

公共空間における接客機会の増加を目的とした 複数ロボットによる呼びかけ戦略の提案

Calling Strategy Using Multiple Robots to Increase Service Opportunities to Passersby in Public Spaces

天田 穰一朗^{1*} 岡藤 勇希^{2,3} 松村 耕平¹
Joichiro Amada¹ Yuki Okafuji^{2,3} Kohei Matsumura¹
馬場 惇^{2,3} 中西 惇也³
Jun Baba^{2,3} Junya Nakanishi³

¹ 立命館大学

¹ Ritsumeikan University

² 株式会社サイバーエージェント

² CyberAgent, Inc.

³ 大阪大学

³ Osaka University

Abstract: 公共空間における接客ロボットの研究が活発に行われているが、複数のロボットを使った対話方法の研究は少なく、どのようにロボットが協調して振る舞うべきか不明である。そこで本研究は、通行人に呼びかける状況に着目し、通行人が立ちとまりやすい呼びかけ戦略を実験で評価した。ビデオ評価の結果、混雑時は通行人に選択的に呼びかけて、呼びかけ時間を長くするほうが立ち止まりやすいことが分かった。それらを達成するために、どのロボットがどの通行人に呼びかけるかの割り当て戦略を提案し、シミュレータを用いて提案手法の有効性を検証した。

1 はじめに

日本をはじめとして、いくつかの国は深刻な少子高齢化に直面しており、現状のまま進行すると人材不足など経済に大きな影響を及ぼすことが予想される [1]。こうした近年の高齢化社会に伴う人材不足に対処すべく、ロボットは人間に代替する労働力、または、人間と協働するパートナーとして期待されつつある [2, 3]。特に、公共の場でサービスを提供するロボット（以下、接客ロボット）の研究は活発に行われている。例えば、公共の場で広告を行うロボットはタブレットなどの従来の広告システムよりも関心を引き寄せ、消費を促進することが知られており [4]、広告の手段として注目されている [5]。また、広告など商業的な用途に限らず、手の消毒を依頼する [6] など、幅広い接客の用途で活用することが可能である。公共空間における接客ロボットの実証実験は多数行われ、店舗の情報提供とルート案内を行うロボット [7]、通行人にチラシを配布するロボット [8, 9]、通行人に店舗の情報提供とクーポンを配

布するロボット [10] などの開発が行われている。

また、単一のロボットによる振る舞いの研究だけでなく、複数のロボットが協調する研究が盛んに行われている [2, 11–17]。接客ロボットを含むロボットアプリケーションについても、振る舞い方によって複数のロボットが単一のロボットより効果的であると予想される [11, 12]。また、複数のロボットを集団として認識させることでユーザに対する受容性はより高くなることが分かっている [14, 16]。そのため、複数の接客ロボットが集団として協調する研究がいくつか行われている [2, 13–15]。また、公共空間における複数のロボットを用いた研究では、複数体ロボットを連携させられることによって接客機会を増加させるか、いくつか検討されている [17, 18]。しかしながら、複数体ロボットがどのように強調して振る舞うべきかの研究は少なく、検討は不十分である。

このような背景のもと、本研究では多くの通行人が集まる公共空間で、複数ロボットを用いて接客機会を増加させる状況を想定する。1日に数万人が通行する公共空間においては、接客ロボットは複数の通行人（あるいは複数のグループ）と同時に対話することが接客

*連絡先：立命館大学大学院情報理工学研究所
滋賀県草津市野路東 1-1-1
E-mail:is0392ff@ed.ritsumei.ac.jp

機会を得るために重要である。一体の接客ロボットで対応できる通行人の人数には限界があるため、複数のロボットを配置する方法は複数の通行人と対話するための有効な手段として考えられる。一体の接客ロボットを用いてどのように振る舞えば接客機会が得られるかは研究されている [10]。一方で、複数の接客ロボットではどのように協調して呼びかければ接客機会が得やすいか分かっていない。

そこで本研究は、複数ロボットを使ったインタラクションにおいて、通行人が立ち止まりやすく、接客機会を効率よく得られる呼びかけ戦略を提案することを目的とする。まず、どの状況の時に通行人が立ち止まりやすいか調査し、その結果や先行研究の知見を基にして、公共空間を想定したシミュレータを開発する。そのシミュレータ上で、呼びかけ戦略の妥当性を検証する。その結果をもとに、どのような呼びかけをすればいいのかの対話戦略を提案する。

2 立ち止まりやすい呼びかけ状況の探索

2.1 概要

複数ロボットを用いた呼びかけ戦略を検討するために、公共空間においてどのような状況の場合に通行人がロボットの呼びかけに立ち止まるかを調査する。先行研究においては、一人の通行人に対して接客ロボットがどのように呼びかければいいかの研究が行われている [8, 9, 19]。Shi らは人と人のインタラクションを観察し、距離と角度がどのようになったときに呼びかけるかモデル化した [19]。また、別の研究ではチャシリ配りを行う人の行動を観察し、どのようにして接客機会を作るかの対話戦略を開発した [8, 9]。また、これらの先行研究においては、ロボットから最も近い人に声をかけることが多い [4, 6, 10, 15, 18]。これは、通行人にとってロボットに近づくという労力やコストが小さいため、通行人が立ち止まりやすいからだと考えられる。その一方で、距離の近さのみで割り当てる手法が、接客機会を多く得るために最適な割り当て方法であるかどうかは不明である。

