

移動ロボットのための顔インタフェースを
利用した動作予告に関する研究

筑波大学

図書館情報メディア研究科

2019年3月

LYU JIAYI

目次

第1章	序章	1
1.1	研究背景	1
1.2	関連研究	1
1.2.1	顔に関する研究	1
1.2.2	動作予告に関する研究	2
1.3	研究の目的と提案	2
1.4	本論文の構成	3
第2章	移動ロボットのシステム構成	4
2.1	システム概要	4
2.2	ハードウェア構成	5
2.3	ソフトウェア構成	6
2.4	移動ロボットの環境認識	7
2.4.1	SLAMによる環境地図の作成および自己位置推定	7
2.4.2	パーティクルフィルタを用いた歩行者検出と追跡	8
第3章	移動ロボットの経路計画	9
3.1	ダイナミックウィンドウアプローチによる経路探索	9
3.2	歩行者を考慮した経路計画	12
3.2.1	パーソナルスペース	12
3.2.2	歩行者とのすれ違いアルゴリズム	13
第4章	顔インタフェースによる動作予告	18
4.1	顔インタフェース	18
4.1.1	モナリザ効果	18
4.1.2	不気味の谷	19
4.2	顔インタフェースによる視線行動の制御	20
4.3	動作予告のタイミング	23
第5章	評価実験	24
5.1	歩行者と移動ロボットのすれ違い実験	26
5.1.1	実験目的および手法	26
5.2	歩行者とのすれ違い評価実験	29
5.2.1	実験目的および手法	29
5.2.2	実験の仮説	34
5.2.3	実験の結果(1): 移動ロボットの行動の分かりやすさに関する評価	34
5.2.4	実験の結果(2): 移動ロボットに対する印象に関する評価	35
5.2.5	実験の考察	36
5.3	動作予告を行うタイミングの評価実験	37

5.3.1	実験目的および手法	37
5.3.2	実験の仮説	41
5.3.3	実験の結果	41
5.3.4	実験の考察	43
5.4	従来手法との比較実験	44
5.4.1	実験目的および手法	44
5.4.2	実験の仮説	46
5.4.3	実験の結果 (1) : 移動ロボットの行動の分かりやすさに関する評価	46
5.4.4	実験の結果 (2) : 移動ロボットに対する印象に関する評価	47
5.4.5	実験の考察	48
5.5	考察	49
第 6 章	結論	50
	参考文献	52

目次

2.1	移動ロボットのシステム概要	4
2.2	移動ロボットのハードウェア構成	5
2.3	システムのソフトウェア構成	6
2.4	SLAMによる環境地図と移動ロボットの位置	7
2.5	基準座標系 Σ_w と基準座標系 Σ_w における移動ロボットの位置 ${}^w p_r$ と姿勢 ${}^w R_r$	7
2.6	パーティクルフィルタを用いた歩行者追跡	8
2.7	ロボット座標系 Σ_r とロボット座標系 Σ_r における歩行者の位置 ${}^r p_p$ と姿勢 ${}^r R_p$	8
3.1	ダイナミックウィンドウアプローチによる移動ロボットの経路	9
3.2	ダイナミックウィンドウ	10
3.3	Proxemicsによるパーソナルスペース	12
3.4	人間同士のすれ違い行動における回避軌跡	13
3.5	Pacchierottiらが提案するすれ違い行動のアルゴリズム	14
3.6	移動ロボットの歩行者とのすれ違い行動アルゴリズム	15
3.7	歩行者すれ違いモードのアルゴリズム	17
4.1	モナリザ効果の様子	18
4.2	提案顔インタフェースの様子	18
4.3	不気味の谷の様子	19
4.4	移動ロボットの座標系と顔インタフェースの座標系の関係	20
4.5	眼球と頭部の回転の割合	21
5.1	Godspeed Questionnaires 評価用紙	24
5.2	動作予告を行う場合のすれ違い実験	27
5.3	動作予告を行わない場合のすれ違い実験	28
5.4	実験に使用した移動ロボット	29
5.5	歩行者とのすれ違い評価実験の環境	30
5.6	歩行者とのすれ違い評価実験の様子	32
5.7	歩行者とのすれ違い評価実験の評価用紙	33
5.8	「移動ロボットの行動の分かりやすさ」に関する評価の結果	34
5.9	「移動ロボットに対する印象」に関する評価の結果	35
5.10	タイミングの適切性の評価用紙	38
5.11	実験協力者が視聴する動画（4種類のうちの2種類）	39
5.12	実験協力者が視聴する動画（4種類のうちの2種類）	40
5.13	「動作予告を行うタイミングの適切性」に関する評価の結果	42
5.14	実験で使用する動画のフレーム画像	45
5.15	「移動ロボットの行動の分かりやすさ」に関する評価の結果	46
5.16	「移動ロボットに対する印象」に関する評価の結果	47

表目次

5.1	移動ロボット PC のスペック	26
5.2	歩行者とのすれ違い実験における各パラメータ	31
5.3	「移動ロボットの行動の分かりやすさ」による 5 段階評価の平均値および標準偏差	34
5.4	「移動ロボットに対する印象」による 5 段階評価の平均値および標準偏差	36
5.5	動作予告を行うタイミングの評価実験における各パラメータ	37
5.6	「動作予告を行うタイミングの適切性」に関する分散分析の結果	41
5.7	「動作予告を行うタイミングの適切性」に関する LSD 法による多重比較の結果	42
5.8	「移動ロボットの行動の分かりやすさ」による 5 段階評価の平均値および標準偏差	46
5.9	「移動ロボットに対する印象」による 5 段階評価の平均値および標準偏差	48

第1章 序章

1.1 研究背景

近年、ロボット技術の発展に伴い、ロボットは徐々に公共の場に入りつつある。産業用ロボットの他に、ますます多くのロボットが、サービスやエンターテイメント、教育、さらには高齢者や障害者向けの支援に使用されつつある。これらの多くの状況の下で、人間とロボットが公共の空間を共有し、共存する空間で働くことが要求されている。しかし、ロボットと共存する経験が少ない、または経験がないといった多くの人はロボットに慣れておらず、公共の空間で遭遇したり、ロボットとインタラクションしたりする際、ロボットの行動に違和感や不快感、恐れなどを感じる可能性がある。ロボットが機械的な外観を持つことや、人間と異なる行動を行うことなどから、人間はロボットの行動を直感的に理解できないことがその要因であると考えられる。人間とのインタラクションおよび出会いにおいて、人々に与える違和感や不快感、恐れなどを抑えることを目的に、改善方法に関する研究がなされてきた。

1.2 関連研究

1.2.1 顔に関する研究

人間同士のコミュニケーションにおいて、顔は存在感や親近感を改善する役割を果たすことができること [1] と、顔による表現が情報の伝達に対して重要であることが広く認識されており [2]、人間とロボットのインタラクションにおいても顔の存在が重要視されている。そして、ロボットとのインタラクションにおける不快感を軽減するために、数多くの研究が行われてきた。家庭用アシスタントロボット Jibo [3] は、人間に親しみやすい印象を与えるため、雪だるまのような外観を採り、インタフェースの液晶画面にコンピュータグラフィックスにより作られたシンプルな図形から構成された顔を表示する。シンプルな図形による様々な顔の表現は抽象的なもので、Jibo と初対面の人々にとってうまく理解できない可能性がある。サービスロボット Pepper [4] は、人とのインタラクションをより直感的で快適にするため、本物のような人型の外観を持ち、頭に人間のような目と口などを持つ顔を搭載している。しかし、目と口などの位置が固定されているため、顔の表情も限られているから、感情的な表現には胸の前に設置するディスプレイを使う必要がある。抽象的な表現の代わりに、顔の各部位を物理的に動かすことで情報の伝達を行うロボットの研究も進んでいる。Kismet [5] は、たくさんのアクチュエーターを用いて、眉、まぶた、耳、唇、顎の位置と向きを物理的に変更することによって、さまざまな表情を表現することが可能となる。可動部品の数が増えることは、製作コストと故障率が嵩む原因となる。小林ら [6] はロボットによりリアルな動的顔表情を表現させるために、人間の動的表情の表現過程を忠実に顔ロボット上で実現した。表情の生成のための各アクチュエーター、人間の頭蓋骨に相当する骨格フレームおよびシリコンゴムで作った皮膚により本物の人間のような顔と表情を再現することが可能となるが、観察者に不気味さを与えてしまう問題点があると考えられる。

1.2.2 動作予告に関する研究

ロボットはこれから実行しようとする行動を事前に周囲の人に知らせることは、人間と異なる行動を理解しやすくするのに有用であると考えられ、それに関する研究が進んである。萩原ら [7] は、ロボットアームの複雑な動作およびその変化が人に与える脅威を取り除くために、赤色 LED を運動の開始の時に点灯したり、緑色 LED を速度の変化を予告に利用したりする手法を提案した。心理評価実験によって提案手法は有効であることが示されたが、予告手法の提示規則を事前に説明しなければ理解できないという問題点が考えられる。ロボットの行動をより直感的で理解しやすくするために、ロボットは人間の観点から理解と予測が可能な行動を行わなければならない。つまり、人間社会で認められる規則や常識、習慣に従い、ロボットが行動することが期待されている。Matsumaru ら [8] は、自動車の運転者が車の次の行動を知らせ、周囲の人を遠ざけるために、ウィンカーとランプを使うという常識に従い、ランプ、伸縮矢印、光線およびプロジェクタを用いて、動作予告という移動ロボットがこれから実行しようとする動作を示す手法を提案した。そして、動作予告を行う際に、人間の常識や習慣に従うだけでなく、予告する情報量をなるべく少なくする必要があると述べた。比較実験により、ランプや伸縮矢印を用いた予告手法よりも、光線やプロジェクタを用いて連続的に予告を行う手法の方が、ロボットの移動方向に関する情報を伝えるのに有効であることが分かった。そして、連続的な変化の方が情報を伝えやすいという結果が見られた。しかし、提案動作予告手法の効果は周囲の環境の明るさや投影する地面の状況によって大きく影響を受けるので、実際に応用できる環境が限られているという問題点がある。吉川ら [9] [10] は、人間の振る舞いの一つである顔を回転させることによる移動方向を示す行動に基づいて、ロボットの頭を今後の移動方向に回転させることにより予告する手法を提案した。ロボットの頭が向いている方向を分かりやすくするために、正面に突き出た犬の頭の形をしている。ただし、その頭に顔がついていないので、目や耳などを頭に備えた顔がある方がより直感的になることが、主観的な評価実験の結果の一つとして挙げられた。

1.3 研究の目的と提案

本研究では、移動ロボットに動作予告を行わせることで、人との出会いにおけるロボットの行動の分かりやすさを向上させることを目的とする。顔は人間とのインタラクションにおける存在感や親近感の改善および情報の伝達に重要であると示されている [1] ので、3D コンピュータグラフィックスにより作成した 3D 顔モデルを顔インターフェイスとして、移動ロボットに取り付けられたタブレットに表示することにした。

人間社会で認められる規則、常識と習慣に従い、移動ロボットに人間が理解しやすい動作予告をさせるため、人間の視線における振る舞い（以降、視線行動と述べる）に注目した。人間の視線行動は非言語表現として、情報の提供や感情の表現、関心の伝達など重要な役割を果たしており、人間同士のインタラクションにおいて重要である [11]。そして人間は、他人の視線方向によって他人の注意や意図の推測に利用する。コンピュータグラフィックスやアニメーションにおけるキャラクターの視線行動は、キャラクターの内部状態と意図を視聴者が推測するときの材料の一つとなっていることが示されている [12]。なお、ロボットによる視線行動は、観察者にとって人間の視線と同様の効果を持ち、人間とロボットのインタラクションにおいてポジティブな影響をもたらすのに有用であり、視線行動を持つロボットはより身近で活発な印象を与えることが示されている [13] [14]。以上の知見を踏ま

えて、移動ロボットの振る舞いとして顔インタフェースの視線行動を取り入れることによって、人にとって直感的で分かりやすい動作予告を実現することができると推測できる。

よって本研究では、移動ロボットが障害物や歩行者を回避するなどの移動方向を変更する行動を実際に行う前に、顔インタフェースにおける視線をその移動方向に回転させ、移動ロボットの今後の行動を連続的に予告する手法を提案し、システムの実装を行う。

1.4 本論文の構成

第2章では、移動ロボットのシステム構成について説明し、第3章にて移動ロボットの経路計画手法について説明する。第4章では本研究の提案手法である顔インタフェースによる動作予告について説明し、第5章では、提案手法の有効性を示すため、動作予告に関する主観評価の実験とその結果についての考察を行う。最後に第6章では、本研究についての結論を述べる。

第2章 移動ロボットのシステム構成

2.1 システム概要

図 2.1 に移動ロボットのシステム概要を示す。ロボットの移動は、オペレータが操作者用パーソナルコンピュータ（以降、操作者用 PC と述べる）およびゲームパッドを用いて遠隔操作する。オペレータが操作者用 PC のキーボードから移動ロボットの目標位置の座標を入力し、入力した目標位置の座標はネットワークを通じて移動ロボット制御用 PC に送信される。また、オペレータがゲームパッドのアナログスティックの操作によって、移動ロボットの移動速度を調整することができる。ただし、移動ロボットの進行方向や顔インタフェースの視線方向は、第 3~4 章で述べる制御手法により、周囲の環境に応じて、自動的に算出される。オペレータが操作者用 PC にて、移動ロボットの移動速度や目標位置までの距離などの出力情報、およびロボットに取り付けられたセンサーから受け取った周囲の環境情報や歩行者情報を確認することができる。このため、オペレータがゲームパッドのアナログスティックから手を離すことで、移動ロボットを停止させることができる。

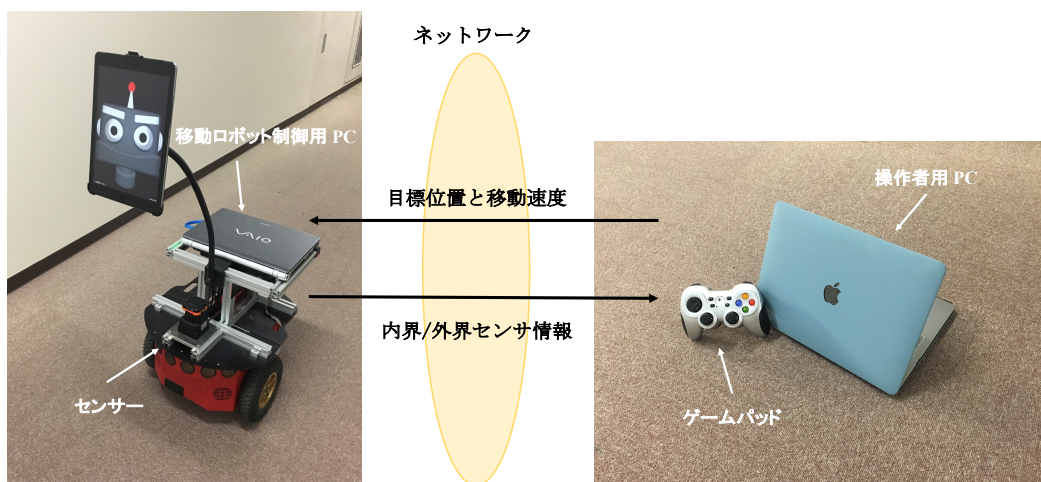


図 2.1: 移動ロボットのシステム概要

2.2 ハードウェア構成

本研究では、2輪駆動型ロボット Pioneer 3-DX (OMRON Adept Technologies, LLC.) を使用している。図 2.2 に示すように、移動ロボットには、周囲の障害物や人をリアルタイムに計測できるレーザーレンジファインダを設置する。レーザーレンジファインダは、発射したレーザー光が計測範囲内にある障害物や歩行者などの物体に到達して戻ってくるまでにかかる時間を測定することによって、障害物や歩行者までの距離を検出するセンサーである。本研究では、URG-04LX (HOKUYO Automatic Co.,Ltd) のレーザーレンジファインダを使用している。このレーザーレンジファインダは、240[deg] の角度と 4[m] の計測範囲内において 100[ms/scan] の頻度でレーザー光を発射し、その範囲内にある障害物や歩行者などの物体を検出することができる。また、顔インタフェースを表示するタブレットを備える。

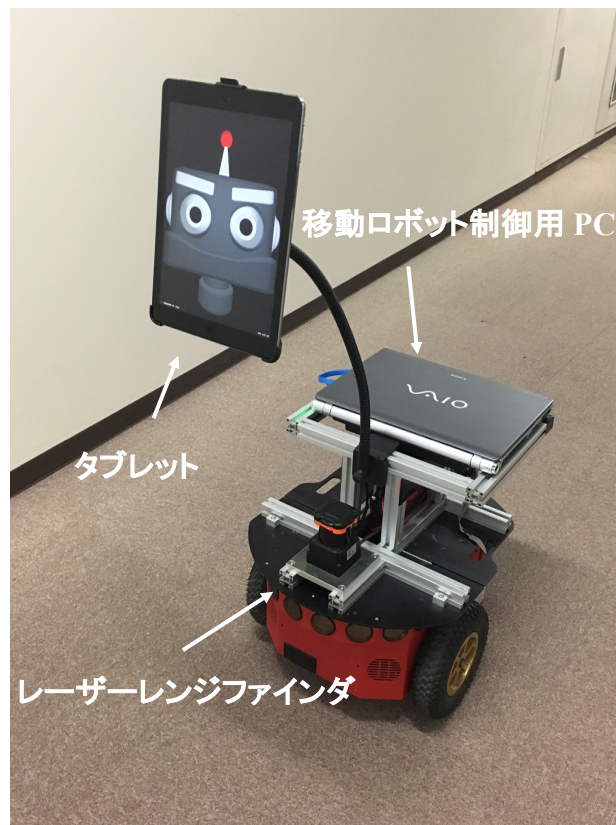


図 2.2: 移動ロボットのハードウェア構成

2.3 ソフトウェア構成

移動ロボット制御用PCは、レーザーレンジファインダによる環境認識と歩行者認識の結果および操作者用PCから取得した指令に基づいてロボットの移動方向や移動速度の計算を行う。また、顔インタフェースによる動作予告の計算とタブレットに対する送信は移動ロボット制御用PCにて行う。レーザーレンジファインダと移動ロボット制御用PCの間および移動ロボットPCとタブレットの間の通信はIPC (Inter Process Communication library) [15] により行う。ロボットの移動制御にはARIA(Advanced Robot Interface for Applications) [16] を用いる。

