

子供たちの引き起こす「ロボットいじめ行動」の回避

城所 宏行^{1,2} 末廣 芳隆^{1,3} ブルシュチッチ ドラジェン² 神田 崇行^{1,2,a)}

受付日 2014年6月30日, 採録日 2015年1月7日

概要: 公共の場で活動するソーシャルロボットが期待されている。ソーシャルロボットは人々の興味を引き、かつ有意義なサービス提供ができる可能性がある。しかし、興味を引かれてロボットと相互作用を始めた子供たちの行動が、ときに行き過ぎ、ロボットに対して攻撃行動を起こすことが明らかになってきた。観察実験によって、ロボットに関心を示した子供のうち、合計で 117 回の執拗な攻撃行動を観測した。子供たちはロボットに暴言を吐き、蹴り、叩くなどの行動でロボットの活動を執拗に妨害していた。本論文では、ロボットに対する執拗な攻撃行動を「ロボットいじめ」と名付け、この現象の緩和を試みる。この目的のために、子供のロボットいじめ行動をモデル化し、ロボットがモデルを用いてロボットいじめ行動を事前にシミュレートし回避可能にさせる。モデルを歩行者シミュレーションへ導入することで、子供のロボットいじめ行動をシミュレーション上で再現できるようにした。また、本論文では、ロボットいじめ行動のシミュレーションをロボットの将来行動の計画に用いる、というシミュレーションに基づいた行動計画方法を提案する。ロボットは、センサシステムから現在の状況を取得し、自らの行動に対して子供たちがどのような行動をして、その結果、近い将来どのような状況が生じるのかをこのシミュレーション上で検討する。このシミュレーション結果を比較することで、ロボットいじめが起きにくい行動を選択する。この「ロボットいじめのシミュレーションに基づいた行動計画」システムを構築した。実際のショッピングモールでシステムを用いた実験を行ったところ、ロボットいじめの生起を抑制できたことを確認した。

キーワード：人とロボットの相互作用, 子供, ロボットいじめ

Robot Navigation Strategy for Escaping from Children's Bullying

HIROYUKI KIDOKORO^{1,2} YOSHITAKA SUEHIRO^{1,3} DRAZEN BRSCIC²
TAKAYUKI KANDA^{1,2,a)}

Received: June 30, 2014, Accepted: January 7, 2015

Abstract: Social robots working in public space often stimulate children's curiosity. However, excess curiosity can sometimes result in aggressiveness towards the robots. In our case studies, we registered 117 cases of aggressive behavior and found that some children persistently obstructed the robot's activity. A number of children actually abused the robot verbally, and sometimes even kicked or hit the robot. In this paper, we define this persistent aggressive behavior as "robot bullying" and analyze ways how the occurrence of robot bullying can be reduced. For this purpose, we developed a statistical model of occurrence of children's bullying of the robot. With this model we want to make the robot able to anticipate and avoid potential bullying situations. We confirmed that the model is able to reproduce well the occurrence of bullying in simulations. While running in real world, a robot can then use pedestrian simulations to test its future behaviors for possible occurrence of bullying and choose the behavior which gives the lowest probability of bullying. We developed a system of simulation-based behavior planning which implements this behavior decision. Finally, in experiments in a real shopping mall we demonstrated that with the model the robot successfully decreased the number of occurrences of bullying.

Keywords: human-robot interaction, children, robot abuse

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

² 国際電気通信基礎技術研究所
Advance Telecommunications Research Institute Interna-

tional, Seika, Kyoto 619-0288, Japan

³ 富士通株式会社
Fujitsu LTD., Minato-ku, Tokyo 105-7123, Japan

a) kanda@atr.jp

1. はじめに

公共の場でのサービスにおいて、ソーシャルロボットを導入する試みが始まっている。たとえば、ミュージアム [1]、展覧会 [2]、スーパーマーケット [3]、駅 [4]、歩道 [5] といった場所での情報提供、案内といった利用成果が報告されている。こういった、ソーシャルロボットの利用では、大人たちよりも子供たちの方がロボットに興味を示し、積極的にアプローチしていたという報告が多い。

目新しい存在であるロボットは、人の目を引き、周りに多くの人を引き寄せる。特に子供たちが多く集まるが、親が付き添っている限りは、たいていの子供たちはロボットに対して行儀良く振る舞う。一方で、親が付き添っていない子供たちは、ロボットに対して「いじめ」のような攻撃行動を見せることが明らかになってきた。

著者らが行った観察実験においても、ロボットに対して「いじめ」る行動を何度も観測している。たとえば、子供たちが執拗にロボットの進路に立ち塞がり、ロボットの動きを封じようとする行動が観測された。さらにその攻撃行動がエスカレートし、暴言を吐く、叩く、蹴る、押し倒すなどの行動をとる場合もあった。攻撃行動をやめるようにロボットが依頼しても、子供たちはたいてい聞く耳を持たない様子であった。最終的に子供たちはその行為に飽きるか、買い物から戻った親に叱られて連れて行かれるまで、その執拗な「いじめ」のような行動を止めようとはしなかった。

こうした子供の攻撃行動は、公共の場でソーシャルロボットが利用されるための障壁となると我々は考える。攻撃行動は、ロボットの仕事の妨げになるのはもちろんのこと、その行動を目撃した人を不快にさせ [6]、子供の健全な成長に害をなす [7], [8]。すなわち、子供のロボットへの攻撃行動の問題が未解決であれば、ソーシャルロボットが攻撃行動を誘発する有害な存在と見なされ、社会に受け入れられなくなる可能性がある。本論文では、こういったソーシャルロボットに対する子供の攻撃行動の発生をなるべく回避する方法を新たに発見し、提案することを目的とする。

2. 関連研究

2.1 子供の動物虐待

ロボットに対する攻撃行動に類似した事例として、「動物虐待」の行動が「人と動物の相互作用」の研究分野において報告されている。動物虐待は「動物の心身の苦痛や、時に死を引き起こす、非偶発的で、社会的に受け入れられない行動」とされている [9]。

Miller は、動物虐待を“目的なしに衝動的に取る行動”だと見なしている [8]。また行動障害をかかえる子供のうち 25% が動物を虐待した経験があることから、動物虐待を行動障害の兆候と見なしている。Gullone らは、動物を虐待する子供は、人に対する「いじめ」も行いがちであること

を明らかにしている [7]。また動物虐待は感情移入する能力の欠如によって起こるとも述べている。

Arluke らは、動物を虐待する子供が、必ずしも“精神異常者、冷酷な殺人鬼、サディスト”であるわけではないとしている [10]。子供の頃の動物虐待の経験について大人にインタビューしたところ、楽しむための遊び（例：缶よりも動く鳥を射撃する方が動作の予測が難しくなるため、より楽しくなる）、新しい知識の形成（例：好奇心からムカデを切って、まだ生きているかを調べる）、遊び仲間との集団行動（例：他の皆がやっているためバッタを焼き殺す）、といった理由で、普通の子供でも動物を虐待していることが明らかになった。一方で、大人は子供ほど動物を虐待しない。約半数の大人は子供の頃グループの 1 人として動物虐待に加担していたが、大人になってからはその割合が 13% に減少している [11]。また女性よりも男性の方が動物を虐待しがちである [12] との報告がある。

以上のような動物虐待の特徴はロボットに対するいじめと類似している点がある。これらの先行研究での動物虐待の原因についてのとらえ方は議論があるものの、いずれの研究でも、動物虐待は避けるべきだという点では一致している。

2.2 ロボットいじめ

ロボットに対するいじめに関して、いくつかの先行研究がある。Bartneck らは、最初に「robot abuse (ロボットいじめ/虐待)」という言葉を使い始めた [13]。またいじめの加害者はたいてい、ロボットいじめを人に対するいじめほど悪いことだと思っていないが、ロボットに知性があると感じ取ると、途端にロボットへの破壊行為をためらうことを明らかにしている [14]。他にも、ロボットが苦痛を与えられる状況を映したビデオを見た人は、不快感やロボットへの同情心をいだいたという報告もある [6]。

Salvini らは、公共空間でロボットいじめ行動（虐待行動）が起きた事例を報告している [15]。その公共空間で行ったデモンストレーションにおいて、人は好奇心からロボットに近づくが、まれに蹴る、殴る、叩くなどの攻撃行動にエスカレートした事例も観測されている。そのようなロボットいじめ行動は、近くで人間のオペレータが監視していないときだけ発生している。この状況は本論文で観測したロボットいじめの状況と類似していると考えられる。