商業施設のような一日に述べ数千人から数万人が通行するような公共空間では、同時に複数の通行人の状態を考慮し、接客機会を最大化させるよう呼びかけることが重要であると考えられる。しかし、先行研究では複数の通行人を考慮した研究は行われておらず、どのように呼びかけを行えば接客機会を得やすいか不明である。また、通行人に対する呼びかけが長いほうが通行人が立ち止まるのか、短いほうが通行人が立ち止まるのか分かっていない。そのため、通行人に呼びかけて

いるときに他の通行人がロボットに向かってきた場合、呼びかけを中断して新しい呼びかけをするべきか分からない。そこで、本研究では第一に呼びかける時間の長さによって立ち止まりやすさが変わるか検証する。第二に、その結果をもとにして、複数の通行人がいるときにどの通行人に呼びかけるべきかの戦略を検討する。

本研究では、複数の通行人の状態を扱うため、通行人の位置などを統制し実環境で実験を行うことは難しい。そのため、立ち止まりやすい状況を確認するためにビデオ評価を利用した実験を行う。先行研究においても、ビデオ評価による実験は多数行われており [12, 16, 17, 20]、ヒューマンロボットインタラクションの分野におけるビデオ評価と実環境での評価はほぼ一致していることが指摘されている [20]。したがって、本実験で得られた結果についても実環境と同様の結論が得られる可能性がある。

2.2 ビデオシナリオ

ロボットとの対話シナリオは、廊下に設置されている1体のロボットの横を通過するユーザに声をかける状況を想定する。ユーザが近くを通るときに「こんにちは、僕とお話ししようよ」と呼びかけ、ユーザがロボットに対して振り向くところで動画は終了する。また、呼びかける長さによる立ち止まりやすさの変化を調査するとき、長時間同じ内容を繰り返すと不自然である。そのため、呼びかける長さによる立ち止まりやすさの変化を見る実験では、ロボットが「こんにちは」と呼びかけた後、商品を推薦する呼びかけを行う。呼びかけは短いもので5秒程度、長いもので30秒程度である。また、動画はすべてユーザの一人称視点である。

2.3 評価

本実験では、一人称動画を用いてロボットの印象をアンケートで評価を行う。評価にはScheffeの対比較法(原法)を用いる。提示する順番は実験参加者ごとにランダムに呈示する。実験参加者は2条件のビデオを視聴した後、「どちらのほうが、実際に体験したときに立ち止まると思うか」という立ち止まりやすさの質問と、「どちらのほうが、このロボットは〇〇だと思うか」というロボットの印象に関する質問に5段階評価(-2: 先の動画の方が非常にそう思う~2: 後の動画の方が非常にそう思う)で答える。ロボットの印象に関する質問は先行研究 [3] を参考に作成し、全部で14問(「不快だ」、「こちらに興味がある」、「見ていてイライラする」、「人間的だ」、「魅力的だ」、「感じのいい」、「好きだ」、「信頼できる」、「有能だ」、「あたたかい」、「優しい」、「親密だ」、「愉快だ」、「話しやすい」)である。ま

た、別にダミー質問を4問追加し、ダミー項目のうちからいくつかを回答しないように動画の最後に指示している。ダミー項目に1つでも回答している場合、その実験参加者の回答を無効とする。

実験はクラウドソーシングのランサーズ¹により回答を集めて行われた。実験参加者数は実験により異なるため、次の項で記述する。なお、Scheffeの一对比較法(原法)を用いるため、呈示する順番ごとの回答数を合わせる必要があった。そのため、呈示する順番ごとの回答を回答日時が早い順に有効とし、回答数を統一した。実験参加者には謝礼として55円支払った。

2.4 呼びかけ時間による立ち止まりやすさ

2.4.1 仮説

公共空間において接客ロボット(特に非移動型のロボット)が通行人に呼びかけて立ち止めるためには、通行人の注意や関心を得る必要があると指摘されている[6, 10]。通行人の関心を惹く一つの方法として、単純接触効果[21]を利用することが考えられる。単純接触効果は接触を繰り返すほどに関心を持つ現象であるが、本論文では一回の接触においても呼び掛ける時間が長いほどに関心を持たせるのではないかと仮説を立てた。つまり、呼びかけ時間を長くすることで関心を惹くことができ、立ち止まる割合が増えると考えた。

2.4.2 実験

実験では、図1のような歩行中にロボットから呼びかけられる通行人の一人称動画においてロボットの印象を評価した。呼びかけ時間の影響を検証するために、呼びかけるのに5秒用いる短文条件と30秒用いる長文条件を比較した。表1に呼びかけに用いた条件ごとの発言を示す。どちらも内容に違いはなく、ロボットが挨拶をした後に商品を推薦する呼びかけを行う点が条件間で同じである。実験参加者は200人(男性:115人、女性:83人、無回答:2人)であり、そのうち有効な回答は133件(66.5%)であった。そのうち、60件ずつに統一し、計120件を解析に用いた。

2.4.3 結果と考察

呼びかけ時間による質問の回答結果を図2に示す。図中の横軸は平均嗜好度であり、本実験では平均嗜好度が高いほど、実験参加者にとってその項目がより当てはまる。結果より、長文条件のほうが立ち止まると感じる事が確認された($F(1, 118) = 7.81, p = 0.006$)。

