
Q23	快適な	4.0	0.87
Q24	静かな	1.5	0.76

そして、関わりのある形容詞対を大きなグループにまとめ、形容詞群が影響を受けている潜在変数を知るために因子分析を行う。因子数は堀の研究 [15] を参考に3つとした。因子分析にはHAD [16] を利用し、最小二乗法とプロマックス回転を組み合わせて因子分析を行った。この際、共通性が著しく低い形容詞は説明変数として適切ではないため、その項目を取り除く必要がある。そこで、共通性が0.20以下である変数Q9, Q23, Q12, Q17, Q15, Q18, Q24を取り除き、観測変数を17項目として再度分析を行った結果を表4に示す。各形容詞の因子負荷量が最も大きい値を太字で表している。また、因子間相関を表5に示す。

表4 因子分析の結果

質問項目	因子1	因子2	因子3	共通性
Q6	<b>.726</b>	.020	-.067	.516
Q19	<b>.696</b>	-.101	.020	.520
Q22	<b>.693</b>	.111	.136	.510
Q2	<b>.679</b>	-.083	.028	.491
Q5	<b>.609</b>	-.110	.427	.634
Q10	<b>.584</b>	-.089	.074	.379
Q20	<b>.563</b>	.346	-.314	.408
Q13	-.057	<b>.807</b>	.112	.699
Q8	.170	<b>.806</b>	-.299	.660
Q14	-.058	<b>.652</b>	.178	.496
Q1	.273	<b>-.627</b>	-.018	.525
Q21	.251	<b>.574</b>	.119	.382
Q11	-.226	<b>.425</b>	.260	.342
Q4	.282	.043	<b>.696</b>	.613
Q3	-.133	.042	<b>.673</b>	.460
Q7	.182	.152	<b>.532</b>	.369
Q16	-.295	.291	<b>.328</b>	.306

表5 因子間相関

	因子1	因子2	因子3
因子1	1.000	-.162	.112
因子2	-.162	1.000	.109
因子3	.112	.109	1.000

表4の結果から6つの形容詞対とそれらから成る3つの評価因子を決定する。第一因子は「感じの良い」「親しみやすい」というロボットに対する親しみを感じさせるまとまりとなったため、「親和性因子」と名付ける。また、第二因子は「便利な」「気が利く」というロボットの追従動作に関する利便性についてのまとまりとなったため、「利便性因子」と名付ける。さらに、第三因子は「軽やかな」「扱いやすい」というロボットの存在に対する快適さを表すまとまりとなったため、「快適性因子」と名付ける。

## 6. 予備実験

### 6.1 追従角度の粒度に関する予備実験

因子分析の実験に参加した24人のうちの10人の被験者を対象に、屋内環境において距離パラメータを1.0mで固定し、角度パラメータ0, 30, 45, 60, 90°と変化させて追従を行う。この時、角度パラメータを降順と昇順で行う2グループに半数ずつ分けることで順序効果を打ち消す。被験者には10mの距離を直進するように指示し、追従中にロボットが気になった場合、後ろを振り返って確認しても良いことを伝えた。ここで、先行研究 [10] を参考に、ユーザのロボットへの関心を高めるために、貴重品として財布をロボットに預けてもらった。アンケートでは因子分析によって決定した6種類の形容詞対を用いて7段階で評価

する。また実験後アンケートとして2点質問を行う。質問内容を以下に示す。

- (1) ロボットを振り向いて見た時に角度によって感じ方に違いがありましたか？
- (2) ロボットに貴重品を預けることでロボットの印象に変化はありましたか？

実験結果から、隣り合う角度ごとに自由度18でt検定を行い、ユーザのロボットに対する感じ方に追従角度による有意差の有無について調査した。この際、有意水準は0.01とする。表6に示すように、30°と45°、45°と60°の場合において、p値が0.01を上回っているため、有意差はないといえる。したがって、30°と60°を本実験の角度条件から除外する。次に質問項目について述べる。「ロボットを振り向いて見た時に角度によって感じ方に違いがありましたか？」という質問に対しては、10人中8人の被験者が角度が大きい場合の追従は角度が小さい場合の追従と比べて安心感が増す、親近感があるといった感想を述べている。この結果から、追従角度による被験者の心理的影響の変化が生じることが分かる。また、「ロボットに貴重品を預けることでロボットの印象に変化はありましたか？」という質問に対しては、10人中8人の被験者が「貴重品を預けたことによるロボットへの印象に変化はなかった」と述べている。また残りの2人は、「貴重品を預けたことでロボットが少し心配になった」と述べている。この結果から、貴重品をロボットに預けることによるロボットへの印象変化は見られないと考えられるため、評価実験では被験者の貴重品は預けずに行う。