以上のように、ロボットいじめに関していくつか報告されているが、ロボットいじめの発生パターンを分析し、ロボットいじめの状況を理解する方法はまだ明らかにされていない。

2.3 人とロボットの相互作用におけるシミュレーションに基づいたプランニング

人の行動は非常に複雑であり、将来とる行動を正確に予

測することは難しい。その予測の難しさは、人と相互作用するロボットにおける行動プランニングを、よりいっそう難しくしている。

最近の研究では、人とロボットの相互作用の行動プランニングのために、シミュレータが用いられている。たとえば、Hoffman らは、人の将来行動の予測が円滑な相互作用を可能にすることを明らかにしている [16]。Morales らは、2人のエージェントが並列で歩行するシミュレータを作成し、エージェントの移動の予測計算に用いている [17]。

ロボットと歩行者との相互作用に関して、歩行者の行動を予測する方法が研究されるようになってきた。いくつかの研究では、行動プランニングのために歩行者シミュレータが用いられている。たとえば、Bennewitz らは、ロボットが歩行者との衝突回避を計画するために、歩行者の移動軌跡から歩行者同士の相互作用モデルを開発し、モデルを用いた歩行者シミュレーションを行っている [18]。Henry らは、歩行者シミュレータ上で学習させる方法により、衝突回避アルゴリズムを実現している [19]。Garrell らは、歩行者のグループを認識する能力を検証するために、歩行者シミュレータを用いている [20]。他にも、衝突回避の最適な位置を計算するために歩行者シミュレータが用いられている [21]。Kidokoro らは、歩行者の歩く邪魔にならない経路を選択可能にするために、歩行者シミュレータを用いてロボットの周りの混雑の生起を再現している [22]。

本論文では、以上の先行研究と同様に、人とロボットの相互作用に対して、シミュレーションに基づいた行動プランニングを適用する、というパラダイムで研究を進める。そのため、ロボットいじめの問題を緩和させるための行動プランニングに、歩行者シミュレーションを用いる。従来研究に対して、本論文では複雑な創発現象である子供のロボットいじめの生起を計算可能にするという点に新規性がある。

3. データ収集

3.1 環境と実験基盤

実験環境は大阪南港にあるショッピングモールを利用している (図 1)。ショッピングモールの一部に、観測範囲内に存在する人の位置と高さの追跡を可能にするセンシング

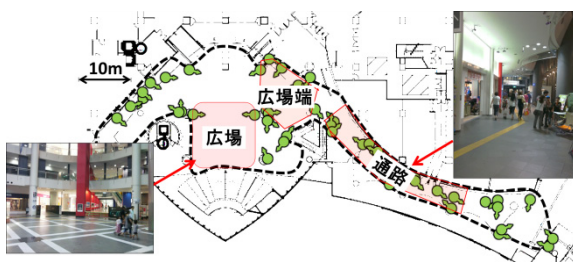


図 1 フィールド実験の環境

Fig. 1 Environment where we conducted the field study.

基盤を構築した (図 1 黒色の破線内)。

観測範囲は、中央の広場、通路と広場をつなぐ場所 (広場端)、広場から東に連絡する長い通路、広場から西に連絡する短い通路で構成される。観測範囲外である広場の北側には、上階にあるオフィスや店へ連絡するためのエスカレータやエレベータが設置されている。この環境における主な人の流れは、人の平均密度が最も高い東の通路を通り抜ける人の流れである。この東の通路を広場側に通り返る人の流れは、東の通路と広場が連絡する広場端において、北に向かう流れと、広場を通過して西の通路に向かう流れに分かれる。東の通路は混雑することが多いが、広場中央はほとんど混雑することはない。広場の東側には、いくつかのベンチや椅子が配置されている。

人追跡システムは合計 49 台の異なる種類の 3 次元距離画像センサ (センサの位置と方向は、それぞれ図 1 内の連結した円と矢印で示してある) を用いており、合計の観測可能範囲は約 900 m² である。人追跡システムは、観測範囲内のすべての人の位置 (誤差約 30 cm 以内) と高さ (誤差約 20 cm 以内) を、20 Hz の周期で取得することが可能である。人追跡システムの技術的な詳細は文献 [23] で報告されている。

実験では人型ロボット Robovie-II を使用する。Robovie-II は発話やジェスチャを通して人と相互作用することが可能であり、人間のような身体的な特徴をいくつか有している。Robovie-II の高さは 120 cm、胴の断面の直径は 40 cm である。ロボットは移動プラットフォーム Pioneer 3-DX を用いており、走行距離を計測するためにエンコーダ付きモータを有している。30 m まで計測可能な 2 つのスキナ式測域センサ (北陽社製 UTM-30LX) をそれぞれロボットの前後、地面から高さ 8 cm の位置に取り付けており、ロボットの位置同定に用いている。位置同定は、グリッドマップを利用したレイトラッキングのアプローチによるパーティクルフィルタを用いて行っている [24]。最高移動速度は人のゆっくりとした歩行速度と同程度の 700 mm/秒に設定している。

3.2 データ収集のための設定

事前の予備観測から人の行動と流れが異なっていた 2 つの場所 (広場、広場端) において、週末に 2 時間ずつロボットによるパトロールを実施しデータを収集する。パトロールタスクとして、いくつかの固定された地点間を往復移動させる。その際に人の操作者がロボットを遠隔操作する。

歩行者がロボットの前に立ち止まった場合、ロボットは移動を停止し、その歩行者に道を開けるように依頼する。まず初めに、“ロボビーです。今はパトロール中なので前を開けてくださいね”と発話する。その後 3 秒間、歩行者がまだ立ち止まっている場合、“前を通りたいので、道を開けてくださいね”と発話する。さらに、その後 3 秒間、歩

行者が立ち止まったままの状態の場合、以前通った地点に方向を変え、ロボットを動かすことを試みる。それでも再び進路を塞がれた場合、上記の過程を初めから繰り返し行う。歩行者が道を開けた場合、“ありがとう”と発話する。

データ収集においては、人追跡システムを用いてビデオ映像と移動軌跡を収集する。

3.3 ロボットいじめの場面

データ収集を行った結果、117回のロボットいじめ行動を観測した（ロボットいじめの抽出方法は3.4節を参照）。ロボットが道を開けるように依頼したとき、たいていの歩行者はその要求に従い道を開けたが、ときどき無視や拒絶を示す子供がいた。ロボットに興味を示し接近してきた歩行者のうち、ほとんどの歩行者は、1度か2度ほどロボットに接近し、ロボットの依頼に従って道を開けた。しかし一部の子供たちは、ロボットが数回依頼した後でもロボットに執拗にまとわりつき、故意にロボットを妨害していた。さらにいくつかの事例では、その行動がロボットに対する暴力的な行動へと徐々にエスカレートしていった。以下では、ロボットいじめ行動についての典型的な事例3例について説明する。

3.3.1 事例1：執拗な妨害

攻撃的な発言や暴力こそないが、パトロールをする、というロボットの役割を妨害する行動が観測された。たとえば、ある子供がロボビーに興味を示し、その前に立ち止まったため、ロボビーは“ロボビーです。今はパトロール中なので前を開けてくださいね”と発話した。その子供はいったんその要求に従い離れたが、すぐにロボビーの目の前に戻ってきた。繰り返し同じ行動をとったので、ロボビーはそのたびに前を開けるように依頼した。この状況が7分間続いた後、その子供は前を開けることさえしなくなり、ロボビーの目の前に立ち続けた。さらに6分以上経過した後、その行動はさらにエスカレートし、妨害の意図を発話で表現し始めた。ロボビーがその子供に道を開けるように依頼したとき、その子供は“だめです”や“やだよ”と発話した。さらに、他の子供がこの妨害行為に加わり、“やだよ”と妨害の意図を発話し、ロボビーの周りに立ち続けた（図2）。ロボビーが何度も道を開けるように依頼しても、その子供たちはかたくなに道を開けることを拒絶した。相



図2 執拗な妨害行動
Fig. 2 Persistent obstruction.