¹<https://www.lancers.jp/>



図1: 参加者に呈示された一人称動画のキャプチャ

表1: 呼びかけに用いた発言内容

条件	発言内容
短文条件	こんにちは、あんこクロワッサンって知ってる? 僕に紹介させてよ。
長文条件	こんにちは、あんこクロワッサンって知ってる? 僕に紹介させてよ。 君はあんこクロワッサンって食べたことある? あれ、とってもおいしいよね。 サクサクしてて、最高。 僕あんこクロワッサン大好きなんだ。 あんこクロワッサンのおすすめポイントを教えるね。

また、ロボットの印象に関する質問は、多くの項目で長文条件のほうが当てはまると感じる事が分かった。

「こちらに興味がある」、「人間的だ」、「魅力的だ」、「親密だ」などの項目の平均嗜好度が有意に高いため、立ち止まる可能性が高いと考えられる。一方で、「不快だ」、「見ていてイライラする」の項目で長文条件の方が有意に平均嗜好度が高かった。これは、呼びかけが長く、鬱陶しく感じられた可能性がある。しかし、立ち止まりやすい呼びかけを行い接客機会を得ることが目的であるため、ロボットと通行人の組み合わせ戦略を設計するうえで、呼びかけられる時間が長くなるように組み合わせることが重要であると考えられる。

2.5 閑散時の複数人への呼びかけ方法による立ち止まりやすさ

2.5.1 仮説

公共空間において接客ロボットが通行人に呼びかけて立ち止めたい時、接客ロボットがどの通行人に呼びかけるかいくつか選択肢がある。一つは、通行人が通

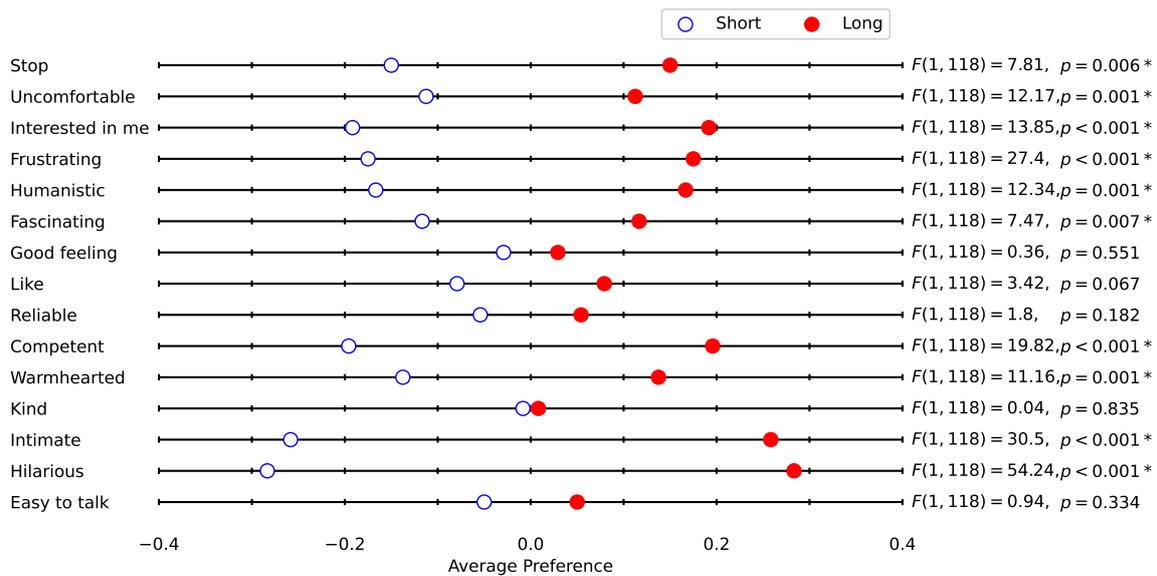


図 2: 呼びかけ時間による質問の平均嗜好度 (*は 5%水準で有意であったことを示す)

過するたびに呼びかける逐次的な方法である。逐次的な呼びかけは公共空間における接客ロボットの研究で多く行われている呼びかけ方法であり、もし呼びかけた歩行者のうちほとんどが立ち止まれば、接客機会が非常に多く得られる。しかし、多くの歩行者が通過する場面では全員に話しかけようとする、別の歩行者が通過するたびに呼びかけを中断しなければならないため、呼びかける時間が短くなってしまふ。もう一つの呼びかけ方法は、呼びかける歩行者を選んで呼びかける選択的な方法である。逐次的な呼びかけ方法と異なり、呼びかけを中断する必要がないため、特定の歩行者に長い時間呼びかけができる可能性がある。また、選択的に呼びかけられた歩行者は自分だけに呼びかけられているために、特別な待遇を受けているように演出することができるため立ち止まりやすくなる可能性がある。本論文では、選択的な呼びかけのほうが立ち止まりやすいと仮説を立てた。

2.5.2 実験

実験は、図 3 のような歩行中にロボットから呼びかけられる歩行者の一人称動画を参加者に見せて、評価させた。複数の歩行者がいる場合の呼びかけ方法による差をみるために、動画の前方に別の歩行者を一人歩かせたうえで、前方で歩いている人にも参加者にも呼びかける逐次条件と、前方で歩いている人は無視して参加者のみに呼びかける選択条件を比較した。実験参加者は 200 人 (男性: 115 人、女性: 83 人、無回答: 2 人) であり、そのうち有効な回答は 133 件 (66.5%) で