表6 追従角度の粒度におけるt検定

評価因子	0°	30°	30°	45°	45°	60°	60°	90°
親和性	0.0085	0.0224		0.5086			0.1776	
利便性	0.4945	0.5911		0.2789			0.7263	
快適性	0.3434	0.0811		0.8114			0.7804	

## 6.2 追従角度の対称性に関する予備実験

次に、追従角度の対称性について調査する。前節で述べた予備実験と同様の手順で実験を行う。距離パラメータを1.0mで固定し、角度パラメータを-90, -45, 0, 45, 90°と変化させて追従を行う。また実験後アンケートとして質問を行う。質問内容を以下に示す。

- (1) ロボットを振り向いて見た時に左右によって感じ方に違いがありましたか？

前節と同様に、アンケート結果から対称な追従角度の有意差の有無について調査した。その結果を表7に示す。この表において、-45°と+45°、-90°と+90°の場合では、p値が0.01を上回っているため、追従角度が左右どちらの場合でも有意差はないといえる。したがって、-90°と-45°の角度条件を本実験の角度条件から除外する。

また、追従角度の変化が昇順と降順の場合でユーザの心理的影響の差の有無についてt検定を行い検証した結果を表8に示す。この結果、0°, 45°, 90°の昇順と降順においてp値は0.01を上回っているため、昇順と降順における有意差はないといえる。また、「ロボットを振り向いて見た場合に左右によって感じ方に違いがありましたか？」という質問に対しては、10人中8人の被験者が「違いは感じなかった」と回答している。また、残りの2名については「右側の方が自然で振り向きやすい」と述べている。このことから、対称となる角度で追従を行なう場合、ユーザの心理的影響は変わらないといえる。

表7 追従角度の対称性におけるt検定

評価因子	-45°	45°	-90°	90°
親和性	0.2789		0.4433	
利便性	0.1934		0.7263	
快適性	0.4433		0.7577	

表8 角度パラメータの昇順と降順のt検定

評価因子	0°		45°		90°	
	降順	昇順	降順	昇順	降順	昇順
親和性	0.0751		0.6213		0.5083	
利便性	0.2635		0.7990		0.5913	
快適性	0.6213		0.5083		0.8466	

## 7. 評価実験

### 7.1 実験内容

ロボットがユーザを追従する時の距離と角度を変化させて追従を行い、その時にユーザが感じる心理的影響の調査を行う。屋内環境において、評価因子の実験に参加した24人のうち10人の被験者に10mの距離を直進してもらい、その被験者の距離と角度のパラメータを変化させてロボットが追従を行う。この時、被験者は自由にロボットを振り返って見ても良いとした。ここで追従角度0, 45, 90°における実験の様子を図6に示す。



(a)0° (b)45° (c)90°

図6 評価実験におけるユーザとロボットの角度

## 7.2 実験方法

追従距離と角度のパラメータは、予備実験の結果から有意差が見られなかったパラメータを取り除いたものを使用する。したがって、距離が0.5, 1.0, 2.0m, 角度が0, 45, 90°の組み合わせであるため、被験者1人につき9通りの組み合わせで評価実験を行う。

この時、予備実験の結果から角度を変化させた際の順番は心理的影響に有意差が出ないといえるため、距離条件のみ被験者を昇順と降順の2グループに分けて半数ずつ実験を行う。ここで、広角度や遠距離においても高精度の追従を行うため、追従中のロボットが指定位置から大きく外れることが予測された場合、実験者の判断でコントローラから追従ロボットに対して補助的な操作を行う。但し、必要に応じて実験者が追従ロボットを操作することを被験者が知るにより、ロボットに対する印象に影響が生じる可能性を考慮し、実験前にこの操作については言及しない。アンケートの内容はの予備実験と同様に、6つの形容詞対を用いた7段階評価となる。また、ユーザが追従ロボットに求める因子の重要度についても7段階でアンケートを行った。これは、追従ロボットが追従動作を行ない最適な距離と角度を決定する際に、単純に各因子の評価値の合計が最大となる追従条件が最適になるとは限らないため、ユーザに重要視される因子を考慮する必要がある。そこで、3つの因子について重要度を7段階で評価してもらい、これらの値を重みとして評価値を決定する。さらに、2点質問を行う。質問内容を以下に示す。