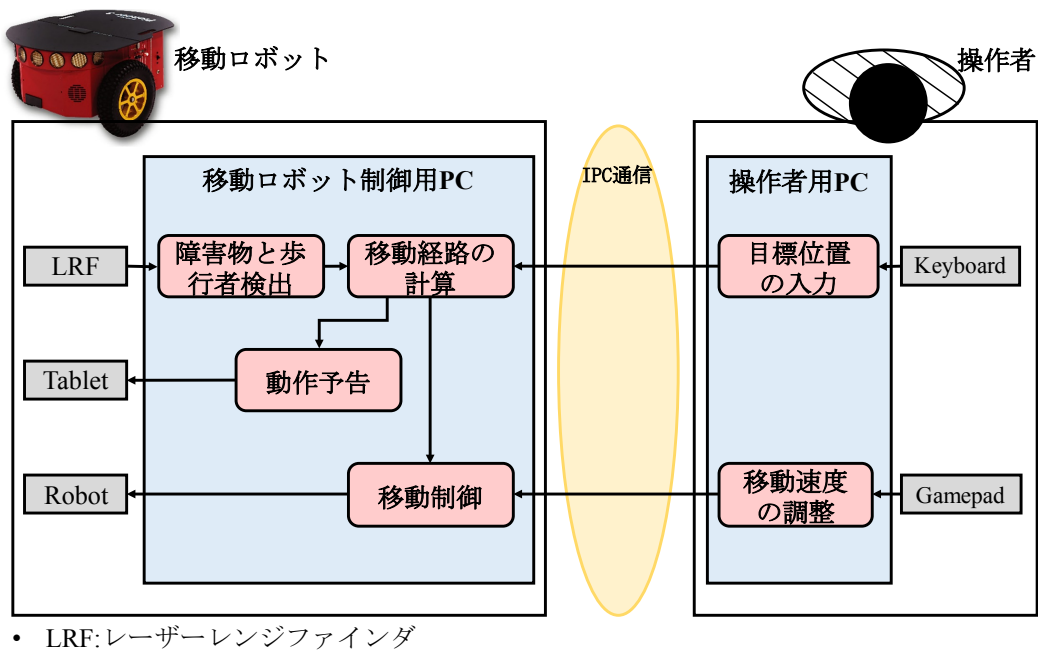


図 2.3: システムのソフトウェア構成

2.4 移動ロボットの環境認識

2.4.1 SLAM による環境地図の作成および自己位置推定

本研究では、SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)に基づき、Mobile Robot Programming Toolkit (MRPT) [17] を用いて、レーザーレンジファインダから取得した移動ロボットから周囲の物体までの距離情報に基づき、環境地図の作成と自己位置推定を行う。SLAM は、図 2.4 のように移動ロボットの周囲の環境地図を構築し、同時にこの環境地図を用いて自己位置を推定する手法である。移動ロボットが走行時の初期位置と姿勢を基準座標系 Σ_w とし、SLAM により推定した移動ロボットの現在の位置と姿勢を ${}^w p_r$ と ${}^w R_r$ とする。また、移動ロボットの現在の位置と姿勢に基づき、移動ロボットの回転中心を原点とするロボット座標系を Σ_r とする。

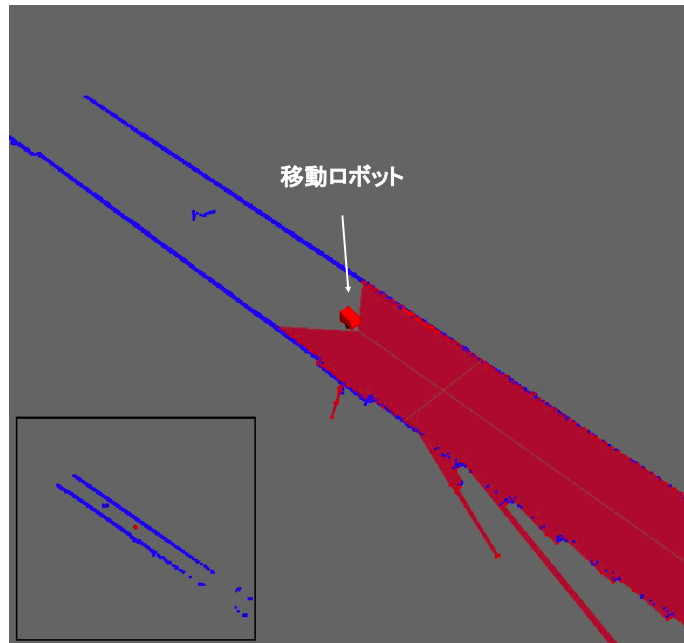


図 2.4: SLAM による環境地図と移動ロボットの位置

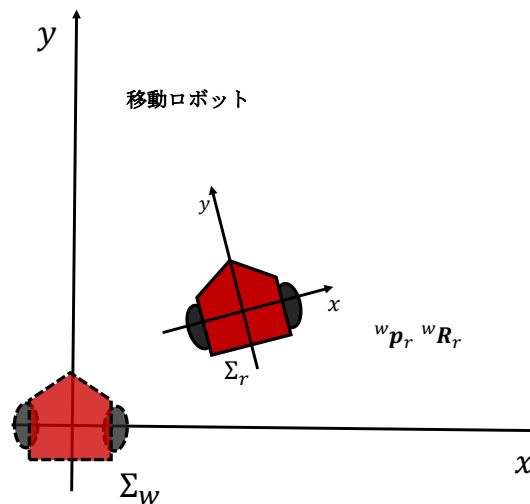


図 2.5: 基準座標系 Σ_w と基準座標系 Σ_w における移動ロボットの位置 ${}^w p_r$ と姿勢 ${}^w R_r$

2.4.2 パーティクルフィルタを用いた歩行者検出と追跡

本研究では、レーザーレンジファインダから受け取った移動ロボットの周囲の距離情報に基づき、パーティクルフィルタ (Particle filter) を用いて歩行者検出と追跡を行う。パーティクルフィルタとは、観測モデルに基づき多数の粒子を時間遷移させながら状態の事後分布を求める手法である。本研究で使用したパーティクルフィルタ [18] では、レーザーレンジファインダから取得した周囲の物体の情報をもとに、人の特徴を持っている物体を歩行者として認識し、重心を歩行者の位置座標とする。そして、検出した歩行者を継続的に追跡しながら、歩行者の位置座標、移動方向と移動速度を推定する。複数の歩行者を同時に検出し、追跡することができる。

移動ロボットの現在位置と姿勢に基づいたロボット座標系 Σ_r における、パーティクルフィルタにより推定された歩行者の位置と姿勢をそれぞれ ${}^r\mathbf{p}_p$ と ${}^r\mathbf{R}_p$ とする。

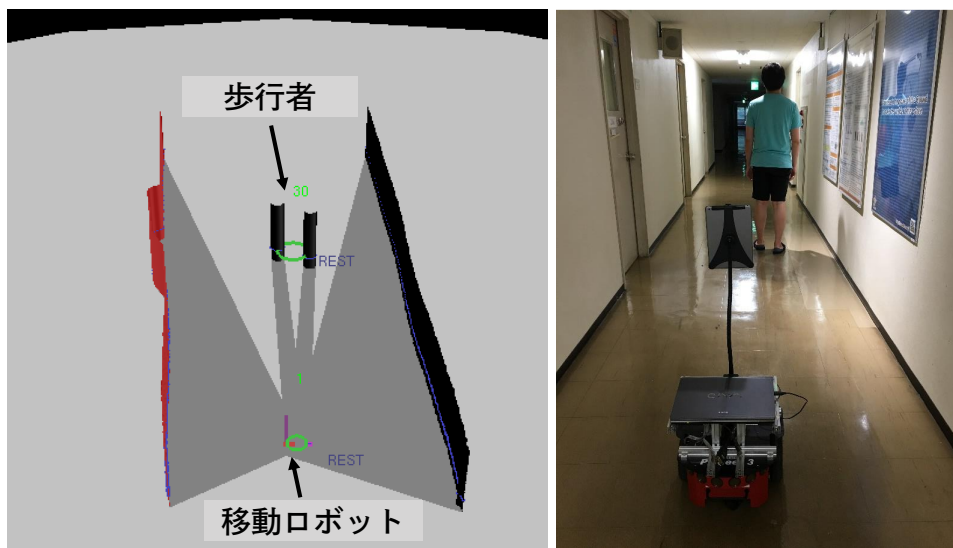


図 2.6: パーティクルフィルタを用いた歩行者追跡

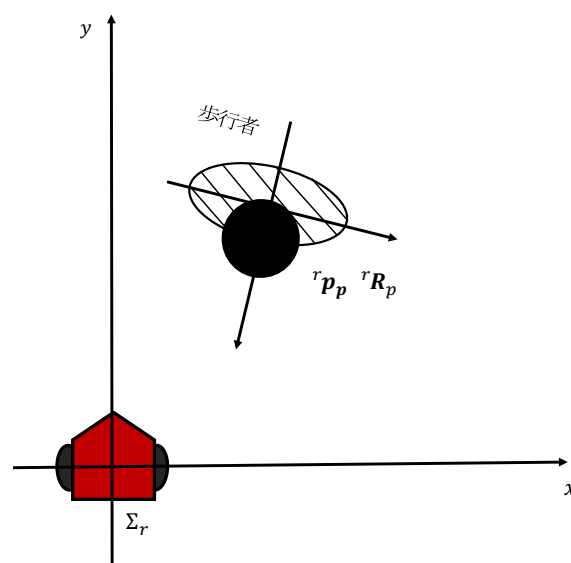


図 2.7: ロボット座標系 Σ_r とロボット座標系 Σ_r における歩行者の位置 ${}^r\mathbf{p}_p$ と姿勢 ${}^r\mathbf{R}_p$

第3章 移動ロボットの経路計画

3.1 ダイナミックウィンドウアプローチによる経路探索

本研究では、移動ロボットが障害物との衝突を回避しながら、目標位置に向かって移動させるため、Foxら [19] が提案したダイナミックウィンドウアプローチ (Dynamic Window Approach) を用いた。ダイナミックウィンドウアプローチとは、移動ロボットの速度および加速度の制限に基づく動的制約を考慮して並進速度および回転速度を導出し、最も許容可能な制御入力 (並進速度と回転速度) によってロボットの軌道を生み出す経路計画手法である。

ダイナミックウィンドウアプローチでは、移動ロボットの経路を一連の円弧で近似することが可能である。最初の時間間隔 Δt のみを考慮し、残りの時間間隔における移動ロボットの速度は一定であると仮定する。そして、ロボットの並進速度と回転速度 (v_r, ω_r) によって経路を決定することができる。

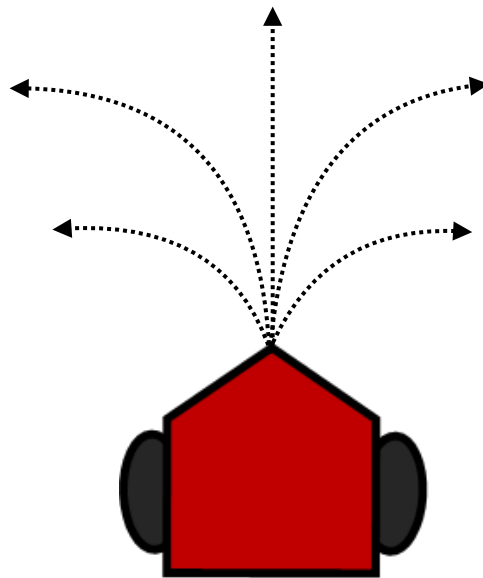


図 3.1: ダイナミックウィンドウアプローチによる移動ロボットの経路

ダイナミックウィンドウアプローチでは、以下の手順でロボットの移動経路を計画する。

(1) 空間探索

移動ロボットが短い時間間隔 Δt 内に到達可能な並進速度と回転速度によって形成されるダイナミックウィンドウと呼ばれる探索空間を導出する。図 3.2 に示すように、以下の3つのウィンドウを組み重ねることにより、ダイナミックウィンドウを生成することができる。

- ウィンドウ1：制御可能な入力範囲
移動ロボットの最大の並進速度 v_{r_max} と回転速度 ω_{r_max} がモーターのスペックなどによって制限されるため、制御可能な並進速度と回転速度の入力範囲は、図 3.2 に示す V_s となる。
- ウィンドウ2：動的制御可能な入力範囲
移動ロボットの最大加減速度がモーターのスペックによって制限されるため、現在の速度における制御可能な最大最小の入力範囲は、図 3.2 に示す V_r となる。
- ウィンドウ3：障害物による許容制御入力範囲
安全走行が可能な軌道のみを考慮するため、移動ロボットに搭載されたレーザーレンジファインダによる観測結果から計算される、ロボットが最も距離の近い障害物に衝突する前に停止できる制御入力の範囲は、図 3.2 に示す V_a となる。

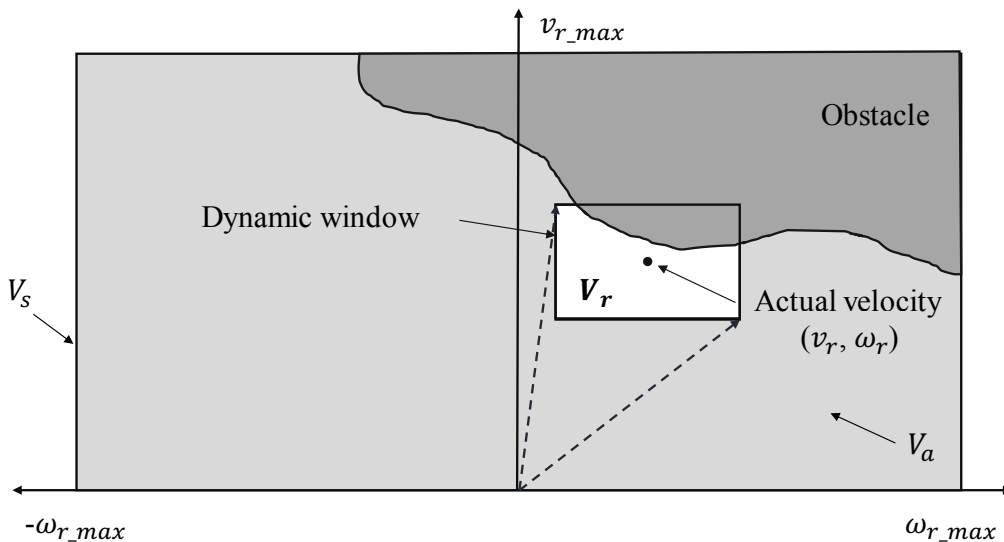


図 3.2: ダイナミックウィンドウ

(2) 評価関数による最適化

生成されたダイナミックウィンドウからの並進速度と回転速度の各ペア (v_i, ω_i) を、以下の評価関数により最適化評価を行う。

$$G(v_i, \omega_i) = \alpha \cdot \text{heading}(v_i, \omega_i) + \beta \cdot \text{distance}(v_i, \omega_i) + \gamma \cdot \text{velocity}(v_i, \omega_i) \quad (3.1)$$

- **heading:** 目標位置への向きの評価
移動ロボットの予測した位置における向きと目標位置方向の差の角度を 180 度から引いた値を用いて評価を行い、その値が大きくなるほど評価値が大きくなる。
- **distance:** 最近傍の障害物までの距離の評価
経路上の最も近い障害物までの距離の値を用いて評価を行い、その値が大きくなるほど評価値が大きくなる。
- **velocity:** 制御入力の値の評価
並進速度 v_i の値を用いて評価を行い、その値が大きくなるほど評価値が大きくなる。

この評価関数により最適化の評価を行うことで、障害物との衝突を避けながら、速い速度で目標位置に向かって走行できる制御入力 (v_i, ω_i) のペアを得ることが可能となる。評価関数に使用された時間間隔 Δt と重み付けパラメータ α 、 β と γ は、実験によって決定と調整を行う。

3.2 歩行者を考慮した経路計画

移動ロボットが目的位置までの移動経路に人と出会う可能性があり、人に対する回避行動が必要になる。しかし、人は常に静止する障害物とは異なり、周囲の環境に合わせて自らの行動の決定と変更を行う。また、移動ロボットが人間に近寄りすぎると、人間に恐怖感や違和感を与えてしまうことがあると考えられる。そこで、人を考慮して移動ロボットの経路計画を行わなければならない。

3.2.1 パーソナルスペース

Hall が提案した Proxemics [20] では、人間同士がさまざまな状況に応じて不均等に互いの間の距離を保つ現象であるパーソナルスペースを述べた。そして、人の周囲の空間を以下のように4つの距離により分割することができる。本論文では、「かくれた次元」[21]で述べられた訳文の密接距離、個体距離、社会距離および公衆距離を使用する。

- 公衆距離 Public distance (3.6 [m]~): 他者とのコミュニケーションが生じにくい距離。
- 社会距離 Social distance (1.2 ~ 3.6 [m]): 社交的な場で人と対面する距離。
- 個体距離 Personal distance (0.5 ~ 1.2 [m]): 他者との間に保つ最低限の距離。
- 密接距離 Intimate distance (~ 0.5 [m]): 身体的または個人的なインタラクションが生じる距離。

さらに、認知科学の分野における研究 [22] では、パーソナルスペースの範囲は図 3.3 のような楕円に近似し、人の正面方向が楕円の長軸方向である。また、人のパーソナルスペースの中に入ることは、その人が不快の気持ちになる要因であることを示している。

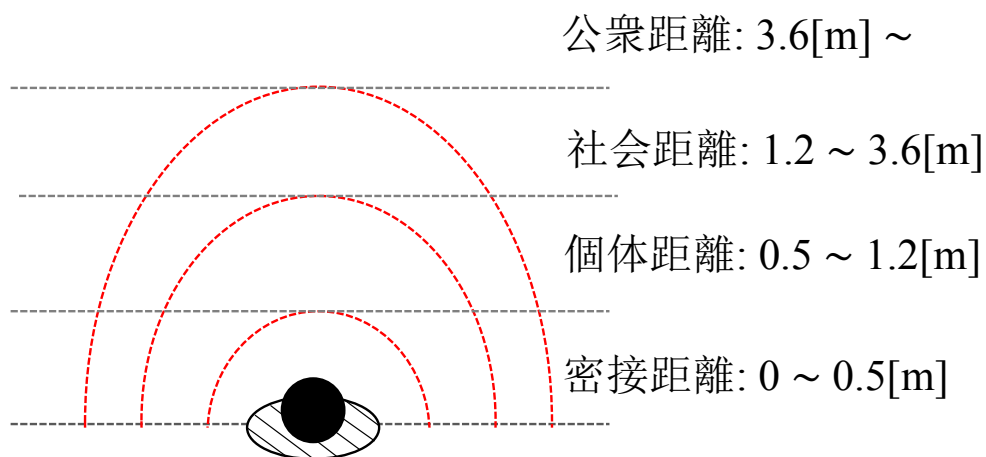


図 3.3: Proxemics によるパーソナルスペース

3.2.2 歩行者とのすれ違いアルゴリズム

本研究では、人間と共存する環境で活動する移動ロボットに人間社会と同様の規則を適用させるため、人のパーソナルスペースを考慮することで、移動ロボットに歩行者に脅威を与えない回避行動を行わせる。