図 3: 参加者に呈示された一人称動画のキャプチャ

あった。そのうち、60 件ずつに統一し、計 120 件を解析に用いた。

2.5.3 結果と考察

前方に 1 人別の歩行者がいる場合の呼びかけ方法による質問の回答結果を図 4 に示す。結果より、逐次条件のほうが立ち止まると感じる事が分かった ($F(1, 118) = 11.47, p = 0.001$)。また、ロボットの印象に関する質問は、多くの項目で逐次条件のほうがポジティブな印象に当てはまると感じる事が分かった。

逐次条件のほうが立ち止まると感じる結果になったのは、自分以外の歩行者が 1 人しかいないような閑散としている場面において、選択的に話しかけるのが不自然であり、ユーザのロボットに対する受容性が低く

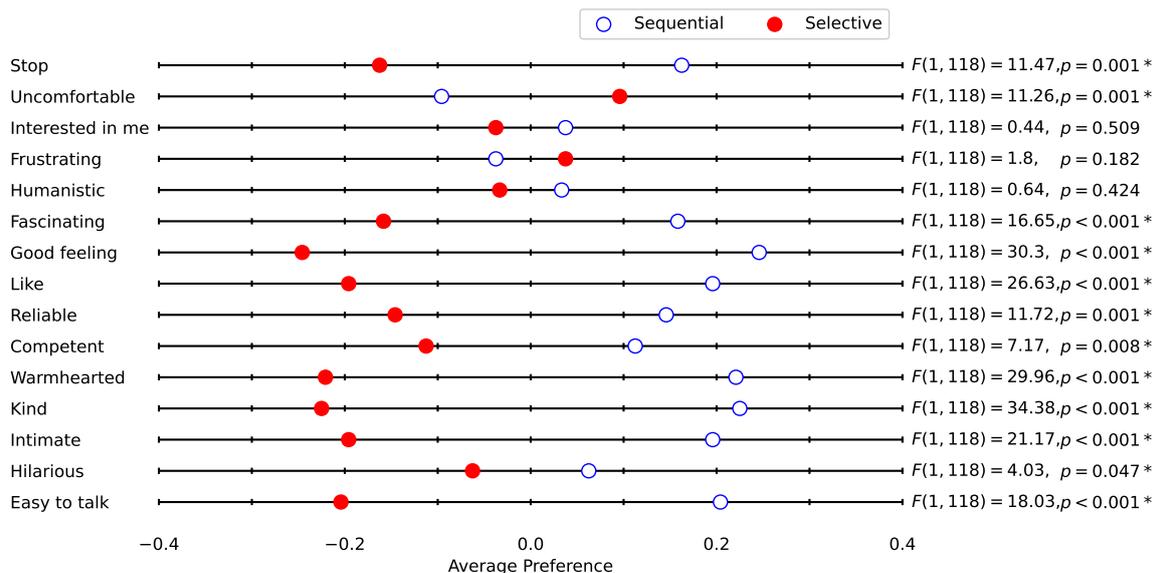


図 4: 前方に別の通行人が 1 人いる場合の呼びかけ方法による質問の平均嗜好度 (*は 5%水準で有意であったことを示す)

なったからだと考えられる。実際に、印象評価でもネガティブな印象は選択条件のほうがよく選ばれ、ポジティブな印象は逐次条件のほうがよく選ばれた。

2.6 混雑時の複数人への呼びかけ方法による立ち止まりやすさ

自分以外の通行人が 1 人しかいないような閑散としている場面では、選択的に話しかけるのが不自然であると考えた。一方で、さらにたくさんの人が通行して混雑しているような場面では選択的な呼びかけ方法が不自然ではなくなるのではないかと考えた。そこで、前方に歩く通行人の数を 1 人から 10 人に増やして同様の実験を行った。参加者には、図 5 のような歩行中にロボットから呼びかけられる通行人の一人称動画が呈示された。実験参加者は 204 人 (男性: 129 人、女性: 73 人、無回答: 2 人) であり、そのうち有効な回答は 176 件 (86.3%) であった。そのうち、79 件ずつに統一し、計 158 件を解析に用いた。

2.6.1 結果と考察

前方に 10 人いる場合の呼びかけ方法による質問の回答結果を図 6 に示す。前方に 1 人しかいなかった時とは対照的に、前方に 10 人いる場合は選択条件のほうが立ち止まると答えた人が多かった ($F(1, 156) = 18.14, p < .001$)。また、印象評価でもネガティブな印象は逐次条



図 5: 参加者に呈示された一人称動画のキャプチャ

件のほうがよく選ばれ、ポジティブな印象は選択条件のほうがよく選ばれた。これらの結果から、閑散とした場面では逐次的に呼びかけ、混雑した場面では選択的に声をかけることで、通行人を立ち止めやすくし、接客機会を得るために有効であると考えらえる。

3 割り当てアルゴリズムの設計

3.1 設計方針

ビデオ評価の結果をもとに、複数ロボットを使ったインタラクションにおいて、通行人が立ち止まりやすく、接客機会を効率よく得られるロボットと通行人の組み合わせ戦略を設計する。