- (1) ロボットとの距離によって感じ方に違いがあったか？
- (2) 実験者がロボットを補助的に操縦していることに気付いたか？

1つ目の質問は、ユーザロボット間の距離による印象の差異の有無についてアンケートによる定性的な分析を行うためである。2つ目の質問は、実験中に実験者がロボットに対して補助的な操作を行うことに対する被験者の気づき具合を確認するためである。

## 7.3 実験結果

ユーザ実験の結果より、評価因子ごとに算出した被験者10人の評価値の平均を表9に示す。また、各因子の重要度を正規化すると、親和性は31.5%、利便性は37.2%、快適性は31.3%となった。各条件における評価値は、表9に示す各因子の平均値を重要度によって重み付した総和によって算出される。これをユーザとロボットの位置関係に対応させ、図7に示す。広角度かつ近距離での追従では評価値が高くなるのに対し、追従距離が2.0mの場合や角度が0°の場合では評価値が低くなるのが分かる。また、表7より、最も評価値が高い組み合わせは追従距離0.5mの角度90°、すなわち最も近くを並んで進む状態での追従であり、次いで、1.0mの45°、3番目に1.0mの90°という結

果になった。さらに、「実験者がロボットを補助的に操縦していることに気付きましたか？」という質問に対しては、全ての被験者が気付かなかったと述べた。したがって、追従ロボットの動作には実験者の操作の介入による不自然さはなかったといえる。

表9 ユーザ実験のアンケート結果

距離 [m]	角度 [°]	評価因子		
		親和性	利便性	快適性
0.5	0	3.4	3.6	4.4
	45	4.4	3.8	4.4
	90	5.2	4.2	4.0
1.0	0	3.9	3.7	4.2
	45	4.4	4.2	4.4
	90	4.8	4.1	3.9
2.0	0	3.7	3.2	4.1
	45	4.0	3.2	4.1
	90	4.0	3.4	4.2

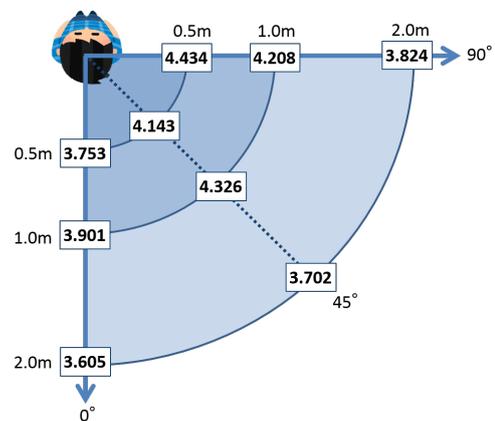


図7 ユーザ位置と評価値の対応

## 8. 考察

### 8.1 最適な追従距離・角度の算出

広角度かつ近距離での追従では評価値が高くなる理由として、45°や90°の広角度での追従は常に目の端でロボットの存在を確認出来るため、安心感があることが分かった。また、犬などのペットと散歩する場合と同様の距離感であるため、日常生活に受け入れられやすいと考えられる。

反対に、追従距離が2.0mの場合や角度が0°の場合では評価値が低くなるのは、アンケートでの回答と合わせて考察すると、まず距離が2.0mの場合ではユーザとロボットの距離が遠すぎると感じるため、ロボットの利便性因子の評価が低くなるのが原因であることが分かった。また、アンケートの自由記述から角度が0°の場合の追従では、振り返らなければロボットを見ることが出来ないことに加え、追従時の走行音が真後ろから追って来るように聞こえると多くの被験者が記述している。これにより恐怖心が生まれ、親和性因子の評価値が下がるためと考えられる。

ここで、評価実験で得られた距離と角度の組み合わせに

よる有意差について検定する。そこで、全体のデータに対して有意差の有無を調べるために一元配置分散分析を利用する。その結果、 $p = 0.506$  となり有意差は見られなかった。

## 8.2 評価式の算出

表7に示した評価値から、距離と角度を変数として回帰分析を行った。得られた重回帰式を式3に示す。さらに、ユーザとロボットの位置関係に重回帰式を当てはめて算出した評価値の分布を図8に示す。

日常生活の中で追従ロボットを利用する場合、ロボットが常に理想の位置で追従出来るとは限らず、周辺環境の様々な条件から追従位置が変化することが考えられる。そこで、この重回帰式を追従ロボットに組み込むことで追従中のユーザの心理的状态を推測することが出来る。これにより、ユーザの心理的状态に合わせてインタラクションを変化させることが出来るため、ユーザからの印象が向上すると考えられる。利用シナリオとしては、通常、ロボットは評価値の高いユーザの真横で並走を行なう。しかし、前方に障害物があり、やむを得ず真後ろへ追従を移行する場合、評価値が下がりユーザは恐怖心を感じる事が予想される。そのため、ユーザに対して予め移行する旨を伝えることで、恐怖心を抑えることが期待できる。

$$\text{評価値} = -0.2903 \times \text{距離} + 0.0045 \times \text{角度} + 4.1261 \quad (3)$$