依田ら [23] は、実験を通じて人間同士のすれ違い行動における回避軌跡を分析することで、回避軌跡は懸垂線に近似し、静止および歩行している実験協力者に対するすれ違い行動における回避軌跡はほぼ等しいことを示した。さらに、求めた回避軌跡に基づき、移動ロボットが人とのすれ違い行動における動作パラメータを決定するために、主観的評価を行い、移動ロボットの行動アルゴリズムを構築した [24]。

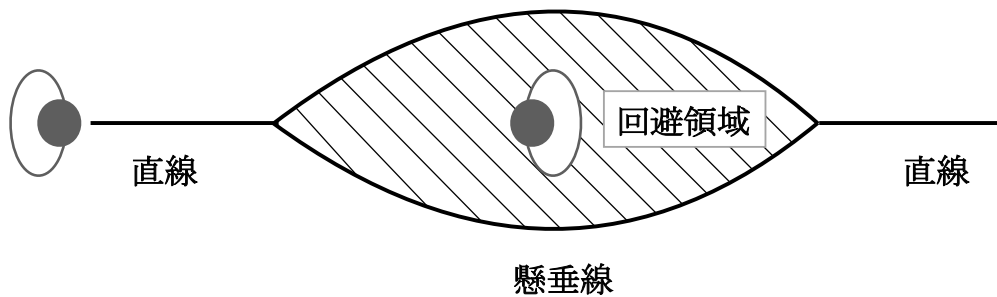


図 3.4: 人間同士のすれ違い行動における回避軌跡

Pacchierotti ら [25] は、パーソナルスペースに基づき、移動ロボットの歩行者に対するすれ違い行動のアルゴリズムを提案した。その提案手法では、移動ロボットは歩行者をセンサーにより検出した時点から、廊下の右側に沿って歩行者とのすれ違いを行い、歩行者が完全に通過した後に、もとの移動経路に戻る。移動ロボットのすれ違い経路は、ロボットの現在位置と速度、歩行者のロボットに対する相対位置と速度を用いて計算される。

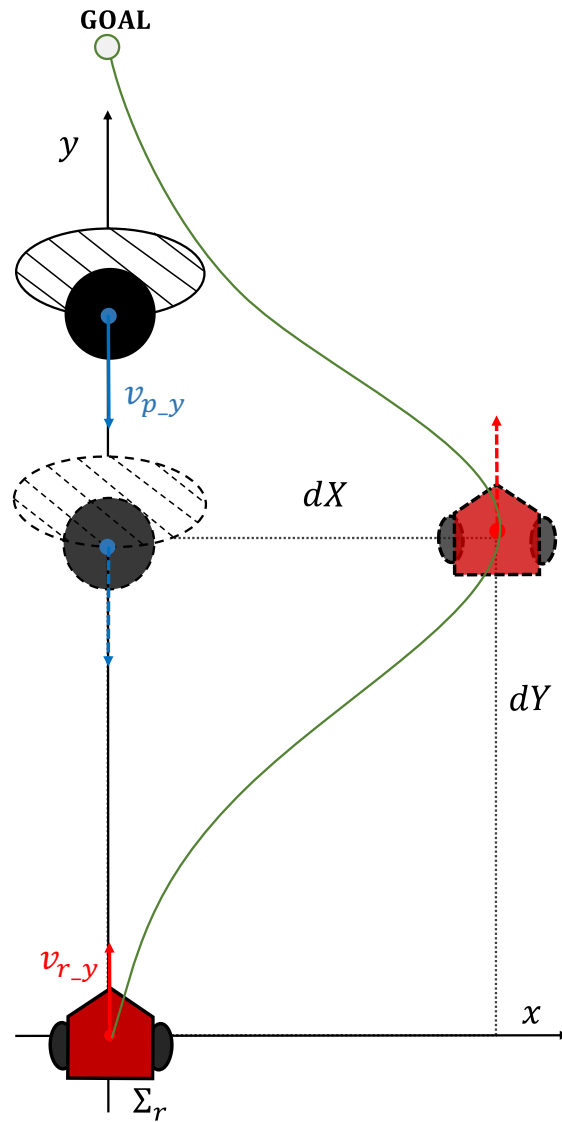


図 3.5: Pacchierotti らが提案するすれ違い行動のアルゴリズム

本研究では、以上の研究で提案されたアルゴリズムを参考にし、移動ロボットの行動アルゴリズムを構築し、移動ロボットに実装する。移動ロボットはレーザーレンジファインダを用いて、パーティクルフィルタによる歩行者検出を行う。ロボットの周囲に歩行者がない場合には、ダイナミックウィンドウアプローチにより計算される制御入力に従って障害物を避けながら、オペレータが入力した目標位置まで移動する。これを、障害物回避モードとする。ロボットの周囲に歩行者が検出され、移動ロボットに最も近い歩行者とロボットとの間の前方距離および側方距離がそれぞれ TH_y および TH_x 以内である場合には、歩行者すれ違いモードに切り替える。

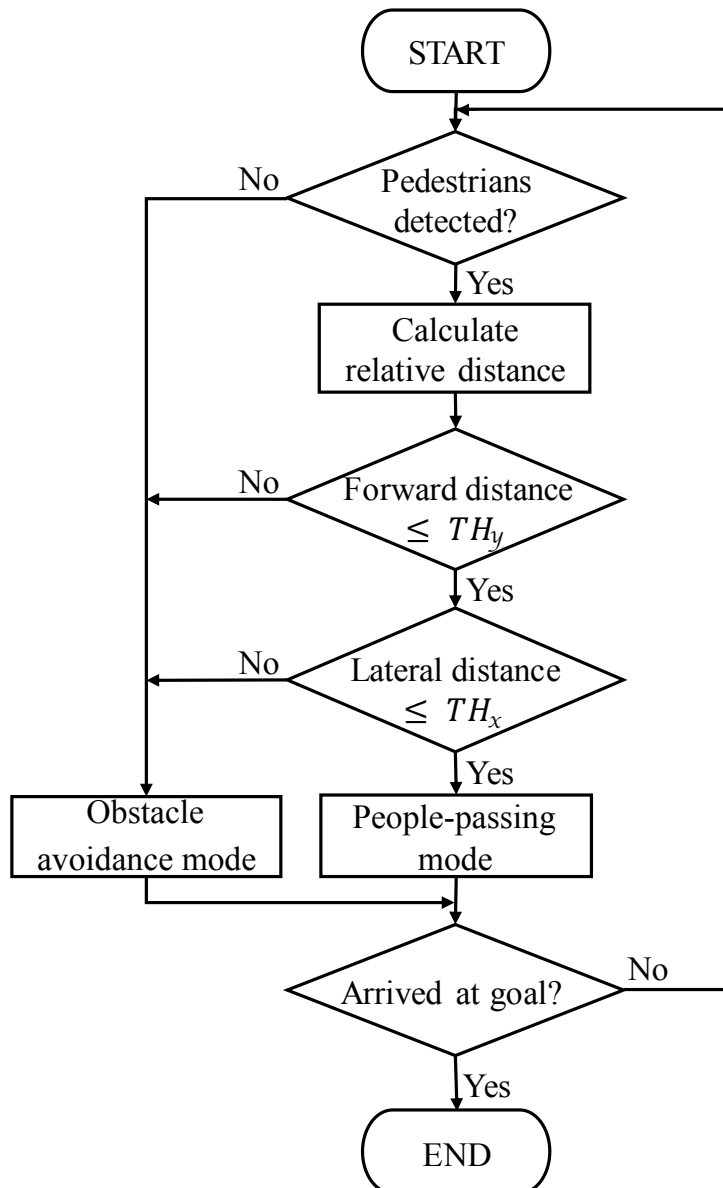


図 3.6: 移動ロボットの歩行者とのすれ違い行動アルゴリズム

歩行者すれ違いモードでは、Pacchierotti らが提案したアルゴリズムに、移動ロボットのすれ違い方向の判定を加え、以下の式を用いてロボット座標系 Σ_r における移動ロボットの回避位置 ${}^r\mathbf{p}_{r-p} = ({}^rx_{r-p} \ {}^ry_{r-p})^T$ を計算する。ロボット座標系 Σ_r における y 軸の方向は廊下の主方向と一致しているものとする。

ロボット座標系 Σ_r における歩行者の現在位置 ${}^r\mathbf{p}_{p-c} = ({}^rx_{p-c} \ {}^ry_{p-c})^T$ は、パーティクルフィルタを用いた歩行者検出により計算されるので、移動ロボットが横方向 (x 軸方向) に移動すべき距離は、次の式により算出することができる。ただし、 w_R は移動ロボットの横幅である。

$$dX = TH_x + w_R/2 - {}^rx_{p-c} \quad (3.2)$$

また、歩行者と移動ロボットの横方向における位置関係の判定により、ロボットのすれ違い方向を決定し、移動ロボットが進むべき位置の横方向 (x 軸方向) の座標を次の式によって計算する。歩行者がロボットの右側にいる場合では、ロボットが歩行者と左側にすれ違い、歩行者がロボットの左側や正面にいる場合には右側にすれ違う。

$${}^rx_{r-p} = \begin{cases} dX & ({}^rx_{p-c} \leq 0) \\ -dX & ({}^rx_{p-c} > 0) \end{cases} \quad (3.3)$$

移動ロボットの移動速度の y 軸成分 v_{r-y} は、SLAM および ARIA により計算され、歩行者の移動速度の y 軸成分 v_{p-y} はパーティクルフィルタを用いた歩行者検出により計算される。

$$v_{r-y} = v_r \cos \theta_r \quad (3.4)$$

$$v_{p-y} = v_p \sin \theta_p \quad (3.5)$$

よって、移動ロボットが行くべき位置の縦方向 (y 軸方向) の座標は、以下の式によって決定する。

$${}^ry_{r-p} = \frac{{}^ry_{p-c} \cdot v_{r-y}}{v_{r-y} - v_{p-y}} \quad (3.6)$$

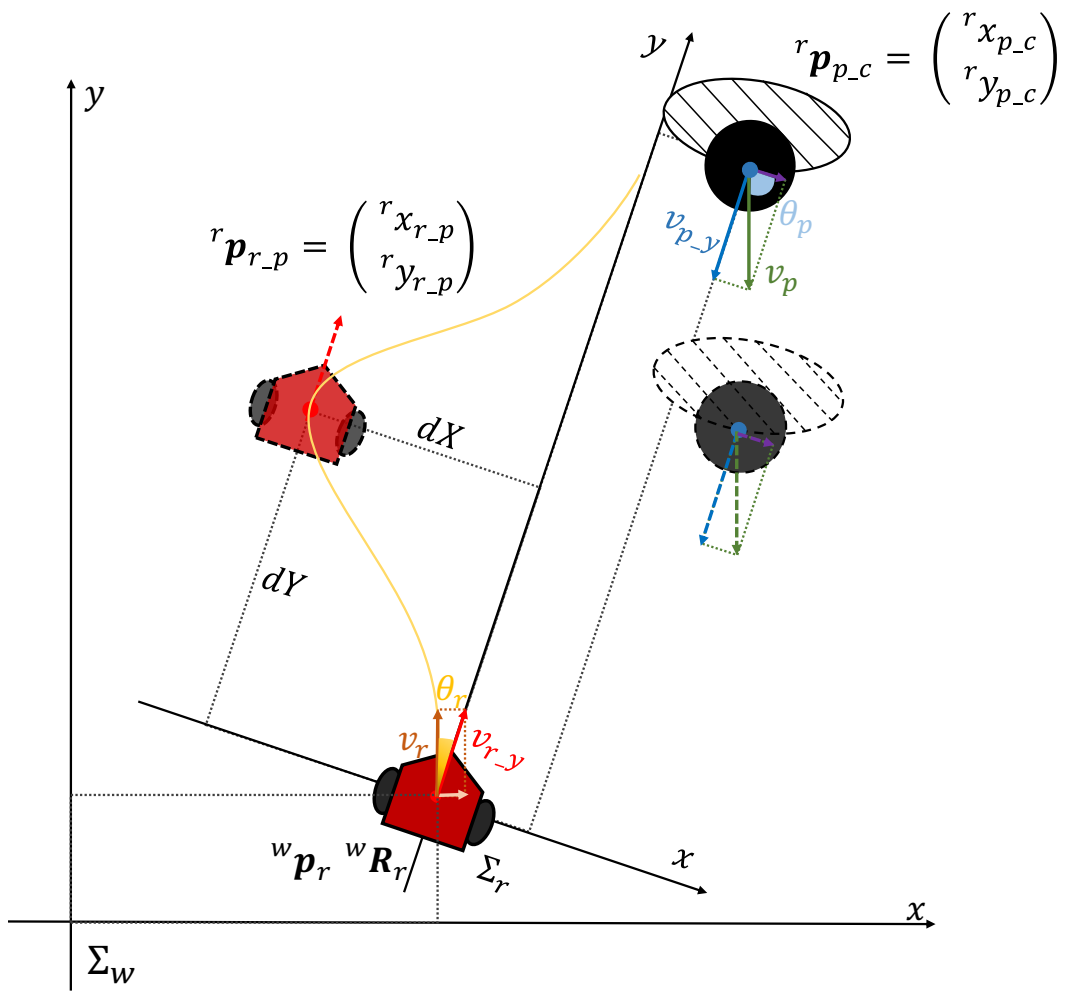


図 3.7: 歩行者すれ違いモードのアルゴリズム

第4章 顔インタフェースによる動作予告

4.1 顔インタフェース

1.2.1 項に述べたように、人とロボットのインタラクションにおいて顔が重要であるため、本研究では顔インタフェースを用いて動作予告を行う。顔インタフェースは移動ロボットに取り付けられたタブレットに表示する。提案する顔インタフェースでは、デザインの自由度が高く、低コストな3Dコンピュータグラフィックスを利用する。

4.1.1 モナリザ効果

平面なタブレットに顔インタフェースを表示すると、モナリザ効果により、顔が傾いていても、実際のロボットの顔と視線の方向と人が感知する顔と視線の方向には誤差が生じるため、人にとって分かりにくいという問題点が考えられる。モナリザ効果 [26] とは、平面な絵画の各部分の遮蔽関係が変わらないため、観察者が絵画を正対していなくても、図 4.1 に示すようにモナリザの目は自分を追いかけ、絵画に描かれた人物が自分に正対していると感じてしまう現象である。

そこで本研究は、3D モデリングソフト Autodesk 3ds Max 2016 (Autodesk, Inc.) を用いて、三次元の提案顔インタフェースのモデルを作成した。顔インタフェースの3D モデルを回転させることで、立体的な顔の遮蔽関係の変化により、モナリザ効果を軽減させることとする。

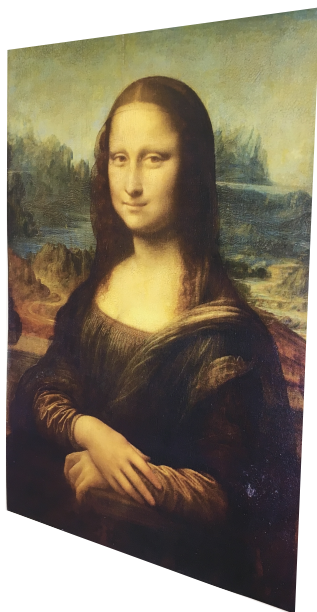


図 4.1: モナリザ効果の様子

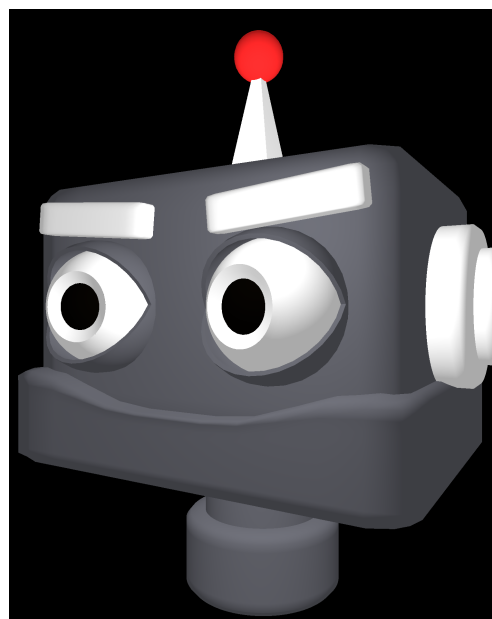


図 4.2: 提案顔インタフェースの様子

4.1.2 不気味の谷

Mori [27] は、ロボットがより人間的に見えるようになるにつれ、人間がロボットの親しみやすさに対する感覚は高まり、ある時点で人間の認知からの微妙な偏差によってロボットが気味の悪いように見え始め、ロボットの親しみやすさに対する感覚が谷に陥る現象を観察した。

その不気味の谷に陥る危険性を取り除くために、本研究では、移動ロボットの外観に合わせて、顔インタフェースの3Dモデルのデザインにはアニメーションのキャラクターのようなロボットのデザインを採用する。