互作用が始まってから19分間が経過した後、子供の母親が買い物から戻り、その子供が両手を広げてロボビーを妨害している状況を見つけた。母親はその子供を叱り、ロボビーから遠くに連れて行った。最終的にロボビーが道を開けるように45回要求した19分間の相互作用の間、27回ロボビーの要求を完全に無視し、目の前に立ち続けた。

3.3.2 事例2：攻撃的な発言

言語による執拗な攻撃行動が起きる事例も何度も観測された。ある事例では、最初4人の子供たちがロボビーを囲んでいた。初めのうちはロボビーの要求に従ったが、繰り返し道を開ける依頼を受けた後に、道を塞ぐようになった。ロボビーからの5回目の依頼の後、4人のうちの1人がロボビーに近づき、突然いくつかの暴言を吐いた。彼はしばらくの間、“お前は馬鹿か”と8回、“いやです”と2回、“どっかいけ”と1回発言した。さらにその子供は“囲もうぜ”といて、他の子供たちがロボビーに攻撃的になるように扇動した。その扇動に従い、他の子供たちはロボビーをしばらくの間執拗に囲い、ロボビーの移動を妨害した。

3.3.3 事例3：暴力

ロボットに対して物理的攻撃が行われる事例もいくつか観測された。たとえば、3.3.2項の事例と同様、ある子供はロボビーから何度か道を開けるように依頼された後、ロボビーの要求を拒むようになった。その後、他の子供が集まり、妨害行為に参加した。そしてしばらくした後、暴力的な行動が起きた。ある子供はロボビーの首を無理やり曲げ（図3(a)）、別の子供はロボビーの頭をペットボトルで叩いた（図3(b)）。ただし、ロボビーのハードウェアにはダメージはなかったため、それらの暴力行為はあくまでロボビーを脅すためであり、ロボビーを壊すためではないように思われた。



図3 ロボビーに対する子供の暴力行為
Fig. 3 Children's violence to Robovie.

データ収集日以外の日に行った予備観測においても、いくつかの暴力的な行動を観測している。たとえば、ある子供はロボビーの頭部を手で叩き、“どっかいけおら”と発言した。さらに、その子供はロボビーの頭部にサッカーボールを投げつけた(図3(c))。他の事例では、3人の男の子が、中身が空のペットボトルでロボットを叩きはじめた。その行動は、力の限りペットボトルをロボビーに投げつけるほどにまで、徐々にエスカレートしていった(図3(d))。

3.3.4 事例のまとめ

ロボットいじめの深刻さの度合いには相違があるが、上記の事例における共通点は、子供は単なる好奇心による行動の範疇を超えて、意図的にロボットの道を塞ぎ、パトロールを妨害し続けたということである。本論文の目的は、ロボットが行う仕事を妨げるようなロボットいじめの生起を抑制することであるため、この観点から上記のすべての事例で、ロボットいじめと判定される閾値を超えている。3つの事例を紹介したが、本論文では、これらの事例をいずれも「ロボットいじめ」現象として扱う。

さらにいくつかの予備観測を行ったが、すべての事例において、ロボットをいじめたのは子供であった。大人は子供ほどロボットの周りに寄って来ず、一度もロボットいじめを起こすことはなかった。また、多くの歩行者が通る廊下よりも、歩行者が少ない広場や広場端でロボットいじめがよく起こった。そこで本論文では、ロボットいじめの緩和を目的とするため、いじめが起きなかった廊下で収集したデータを分析から除外する。これらの予備観測から分析した、「ロボットいじめ」行動を3.4節で詳しく説明する。

3.4 データコーディング

収集したデータから、ロボットいじめ行動をコーディングした。人とロボットの相互作用の各事例に対して、1人のコーダが相互作用の開始時点から終了時点までのビデオ映像を観察し、ロボットいじめに該当するかどうかを判定した。ロボットいじめの判定基準は以下のように定めた。
ロボットいじめ：言語や振舞いによる執拗な攻撃や物理的攻撃によって、ロボットが有している役割や人間的(動物的)性質を侵害すると考えられる行動。

人間的(動物的)性質とは具体的に、発声可能、姿勢・状態を自律的に変化可能、人間・動物に似た容姿、存在しているなどを指す。人はロボットが擬人的な姿をし、擬人的に振る舞う様子を見ると、実際には無生物であるロボットを思い思いに擬人化する擬人観を持ち合わせている(あるいは、動物的なロボットの場合には擬動物化が起きる)。コーダは、ビデオを観察するなかで、この擬人観によって擬人化したロボットに対して、上記基準に基づいて「ロボットいじめ」の有無を判定した。たとえば、3.3.1項の事例1は、ロボビーが子供の執拗な攻撃行動により妨害されている、すなわちその役割(パトロール)が果たせないため、コーダ

によってロボットいじめだと判定される。また、事例2は、コーダがロボビーをある程度擬人的にとらえた結果、ロボビーが耐え難い程度の執拗な攻撃的言動を受けている、すなわちロボットの人間の性質が侵害されたと判定された。

コーディング結果の妥当性を確認するため、前述のコーダによって抽出された相互作用の事例のうち、ランダムに選ばれた10%の事例に対して、2人目のコーダが同じコーディングタスクを行った。2人のコーダの間のロボットいじめ判定の一致度を計算したところ、コーエンのカップ係数は0.714と高い一致度を示す結果となった。すなわち、上記のコーディング結果は妥当であると考えられる。

なお、すべての相互作用の事例に対して、同時に相互作用している子供の人数、その親が近くにいるかどうか、のコーディングも行った。その定義については4章で述べる。

4. 子供の行動モデル

4.1 概要

本章では、歩行者シミュレーション上でロボットいじめを再現するために、子供の行動をモデル化することを目的とする。3章のデータ収集で観測した事例では、子供のみがロボットいじめを行っており、大人はロボットいじめを行うことはなかった。そこで子供の行動に焦点を当てて、子供の行動をモデル化する。ロボットいじめには言葉によるもの、暴力をとともなうもの、など様々な事例があるが、本論文の目的には十分であるため、いずれも「ロボットいじめ」と単純化したモデルを作成する。

本モデルは、ロボットとの相互作用において、子供によるロボットいじめの生起確率を推定する統計的なモデルである。モデルは「相互作用時間」モデル、「ロボットいじめの生起」モデルの2つのサブモデルで構成される。図4はサブモデル間の関係を表している。「相互作用時間」モデルは、ある子供がロボットと相互作用する時間を表している。「ロボットいじめの生起」モデルは、ある子供がロボットいじめ行動をしているかどうかを表しており、そのいじめ行動の生起確率を推定するための要因に相互作用時間を含んでいる。各サブモデルを以降の節で説明する。

4.2 相互作用時間モデル

3章のデータ収集で抽出した、ロボットに対する子供の相互作用時間を統計的に分析した。図5は子供が相互作

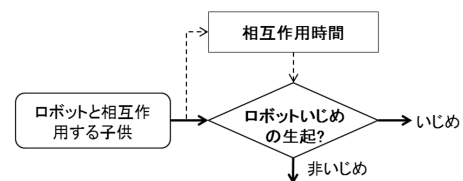


図4 作成したサブモデルの関係

Fig. 4 Relationship among developed sub-models.

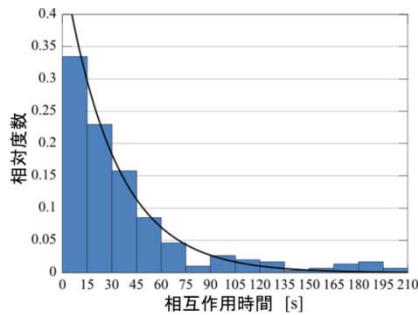


図 5 相互作用時間のヒストグラム
Fig. 5 Histogram of interaction time.

表 1 子供の相互作用に関する統計

Table 1 Statistics on children's interaction.