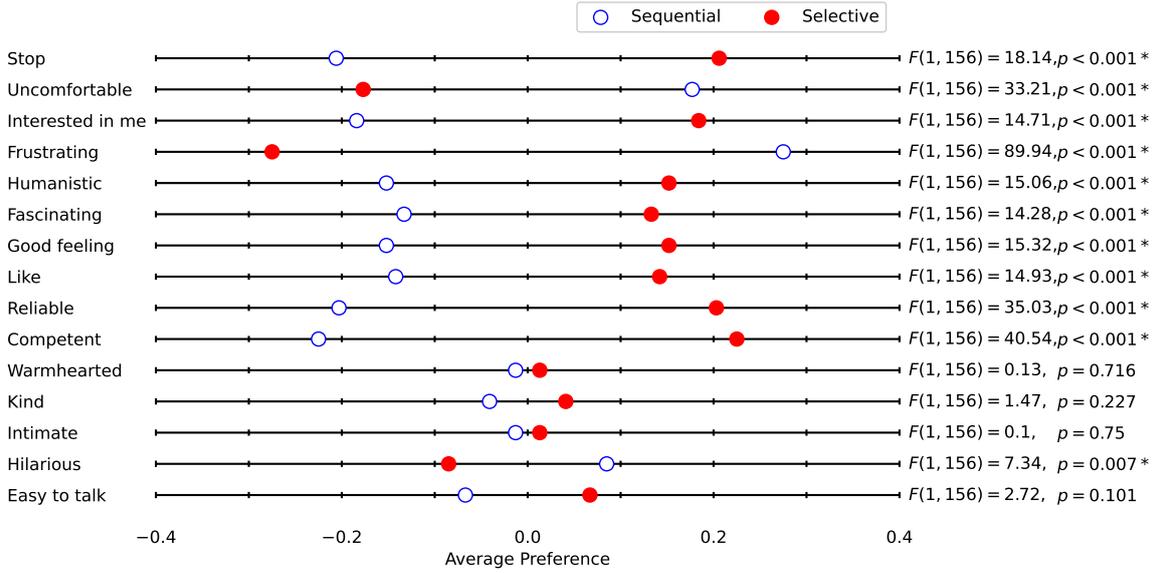


図 6: 前方に別の通行人が 10 人いる場合の呼びかけ方法による質問の回答結果。*は 5%水準で有意であったことを示す。

ビデオ評価より、閑散時は全員に話しかけたほうが立ち止まりやすいことが分かった。つまり、閑散時はロボットに近い通行人に単純に呼びかける手法である従来の割り当て手法 [4, 6, 10, 18] が最適であるといえる。一方で、混雑時は全員に短く呼びかけるよりも、選択的に呼びかけて呼びかけ時間を長くするほうが立ち止まりやすいことが分かった。ここで、通行人は移動しているため、呼びかけている途中で別の通行人の方が来て、呼びかける通行人を変更することがある（以下、呼びかけ中の対象変更）。混雑時は、呼びかけ中の対象変更が起きやすい状況である。呼びかけ中の対象変更が発生すると、呼びかけ時間が短くなり、全体の立ち止まる確率が小さくなってしまい、結果として接客機会の損失が起きる可能性がある。従来手法の距離のみで割り当てる場合、通行人が移動することを考慮していないため、呼びかけ中の対象変更が多く発生してしまう。そこで、本研究では、将来の通行人の位置を考慮し、混雑時に呼びかけ中の対象変更が起きにくいようにする割り当てアルゴリズムを提案する。提案手法によって、通行人の立ち止まる確率が上がり、接客機会を得やすい対話戦略を実現できると考える。

3.2 提案手法

本研究では、割り当てアルゴリズムに線形割当問題 (*linear assignment problem*) の解法を用いる。線形割当問題は線形計画法および組合せ最適化における有名

な問題の一つであり、定義は以下のように与えられる。入力としてエージェントの集合 $I = \{1, \dots, n\}$ とそれらに割り当てる仕事の集合 $J = \{1, \dots, n\}$ が与えられる。また、仕事 $i \in I$ をエージェント $j \in J$ に割り当てたときにかかるコスト c_{ij} が与えられる。この問題では、各仕事を各エージェントに 1 つずつ割り当てることである。出力は仕事のエージェントへの割り当て $\sigma: J \rightarrow I$ である。つまり、エージェント $i \in I$ に対して仕事 $j \in J$ を割り当てる場合 $x_{ij} = 1$ 、それ以外の場合 $x_{ij} = 0$ とすると、次のように定式化できる。

$$\text{minimize } \text{cost}(\sigma) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in I, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \forall j \in J, \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J$$

目的関数 (1) は各仕事をそれぞれエージェントに割り当てた時のコストの総和を表している。また、制約式 (2) は各仕事が 1 つのエージェントに割り当てられ、制約式 (3) は各エージェントが 1 つの仕事を割り当てられることを表している。

線形割当問題の解法は知られており、多項式時間で解くことができる。そのため、エージェント i をロボッ

ト、仕事 j を通行人に読み替えて解くことで求める割り当てアルゴリズムを設計できる。なお、線形割当問題では I, J の要素数が一致している必要があるが、異なる場合は大きいほうに要素数を合わせるようにダミーの要素を増やし、ダミーの要素に関連するコスト c_{ij} を十分に大きい値にすれば対応可能である。ここで、従来手法のロボットから最も近い人に声をかける場合は、コスト c_{ij} はロボット i と通行人 j の距離である。本研究では、将来の通行人の位置を考慮するため、ここに将来の通行人の位置とロボットの位置の距離を入れることで、呼びかけ中の対象変更が起きにくいようにする割り当てアルゴリズムを実現する。 α 秒後の通行人の位置 $\mathbf{p}_j(t + \alpha)$ は過去 50 フレームの位置の平均と現在の位置 $\mathbf{p}_j(t)$ との差分から、フレーム間のインターバル T を用いて式 (4) のように求める。

$$\mathbf{p}_j(t + \alpha) = \mathbf{p}_j(t) + \left(\mathbf{p}_j(t) - \frac{1}{50} \sum_{k=t-50}^{t-1} \mathbf{p}_j(k) \right) \frac{\alpha}{25T} \quad (4)$$