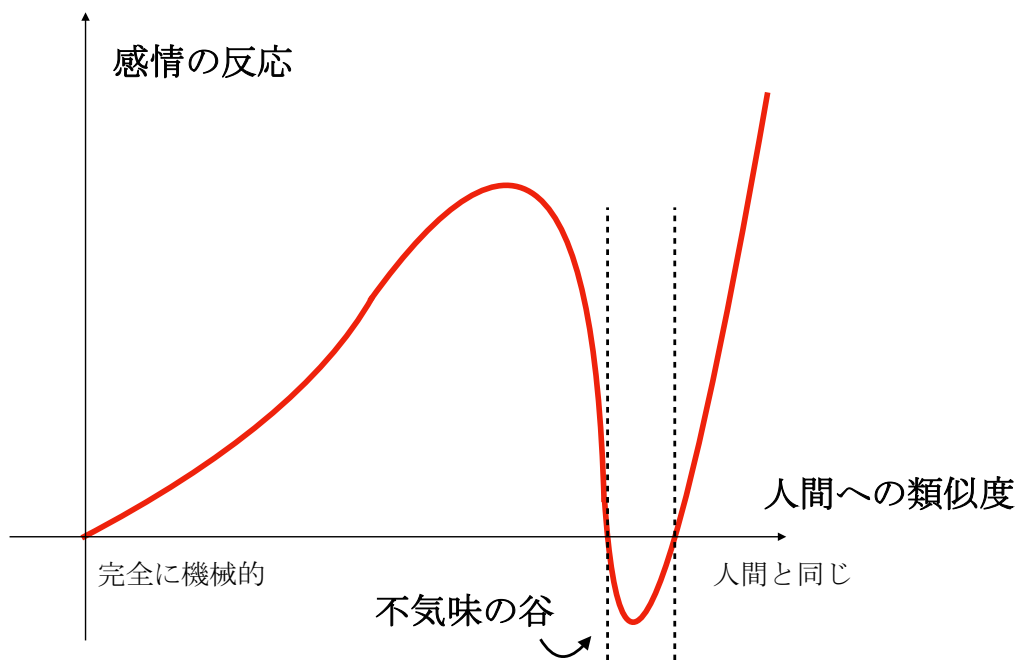


図 4.3: 不気味の谷の様子

4.2 顔インタフェースによる視線行動の制御

視線行動は、急速で複雑な行動であり、関心のある領域や音、記憶などの刺激によって引き起こされ、明確なターゲットがなくても頭や視野全体を動かす視覚的刺激によって自然に発生することもある [28]。実世界において、発達した視覚システムを持つ人間を含む多くの動物は、目、頭、または体の動きを複合的に使って視線を制御する現象が観察された [29]。

人間の視線行動に伴う頭部、眼球および体の動きの特徴をモーションキャプチャーなどの実験により計測し、モデル化してバーチャルキャラクターに応用する研究が盛んである [30] [31]。本研究では、実際の人間の視線行動の実測データによる汎用モデルを用いることで、移動ロボットに人間のような自然な視線行動をさせることが可能となる。眼球と顔の回転の協調運動を考慮した CG キャラクターの動作モデルを利用する [32]。本モデルに基づき、顔インタフェースの頭部と眼球のそれぞれの回転角度を計算し、眼球と頭部の複合的な回転動作を生成する。

提案する動作予告手法では移動ロボットのこれからの移動方向を示すため、垂直方向における顔インタフェースによる視線行動必要ではなく、水平方向の視線行動のみを考慮する。移動ロボットの本体の座標系 Σ_r と顔インタフェースにおける頭部 Σ_h と左右二つの眼球の座標系 Σ_{e_l} 、 Σ_{e_r} の関係を図 4.4 に示す。

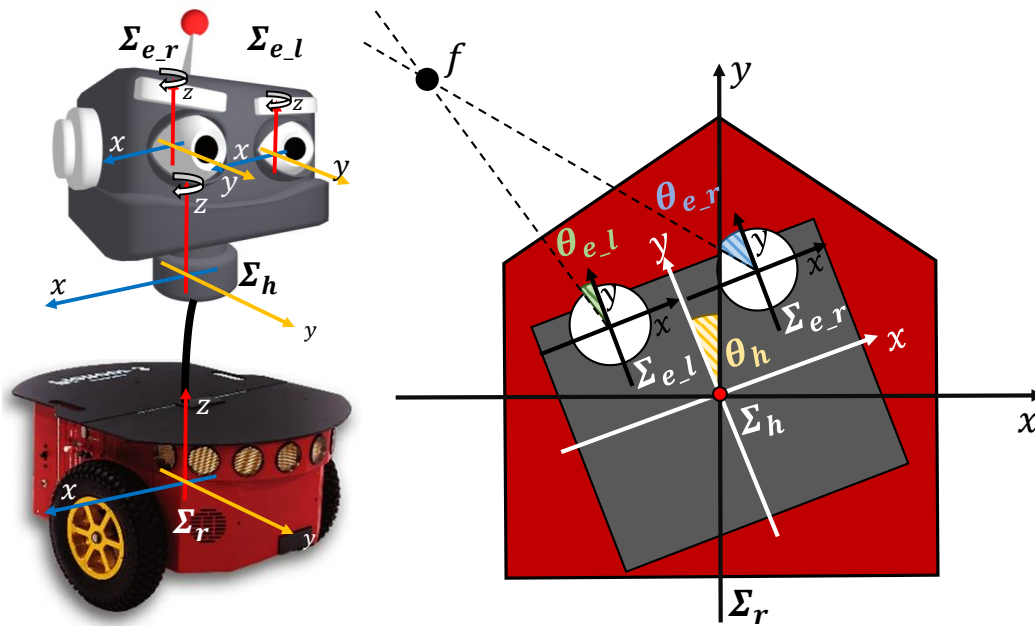


図 4.4: 移動ロボットの座標系と顔インタフェースの座標系の関係

使用するモデルでは、眼球と頭部の回転の和を視線方向と定義する。ロボット座標系 Σ_r における視線の方向 ${}^r\theta_f$ は注視点 f の位置 $({}^rx_f, {}^ry_f)$ を用いて以下の式により計算する。

$${}^r\theta_f = \text{atan2}({}^rx_f, {}^ry_f) \quad (4.1)$$

式(4.1)で算出された視線方向 ${}^r\theta_f$ に基づき、眼球と頭部の回転の割合をそれぞれ D_e と D_h とし、以下の式で計算する。

$$D_e = \begin{cases} 1 & (0 \leq |{}^r\theta_f| < 15) \\ \frac{30 - |{}^r\theta_f|}{15} & (15 \leq |{}^r\theta_f| \leq 30) \\ 0 & (30 < |{}^r\theta_f|) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$D_h = \begin{cases} 1 - D_e & (0 \leq |{}^r\theta_f| < 50) \\ 1 - \frac{(|{}^r\theta_f| - 50)/2}{80} & (50 \leq |{}^r\theta_f| \leq 130) \\ 0 & (130 < |{}^r\theta_f|) \end{cases} \quad (4.3)$$

ただし、人間の骨格の構造上の制限に基づき、 $0 \leq |{}^r\theta_f| < 15$ の範囲では眼球の回転のみ、 $15 \leq |{}^r\theta_f| \leq 30$ の範囲では眼球と頭部の回転を行うように簡略化した。

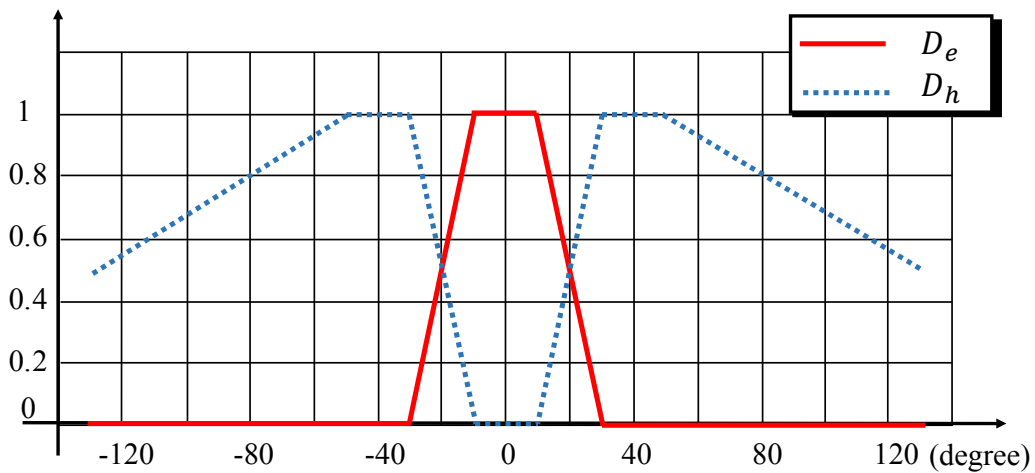


図 4.5: 眼球と頭部の回転の割合

視線方向が ${}^r\theta_f$ の場合における眼球と頭部の回転の割合に基づき、頭部の回転角度 θ_h は

$$\theta_h = D_h \cdot {}^r\theta_f \quad (4.4)$$

となり、頭部座標系 Σ_h における注視点の位置は以下のようなになる。

$${}^h\mathbf{p}_f = {}^r\mathbf{R}_h^T ({}^r\mathbf{p}_f - {}^r\mathbf{p}_h) \quad (4.5)$$

また、左右の眼球の座標系 Σ_{e_l} と Σ_{e_r} における注視点の位置は以下の式で算出される。

$${}^{e_l}\mathbf{p}_f = {}^h\mathbf{R}_{e_l}^T ({}^h\mathbf{p}_f - {}^h\mathbf{p}_{e_l}) \quad (4.6)$$

$${}^{e_r}\mathbf{p}_f = {}^h\mathbf{R}_{e_r}^T ({}^h\mathbf{p}_f - {}^h\mathbf{p}_{e_r}) \quad (4.7)$$

よって、左右二つの眼球の回転角度 θ_{e_l} と θ_{e_r} は、それぞれ以下の式で計算される。

$$\theta_{e_l} = \text{atan2}({}^{e_l}x_f, {}^{e_l}y_f) \quad (4.8)$$

$$\theta_{e_r} = \text{atan2}({}^{e_r}x_f, {}^{e_r}y_f) \quad (4.9)$$

4.3 動作予告のタイミング

顔インタフェースによる動作予告は、移動制御の計算によって自動的に生成する。ダイナミックウィンドウアプローチでは、ロボットの現在位置、姿勢と移動速度に基づき、これからの移動経路を予測することができ、予測した経路上における移動ロボットの各位置を求めることが可能である。そして、予測した移動ロボットの位置をロボットの現在位置における注視点の位置とし、顔インタフェースの眼球と顔の回転により動作予告を行う。その際に、動作予告の提示から実際の動きまでの時間（以降、タイミングと述べる）が重要となる。タイミングが短すぎる場合、歩行者が動作予告に対する認識と反応に時間がかかるので人に脅威を与えてしまう可能性があり、タイミングが長すぎる場合、動作予告に対して違和感を感じてしまう可能性があると考えられる。

ロボットの行動を予告するタイミングを心理実験より検証した研究が様々ある。萩原ら [7] はロボットアームの速度変化に対する予告のタイミングを主観評価と心拍数の変化により評価し、1.0~1.5[s] が最適なタイミングであると示した。Matsumaru ら [33] は、移動ロボットに動作予告を提示させる際に 1.0~1.5[s] が最適であると見なされることを示した。

本研究では、顔インタフェースによる動作予告のタイミングを評価実験で評価する。

第5章 評価実験

本研究では、顔インタフェースによる動作予告を評価するため、移動ロボットに対する印象に関する主観的評価を行った。

主観的評価には、一般的に Semantic Differential 法 (SD 法) [34] を用いる。SD 法は、相反する意味の複数の形容詞対を複数の項目として用意し、評価対象に対する印象を 5 段階や 7 段階の評価尺度のどこに位置付けられるのかを質問し、因子分析により因子得点を印象評価の値として抽出する手法である。評価に用いる形容詞対の選択には、実験および調査によって異なり、因子分析を行う必要がある。

Bartneck ら [35] は、ロボットに特化したヒューマンロボットインタラクション (HRI) の分野における標準化された測定ツールを目指し、人間とロボットの相互作用における 4 つの重要な概念、擬人化、生命性、好ましさ、および知性の知覚の測定について、SD 法の評価尺度を使用した質問表 Godspeed Questionnaire を提案した。Godspeed Questionnaire の付録には、back translation という翻訳文の正確性を検証するための翻訳手法を用いて作成した形容詞対と説明文の日本語訳が含まれている。

評価項目	項目数	形容詞対
Anthropomorphism (擬人化)	5	Fake 偽物のような Machinelike 機械的 Unconscious 意識を持たない Artificial 人工的な Moving rigidly ぎこちない動き - Natural 自然な - Humanlike 人間的 - Conscious 意識を持っている - Lifelike 生物的な - Moving elegantly 洗練された動き
Animacy (生命性)	6	Dead 死んでいる Stagnant 活気のない Mechanical 機械的な Artificial 人工的な Inert 不活発な Apathetic 無関心な - Alive 生きている - Lively 生き生きとした - Organic 有機的な - Lifelike 生物的な - Interactive 対話的な - Responsive 反応のある
Likeability (好ましさ)	5	Dislike 嫌い Unfriendly 親しみにくい Unkind 不親切な Unpleasant 不愉快な Awful ひどい - Like 好き - Friendly 親しみやすい - Kind 親切な - Pleasant 愉快な - Nice 良い
Perceived Intelligence (知性の知覚)	5	Incompetent 無能な Ignorant 無知な Irresponsible 無責任な Unintelligent 知的でない Foolish 愚かな - Competent 有能な - knowledge 物知りな - Responsible 責任のある - Intelligent 知的な - Sensible 賢明な

図 5.1: Godspeed Questionnaires 評価用紙

各概念における形容詞対の項目数と形容詞対の内容を図 5.1 に示す。SD 法とは異なり、Godspeed Questionnaire における形容詞対の選択は固定されている。「機械的-人間的」や「人工的な-生物的な」は擬人化を評価する形容詞対であり、「死んでいる-生きている」や「人工的な-生物的な」は生命性を評価する形容詞対である。擬人化と生命性の間には形容詞対「人工的な-生物的な」の重複がある。この形容詞対が両方に現れる理由は、生きていくことが人間のようなものであることの本質的な部分である。なお、「嫌い-好き」や「親しみにくい-親しみやすい」は好ましさを評価する形容詞対であり、「無知な-物知りな」や「知的でない-知的な」は知性の知覚を評価する形容詞対である。質問表において、左側にネガティブな形容詞を示しており、右側にポジティブな形容詞を示している。本研究では、評価尺度には最もネガティブな回答を 1 点から最もポジティブな回答を 5 点までの 5 段階を採用した。なお、質問表では「以下のスケールに基づいてこのロボットの印象を評価してください」という説明文でロボットの擬人化、生命性、好ましさおよび知性の知覚に対する印象を測定する。

5.1 歩行者と移動ロボットのすれ違い実験

5.1.1 実験目的および手法

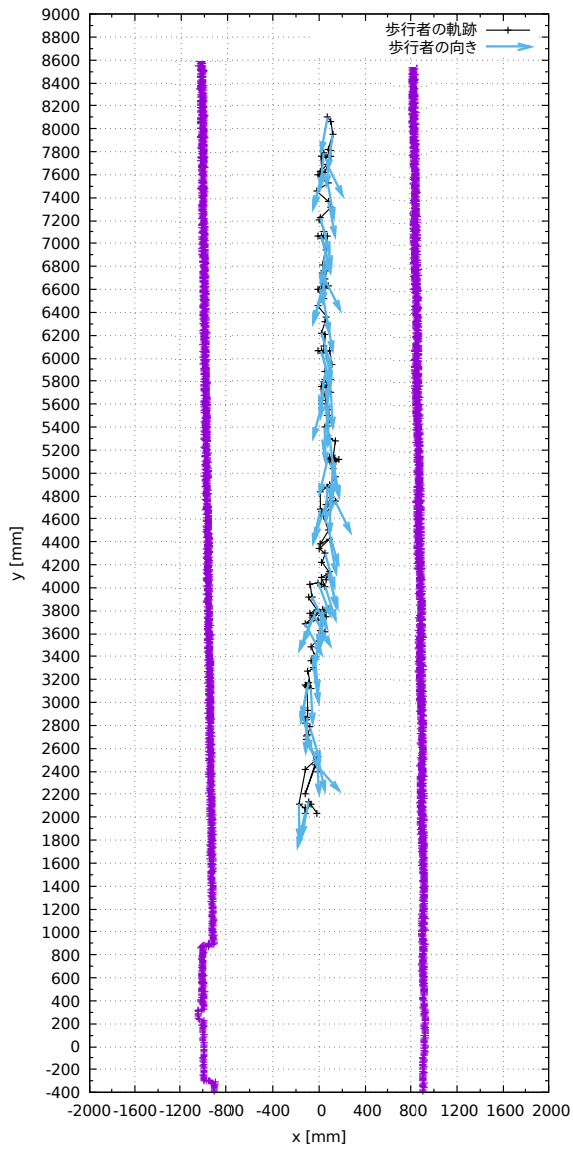
主観的評価実験の前に、移動ロボットの動きと顔インタフェースによる動作予告が設計どおりに実行されるかを確認するために、歩行者とのすれ違い実験を行った。

本実験では、移動ロボットは幅 1.7[m] の屋内の廊下で 0.3[m/s] の平均速度で移動し、対面の 8.0[m] の距離から 1.2[m/s] の平均速度で移動する歩行者とすれ違う。歩行者は移動ロボットを避けることなく、ロボットに向かって直進した。顔インタフェースによる動作予告を行う場合と動作予告を行わない場合に分けて、実験を二回行った。