	いじめの 生起確率	相互作用 時間[秒]	流量 [人/分]	同時滞在子 供人数 [人/15 秒]	近くに親 が居るか [%]
広場端	0.085 (±0.0104)	45.2 (±10.70)	40.6 (±1.17)	0.78 (±0.074)	54.1 (±0.054)
広場	0.139 (±0.0110)	72.6 (±10.60)	12.6 (±0.28)	1.52 (±0.122)	50.0 (±0.05)

用を開始してから終わるまでの時間のヒストグラムを表している。縦軸は相対度数、横軸は相互作用時間を表している。ここではロボットが行う相互作用の行動ユニットの周期（依頼 2 回とその場での半回転）の時間である、15 秒ごとの相互作用の頻度を数えた。分布の形状は指数分布に近いので、指数分布を用いて相互作用時間をモデル化することにした。つまり、ある子供 c は 15 秒ごとに確率 $\lambda(c)$ でロボットに対する相互作用を終了すると仮定する。相互作用時間の確率密度関数は以下で与えられる：

$$p_{int}(t, c) = \lambda(c) \cdot e^{-\lambda(c)t} \quad (1)$$

図 5 では $\lambda = 0.032$ でフィッティングしたときの指数分布を曲線で表している。

収集したデータから各場所に対して、ロボットいじめが起こっているかどうか、どのくらい相互作用が続いたか、他に何人の子供が同時に相互作用をしていたか、親が近くにいるかどうか、についての情報をデータセットとして抽出した。抽出したデータの平均値を表 1 に示す。相互作用時間は場所ごとに異なっており、流量などの影響があることを示唆している。そこで、これらの要因を関数として λ をモデル化した。まず以下 3 つの変数を考慮してモデル化を試みた。

- 1) 流量 (*density*)：相互作用が起こった場所における人の密度を表す。ただし、この変数はその場所において、ロボットが存在しない通常時の人の密度である。
- 2) 近くに親がいるか (*parent*)：親が子供の近く（子供から 3 m 以内）にいる場合は 1 とし、いない場合は 0 とする。
- 3) 同時滞在孩子人数 (*child*)：子供がロボットと相互作用するとき、同時に相互作用している他の子供の平均

表 2 いじめと非いじめの事例における比較

Table 2 Comparison of bullying and no bullying cases.

	相互作用 時間 [s]	同時滞在 子供人数	近くに親が居 るか [%]
いじめ	232.5	4.58	16.7
非いじめ	35.0	2.34	58.6

均人数を表す。

初めに上記 3 つの変数を用い、収集した相互作用時間のデータについてフィッティングを行った結果、それぞれの標準偏回帰係数は、*density* が 0.01235、*child* が -0.0003622 、*parent* が 0.005770 であり、*child* の影響が小さかったため、これを除外した。最終的に λ のためのモデル式は以下で与えられる：

$$\lambda(c) = a_{density} \cdot density + a_{parent} \cdot parent + b_1 \quad (2)$$

フィッティング後のそれぞれの値は、 $a_{density} = 0.000219$ 、 $a_{parent} = 0.0116$ 、 $b_1 = 0.0725$ である。

すなわち、相互作用時間モデルは、周囲の人が多い場所ほど、あるいは親と一緒に滞在中の場合ほど、子供が単位時間あたりにロボットから立ち去る確率 (λ) が高く、相互作用が短時間で終わる傾向を表している。また、 a_{parent} の値が大きいことから、親がそばにいる影響は大きい、と考えられる。

歩行者シミュレーションにおいて、子供がロボットと相互作用を開始した場合（4.5 節に後述する相互作用タイプが *stop to interact* の場合）、その相互作用時間は式 (1) と式 (2) を用いて計算される。

4.3 ロボットいじめの生起モデル

ロボットいじめが起きた事例、起きなかった事例の間の統計的な特徴を比較分析する。表 2 に各データの平均値を示す。平均値に差があるか t 検定を行った結果、すべての変数で有意差が見られた（最も t 値が小さかった同時滞在孩子人数では、 $t = 1.970$, $df = 285$, $p < 0.05$ ）。それゆえ、子供の相互作用時間が長いほど、同時滞在孩子人数が多いほど、子供の親が近くにいない場合ほど、ロボットいじめが起こる傾向があることが分かる。

上記の統計的な特徴に基づいて、いじめの生起をモデル化した。モデルには、ロジスティック回帰モデルを用いた。これは、本論文の目的であるロボットいじめを抑制・回避する行動プランニングのために、いじめの有無の 2 値の出力ではなく、ロボットいじめの生起を確率的に表すことが望まれるためである。

モデルに含める変数については、さらに 4.2 節で用いた 3 つの変数に加えて、下記の変数を考慮した。

- 4) 相互作用時間 (*interact*)：相互作用（子供がロボットに接近し、ロボットからの距離 $D_{interact}$ （ロボットと

相互作用する距離) 以内の範囲に入っている状態) の開始時点から終了時点までの時間を表す。

4つすべての変数を用い、コーディングしたロボットいじめの有無のデータについてフィッティングを行ったところ、*parent* と *density* の影響がきわめて小さかったため、これを除外した。この2つの変数の影響が小さかった理由として、すでに相互作用時間に反映されているためだと考える。たとえば、子供が親と一緒にいる場合あるいは人の密度が高い場所にいる場合は子供の相互作用時間がより短くなる傾向がある。または、子供が親と一緒にいないときに、子供のところに親が戻って来た場合、その子供は相互作用をやめる傾向がある。こういった影響は、すでに相互作用時間のモデルに反映されている。それゆえ *parent* 変数は直接的にロボットいじめの生起モデルに影響しなかったであろう。最終的に、ロボットいじめの生起モデルの式は以下で与えられる：

$$p_{abuse}(t, c) = 1 / (1 + \exp(-(a_{child} \cdot child + a_{interact} \cdot interact + b_2))) \quad (3)$$

フィッティング後のそれぞれの値は、 $a_{child} = 0.5935$, $a_{interact} = 0.003218$, $b_2 = -3.084$ である。

すなわち、得られたロボットいじめの生起モデルによると、同時に滞在する子供の人数が多いほど、相互作用時間が長いほど、ロボットいじめの生起確率 (p_{abuse}) が大きくなる。また、 a_{child} の値を考えると、同時に滞在する子供の人数の影響が大きいと考えられる。たとえば、($child = 2$ で) 相互作用時間が30秒から60秒になった場合、 p_{abuse} の値は0.142から0.154とわずかに上昇するが、($interact = 30$ で) 同時に滞在する子供が2人から5人になった場合、 p_{abuse} の値は、0.142から0.495とかなり上昇する。

歩行者シミュレーションにおいて、子供がロボットと相互作用を開始した場合 (4.5節に後述する相互作用タイプが *stop to interact* の場合)、ロボットいじめの生起確率を推定するために式 (3) が用いられる。

4.4 ロボットいじめの影響モデル

ロボットいじめが起こると、子供が目の前に立ち塞がるためにロボットの移動が妨げられ、移動の効率が著しく低下する。このような、ロボットいじめによるロボットの移動速度への影響をモデル化した。他にもロボットに対するロボットいじめからの様々な影響があると考えられるが、ここでは行動プランニング (5章を参照) のために、ロボットが行うタスク効率 (平均移動速度) に対する影響のみに単純化し、ロボットいじめの影響をモデル化することにした。そのために、3章で収集したデータから、ロボットが移動する間の移動速度系列を抽出し、この移動速度系列データと、コーディングされたロボットいじめの生起のデータセットを用いた。

移動の間にロボットいじめが起こると平均速度がより遅くなると仮定し、この影響のモデル化を試みた。時刻 t におけるロボットの移動速度 $v_r(t)$ は、すべての子供からのロボットいじめの生起確率の総和によって低下すると仮定した場合、ロボットいじめの影響のモデル式は以下で与えられる：

$$v_r(t) = a_{abuse} \cdot \sum_{s \in N} p_{abuse}(t, c) + v_0 \quad (4)$$

最小二乗誤差によりフィッティングした後の、それぞれの値は、 $a_{abuse} = -115$, $v_0 = 297 \text{ mm/s}$ である。

4.5 歩行者シミュレーション

歩行者の移動を再現する歩行者シミュレーションを作成する。歩行者シミュレーションでは、実環境を上空から見た2次元平面ととらえたときの歩行者の移動の中で、ロボットに遭遇した一部の歩行者がロボットに接近し、さらにその一部がロボットをいじめる行動を再現する。図6はシミュレータの基本要素を图示している。

本シミュレーションには、文献 [22] で報告されている歩行者シミュレーションのフレームワークを用いる。歩行者シミュレーション上の歩行者は、3章で取得した歩行者の統計的特徴を表す歩行者モデルに基づいて生成される。歩行者モデルは以下3つの基本要素で構成される：新たな歩行者の生成、移動軌跡、ロボットとの相互作用。各要素を以下で説明する。

新たな歩行者の生成：シミュレーション上で新たな歩行者は、以下3つの統計情報に基づいて決定される場所・時間・属性で生成される。

- 「出現確率」：シミュレーションの1ステップごとに各エリアで新しい歩行者が出現する確率である。各エリアは、歩行者シミュレーション上の環境である二次元平面を $1\text{m} \times 1\text{m}$ のグリッドに分割した、それぞれのセルとする。この出現確率は、3章のデータ収集から統計的に取得され、歩行者の出現場所と時間を決定するために用いられる。
- 「グループの帰属関係」：グループ人数の分布である。3章で収集したデータから取得している。たとえば、出現する歩行者グループのうち、46.4%が単独の人、

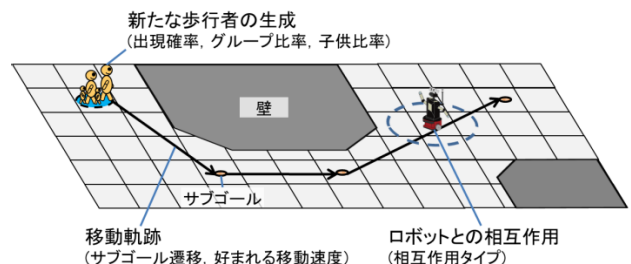


図6 歩行者シミュレーションの基本要素

Fig. 6 Basic elements of pedestrian simulation.