また、距離のみで割り当てを行うと、例えば通行人の背後から話しかけるなど、無理な呼びかけを行うことがある。そこで、無理な呼びかけを行わないように、対話不可能な位置関係にいる場合に定数を足す。

つまり、提案手法の評価関数は式 (5) のように表される。

$$c_{ij}(t) = D_{ij}(t) + aD_{ij}(t + \alpha) + bS_{ij}(t) \quad (5)$$

ただし、 $D_{ij}(t)$ は時刻 t の時の i と j の距離、 $S_{ij}(t)$ は時刻 t の時の i と j が対話できない状態かどうか (対話できるとき 0、できないとき 1)、 a, b, α は定数である。以下、式 (5) の第二項を将来情報の項、第三項を無理な呼びかけ回避の項と呼ぶ。

4 シミュレータ設計

この節では、組み合わせ戦略の検証に用いるシミュレータの開発を行う。シミュレータは前の実験で分かったことをもとに、「呼びかけが長いほどよく立ち止まる」、「閑散としているときには逐次的に呼びかける方が、混雑しているときには選択的に呼びかける方がよく立ち止まる」の二点が表現されるように開発する。また、先行研究で分かっている「呼びかける位置が遠くなく、正面にいと適切である」ことも立ち止まりやすさに表れるよう表現する。

シミュレータは図 7 のように一直線の廊下にロボットの配置し、通行人がそこを通過することを想定する。シミュレータは、廊下を通過する通行人と移動しない複数のロボットで構成される。ロボットと通行人は、それぞれ前方に扇型の対話可能範囲を持ち、ロボットに

アルゴリズム 1

通行人の立ち止まる確率 p の求め方

```

1:  $p \leftarrow p_0$ 
2: if  $d < d_{interactive}$  then
3:    $p \leftarrow p(1 - d/d_{interactive})$ 
4: else
5:    $p \leftarrow 0$ 
6: end if
7: if  $|\theta| < \theta_{interactive}/2$  then
8:    $p \leftarrow p/2$ 
9: end if
10: if 選択的呼びかけか? then
11:    $p \leftarrow 2p$ 
12: end if
13:  $p \leftarrow p(1 + 0.05n)$ 
14: return  $p$ 

```

割り当てられた通行人がロボットの対話可能範囲にいる場合、ロボットは通行人に対して立ち止まるように呼び掛ける。この呼びかけの試行は 0.5 秒に 1 度行われる。呼びかけられた通行人はアルゴリズム 1 の手順に従って立ち止まる確率 p が求められ、その確率に従って立ち止まるかどうか決定される。ここで、アルゴリズム 1 中の p_0 は基準となる定数である。また、 d, θ はそれぞれロボットと通行人の距離、体の向きのなす角であり、 $d_{interactive}, \theta_{interactive}$ はそれぞれ通行人の対話可能範囲の距離と角度であり、 n は継続して呼びかけられた回数である。通行人が立ち止まる場合、ランダムな時間滞留し離脱する。また、選択的呼びかけかどうかの判定は、通行人から見て、対話可能範囲内にロボットがいる場合に他の通行人に呼びかけずに、その通行人に呼びかけたかどうかで判断する。

検証に用いるシミュレータは、通行人が 90 秒の間に 50 人通過し、ロボットが 3 体設置されている状況で実行された。立ち止まりに関する定数などについては先行研究 [15, 19] を参考に決定した。図 7 における、ロボットの対話可能範囲は距離 3 m、中心角 $2\pi/3$ rad の扇型であり、通行人の対話可能範囲は距離 $d_{interactive} = 6$ m、中心角 $\theta_{interactive} = 2\pi/3$ rad の扇型であった。なお、混雑時を再現するために通行人と通行人の間隔は 6 m 開かないように調整された。また、立ち止まる確率の基準となる p_0 は 0.1 であった。

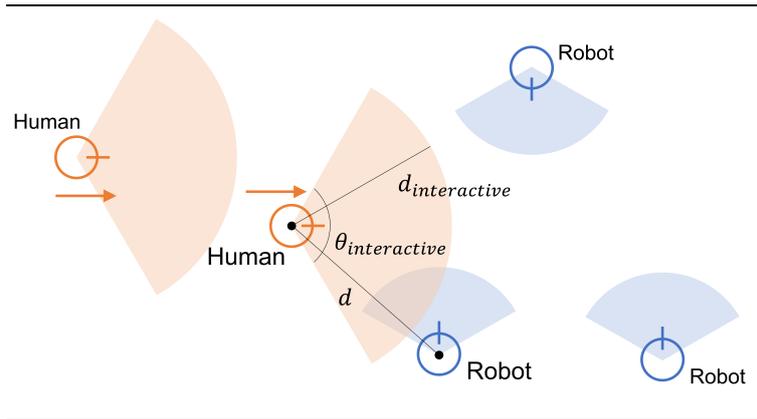


図 7: 作成する検証用シミュレータのイメージ

5 割り当てアルゴリズムの検証

5.1 検証手法

割り当てアルゴリズムの検証には、開発したシミュレータにおいてどれだけ通行人を立ち止めたかで評価する。5 回試行を行い、立ち止めた割合の平均をもとに、設計した割り当てアルゴリズムの重みなどの定数を最適化する。5 回の試行において乱数に用いるシード値はそれぞれ固定し、提案手法が最適化されたときの立ち止めた割合と従来の割り当てアルゴリズムの立ち止めた割合を比較する。比較の結果、提案手法の立ち止めた割合が従来手法より高ければ、提案手法が接客機会を創出するのに有効であるといえる。