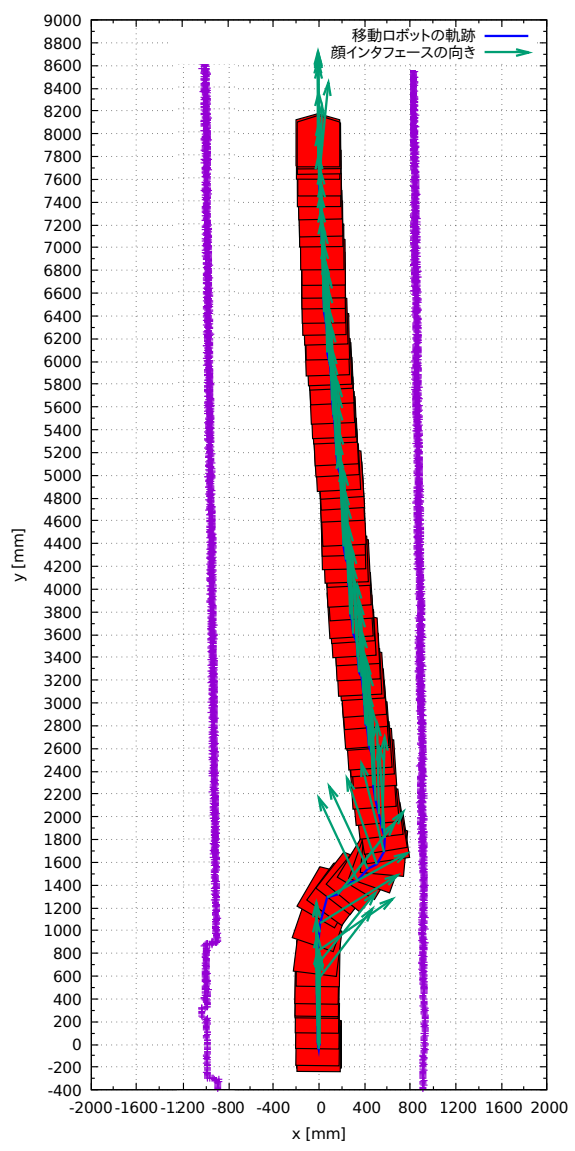
表 5.1: 移動ロボット PC のスペック

種類	仕様
OS	Ubuntu 16.04
OS type	64-bit
CPU	Intel(R) Core 2 DUO T9900
Memory	8Gbyte

実験を行った際に、出力された移動ロボットの位置姿勢と顔インタフェース向きおよびパーティクルフィルタにより計算された歩行者の位置姿勢と向きを図 5.2 と図 5.3 に示す。ただし、0.5[s] 毎に描画した。紫色点群は SLAM による作成した実験環境である廊下の地図を示す。これらの図より、移動ロボットが経路上の歩行者とすれ違いながら目標位置までたどり着けることと、回避行動を行う前に顔インタフェースが事前にロボットの移動方向に向けられることが確認できた。

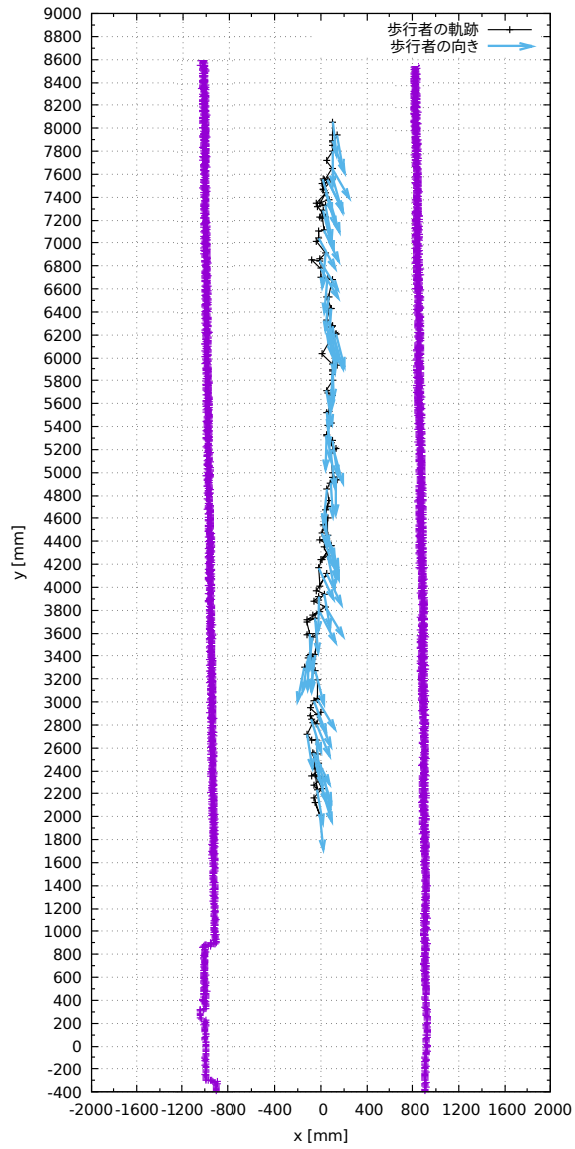


(a) 歩行者の移動軌跡と向き

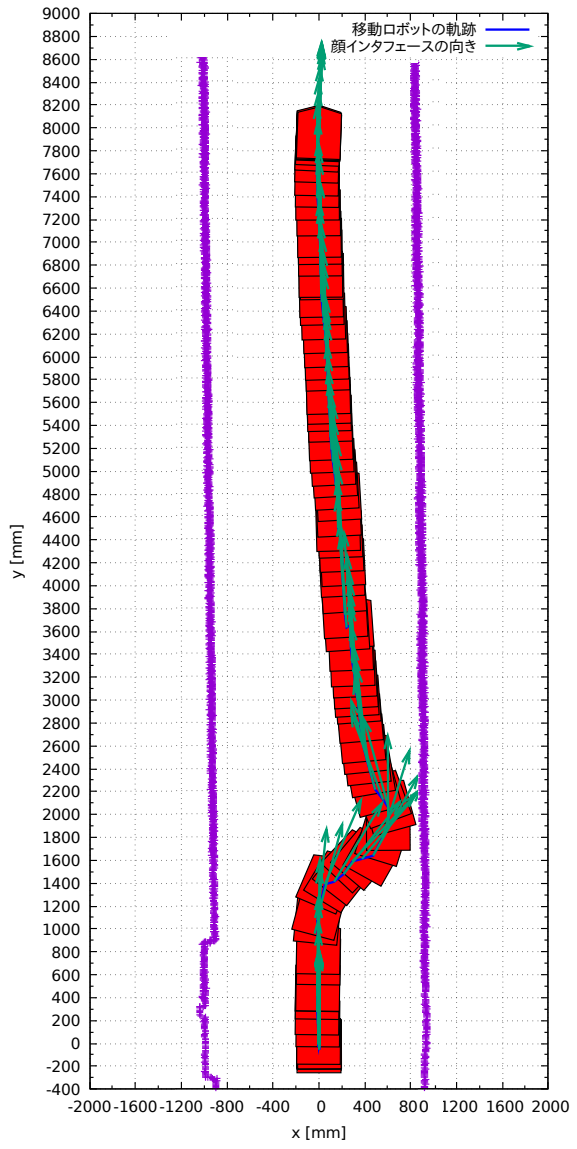


(b) 移動ロボットの軌跡と顔インタフェースの向き

図 5.2: 動作予告を行う場合のすれ違い実験



(a) 歩行者の移動軌跡と向き



(b) 移動ロボットの軌跡と顔インタフェースの向き

図 5.3: 動作予告を行わない場合のすれ違い実験

5.2 歩行者とのすれ違い評価実験

5.2.1 実験目的および手法

歩行者とすれ違う際、顔インタフェースによる動作予告がロボットの行動の分かりやすさを向上させているか、および顔インタフェースによる動作予告は人間がロボットに対する印象との関係を明らかにすることを本実験の目的とし、実験協力者による評価実験を行った。

本実験では、条件の簡略化を意図して実験協力者と移動ロボットが一对一ですれ違う場面を設定した。実験に使用した移動ロボットと実験環境を図 5.4 と図 5.5 に示す。実験協力者には、実験の説明を行った後、普段どおりに歩くように指示し、スタート地点からゴール地点まで歩行練習を二回させた。実験協力者は幅 1.7[m] の屋内の廊下で移動ロボットと対面し、距離の 8.0[m] の位置で、移動ロボットと向かい合う。移動ロボットが 0.3[m/s] の平均速度で移動し、実験協力者とすれ違う際、自動的に障害物回避と歩行者回避を行いつつ、目標位置に向かう。実験協力者は、普段の歩行速度で前進し、ゴール地点まで到着した直後に、移動ロボットに対する印象と行動の分かりやすさについて評価用紙に回答した。

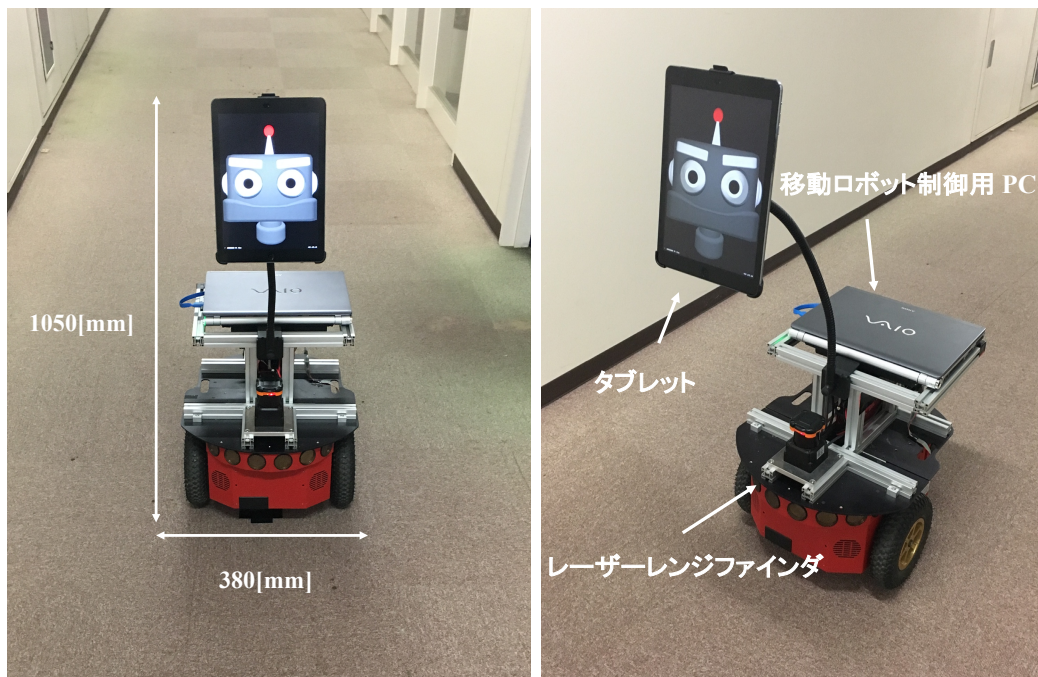


図 5.4: 実験に使用した移動ロボット

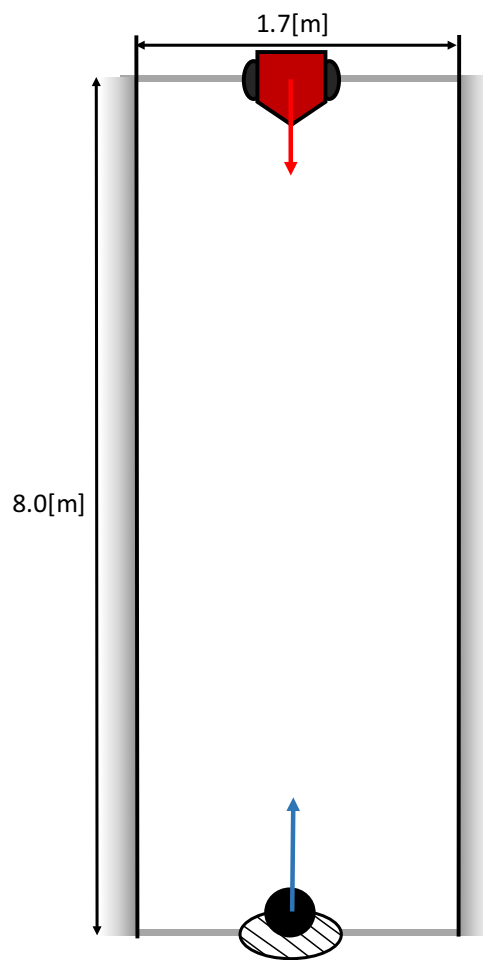


図 5.5: 歩行者とのすれ違い評価実験の環境

顔インタフェースによる動作予告の有無に関して以下のように二つの条件を設けた。

- 予告あり条件: ロボットが顔インタフェースによる動作予告を行う。
- 予告なし条件: ロボットが顔インタフェースによる動作予告を行わない。

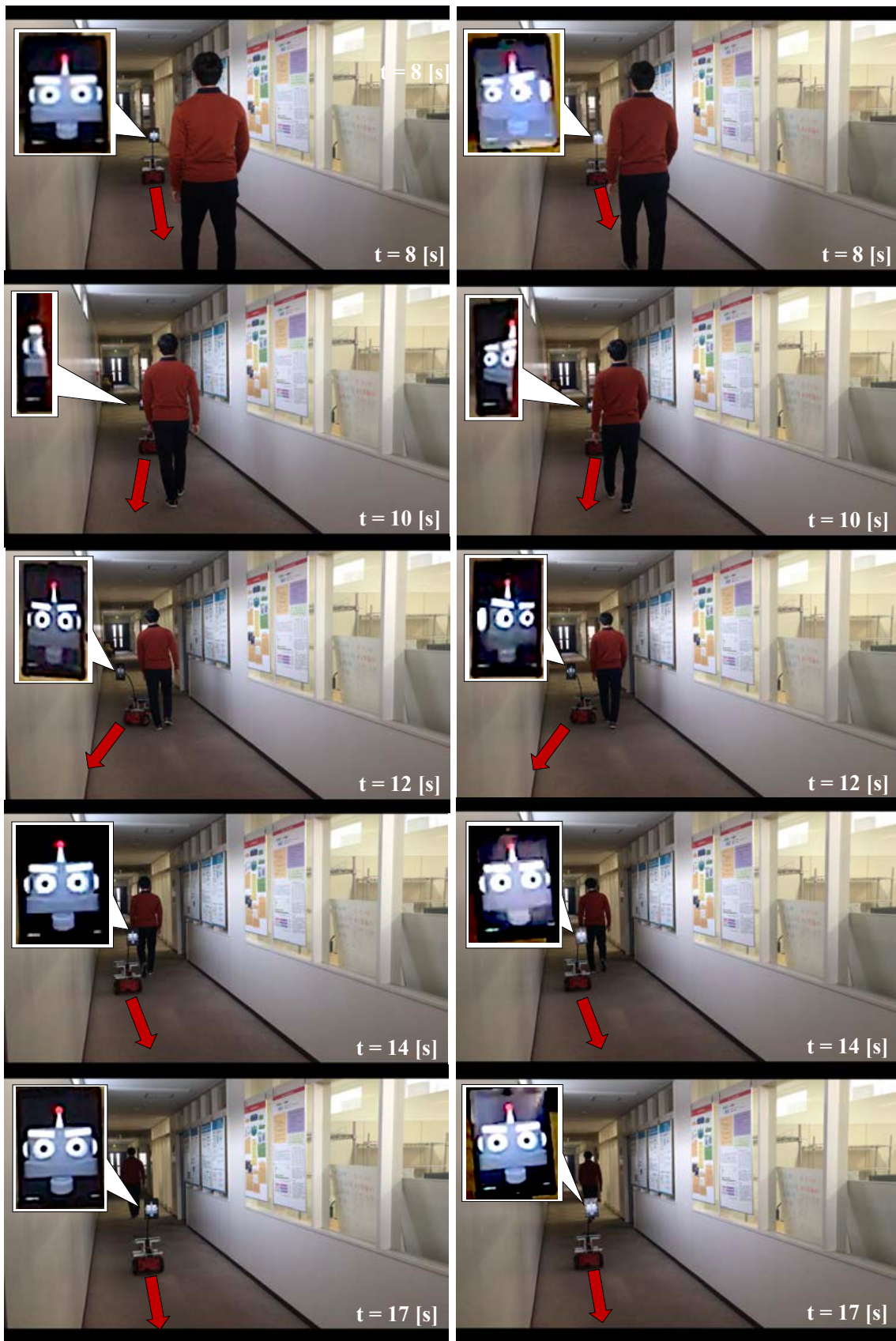
予告あり条件と予告なし条件における実験を以上の手順で二回行った。しかし、二回目のすれ違い実験では実験協力者が移動ロボットの回避行動を予想できるようになり、反復使用による練習効果が印象評価へ影響してしまう。そのため、実験協力者ごとに予告あり条件と予告なし条件の順序を入れ替え、カウンターバランスをとった。

予告あり条件と予告なし条件における各パラメータは表 5.2 に示す。動作予告の有無以外の差異をなしにしている。人間のパーソナルスペースを基準としてロボットの回避前方距離 TH_y を 3.6[m] と設定し、回避側方距離 TH_x を 0.7[m] と設定した。動作予告を行うタイミングは 1.5[s] と設定した。

オペレータは、移動ロボットにゴール地点の設定と移動開始させる操作のみ行った。実験の様子の一例を図 5.6 に示す。実験協力者の同意を得た上で撮影を行った。

表 5.2: 歩行者とのすれ違い実験における各パラメータ

各パラメータ	予告なし	予告あり
移動ロボットの平均速度	0.30[m/s]	0.30[m/s]
前方距離 TH_y	3.60[m]	3.60[m]
側方距離 TH_x	0.70[m]	0.70[m]
動作予告のタイミング t	1.50[s]	1.50[s]



(a) 予告なし

(b) 予告あり

図 5.6: 歩行者とのすれ違い評価実験の様子

本実験では、移動ロボットに対する印象を評価するため、擬人化、生命性、好ましさ、知性の知覚の4つの項目について移動ロボットに対する主観的評価を行った。評価用紙を図5.7に示す。評価用紙の説明文、形容詞対および評価尺度には、Godspeed Questionnaireを参考にし、「以下のスケールに基づいて移動ロボットの行動を評価してください」という説明文と「分かりにくい-分かりやすい」という形容詞対を加えた。なお、評価実験の目的を隠すため、形容詞対の順序をランダムにした。実験協力者は、合計24名の筑波大学および筑波大学大学院の学生であった（男性14名、女性10名、平均年齢25.6歳）。

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの行動を評価してください。/Please rate the behavior of the robot based on the scale below.

Confusing 分かりにくい	1	2	3	4	5	Obvious 分かりやすい
------------------	---	---	---	---	---	----------------

Q2. 以下のスケールに基づいてこのロボットへの印象を評価してください。/Please rate your impression of the robot on the following scales.