41.0%が2人グループであった。

- 「グループ内の子供の割合」：グループ構成人数ごとの子供の人数の分布である。3章で収集したデータから取得される。たとえば、4人グループでは7%のグループが子供を含まない、16%が1人の子供を含む、といった統計情報が含まれている。

移動軌跡：歩行者が生成された後、以下のモデルを用いて歩行者の軌跡がシミュレーションの1ステップごとに計算される。

- 「サブゴール遷移」：サブゴール遷移は、歩行者が目的地に到着するまでに経由する地点（サブゴール）の系列である。現在到着したサブゴールから次に移動するサブゴールへの遷移は確率的に扱われる。このサブゴール間の遷移確率と同様、サブゴールの位置は文献 [25] の手法を用いて抽出される。
- 「好まれる速度」(v_p)：歩行者の歩行速度の分布である。シミュレーション上の歩行者の移動速度を決定するために用いられる。好まれる速度は3章で収集したデータから取得される。

なお、同じグループのすべてのメンバに対して、同じサブゴール系列、同じ好まれる速度が設定される。

ロボットとの相互作用：毎ステップ更新される歩行者の位置が、ロボットから距離 D_{notice} （ロボットを視認可能な距離）の範囲に入った場合、その歩行者はロボットと相互作用するように軌跡が再計算される。相互作用を終えた後は、前述の「移動軌跡」の基本要素により、軌跡が再計算される。ロボットの周りの相互作用は以下のモデルを用いてシミュレートされる。

- 「相互作用タイプ」：実環境において、歩行者のロボットに対する行動にはいくつかのパターンが見られる。大別すると、ロボットを見ると近づいてくる歩行者“*stop to interact*”，ロボットにまったく影響を受けず（興味を示さず）移動を続ける歩行者“*not interested*”に分けることができる。前者のロボットに接近する行動タイプ“*stop to interact*”の行動を再現するために、文献 [26] で報告されている相互作用タイプの移動モデルを用いる。“*stop to interact*”の場合、歩行者はロボットと遭遇した（ロボットから距離 D_{notice} 以内に入った）時点で、ロボットに接近するために移動経路をロボットの方向に変更し、ロボットから距離 $D_{interact}$ を保つようにロボットの周りに停留する（停留時間は4.2節で説明した「相互作用時間」モデル）。そして相互作用を開始する直前に設定されていたサブゴールへの移動を再開する。

3章でのデータ収集で記録されたデータから、ロボットに遭遇したすべての歩行者の相互作用タイプを2人のコードによってコーディングした結果、2人のコーディングは高い一致率を示しており（コーエンの

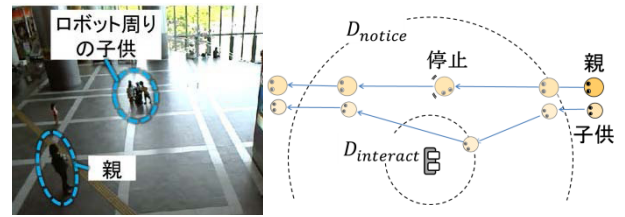


図7 子供が *stop to interact* の場合の親の行動のシミュレーション
Fig. 7 Simulation of parent's behavior when child *stops to interact*.

一致係数は0.818)，“*stop to interact*”タイプの割合は子供で35.48%，大人で4.21%であった。

- 「親子関係」：本研究では子供の行動が親に影響される、という点が重要であるため、親子関係を含むように文献 [26] で用いられている歩行者モデルを拡張する。実際には子供が相互作用するためにロボットに接近する場合、親は子供が相互作用を終えるまで、少し離れた場所から観ていることが多い（図7左）。この親の行動を以下の方法でモデル化する。まず親子は独立で相互作用タイプを統計的に割り当てられる。この中で、子供の相互作用タイプが“*stop to interact*”である場合のみ、親子関係を考慮した行動を設定する。その場合、子供がロボットから距離 D_{notice} に入ったあと、親は子供が視界から外れる（子供が親の移動方向から90度以上にいる）ようになったとき、移動をその地点で停止し、子供が相互作用を終えるまで待機する（図7右）。その後、現在のサブゴールに向かって移動を再開する。

全体として、歩行者シミュレーションでは上記の基本要素を組み合わせたモデルを用いて、各歩行者の位置が1ステップごとに更新される。たとえば、相互作用が“*stop to interact*”の子供の場合、その子供の現在の位置を \mathbf{x} 、ロボットの現在の位置を \mathbf{x}_r とすると、その子供の移動速度 \mathbf{v} は以下のように計算される：

$$\mathbf{v} = \begin{cases} 0 & (0 \leq D_{interact} \text{ and } p_{int}(t_{int}, c) \leq p_r) \\ \mathbf{v}_p \cdot (\mathbf{x}_r - \mathbf{x}) / |\mathbf{x}_r - \mathbf{x}| & \left(D_{interact} \leq |\mathbf{x}_r - \mathbf{x}| \leq D_{notice} \right. \\ & \left. \text{and } p_{int}(t_{int}, c) \leq p_r \right) \\ \mathbf{v}_p \cdot (\mathbf{x}_s - \mathbf{x}) / |\mathbf{x}_s - \mathbf{x}| & \left(|\mathbf{x}_r - \mathbf{x}| \geq D_{notice} \right. \\ & \left. \text{or } p_{int}(t_{int}, c) > p_r \right) \end{cases} \quad (5)$$

p_{int} は式 (1) に従う。また、 t_{int} は距離 $D_{interact}$ 以内に停留している時間、 p_r ($p_r \in \mathbf{R} | 0 \leq p_r \leq 1$) は実数乱数、 \mathbf{x}_s は現在のサブゴール s の位置である。3章のデータ収集の分析から、“*stop to interact*”の歩行者がロボットに接近したときのロボットからの平均距離0.89m（標準誤差

0.23 m) を $D_{interact}$ に設定し、十分に相互作用が起こる距離の上限値として、 D_{notice} を 10 m に設定する。

最終的に、シミュレートされる子供がロボットと相互作用する場合、ロボットいじめの生起モデル (4.3 節を参照) は、その子供がロボットをいじているかどうかを推定するために用いられる。

4.6 歩行者シミュレーションの実行結果

図 8 は実行した歩行者シミュレーション結果の例を示している。この例では、親子が出現し (図 8(a))、親が待っている間に子供がロボットと相互作用し (図 8(b))、相互作用が終わった後に親子が離れる状況 (図 8(c)) が再現されている。このような行動は実環境で観測された状況と類似しており、歩行者シミュレーションが実際の相互作用の状況を再現できていると考えられる。

歩行者シミュレーションの再現性を確認するために、ロボットによるパトロールについて、広場と広場端の 2 つの場所において、2 時間のシミュレーションを 20 回実行した。各シミュレーションでは、データ収集から統計的に作成した歩行者モデルに基づき、歩行者が生成される。歩行者の単位時間あたりの出現人数は、データ収集を行った日における、環境内に出現する単位時間あたりの人数 (広場端で収集した実験日では 23 [人/分]、広場で収集した実験日では 37 [人/分]) に合わせた。パトロールタスクとしては、データ収集で行ったときと同じ固定された地点間をロボットに移動させた。

シミュレーション結果を表 3 に示す。表 1 の実環境で計測したデータと比較すると、すべての項目において、その平均値と実環境での計測値の平均値の差は、標準誤差以内にとどまっていることが確認できた。したがって、この歩行者シミュレーションによって、ロボットいじめの生起

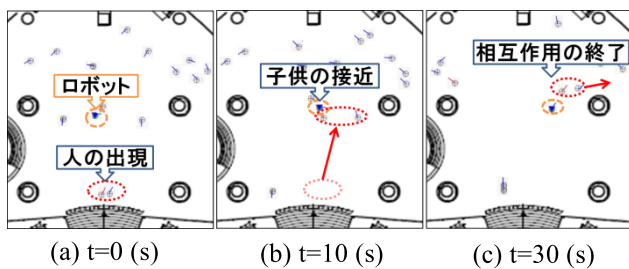


図 8 歩行者シミュレーションの時系列の例

Fig. 8 Example sequence from simulation.