最適化には準ニュートン法の L-BFGS-B 法を用い、評価関数 (5) の定数 a, b, α に対して通行人の立ち止まった割合が最大になるよう最適化した。なお、比較のために、将来情報の項の定数 (a, α) のみの評価関数 (6) の最適化と無理な呼びかけ回避の項の定数 (b) のみの評価関数 (7) の最適化も行う。また、従来手法の評価関数 (8) は最適化をすべき定数がないため、最適化を行わない。

$$c_{ij}(t) = D_{ij}(t) + aD_{ij}(t + \alpha) \quad (6)$$

$$c_{ij}(t) = D_{ij}(t) + bS_{ij}(t) \quad (7)$$

$$c_{ij}(t) = D_{ij}(t) \quad (8)$$

5.2 結果

最適化の結果を表 2 に示す。従来手法の距離のみの割り当て法に比べると、将来情報の考慮や無理な呼びかけを回避することでシミュレータ上で立ち止まり率が向上した。また、呼びかけの詳細を表 3 に示す。将来情

報の項を含む場合に選択的呼びかけの回数が増え、無理な呼びかけ回避の項を含む場合に対話可能な時に呼びかけた回数が増えた。

5.3 考察

提案手法が従来手法よりも立ち止まり率が高くなった理由として、選択的呼びかけが多くなったからと考えられる。選択的呼びかけの割合は将来情報の項を含む場合に増えた。なお、将来情報の項を含まない場合でも選択的呼びかけが起きるのはロボットが複数体いることに起因する。例えば、距離のみの評価関数の場合でも、全体の距離の和を小さくするため、必ずしも近いロボットと通行人が割り当てられるとは限らない。そのため、将来情報を考慮しなくても選択的呼びかけが起こりうる。一方で、将来情報を考慮することで、その時点では近くても呼びかけず他の人に呼びかけることが起きるため、選択的呼びかけが多くなる。その結果、立ち止まり率が高くなったと考えられる。

また、呼びかけに不適切な位置から呼びかける割合が低くなったことも理由として考えられる。無理な呼びかけ回避の項を含む場合の方が、含まないときよりも対話可能時の呼びかけの割合が増えた。距離だけでなく、体の向きを考慮し、無理な呼びかけを行う割り当ての場合に定数を足したため、対話可能な組み合わせが選ばれやすい。その結果、背後などの立ち止まりにくい位置からの呼びかけが減り、立ち止まり率が高くなったと考えられる。

以上より、公共空間において混雑時に接客機会を創出するために、提案手法によるロボットと通行人の割り当て法が有効であることが分かった。また、閑散時は近い通行人に単純に呼びかける手法である従来の割り当て手法が最適であるといえるため、通行人の密集度に合わせてロボットと通行人の割り当て法を変える

表 2: 最適化の結果

条件	評価関数	最適化結果			立ち止まり率 [%]
		a	α	b	
提案手法	式 (5)	0.67	1.87	10.0	20.0
距離+将来情報の項	式 (6)	0.66	1.82	-	18.0
距離+無理な呼びかけ回避の項	式 (7)	-	-	10.0	19.2
従来手法	式 (8)	-	-	-	17.6

表 3: 呼びかけの回数 (カッコ内は総数に対する割合)

条件	選択的呼びかけ	対話可能時呼びかけ	総数
提案手法	319(20.4%)	1227(78.6%)	1562
距離+将来情報の項	330(21.8%)	899(59.4%)	1514
距離+無理な呼びかけ回避の項	242(14.8%)	1120(68.3%)	1639
従来手法	322(20.0%)	807(50.1%)	1611

ことが接客機会を作るために有効である可能性が示唆された。

6 おわりに

本論文では、複数ロボットを使ったインタラクションにおいて、通行人が立ち止まりやすく、接客機会を効率よく得られるロボットと通行人の組み合わせ戦略を提案することを目的とした。まず、どの状況の時に通行人が立ち止まりやすいか調査し、その結果や先行研究の知見を基にして、公共空間を想定したシミュレータを開発した。シミュレータ上で、組み合わせ戦略の妥当性を検証するために、距離の近さのみで割り当てる従来手法と比較して、通行人を多く立ち止めることができるか確かめた。その結果、将来の通行人の位置と対話可能かどうかを考慮することが有効であることが分かった。

本研究は、ビデオ評価による実験結果に基づいてシミュレータを作成している。ビデオ評価での体験は実環境での体験と異なるため、立ち止まりやすい状況について実環境で得られる結論は不明である。また、提案手法の検証について、本研究ではシミュレータ上で立ち止まり率を検証したため、実環境において提案手法による割り当て法が有効かどうかは不明である。そのため、実環境においても同様の結論が得られるか調査することが必要である。

また、本研究で作成したシミュレータの変数のいくつかは実験や先行研究で得られた値ではなく、決め打

ちされた値が含まれている。例えば、通行人の立ち止まる確率を決めるアルゴリズム 1において、選択的呼びかけをされた場合に、されない場合より 2 倍立ち止まりやすくした。2節の実験によって選択的呼びかけの場合に立ち止まりやすくなることは分かっているが、2 倍という値は実験から得られない値である。そのため、決め打ちされたパラメータについて実験などが行い、その結果をもとに決定されることが必要である。