Ignorant 無知な	1	2	3	4	5	Knowledgeable 物知りな
Dislike 嫌い	1	2	3	4	5	Like 好き
Moving rigidly ぎこちな い動き	1	2	3	4	5	Moving elegantly 洗練さ れた動き
Unkind 不親切な	1	2	3	4	5	Kind 親切な
Inert 不活発な	1	2	3	4	5	Interactive 対話的な
Irresponsible 無責任な	1	2	3	4	5	Responsible 責任のある
Stagnant 活気のない	1	2	3	4	5	Lively 生き生きとした
Awful ひどい	1	2	3	4	5	Nice 良い
Unconscious 意識を持た ない	1	2	3	4	5	Conscious 意識を持って いる
Fake 偽物のような	1	2	3	4	5	Natural 自然な
Artificial 人工的な	1	2	3	4	5	Lifelike 生物的な
Incompetent 無能な	1	2	3	4	5	Competent 有能な
Foolish 愚かな	1	2	3	4	5	Sensible 賢明な
Mechanical 機械的な	1	2	3	4	5	Organic 有機的な
Dead 死んでいる	1	2	3	4	5	Alive 生きている
Unpleasant 不愉快な	1	2	3	4	5	Pleasant 愉快的な
Unintelligent 知的でな い	1	2	3	4	5	Intelligent 知的な
Unfriendly 親しみにくい	1	2	3	4	5	Friendly 親しみやすい
Apathetic 無関心な	1	2	3	4	5	Responsive 反応のある
Machinelike 機械的	1	2	3	4	5	Humanlike 人間的

図 5.7: 歩行者とのすれ違い評価実験の評価用紙

5.2.2 実験の仮説

本実験では、集計した 24 名のデータを用いて、以下の仮説に基づき分析を行う。

仮説 1：歩行者とすれ違う際に顔インタフェースによる動作予告を行う場合は、動作予告を行わない場合よりロボットの行動が分かりやすい。

仮説 2：歩行者とすれ違う際に顔インタフェースによる動作予告を行う場合は、動作予告を行わない場合よりロボットに対する印象が良い。

5.2.3 実験の結果 (1)：移動ロボットの行動の分かりやすさに関する評価

予告あり条件と予告なし条件において、移動ロボットの行動の分かりやすさに差があるかどうかについて有意差水準 5% で t 検定を行った。その結果、有意差が見られた ($t=-3.935$, $df=23$, $p<.001$)。その結果と平均値を見ると、動作予告を行わない場合より動作予告を行う場合がロボットの行動が分かりやすいと解釈することができる。

図 5.8 に「移動ロボットの行動の分かりやすさ」に関する評価の結果を示す。表 5.3 に 5 段階評価の平均値および標準偏差を示す。

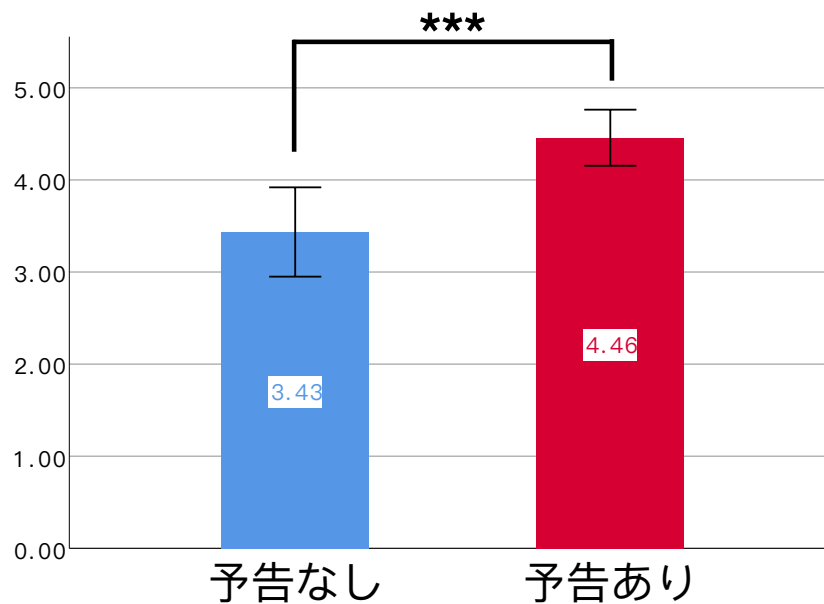


図 5.8: 「移動ロボットの行動の分かりやすさ」に関する評価の結果

表 5.3: 「移動ロボットの行動の分かりやすさ」による 5 段階評価の平均値および標準偏差

評価項目	統計量	予告なし	予告あり
分かりやすさ	平均値	3.43	4.46
	標準偏差	1.14	0.72
	有意確率 (両側)	$t=-3.935$, $p<.001$ (***)	

5.2.4 実験の結果(2): 移動ロボットに対する印象に関する評価

評価用紙のロボットに対する印象に関する擬人化、生命性、好ましさ、知性の知覚の4つの項目に対する評価値について有意差水準5%でt検定を行った結果、いずれも、予告あり条件と予告なし条件において有意差があると示唆された。各項目における評価値の平均値を見ると、動作予告を行わない場合より動作予告を行う場合はロボットに対する印象が良いと解釈することができる。

図 5.9 に「移動ロボットに対する印象」の各項目に関する評価の結果を示す。表 5.4 に各項目による5段階評価の平均値および標準偏差を示す。

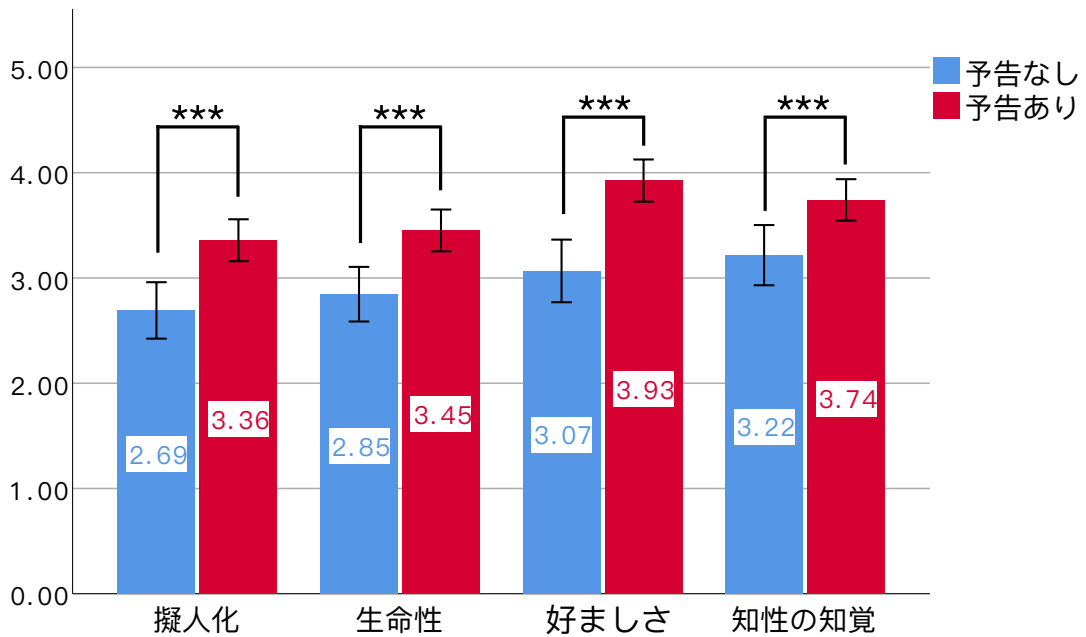


図 5.9: 「移動ロボットに対する印象」に関する評価の結果

表 5.4: 「移動ロボットに対する印象」による5段階評価の平均値および標準偏差

評価項目	統計量	予告なし	予告あり
擬人化	平均値	2.69	3.36
	標準偏差	0.64	0.47
	有意確率（両側）	t=-4.143, p<.001 (***)	
生命性	平均値	2.85	3.45
	標準偏差	0.62	0.47
	有意確率（両側）	t=-4.803, p<.001 (***)	
好ましさ	平均値	3.07	3.93
	標準偏差	0.71	0.48
	有意確率（両側）	t=-6.390, p<.001 (***)	
知性の知覚	平均値	3.22	3.74
	標準偏差	0.68	0.47
	有意確率（両側）	t=-4.387, p<.001 (***)	

5.2.5 実験の考察

(1) 「移動ロボットの行動の分かりやすさ」に関する考察

実験結果の分析から、歩行者が移動ロボットとすれ違う場合、顔インタフェースによる動作予告を行うことで、ロボットの行動が分かりやすくなるように思わせることができたと言える。しかし、自由記述の欄に、「動作予告のない場合ロボットがどこに行きたいのかわからないから、ぶつかることを心配した」というコメントがあった。一方で、「ロボットは顔を回転することで行きたい方向に視線を向けるように見えるから、次はその方向に行く判断できるので、ロボットの行動が分かりやすかった」というコメントも得られた。

(2) 「移動ロボットに対する印象」に関する考察

歩行者が移動ロボットとすれ違う場合、顔インタフェースによる動作予告を行うことで、より人間らしく、生きている、好ましい、知的なロボットであるような印象を与えることができるという結果が得られた。自由記述の欄に、「移動方向を変える前に行きたい方向に顔を向ける行動が優しくて親しみやすかった」というコメントがあった。

一方で、擬人化という項目に関する主観的評価の結果は他の項目より低いことが分かった。「ロボットの外見が完全に機械的なので、機械であるイメージが強かった」というコメントが得られた。よって、ロボットの外見が人に与える印象に影響することが分かった。ロボットに人間に似ているイメージをさらに増加させるため、外見に工夫する必要があると考える。

5.3 動作予告を行うタイミングの評価実験

5.3.1 実験目的および手法

動作予告における重要なパラメータであるタイミングの適切性の調査を行うために、実験協力者に動画を視聴してもらい、評価用紙への回答を求めた。

動作予告タイミングは先行研究 [7] [33] の 1.0[s] から 1.5[s] までが最適であるという結論を参考にし、以下のように 4 つの条件を設定した。5.2 節の歩行者とのすれ違い実験で使用した廊下において撮影された各条件における移動ロボットと歩行者に対するすれ違い行動が写し込まれている 20[s] ずつの動画を利用し、実験協力者による動作予告を行うタイミングの適切性の調査を行った。各タイミングの条件における各パラメータは表 5.5 に示し、動作予告を行うタイミングのほかには差異のないようにしている。

- 条件 A: ロボットがタイミング $t = 0.5[s]$ で顔インタフェースによる動作予告を行う。
- 条件 B: ロボットがタイミング $t = 1.0[s]$ で顔インタフェースによる動作予告を行う。
- 条件 C: ロボットがタイミング $t = 1.5[s]$ で顔インタフェースによる動作予告を行う。
- 条件 D: ロボットがタイミング $t = 2.0[s]$ で顔インタフェースによる動作予告を行う。

表 5.5: 動作予告を行うタイミングの評価実験における各パラメータ

条件	A	B	C	D
移動ロボットの平均速度	0.30[m/s]	0.30[m/s]	0.30[m/s]	0.30[m/s]
前方距離 TH_y	3.60[m]	3.60[m]	3.60[m]	3.60[m]
側方距離 TH_x	0.70[m]	0.70[m]	0.70[m]	0.70[m]

タイミングの適切性の測定には、図 5.10 に示す評価用紙を用いた。「以下のスケールに基づいて動作予告のタイミングに対する印象を評価してください」という説明文と「悪い-良い」という形容詞対を用意し、タイミングの適切性を 5 段階で評価させる形式を採用した。評価用紙には、左側にネガティブな評価「悪い」を示しており、右側にポジティブな評価「良い」を示している。

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの動作予告のタイミングを評価してください
/Please rate the timing of the previous announcement of the robot based on the scale below.

Bad 悪い	1	2	3	4	5	Good 良い
--------	---	---	---	---	---	---------

図 5.10: タイミングの適切性の評価用紙

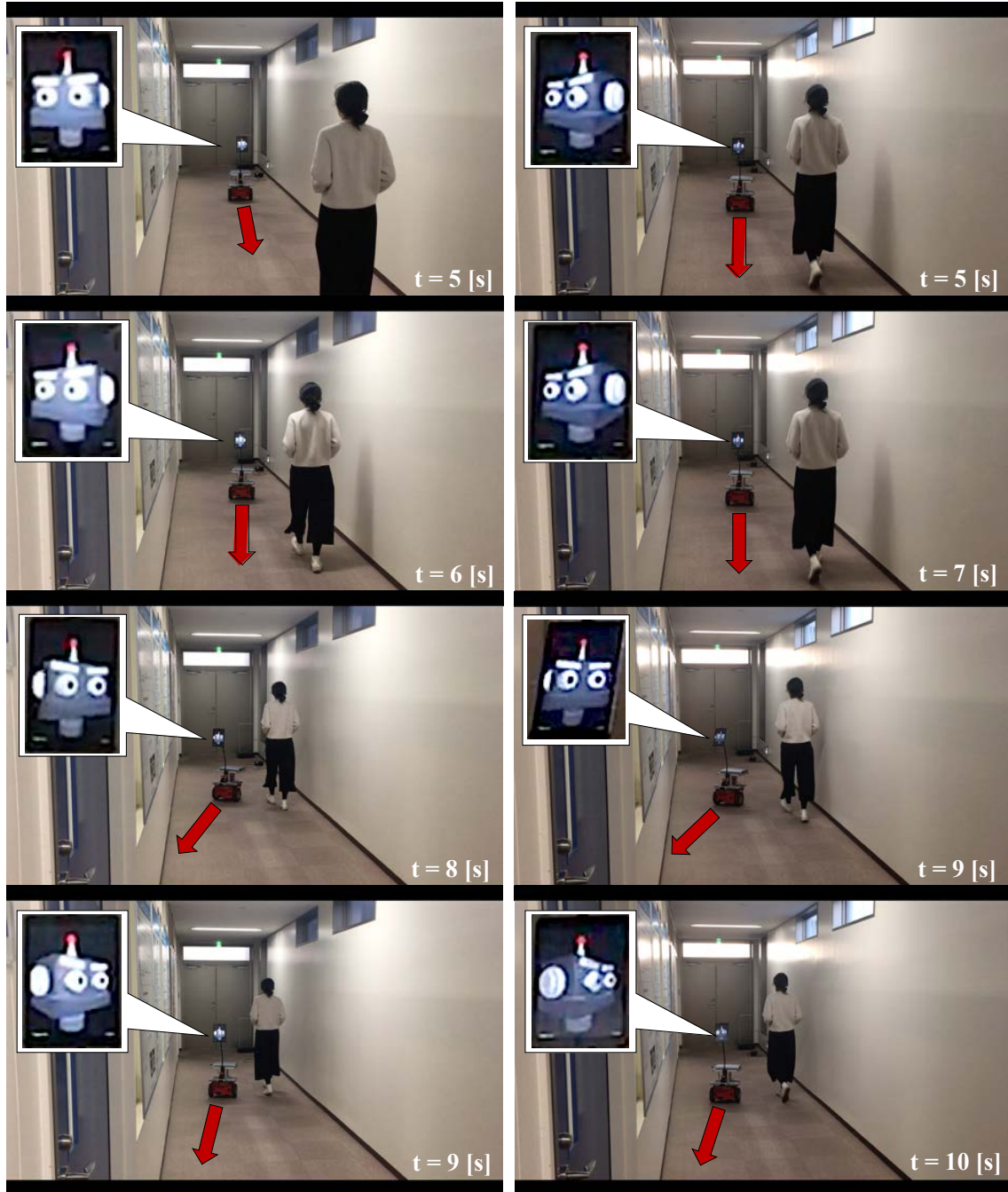
実験協力者は、用意した 4 本の動画をそれぞれ二回ずつ視聴してもらった直後に、各動画における動作予告を行うタイミングの適切性の回答を求めた。実験協力者に二回視聴してもらう理由は、各動画が非常に短いため一度しか見せない場合には、評価用紙への回答を求める際に印象が不足している可能性があるからである。動画の視聴順序によるタイミングの適切性に対する評価への影響を除くため、動画の提示順序についてカウンターバランスをとった。



(a) 条件 A: $t = 0.5$ [s]

(b) 条件 B: $t = 1.0$ [s]

図 5.11: 実験協力者が視聴する動画 (4 種類のうちの 2 種類)



(c) 条件 C: t = 1.5[s]

(d) 条件 D: t = 2.0[s]

図 5.12: 実験協力者が視聴する動画 (4 種類のうちの 2 種類)

5.3.2 実験の仮説

本実験では、集計した 24 名のデータを用いて、以下の仮説に基づき分析を行う。

仮説：顔インタフェースによる動作予告を行う異なるタイミングの適切性には差がある。

5.3.3 実験の結果

動作予告を行うタイミングの適切性を分析するために有意差水準 5 % で分散分析を行った。その結果、異なるタイミングの適切性に有意な差が認められた ($F=4.244$, $df=3,92$, $p<.01$)。

表 5.6: 「動作予告を行うタイミングの適切性」に関する分散分析の結果

評価項目	統計量	t=0.5[s]	t=1.0[s]	t=1.5[s]	t=2.0[s]
適切性	平均値	3.42	4.08	4.13	3.42
	標準偏差	1.06	0.654	0.947	1.06
	有意確率	F=4.244, p<.01 (**)			

つぎに、4つの動画における動作予告のタイミングの間に適切性の差を調べるために、有意差水準5%でLSD法による多重比較を行った。結果によれば、「0.5[s]、1.0[s]」と「0.5[s]、1.5[s]」および「2.0[s]、1.0[s]」と「2.0[s]、1.5[s]」に有意な差が確認された。評価値の平均値と標準偏差を見ると、1.0[s]および1.5[s]のタイミングの適切性における評価値が高いことが分かった。なお、「0.5[s]、2.0[s]」と「1.0[s]、1.5[s]」には有意な差が確認されなかった。