表 3 シミュレーション結果

Table 3 Simulation result.

	いじめの生起確率	相互作用時間[秒]	流量 [人/分]	同時滞在子供人数 [人/15 秒]	近くに親が居るか [%]
広場端	0.094	44.6	41.6	0.78	55.6
広場	0.134	69.6	12.6	1.43	51.5

をある程度シミュレーション内に再現できたと考える。

5. システム

5.1 アーキテクチャ

4 章で作成した歩行者モデルと歩行者シミュレーションを用いて、ロボットいじめを回避するためのプロトタイプシステムを開発する。作成した歩行者シミュレーションは、シミュレーションに基づいた行動プランニングに用いられる。

ロボットのタスクは、環境内を動き回り、限られた時間内にはできるだけ効率的に長い距離を移動 (できるだけ平均移動速度を上げて移動) することとする。このタスクは単純ではあるが、たとえば効率的な移動が要求される、パトロール、探索 (たとえば迷子になった子供を探すこと)、ユーザに対する目的地への案内、運搬、などのような様々な将来期待されるサービスに容易に拡張することができる。

図 9 にシステムのアーキテクチャを示す。主な構成要素は、「シミュレーションに基づいた行動プランニング」モジュールである。このモジュール内では、実環境における近い将来をシミュレートするために、現在の実環境の状態を反映した歩行者シミュレーションを繰り返し実行する。実環境における現在の状態の情報としては、「人追跡」モジュールと「位置同定」モジュールによって取得される) 現在観測している歩行者とロボットの位置と高さ、「人の属性付与」モジュールによって付与される現在観測している歩行者の属性、の各情報が取得される。「シミュレーションに基づいた行動プランニング」では、これらの情報と、事前に取得した「歩行者モデル」モジュールを用いてシミュレーションが実行され、行動プランが決定される。

最終的に、「ロボットの行動」モジュールにおいて、「シミュレーションに基づいた行動プランニング」によって選択された行動プランと、「位置同定」モジュールによるロボットの位置に基づいて、ロボットのナビゲーションが実行される。

この一連の過程は T_1 秒ごとに行われ、決定された行動プランに従って、ロボットの行動がそのつど変えられる。 T_1 は 1 秒に設定されている。

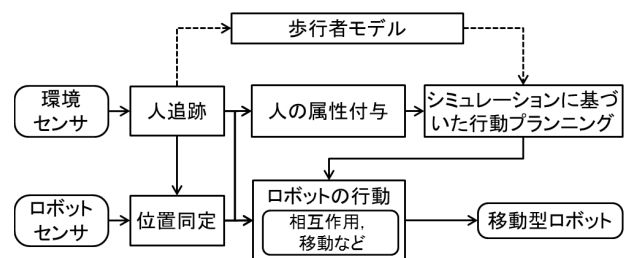


図 9 システムアーキテクチャ

Fig. 9 Architecture of the system.

5.2 人追跡とロボットの位置同定

「人追跡」モジュールとロボットの「位置同定」モジュールには、3.1 節で説明したセンシング基盤を用いる。ただし、ショッピングモール内の多くの物の配置が頻繁に変わる、あるいは歩行者が頻繁にセンシングのオクルージョンを引き起こす場合に、位置同定がときどき失敗する。そこで、ロボットが位置同定に失敗し危険な状況下にある場合には、人の操作者によってロボットの位置同定の失敗を修復する。位置同定の失敗は状況により異なるが、位置同定の失敗が起こり、人の操作者が補助するのはおよそ1時間に1回程度である。

「人追跡」については、歩行者の行動を早くから察知できるように広い範囲での人追跡が本研究の目的にとって望ましい。そこで、ロボットに搭載されているセンサの代わりに、3.1 節で説明したように、ショッピングモールのすべての観測可能範囲 900m² をカバーするように取り付けられた環境センサを用いる。

5.3 人の属性付与

「人の属性付与」モジュールでは、「人追跡」モジュールで観測した歩行者の軌跡から、「シミュレーションに基づいたプランニング」モジュールへの入力情報ために、以下の属性を推定する。

- 「集団の帰属関係」：文献 [27] のアルゴリズムに従い、観測された時間のうち、3m 以内に 60% 以上の時間と一緒にいる人たちは同じグループのメンバーであると推定される。
- 「子ども/大人」：観測された人の高さから、単純な閾値 (1.38m) を設けることで大人か子供かが推定される。子供と大人が同じグループに属している場合、大人はその子供の親として属性を付与される。
- 「相互作用タイプ」：歩行者がロボットから D_{notice} 以内の距離に来るまでは、3 章で計測された統計的な確率分布に沿って、暫定的に “*stop to interact*” タイプを割り当てる。歩行者が一度ロボットから D_{notice} 以内の範囲にやって来た場合、その歩行者の実際の行動に基づいて相互作用タイプを更新する。その歩行者がロボットの近くに立ち止まった場合、その相互作用タイプは “*stop to interact*” として推定される。

5.4 シミュレーションに基づいた行動プランニング

「シミュレーションに基づいた行動プランニング」モジュールは、いくつかのサブモジュールを含んでいる。図 10 は「シミュレーションに基づいた行動プランニング」モジュールにおけるサブモジュールと情報の流れを示している。まず「プランの準備」モジュールにおいて、ロボットいじめの回避行動を含む複数の行動プランが準備される、次に、「シミュレーション」モジュールにおいて、各行

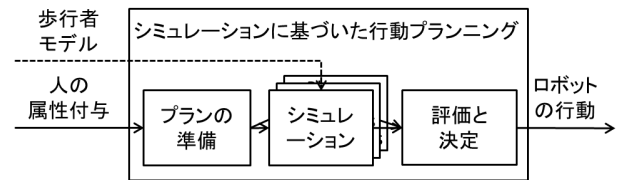


図 10 シミュレーションに基づいた行動プランニングにおける情報の流れ

Fig. 10 Information flow in the simulation-based behavior planning.

動プランの行動をとった場合の将来の状況をシミュレートするために、歩行者シミュレーションが繰り返し実行される。最終的に「評価と決定」モジュールにおいて、実行されたシミュレーション結果に基づいて、1つのプランの行動が選択される。各サブモジュールを以下で説明する。

プランの準備：各行動プランの内容は、ある決められた目的地までの移動、である。その移動先 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{|D|}\}$ として、以下 3 種類の地点を準備する：(1) 現在の目的地、(2) 無作為に選んだ 10 通りの目的地、(3) 相互作用が “*stop to interact*” でかつ現在ロボットの周りにいる子供の親 (ロボットの近くに立っている大人である親のような存在を含む) から 1m 離れた地点。プラン 3 は 4.3 節の分析から、ロボットいじめの生起において親の存在の影響が大きいことが明らかであるため、プランに含める。

シミュレーション：目的地のプラン d_i について、同時に複数の歩行者シミュレーションが実行される。すなわち、ロボットは行動プランを実行した場合の、現時刻 t から近い将来 ($t + T_2$) までの状況を繰り返しシミュレートする。まず、シミュレーションの初期状態として、実環境の現在の状況 (現在観測されている歩行者の位置と推測した属性) をシミュレーション上に反映させるために、推測した属性を与えられた歩行者を同じ位置に配置させる。この初期状態で配置した歩行者が向かっている現在のサブゴールは、サブゴールモデル [25] のアルゴリズムによって推定される。また、初期状態で配置した歩行者が将来通るサブゴール系列は、ロボットがない通常時の歩行者の軌跡データから事前に計算されたサブゴール遷移モデル [25] を用いて、確率的に割り当てられる。初期状態の次のステップ以降は、4.5 節の歩行者モデルに従って歩行者が生成される。シミュレーション上のすべての歩行者の移動およびロボットとの相互作用は 4.5 節の歩行者モデルに従って計算され更新される。最終的にシミュレートされたロボットが歩き回ったときのシミュレーション結果の速度の分布 $(v_1^{d_i}, v_2^{d_i}, \dots, v_{|Q|}^{d_i})$ がシミュレーションの出力として計算される。1 ステップは 100 ミリ秒、 T_2 は 60 秒、シミュレーションの回数 $|Q|$ は 50 回に設定されている。