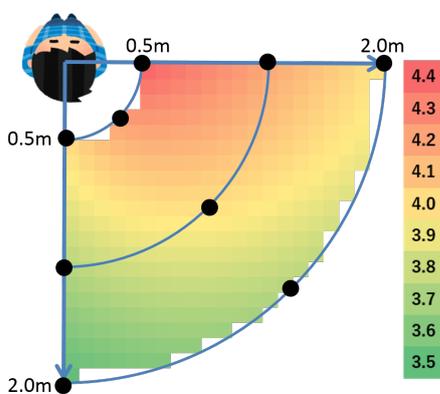


図8 評価値のヒートマップ

## 9. おわりに

我々は、人物追従ロボットを開発し、追従ロボットの距離と角度がユーザに与える心理的影響の調査を行った。そして、最適な追従距離と角度を定義した結果、近距離かつ広角度での追従はユーザにとって評価が高く、反対に遠距離や背後では評価が低くなる事が分かった。これにより、特定の追従状態におけるユーザの感情をある程度推定することが可能となり、状況に合わせたインタラクションを行うことが出来るようになる。本研究では、対象人物が空間に単独で存在する場合を想定したが、公共空間で利用する場合は他人が存在するため、ユーザはより複雑な感情

を抱く可能性がある。今後の発展として、人間を先導するような案内ロボットを開発し、人間の前方方面の距離や角度が与える心理的影響を調査する。

## 参考文献

- [1] Yousuke Nagumo, and Akihisa Ohya. "Human following behavior of an autonomous mobile robot using light-emitting device." Robot and Human Interactive Communication, 2001. Proceedings. 10th IEEE International Workshop on. IEEE, 2001. p. 225-230.
- [2] Minh-Quoc Do, and Chang-Hong Lin. "Embedded human-following mobile-robot with an RGB-D camera." Machine Vision Applications, 2015 14th IAPR International Conference on. IEEE, 2015. p. 555-558.
- [3] 中野広樹, 他. "両足独立追跡に基づく自律移動型ロボットにおける人物追跡システム." 日本ロボット学会誌 25.5 (2007): 707-716.
- [4] Mohammad Obaid, et al. "Stop! That is close enough. How body postures influence human-robot proximity." Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2016 25th IEEE International Symposium on. IEEE, 2016.
- [5] Koji Nakashima, and Haruhiko Sato. "Personal distance against mobile robot." The Japanese Journal of Ergonomics 35.2 (1999): 87-95.
- [6] Tomoya Amari, et al. "A Mobile Robot for Following, Watching and Detecting Falls for Elderly Care." Procedia Computer Science 112 (2017): 1994-2003.
- [7] Doog, "THOUZER", <http://jp.doog-inc.com/product-thouzer.html>
- [8] Rachel Gockley, Jodi Forlizzi, and Reid Simmons. "Natural person-following behavior for social robots." Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction. ACM, 2007. p. 17-24.
- [9] Kerstin Dautenhahn, et al. "How may I serve you?: a robot companion approaching a seated person in a helping context." Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction. ACM, 2006. p. 172-179.
- [10] Honig S. Shanee, et al. "The influence of following angle on performance metrics of a human-following robot." Robot and Human Interactive Communication, 2016 25th IEEE International Symposium on. IEEE, 2016. p. 593-598.
- [11] 石井健太郎, 鳩康彦, 今井倫太. "自発的に話しかける対話ロボットの話しかけの一手法." 知能と情報 21.5 (2009): 693-700.
- [12] 神田崇行. "ロボットに「人らしさ」を感じる人々." 日本ロボット学会誌 31.9 (2013): 860-863.
- [13] 神田崇行, 石黒浩, 石田亨. "人間-ロボット間相互作用にかかわる心理学的評価." 日本ロボット学会誌 19.3 (2001): 362-371.
- [14] 依田光正, 塩田泰仁. "主観的評価に基づく移動ロボットのすれ違い行動アルゴリズム." 日本機械学会論文集 C 編 66.650 (2000): 3380-3387.
- [15] 堀啓造. "因子分析における因子数決定法." (2005): 35-70.
- [16] 清水裕士. "フリーの統計分析ソフト HAD: 機能の紹介と統計学習・教育, 研究実践における利用方法の提案." メディア・情報・コミュニケーション研究 第1巻, 2016, 5973.