図 5.13 と表 5.7 に、「動作予告を行う異なるタイミングの適切性」に関する評価の結果およびLSD法による多重比較の結果を示す。

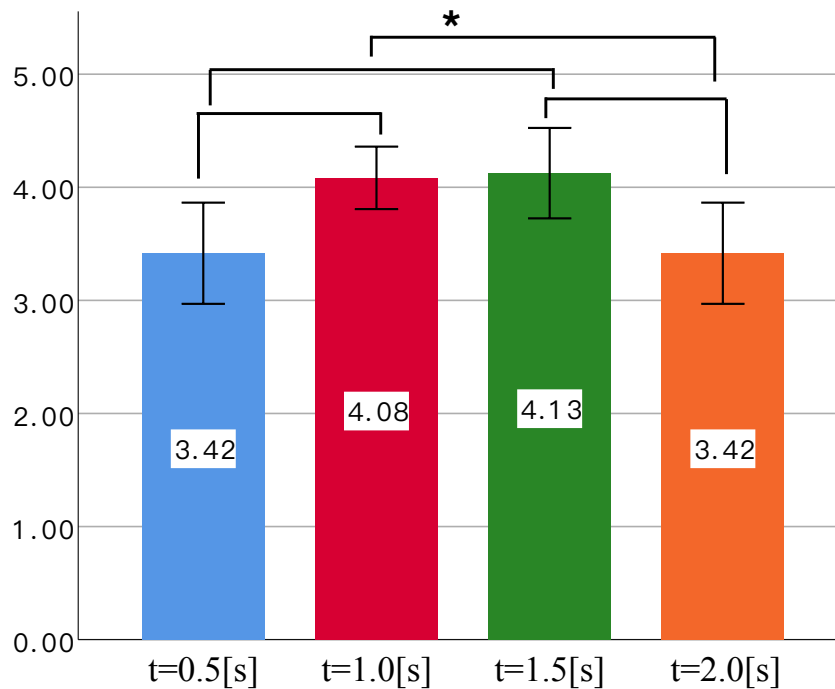


図 5.13: 「動作予告を行うタイミングの適切性」に関する評価の結果

表 5.7: 「動作予告を行うタイミングの適切性」に関するLSD法による多重比較の結果

有意確率 (多重比較)	t=0.5[s]	t=1.0[s]	t=1.5[s]	t=2.0[s]
t=0.5[s]	1	0.016, p<.05(*)	0.011, p<.05(*)	1
t=1.0[s]	0.016, p<.05(*)	1	0.879	0.16, p<.05(*)
t=1.5[s]	0.011, p<.05(*)	0.879	1	0.011, p<.05(*)
t=2.0[s]	1	0.16, p<.05(*)	0.011, p<.05(*)	1

5.3.4 実験の考察

実験結果の分析から、歩行者が移動ロボットとすれ違う場合、実際の動きの 1.0[s] から 1.5[s] 前に動作予告を行うのが、適切であると判断することができる。

一方で、タイミングに対する適切性に関しては個人差が大きいことが分かった。自由記述には、「0.5[s] のタイミングで動作予告を行う場合、実際の行動との間に時間が短すぎたから、予告に対する反応時間がなかった」というコメントや、「すべてのタイミングが実際の行動までの時間が短かった、もうちょっと早めに予告してほしい」というコメントも得られた。また、「4つのタイミングの差が分からなかった」というコメントを記入し、すべてのタイミングに対する適切性と同じ点数を付けた実験協力者もいた。

このため、今後はタイミングの設定の幅を広がり、実験協力者の人数を増やしてタイミングの適切性に関する主観的評価を行うことが必要である。

5.4 従来手法との比較実験

5.4.1 実験目的および手法

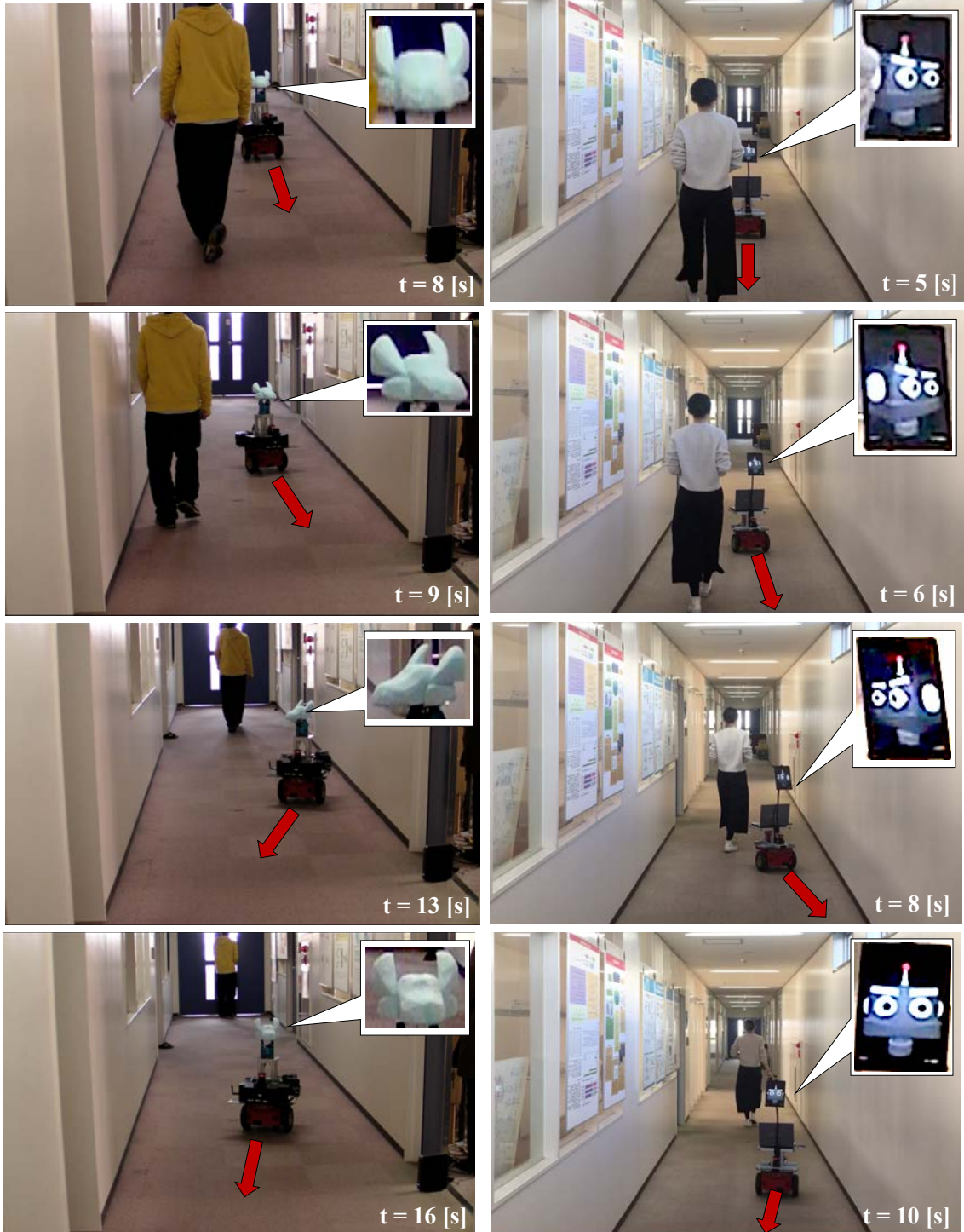
動作予告の手法の差異は、ロボットの行動の分かりやすさ、および人間がロボットに対する印象との関係を明らかにすることを目的とし、顔インタフェースによる動作予告手法と類似した人間の首振り行為に基づいた吉川らの提案手法 [10]（以降、従来手法と述べる）との比較実験を行った。

- 条件 A: 移動ロボットが従来手法による動作予告を行う。
- 条件 B: 移動ロボットが顔インタフェースによる動作予告を行う。

実験の目的を説明し、許可を得た上で、吉川らの評価実験で撮影した動作予告を行う場合における歩行者と移動ロボットのすれ違い実験の動画を動画 1 として用意した。顔インタフェースによる動作予告を行う場合における歩行者と移動ロボットのすれ違い実験を行い、実験の様子撮影した動画を動画 2 とした。動画 2 の実験環境と歩行者の歩行は、カメラの撮影位置と角度も含めて、できる範囲で動画 1 と同じになるようにした。

実験協力者は、用意した 2 本の動画を視聴し、動画における移動ロボットの行動の分かりやすさとロボットに対する印象を評価用紙に回答した。

印象の測定には、実験 1 で用いた評価用紙を用いる。実験協力者には、各動画を二回ずつ視聴させた。動画の視聴順序による印象評価への影響を除くため、実験協力者ごとに動画の提示順序を入れ替え、カウンターバランスをとった。



(a) 従来手法条件

(b) 提案手法条件

図 5.14: 実験で使用する動画のフレーム画像

5.4.2 実験の仮説

本実験では、集計した 24 名のデータを用いて、以下の仮説に基づき分析を行う。

仮説 1：提案手法である顔インタフェースによる動作予告を行う場合は従来手法より、ロボットの行動が分かりやすい。

仮説 2：提案手法である顔インタフェースによる動作予告を行う場合は従来手法より、ロボットに対する印象が良い。

5.4.3 実験の結果 (1)：移動ロボットの行動の分かりやすさに関する評価

提案手法と従来手法において、ロボットの行動の分かりやすさの差異が確認するために、評価用紙のロボットの行動の分かりやすさという項目について有意差水準 5% で t 検定を行った。その結果、提案手法と従来手法において、有意差があると示唆された。(t=-7.393, df=23, p<.001)。その結果と平均値を見ると、従来手法より提案手法の方がロボットの行動が分かりやすいと解釈することができる。

図 5.15 と表 5.8 に「移動ロボットの行動の分かりやすさ」に関する評価の結果および 5 段階評価の平均値および標準偏差を示す。

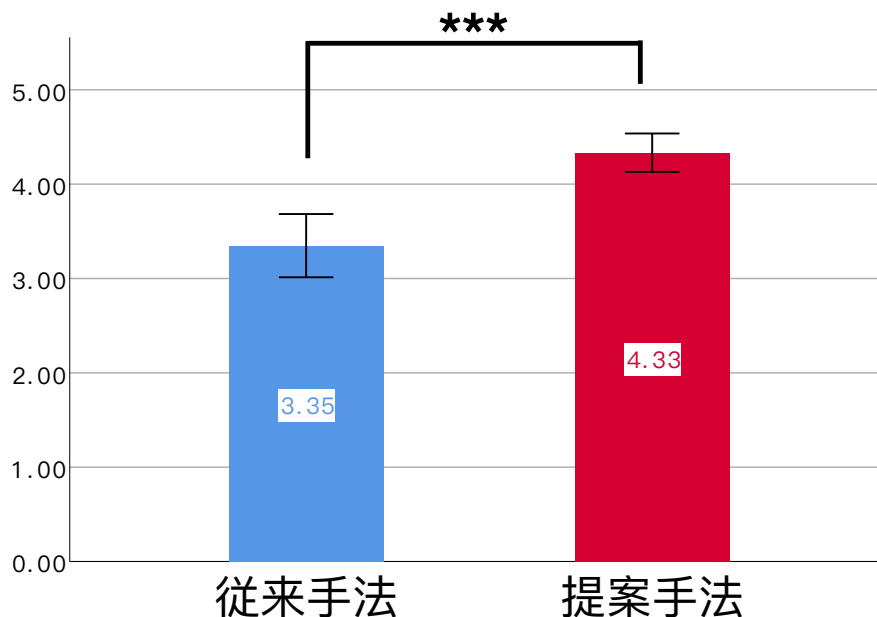


図 5.15: 「移動ロボットの行動の分かりやすさ」に関する評価の結果

表 5.8: 「移動ロボットの行動の分かりやすさ」による 5 段階評価の平均値および標準偏差

評価項目	統計量	従来手法	提案手法
分かりやすさ	平均値	3.35	4.33
	標準偏差	0.81	0.48
	有意確率 (両側)	t=-7.393, p<.001 (***)	

5.4.4 実験の結果(2)：移動ロボットに対する印象に関する評価

評価用紙のロボットに対する印象に関する擬人化、生命性、好ましさ、知性の知覚の4つの項目について有意差水準5%でt検定を行った。結果によれば、全ての項目において有意な差が見られた($t=-7.393$, $p<.001$)。各項目における評価値の平均値を見ると、従来手法より提案手法の方がロボットに対する印象が良いと解釈することができる。

図 5.16 と表 5.9 に「移動ロボットに対する印象」の各項目に関する評価の結果および各項目による5段階評価の平均値および標準偏差を示す。

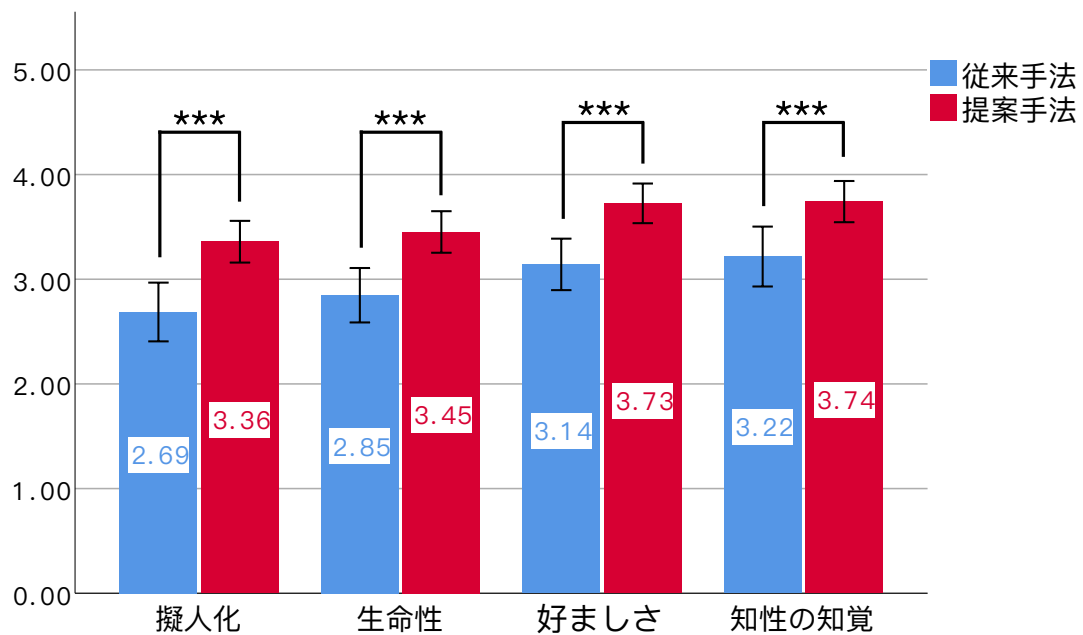


図 5.16: 「移動ロボットに対する印象」に関する評価の結果

表 5.9: 「移動ロボットに対する印象」による 5 段階評価の平均値および標準偏差

評価項目	統計量	従来手法	提案手法
擬人化	平均値	2.69	3.36
	標準偏差	0.64	0.47
	有意確率（両側）	t=-4.143, p<.001 (***)	
生命性	平均値	2.85	3.45
	標準偏差	0.62	0.47
	有意確率（両側）	t=-4.071, p<.001 (***)	
好ましさ	平均値	3.14	3.73
	標準偏差	0.58	0.45
	有意確率（両側）	t=-4.520, p<.001 (***)	
知性の知覚	平均値	3.22	3.74
	標準偏差	0.68	0.47
	有意確率（両側）	t=-4.387, p<.001 (***)	

5.4.5 実験の考察

(1) 「移動ロボットの行動の分かりやすさ」に関する考察

実験結果の分析から歩行者が移動ロボットとすれ違う場合、本研究の提案手法（顔インタフェースによる動作予告）が従来研究手法（首振りによる動作予告）より、ロボットの行動が分かりやすいと思わせることができる。自由記述の欄には、「首振りによる動作予告の場合、頭がふらつくように見えるから、ロボットが次にどこに行くのが分かりにくい」というコメントがあった。「顔の動きが見やすいから顔が付いているインタフェースの方が分かりやすかった」というコメントも得られた。

(2) 「移動ロボットに対する印象」に関する考察

歩行者が移動ロボットとすれ違う場合、本研究の提案手法（顔インタフェースによる動作予告）が従来手法（首振りによる動作予告）より、人間らしく、生きている、好ましい、知的なロボットであるような印象を与えることができるという結果が得られた。自由記述の欄には、「顔インタフェースのデザインがかわいい」というコメントや「犬の頭の方が柔らかいイメージがあるから好ましい」というコメントが得られたため、顔インタフェースのデザインやロボットの外見（タブレット）が人に与える印象に影響することが分かった。今後は顔インタフェースのデザインやロボットの外見に工夫する必要があると考える。

5.5 考察

実験の結果から、顔インタフェースによる動作予告を行うことで、歩行者が移動ロボットとすれ違う場合において、ロボットの行動が分かりやすさを向上させることができると分かった。顔インタフェースによる眼球と頭部の回転動作と視線運動が移動ロボットの行動意図を歩行者に伝達できることと、歩行者が移動ロボットの眼球と頭部の回転動作と視線運動からロボットの行動意図を推測できるようになったことが要因であると考えられる。また、顔インタフェースによる動作予告を行うことで、移動ロボットの擬人化、生命性、好ましさ、知性の知覚に対する印象が良くなることが分かった。顔インタフェースによる動作予告は、人間の行動に類似し、移動ロボットの擬人化や親近感の向上の要因となり得ることを示唆している。

人間の振る舞いに基づいた首振り行動による動作予告より、顔インタフェースによる動作予告の方がロボットの行動が分かりやすいことと、擬人化、生命性、好ましさ、知性の知覚に対する印象が良いことが分かった。顔が人間とのコミュニケーションにおいて、存在感や親近感を改善する役割のあることが要因となっていると考えられる。また、コンピュータグラフィックスにおける視線は、キャラクターの意図を視聴者に伝えることができることも要因であると考えられる。

実際の行動の1.0[s]から1.5[s]前に動作予告を行うことが適切であることが分かった。ただし、動作予告を行うタイミングに対する印象は、個人差が大きかったことが見られた。

一方、実験動画における移動ロボットの様子を確認したところ、タブレットのスクリーンに反射が起きる場合があり、その場合では顔インタフェースの画面が一瞬見にくくなることがあった。そのため、今後はさらに反射防止対策を行うことが必要である。また提案手法では、顔インタフェースを平面のタブレットに表示することにしたので、顔インタフェースが見える位置が限られているという問題点もある。タブレットの数を増やすなどの解決策が必要となると考えられる。

第6章 結論

本研究では、ロボットの機械的な外観および人間と異なる行動によるロボットの行動の分かりにくさを改善することを目的とし、顔インタフェースによる移動ロボットの今後の行動を予告する手法を提案した。人間の常識と習慣に従い、見た目から理解と予測しやすい動作予告を行うため、人間が視線を移動方向に回転させる振る舞いに基づき、顔インタフェースの視線方向をロボットの移動方向に回転させることを動作予告に利用した。

移動ロボットの移動経路と顔インタフェースの視線方向は、オペレータにより入力された移動ロボットの目標位置、現在位置と姿勢および速度、ならびに周囲の障害物と歩行者の情報に基づき、ダイナミックウィンドウアプローチを用いて計算される。提案手法では、歩行者との出会いをより快適にするためにパーソナルスペースを考慮し、障害物回避モードと歩行者すれ違いモードに分けて、移動ロボットの移動経路の計算を行う。実際の人間の頭部と眼球の協調運動モデルに基づき、顔インタフェースの眼球と頭部の回転角度を算出することにより、自然な視線行動を実現する。