評価と決定：プラン d_i に対して、ロボットの移動速度 V^{d_i} は、以下のように計算される：

$$V^{d_i} = 1/|Q| \cdot \sum_{q=1}^{|Q|} v_q^{d_i} \quad (6)$$

ただし、目的地が頻繁に切り替わると、かえって進路方向を変えるための回転動作による移動ロスが起きるため、現在選択されている目的地への移動速度の値は、重み α によって乗算することで重み付けされる。最終的に、最も速い移動速度 V^d となった目的地プラン d が行動プランとして決定される。 α は 1.25 に設定した。

5.5 ロボットの行動

「ロボットの行動」モジュールは、「シミュレーションに基づいた行動プランニング」モジュールで決定された目的地プランを受け取り、与えられた目的地へロボットをナビゲートする。データ収集同様、Robovie-II の最高移動速度は 700 mm/秒に設定されている。ロボットの前方方向がブロックされない限り、ロボットは目的地へ直進する。そしてロボットの目の前に人が立ち止まった場合、その移動を一時停止する。

本システムでは、「パトロール」→「一時停止」→「発話ユニットの実行」→「パトロール」の切替えおよび実行はすべて自動化されている。「一時停止」では、ロボットの目の前にいる歩行者の検出は、「人追跡」モジュールによって取得された人の位置に基づいている。具体的には、ロボットの中心から 50 cm 以内で、かつロボットの前方方向から 90 度以内に人がいる場合、移動を一時停止する。「発話ユニットの実行」では、ロボットが移動を一時停止した後、その歩行者に道を開けるように依頼する。発話ユニットは、3 章のデータ収集のときと同一の言葉が使用される。初めにロボットは「ロボビーです、今はパトロール中なので前を開けてくださいね」と発話する。3 秒後にまだ人が目の前にいる場合、「前を通りたいので、道を開けてくださいね」と発話する。さらに 3 秒後にまだ人が妨害をし続けている、あるいは道を塞いでいる場合、「パトロール」を再開する。「パトロール」では、ロボットは現在のプランニング結果で選択されている地点に方向を変え、その方向に動くように試みる。再びその道を塞がれた場合、上記の過程を初めから繰り返す。「発話ユニットの実行」の間、人が道を開けた場合には「ありがとう」と発話し、その時点で「パトロール」に切り替えられる。

6. フィールドでの評価実験

6.1 概要

実際のショッピングモールにおいて評価実験を実施する。この評価では、本論文で提案する、将来のロボットいじめの生起をシミュレーションにより予測しロボットいじめを回避する、というプランニング方法の効果を調査することを目的とする。

評価基準は「移動速度」と「ロボットいじめの生起」である。これら両方の基準において、将来を予測しプランニングした場合に改善されることを目指す。5 章のシステムにおけるシミュレーションに基づいた行動プランニングは、ロボットいじめの生起を減らすことで移動速度を最大化しようと試みる。そのため本論文ではこれら両方の基準を同時に改善させることを試みるが、実際のサービスでは内容によって異なるバランス、すなわち、ロボットいじめの生起を抑制することがより重要なサービスもあれば、移動速度の重要性の方が高いものもあると考えられる。たとえば、管理者がよく秩序立った環境を望む場合には、ロボットいじめの生起の抑制がより重視される。とはいえ、本論文では、シミュレーションに基づいたプランニングによってこういった状況がそもそも改善されることを示すため、これらの両者を同時に改善することを目的とする。

6.2 条件

ロボットいじめをシミュレートし回避する能力を評価するために、以下 2 つの条件を比較する。

- 「シミュレーションに基づいたプランニング」：ロボットは 5.4 節で説明したシミュレーションに基づいた行動プランニングを用いて目的地を決定する。
- 「移動速度に基づいたプランニング」：ロボットは歩行者からのいかなる影響も計算することなしに移動速度のみを考慮する単純なプランニングを行う。すなわち、目的地に到達するごとに、最大の移動速度（回転の回数がより少なく、目的地までの距離がより長い直線経路）となる次の目的地を選択する。

仮説として、「シミュレーションに基づいたプランニング」の条件が、将来の状況をロボットにシミュレートさせることを確かに可能にする場合、ロボットはロボットいじめの生起の機会を減らすことが可能になるはずであり、それゆえロボットの移動はより効率的になると考える。

6.3 手順

6.2 節の両方の条件において実験条件を平等にするために、評価の各条件が無作為に割り当てられた複数の時間割の組を用意する。これにより、環境の条件（たとえば、歩行者の数、子供の割合、歩行者が暇な時間を持つ傾向があるかどうか、など）は条件ごとに平等に調整される。合計で 1 時間 20 分の評価実験を行う。

6.4 計測

評価基準である「移動速度」および「ロボットいじめの生起」は、具体的に以下のように計測される。

- 移動速度：時間単位ごとの実際の平均移動速度として計算される。時間単位は 1 秒と設定する。
- ロボットいじめの生起：ロボットいじめを起こしてい

る子供の人数。ロボットいじめが起きたかどうかは、3.4節で説明したコーディングの基準に基づいて、人のコーダによって判断される。

6.5 結果

6.5.1 全体の傾向

「移動速度に基づいたプランニング」条件では、ロボットは移動速度を高めるためにできるだけ回転が少なく済み、直線距離を稼げる広場の端から端までを移動していた。そのため、ときどき人の流量の少ない場所を通ることがあり、その場所で3章のデータ収集で観測されたものと類似した、ロボットいじめがいくつか発生した。たとえば、人の流量の少ない広場中央において、子供がロボットの目の前で両腕を広げて立ち塞がり、ロボットの進路を妨害した(図11(a)左)。その子供の行動はさらにエスカレートし、ロボットを叩く攻撃行動に発展した(図11(a)右)。この攻撃行動は母親が買い物から戻ってきて、子供がロボットを叩く状況を見て、子供を叱り、連れて行くまで続いた。

一方で、「シミュレーションに基づいたプランニング」条件では、子供が環境にいない場合は「移動速度に基づいたプランニング」条件と同様、ロボットは広場の端から端までを移動していた。子供が出現しロボットに接近してくると、ロボットは人の流量が多い場所へ移動、あるいは子供の親がいる地点に向かう行動をとった。親が子供を連れて行く、あるいは人通りが多いところでは、相互作用にかかる時間が少なくなる傾向が見られ、ロボットいじめはほとんど起きなかった。たとえば、初めにロボットは広場の端から端までを移動し、ときには人の流量の少ない広場の中央を移動することもあった。ある時点で子供が環境に出現し、ロボットの方に近づきつつあったが(図11(b)左)、ロボットは先読みしその子供の親がいる地点に向かった。最

終的に、子供のロボットへの相互作用はロボットいじめに発展することなく、親が子供を連れてロボットから離れて行った(図11(b)右)。

6.5.2 定量評価

評価実験の間、4,064人(「移動速度に基づいたプランニング」条件で2,147人、「シミュレーションに基づいたプランニング」条件で1,917人)が3.1節における人追跡システムの観測可能範囲900m²に現れた。57人(「シミュレーションに基づいたプランニング」条件で26人、「移動速度に基づいたプランニング」条件で31人)がロボットの近くで立ち止まった。ロボットいじめの生起をコーディングした結果、このコーディングによるコーダ2人でのコーエンの一致係数は0.818と高い一致率であった。

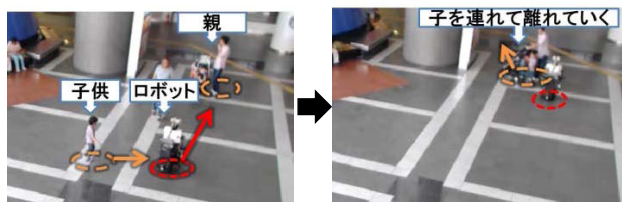
評価基準「ロボットいじめの生起」の結果を表4に示す。「移動速度に基づいたプランニング」条件、「シミュレーションに基づいたプランニング」条件の各いじめ率を用いてカイ二乗検定した結果、有意差が確認できた($\chi^2 = 4.11$, $df = 1$, $p < 0.05$)。それゆえ、シミュレーションに基づいたプランニングを行うことでいじめを抑制・回避できていることが分かる。

評価基準「移動速度」の結果を図12に示す。実験時間における平均の移動速度は、「移動速度に基づいたプランニング」条件で260.7±4.96 [mm/秒]、「シミュレーションに基づいたプランニング」条件で321.3±5.25 [mm/秒]となった。平均の移動速度に差があるかt検定を行った結果、有意差が確認できた($t = 8.402$, $df = 4353.4$, $p < 0.001$)。したがって、シミュレーションに基づいたプランニングを行うことで移動速度が向上していることが分かる。

以上、移動速度、ロボットいじめの生起、の両方の評価基準において、提案したシミュレーションに基づいたプランニングを行うことで、状況を改善することができた。



(a) 「移動速度に基づいたプランニング」条件



(b) 「シミュレーションに基づいたプランニング」条件

図11 ロボットの周りで起きた事例

Fig. 11 Example of scene that bullying was happened around a robot.