参考文献

- [1] 内閣府. 令和 4 年版高齢社会白書, 2022. <https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2022/html/zenbun/index.html>.
- [2] Anna MH Abrams and Astrid M der Pütten. I-c-e framework: Concepts for group dynamics research in human-robot interaction. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 12, No. 6, pp. 1213–1229, 2020.
- [3] Yuki Okafuji, Sichao Song, Jun Baba, Yuichiro Yoshikawa, and Hiroshi Ishiguro. Influence of collaborative customer service by service robots and clerks in bakery stores, 2022.
- [4] Malaika Brengman, Laurens De Gauquier, Kim Willems, and Bram Vanderborght. From stopping to shopping: An observational study comparing a humanoid service robot with a tablet service kiosk to attract and convert shoppers. *Journal of Business Research*, Vol. 134, pp. 263–274, 2021.

- [5] Masahiro Shiomi, Kazuhiko Shinozawa, Yoshifumi Nakagawa, Takahiro Miyashita, Toshio Sakamoto, Toshimitsu Terakubo, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. Recommendation effects of a social robot for advertisement-use context in a shopping mall. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 5, No. 2, pp. 251–262, 2013.
- [6] Joichiro Amada, Yuki Okafuji, Takahiro Wada, Jun Baba, Junya Nakanishi, and Yuichiro Yoshikawa. Behavioral changes in passersby by expanding embodiment of a calling robot. In *2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 1313–1318, 2021.
- [7] Takayuki Kanda, Masahiro Shiomi, Zenta Miyashita, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. A communication robot in a shopping mall. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26, No. 5, pp. 897–913, 2010.
- [8] Chao Shi, Masahiro Shiomi, Christian Smith, Takayuki Kanda, and Hiroshi Ishiguro. A model of distributional handing interaction for a mobile robot. In *Robotics: Science and Systems*, 2013.
- [9] Chao Shi, Satoru Satake, Takayuki Kanda, and Hiroshi Ishiguro. A robot that distributes flyers to pedestrians in a shopping mall. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 10, No. 4, pp. 421–437, 2018.
- [10] Yuki Okafuji, Yasunori Ozaki, Jun Baba, Junya Nakanishi, Kohei Ogawa, Yuichiro Yoshikawa, and Hiroshi Ishiguro. Behavioral assessment of a humanoid robot when attracting pedestrians in a mall. *International journal of social robotics*, Vol. 14, No. 7, pp. 1731–1747, 2022.
- [11] Imad Jawhar, Nader Mohamed, Jie Wu, and Jameela Al-Jaroodi. Networking of multi-robot systems: Architectures and requirements. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol. 7, No. 4, 2018.
- [12] Magnus Söderlund. The robot-to-robot service encounter: an examination of the impact of inter-robot warmth. *Journal of Services Marketing*, Vol. 35, No. 9, pp. 15–27, 2021.
- [13] Xiang Zhi Tan, Samantha Reig, Elizabeth J Carter, and Aaron Steinfeld. From one to another: how robot-robot interaction affects users’ perceptions following a transition between robots. In *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 114–122. IEEE, 2019.
- [14] Marlena R. Fraune, Yusaku Nishiwaki, Selma Šabanović, Eliot R. Smith, and Michio Okada. Threatening flocks and mindful snowflakes: How group entitativity affects perceptions of robots. In *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, HRI ’17*, p. 205–213, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [15] Joichiro Amada, Yuki Okafuji, Kohei Matsumura, Jun Baba, and Junya Nakanishi. Investigating the crowd-drawing effect, on passersby, of pseudo-crowds using multiple robots. *Advanced Robotics*, Vol. 0, No. 0, pp. 1–10, 2022.
- [16] Marlena R. Fraune, Steven Sherrin, Selma Šabanović, and Eliot R. Smith. Rabble of robots effects: Number and type of robots modulates attitudes, emotions, and stereotypes. In *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, HRI ’15*, p. 109–116, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [17] Marlena R. Fraune, Benjamin C. Oisted, Catherine E. Sembrowski, Kathryn A. Gates, Margaret M. Krupp, and Selma Šabanović. Effects of robot-human versus robot-robot behavior and entitativity on anthropomorphism and willingness to interact. *Computers in Human Behavior*, Vol. 105, p. 106220, 2020.
- [18] Daisuke Sakamoto, Kotaro Hayashi, Takayuki Kanda, Masahiro Shiomi, Satoshi Koizumi, Hiroshi Ishiguro, Tsukasa Ogasawara, and Norihiro Hagita. Humanoid robots as a broadcasting communication medium in open public spaces. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 1, No. 2, pp. 157–169, 2009.
- [19] Chao Shi, Masahiro Shiomi, Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. Measuring communication participation to initiate conversation in human-robot interaction. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 7, No. 5, pp. 889–910, 2015.
- [20] Sarah Woods, Michael Walters, Kheng Lee Koay, and Kerstin Dautenhahn. Comparing human robot interaction scenarios using live and video based methods: towards a novel methodological approach. In *9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2006.*, pp. 750–755. IEEE, 2006.
- [21] Robert B Zajonc. Attitudinal effects of mere exposure. *Journal of personality and social psychology*, Vol. 9, No. 2p2, p. 1, 1968.