提案手法のシステムを実装し、移動ロボットと歩行者がすれ違う際、歩行者の主観的な印象を評価する評価実験を行った。顔インタフェースによる動作予告はロボットの行動の分かりやすさを向上させることに有効であることが分かった。顔インタフェースによる動作予告を行うことで、人間がロボットの擬人化、生命性、好ましさ、知性の知覚に対する印象が良くなることが確認できた。また、人間の首振りに基づいた頭による動作予告との比較実験を行い、提案手法が従来手法より、移動ロボットの行動が分かりやすく、人に与える印象が良いことが分かった。顔の存在と人間の視線行動に基づいた顔インタフェースの視線行動は評価結果の差異の要因となることが考えられる。さらに、動作予告を行うタイミングについて検証することが必要であると考え、移動ロボットが歩行者とすれ違う際に異なるタイミングで動作予告を行う様子を動画にて視聴させ、タイミングの適切性について評価した。その結果、実際の動きの1.0~1.5[s]前に顔インタフェースによる動作予告を行うのが最適であると示された。

しかしながら、移動ロボットが人間に似ているイメージを与えるために、人間の視線行動をもとに顔インタフェースの視線行動による動作予告を行わせたが、ロボットの外観から機械的なイメージを与えてしまうため、擬人化という項目に関する主観的評価の平均値は他の項目より低いことが分かった。移動ロボットのイメージをより親しみやすくするため、顔インタフェースの3Dモデルのデザインやロボット自体の外観に工夫する必要があると考えられる。なお、顔インタフェースによる動作予告手法および動作予告を行うタイミングに関する評価について個人差が見られたため、より多くの実験協力者を対象とした実験を行うことが必要である。さらに、商店街などのより複雑な現実環境にて実験を行い、研究を進める必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の三河正彦准教授には研究生時代から終始適切な指導や助言を下さり心より御礼申し上げます。日頃から研究の進み具合のみならず、学会発表などを気にかけていただき、優しい言葉で私を励まして下さりましてありがとうございました。また、合同ゼミにて研究について貴重なご意見を賜りました藤澤誠助教授に感謝致します。ゼミや研究活動において多くのご指摘をいただいた三河研究室、藤澤研究室の皆様、そして、評価実験に参加して下さった実験協力者の皆様に心から感謝します。

参考文献

- [1] 小林哲則. 会話ロボットと顔インタフェース [J]. 情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), 2004, 2004(74 (2004-HI-109)): 61-61.
- [2] Mehrabian A. Nonverbal communication[M]. Routledge, 2017.
- [3] Guizzo E. Cynthia Breazeal Unveils Jibo, a social robot for the home[J]. IEEE Spectrum, 2014.
- [4] SoftBank Robotics Corp. Pepper. <http://www.softbank.jp/en/robot/>. [Online; Accessed: 08-Jan-2019].
- [5] Breazeal C L. Sociable machines: Expressive social exchange between humans and robots[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [6] 小林宏, 原文雄. 顔ロボットにおける 6 基本表情の動的実時間表出 [J]. 日本ロボット学会誌, 1996, 14(5): 677-685.
- [7] 萩原敦, 池浦良淳, 河北洋平, 水谷一樹. 人間に脅威を与えないロボットの動作予告提示方法—動作中に予告を提示する場合—[J]. 日本ロボット学会誌, 2003, 21(4): 401-408.
- [8] Matsumaru T, Iwase K, Akiyama K, et al. Mobile robot with eyeball expression as the preliminary-announcement and display of the robot 's following motion[J]. Autonomous Robots, 2005, 18(2): 231-246.
- [9] 吉川由李子. 歩行者を考慮した遠隔操作移動ロボットの動作予告提示手法. 筑波大学大学院修士論文, 2014 年 3 月.
- [10] Mikawa M, Yoshikawa Y, Fujisawa M. Expression of intention by rotational head movements for teleoperated mobile robot[C]. Advanced Motion Control (AMC), 2018 IEEE 15th International Workshop on. IEEE, 2018: 249-254.
- [11] Kendon A. Conducting interaction: Patterns of behavior in focused encounters[M]. CUP Archive, 1990.
- [12] Marsella S, Gratch J, Rickel J. Expressive behaviors for virtual worlds[M]. Life-like characters. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004: 317-360.
- [13] Kanda T, Ishiguro H, Ishida T. Psychological analysis on human-robot interaction[C]. Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on. IEEE, 2001, 4: 4166-4173.
- [14] Wiese E, Weis P P, Lofaro D M. Embodied social robots trigger gaze following in real-time HRI[C]. 2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). IEEE, 2018: 477-482.

- [15] Rajkumar R, Gagliardi M, Sha L. The real-time publisher/subscriber inter-process communication model for distributed real-time systems: design and implementation[C]. Real-Time Technology and Applications Symposium, 1995. Proceedings. IEEE, 1995: 66-75.
- [16] Adept Mobile Robot. ARIA. <http://robots.mobilerobots.com/wiki/ARIA/>. [Online; Accessed: 28-Jun-2018].
- [17] Mobile robot programming toolkit. <https://www.mrpt.org/>. [Online; Accessed: 18-Jan-2019].
- [18] Rollo J. Tracking for a Roboceptionist[J]. Undergraduate Senior Research Thesis, Carnegie Mellon University, 2007.
- [19] Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 1997, 4(1): 23-33
- [20] Hall E T, Birdwhistell R L, Bock B, et al. Proxemics [and comments and replies][J]. Current anthropology, 1968, 9(2/3): 83-108.
- [21] Hall E T, 日高敏隆, 佐藤信行. かくれた次元 [J]. 日高敏隆, 佐藤信行 訳, 1970: 160-181.
- [22] Malmberg T. Human Territoriality: Survey of behavioural territories in man with preliminary analysis and discussion of meaning[M]. Mouton De Gruyter, 1980.
- [23] 依田光正, 塩田泰仁. 人間同士のすれ違い行動における回避領域の実験的研究 [J]. 人間工学, 1999, 35(1): 9-15.
- [24] 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 [J]. 日本機械学会論文集 C 編, 2000, 66(650): 3380-3387.
- [25] Pacchierotti E, Christensen H I, Jensfelt P. Evaluation of passing distance for social robots[J]. 2006.
- [26] Rogers S, Lunsford M, Strother L, et al. The Mona Lisa effect: Perception of gaze direction in real and pictured faces[J]. Studies in Perception and Action VII, 2003: 19-24.
- [27] Mori M. The uncanny valley[J]. Energy, 1970, 7(4): 33-35.
- [28] Scudder C A, Kaneko C R, Fuchs A F. The brainstem burst generator for saccadic eye movements[J]. Experimental brain research, 2002, 142(4): 439-462.
- [29] Land M F. Motion and vision: why animals move their eyes[J]. Journal of Comparative Physiology A, 1999, 185(4): 341-352.
- [30] 高木英行, 竹田仰. CG 人物像の視線移動のための頭部と眼球の動きモデル [J]. 電子情報通信学会論文誌 A, 1997, 80(8): 1304-1311.
- [31] Kokkinara E, Oyekoya O, Steed A. Modelling selective visual attention for autonomous virtual characters[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2011, 22(4): 361-369.
- [32] Masuko S, Hoshino J. Head- eye animation corresponding to a conversation for CG characters[C]. Computer Graphics Forum. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2007, 26(3): 303-312.

- [33] Matsumaru T, Kudo S, Endo H, et al. Examination on a Software Simulation of the Method and Effect of Preliminary-announcement and Display of Human-friendly Robot's Following Action[J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 2004, 40(2): 189-198.
- [34] Osgood C E. The nature and measurement of meaning[J]. Psychological bulletin, 1952, 49(3): 197.
- [35] Bartneck C, Kulić D, Croft E, et al. Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots[J]. International journal of social robotics, 2009, 1(1): 71-81.

付録

評価実験にて使用したアンケート用紙を以下の順で提示する。

- 歩行者とのすれ違い評価実験に関するアンケート
- 動作予告を行うタイミングの評価実験に関するアンケート
- 従来手法との比較実験に関するアンケート

実験 1

一回目について

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの行動を評価してください。/Please rate the behavior of the robot based on the scale below.

Confusing 分かりにくい	1	2	3	4	5	Obvious 分かりやすい
------------------	---	---	---	---	---	----------------

Q2. 以下のスケールに基づいてこのロボットへの印象を評価してください。/Please rate your impression of the robot on the following scales.

Ignorant 無知な	1	2	3	4	5	Knowledgeable 物知りな
Dislike 嫌い	1	2	3	4	5	Like 好き
Moving rigidly ぎこちない動き	1	2	3	4	5	Moving elegantly 洗練された動き
Unkind 不親切な	1	2	3	4	5	Kind 親切な
Inert 不活発な	1	2	3	4	5	Interactive 対話的な
Irresponsible 無責任な	1	2	3	4	5	Responsible 責任のある
Stagnant 活気のない	1	2	3	4	5	Lively 生き生きとした
Awful ひどい	1	2	3	4	5	Nice 良い
Unconscious 意識を持たない	1	2	3	4	5	Conscious 意識を持っている
Fake 偽物のような	1	2	3	4	5	Natural 自然な
Artificial 人工的な	1	2	3	4	5	Lifelike 生物的な
Incompetent 無能な	1	2	3	4	5	Competent 有能な
Foolish 愚かな	1	2	3	4	5	Sensible 賢明な
Mechanical 機械的な	1	2	3	4	5	Organic 有機的な
Dead 死んでいる	1	2	3	4	5	Alive 生きている
Unpleasant 不愉快な	1	2	3	4	5	Pleasant 愉快的な
Unintelligent 知的でない	1	2	3	4	5	Intelligent 知的な
Unfriendly 親しみにくい	1	2	3	4	5	Friendly 親しみやすい
Apathetic 無関心な	1	2	3	4	5	Responsive 反応のある
Machinelike 機械的	1	2	3	4	5	Humanlike 人間的

Q3. 移動ロボットに対する感想や気になる点等を自由にご記入ください。/Please write comments and concerns about the mobile robot.

実験 1

二回目について

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの行動を評価してください。/Please rate the behavior of the robot based on the scale below.

Confusing 分かりにくい	1	2	3	4	5	Obvious 分かりやすい
------------------	---	---	---	---	---	----------------

Q2. 以下のスケールに基づいてこのロボットへの印象を評価してください。/Please rate your impression of the robot on the following scales.

Ignorant 無知な	1	2	3	4	5	Knowledgeable 物知りな
Dislike 嫌い	1	2	3	4	5	Like 好き
Moving rigidly ぎこちない動き	1	2	3	4	5	Moving elegantly 洗練された動き
Unkind 不親切な	1	2	3	4	5	Kind 親切な
Inert 不活発な	1	2	3	4	5	Interactive 対話的な
Irresponsible 無責任な	1	2	3	4	5	Responsible 責任のある
Stagnant 活気のない	1	2	3	4	5	Lively 生き生きとした
Awful ひどい	1	2	3	4	5	Nice 良い
Unconscious 意識を持たない	1	2	3	4	5	Conscious 意識を持っている
Fake 偽物のような	1	2	3	4	5	Natural 自然な
Artificial 人工的な	1	2	3	4	5	Lifelike 生物的な
Incompetent 無能な	1	2	3	4	5	Competent 有能な
Foolish 愚かな	1	2	3	4	5	Sensible 賢明な
Mechanical 機械的な	1	2	3	4	5	Organic 有機的な
Dead 死んでいる	1	2	3	4	5	Alive 生きている
Unpleasant 不愉快な	1	2	3	4	5	Pleasant 愉快的な
Unintelligent 知的でない	1	2	3	4	5	Intelligent 知的な
Unfriendly 親しみにくい	1	2	3	4	5	Friendly 親しみやすい
Apathetic 無関心な	1	2	3	4	5	Responsive 反応のある
Machinelike 機械的	1	2	3	4	5	Humanlike 人間的

Q3. ロボットの顔が動いたのはどちらでしたか。番号に○をつけてください。/Please circle the number that the face was turned.

1. 1回目/The first time. 2. 2回目/The second time. 3. わからない/I don't know.

Q4. 移動ロボットに対する感想や気になる点等を自由にご記入ください。/Please write comments and concerns about the mobile robot.

[]

ここまでの回答が終わりましたら、次の指示までページをめくらずにお待ちください。

実験2

一回目について

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの動作予告のタイミングを評価してください/Please rate the timing of the previous announcement of the robot based on the scale below.

Bad 悪い	1	2	3	4	5	Good 良い
--------	---	---	---	---	---	---------

Q2. 動画の番号に○をつけてください。/Please circle the number of the video.

1. 1番 2. 2番 3. 3番 4. 4番

Q5. 動作予告のタイミングに対する感想や気になる点等をご記入ください/Please write comments and concerns about the timing if you chose 1 or 2 in Q1.

--

実験 2

二回目について

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの動作予告のタイミングを評価してください/Please rate the timing of the previous announcement of the robot based on the scale below.

Bad 悪い	1	2	3	4	5	Good 良い
--------	---	---	---	---	---	---------

Q2. 動画の番号に○をつけてください。/Please circle the number of the video.

1. 1番 2. 2番 3. 3番 4. 4番

Q3. 動作予告のタイミングに対する感想や気になる点等をご記入ください/Please write comments and concerns about the timing if you chose 1 or 2 in Q1.

--

実験2

三回目について

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの動作予告のタイミングを評価してください/Please rate the timing of the previous announcement of the robot based on the scale below.

Bad 悪い	1	2	3	4	5	Good 良い
--------	---	---	---	---	---	---------

Q2. 動画の番号に○をつけてください。/Please circle the number of the video.

1. 1番 2. 2番 3. 3番 4. 4番

Q3. 動作予告のタイミングに対する感想や気になる点等をご記入ください/Please write comments and concerns about the timing if you chose 1 or 2 in Q1.

--

実験 2

四回目について

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの動作予告のタイミングを評価してください/Please rate the timing of the previous announcement of the robot based on the scale below.

Bad 悪い	1	2	3	4	5	Good 良い
--------	---	---	---	---	---	---------

Q2. 動画の番号に○をつけてください。/Please circle the number of the video.

1. 1番 2. 2番 3. 3番 4. 4番

Q3. 動作予告のタイミングに対する感想や気になる点等をご記入ください/Please write comments and concerns about the timing if you chose 1 or 2 in Q1.

--

ここまでの回答が終わりましたら、次の指示までページをめくらずにお待ちください。

実験3

動画1について

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの行動を評価してください。/Please rate the behavior of the robot based on the scale below.

Confusing 分かりにくい	1	2	3	4	5	Obvious 分かりやすい
------------------	---	---	---	---	---	----------------

Q2. 以下のスケールに基づいてこのロボットへの印象を評価してください。/Please rate your impression of the robot on the following scales.

Ignorant 無知な	1	2	3	4	5	Knowledgeable 物知りな
Dislike 嫌い	1	2	3	4	5	Like 好き
Moving rigidly ぎこちない動き	1	2	3	4	5	Moving elegantly 洗練された動き
Unkind 不親切な	1	2	3	4	5	Kind 親切な
Inert 不活発な	1	2	3	4	5	Interactive 対話的な
Irresponsible 無責任な	1	2	3	4	5	Responsible 責任のある
Stagnant 活気のない	1	2	3	4	5	Lively 生き生きとした
Awful ひどい	1	2	3	4	5	Nice 良い
Unconscious 意識を持たない	1	2	3	4	5	Conscious 意識を持っている
Fake 偽物のような	1	2	3	4	5	Natural 自然な
Artificial 人工的な	1	2	3	4	5	Lifelike 生物的な
Incompetent 無能な	1	2	3	4	5	Competent 有能な
Foolish 愚かな	1	2	3	4	5	Sensible 賢明な
Mechanical 機械的な	1	2	3	4	5	Organic 有機的な
Dead 死んでいる	1	2	3	4	5	Alive 生きている
Unpleasant 不愉快な	1	2	3	4	5	Pleasant 愉快的な
Unintelligent 知的でない	1	2	3	4	5	Intelligent 知的な
Unfriendly 親しみにくい	1	2	3	4	5	Friendly 親しみやすい
Apathetic 無関心な	1	2	3	4	5	Responsive 反応のある
Machinelike 機械的	1	2	3	4	5	Humanlike 人間的

Q3. 移動ロボットに対する感想や気になる点等をご記入ください/Please write comments and concerns about the mobile robot.

実験3

動画2について

Q1. 以下のスケールに基づいてロボットの行動を評価してください。/Please rate the behavior of the robot based on the scale below.

Confusing 分かりにくい	1	2	3	4	5	Obvious 分かりやすい
------------------	---	---	---	---	---	----------------

Q2. 以下のスケールに基づいてこのロボットへの印象を評価してください。/Please rate your impression of the robot on the following scales.

Ignorant 無知な	1	2	3	4	5	Knowledgeable 物知りな
Dislike 嫌い	1	2	3	4	5	Like 好き
Moving rigidly ぎこちない動き	1	2	3	4	5	Moving elegantly 洗練された動き
Unkind 不親切な	1	2	3	4	5	Kind 親切な
Inert 不活発な	1	2	3	4	5	Interactive 対話的な
Irresponsible 無責任な	1	2	3	4	5	Responsible 責任のある
Stagnant 活気のない	1	2	3	4	5	Lively 生き生きとした
Awful ひどい	1	2	3	4	5	Nice 良い
Unconscious 意識を持たない	1	2	3	4	5	Conscious 意識を持っている
Fake 偽物のような	1	2	3	4	5	Natural 自然な
Artificial 人工的な	1	2	3	4	5	Lifelike 生物的な
Incompetent 無能な	1	2	3	4	5	Competent 有能な
Foolish 愚かな	1	2	3	4	5	Sensible 賢明な
Mechanical 機械的な	1	2	3	4	5	Organic 有機的な
Dead 死んでいる	1	2	3	4	5	Alive 生きている
Unpleasant 不愉快な	1	2	3	4	5	Pleasant 愉快的な
Unintelligent 知的でない	1	2	3	4	5	Intelligent 知的な
Unfriendly 親しみにくい	1	2	3	4	5	Friendly 親しみやすい
Apathetic 無関心な	1	2	3	4	5	Responsive 反応のある
Machinelike 機械的	1	2	3	4	5	Humanlike 人間的

Q3. 移動ロボットに対する感想や気になる点等を自由にご記入ください/Please write comments and concerns about the mobile robot.