表4 ロボットいじめの生起
Table 4 Occurrence of bullying.

	いじめ回数	非いじめ回数
移動速度に基づいたプランニング	7	24
シミュレーションに基づいたプランニング	1	25

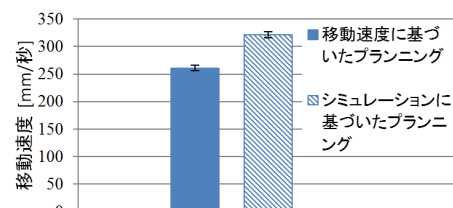


図12 移動速度

Fig. 12 Travel velocity.

7. 議論

7.1 いじめを回避するのではなく、克服できないのか？

本論文では、ロボットいじめが起きることを未然に回避した。これに対して、ロボットいじめが起きてから、それを克服する方法を考えることはできないのか？、という問題提起も可能であろう。しかし、実際には、我々もまずロボットいじめの克服を試みたものの、簡単にはいかなかった。ロボビーにとって、ロボットいじめをしないように子供を説得することは非常に難しいと考えられる。予備観察において、ロボットいじめが起きたときに、威圧的な言語表現、感情的な言語表現、より丁寧な言語表現など多くの言語表現をロボットにさせたが、どの方法も成功しなかった。

また、ロボットいじめの克服方法をいくつか試行した中で唯一部分的に成功した方法としては、ロボットが物理的に子どもを押し除けることであった。具体的には、ロボビーの道が塞がれた際に、(実際はぶつからないが)子供にぶつかっていくかのように、その子供を強制的に押し除けるようロボビーを操作した(この方法では人の操作者からの厳重な監視によって行われている)。その際、子供は一度ロボビーの要求を受け入れいったん脇に避けた。しかし、その後すぐにその子供はロボビーよりも強いことを学習した(ロボビーを押し返す、安全目的のために取り付けられたバンパースイッチを押す、などの行為でロボビーを止めることができることを理解した)。一度ロボビーに勝てる方法を発見すると、その子供はロボビーを再びいじめ始めた。一方で、社会的に受け入れられるようになるために、ソーシャルロボットはおそらく子供を打ち負かすような力を備えることは安全面から難しいと考えられる。したがって、ロボット自身によってロボットいじめの状況を克服することは容易ではないと考えられる。

7.2 一般化可能性と制約

本論文では、ロボットが単純に歩き回る状況のみをモデル化した。ソーシャルロボットが将来的に使われる際には、たとえば会話のような異なるタスクを行う状況も考慮されるべきだと考えられる。そのためには少なくとも各モデルのパラメータを調整することが必要である。たとえば、ロボットからの反応やタスクの種類に応じて、人がロボットの近くに滞在する時間がかなり異なってくると考えられる。さらに、本システムでは、人々の位置のみを観測し、相互作用時間からロボットいじめの生起を推定したが、ロボットいじめの種類や状況が異なる場合、センシングはより難しくなるが、暴力や暴言のようなロボットいじめ行動を直接的に観察する必要がある場合も生じるであろう。

また、本論文で行ったロボットのタスクのほかにも、タスクが異なれば、子供が寄ってくる行動やロボットのタスクに対するロボットいじめの影響モデルなどに違いが出て

くることが考えられる。ただその場合でも、子供のロボットに対する相互作用時間モデルにおけるパラメータを変えることでロボットいじめを再現することができ、タスクの効率に対するロボットいじめの生起変数の影響をモデル化することによって、提案手法の基本的なフレームワークは広く適用可能であると考えている。

8. おわりに

本論文では我々のロボットが子供によって「いじめ」られることを発見した。そこで、ロボットいじめがどのように起こるのかを分析し、その統計的な特徴を明らかにした。分析から、子供だけがロボットいじめを起こしており、子供の親が近くにいないと、近くを通る歩行者が少ない場合に子供はより長くロボットの近くに滞在する傾向があることが分かった。また、子供はより長く滞在することによって、より高い可能性でロボットいじめを引き起こす傾向にあることが分かった。このロボットいじめ行動をモデル化し、ロボットいじめの特徴を再現する歩行者シミュレータを作成した。さらに、ロボットいじめの生起を回避するために、シミュレーションに基づいたプランニングを行うシステムを開発した。フィールド実験により、提案方法によってロボットいじめが抑制されることを確認した。

謝辞 本研究は独立行政法人科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (CREST) の支援の下に行われたものである。また、実験にご協力いただいた ATC の皆様に、謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Thrun, S. et al.: MINERVA: A Second-Generation Museum Tour-Guide Robot, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.1999–2005 (1999).
- [2] Siegwart, R. et al: Robox at Expo.02: A Large Scale Installation of Personal Robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.42, pp.203–222 (2003).
- [3] Gross, H.-M. et al.: ShopBot: progress in developing an interactive mobile shopping assistant for everyday use, *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pp.3471–3478 (2008).
- [4] Svenstrup, M. et al.: Pilot Study of Person Robot Interaction in a Public Transit Spac, *Research and Education in Robotics – EUROBOT 2008*, Vol.33, pp.96–106 (2009).
- [5] Weiss, A. et al: A Methodological Variation for Acceptance Evaluation of Human-Robot Interaction in Public Places, *IEEE Int. Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp.713–718 (2008).
- [6] Pütten, A. et al.: An Experimental Study on Emotional Reactions Towards a Robot, *International Journal of Social Robotics*, Vol.5, pp.17–34 (2013).
- [7] Gullone, E. and Robertson, N.: The relationship between bullying and animal abuse behaviors in adolescents: The importance of witnessing animal abuse, *Journal of Applied Developmental Psychology*, Vol.29, pp.371–379 (2008).

[8] Miller, C.: Childhood animal cruelty and interpersonal violence, *Clinical Psychology Review*, Vol.21, pp.735-749 (2001).

[9] Ascione, F.R. and Shapiro, K.: People and Animals, Kindness and Cruelty: Research Directions and Policy Implications, *Journal of Social Issues*, Vol.65, pp.569-587 (2009).

[10] Arluke, A.: Animal Abuse as Dirty Play, *Symbolic Interaction*, Vol.25, pp.405-430 (2002).

[11] Arluke, A. and Luke, C.: Physical Cruelty Toward Animals in Massachusetts, 1975-1996, *Society and Animals*, Vol.5, pp.195-204 (1997).

[12] Herzog, H.A.: Gender Differences in Human-Animal Interactions: A Review, *Anthrozoos: A Multidisciplinary Journal of The Interactions of People & Animals*, Vol.20, pp.7-21 (2007).

[13] Bartneck, C., Rosalia, C., Menges, R. and Deckers, I.: Robot abuse—a limitation of the media equation, *Proc. Interact 2005 Workshop on Agent Abuse*, Rome (2005).

[14] Bartneck, C. and Hu, J.: Exploring the Abuse of Robots, *Interaction Studies - Social Behaviour and Communication in Biological and Artificial Systems*, Vol.9, pp.415-433 (2008).

[15] Salvini, P. et al.: How safe are service robots in urban environments? Bullying a Robot, *IEEE Int. Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp.1-7 (2010).

[16] Hoffman, G. and Breazeal, C.: Effects of anticipatory perceptual simulation on practiced human-robot tasks, *Autonomous Robots*, Vol.28, pp.403-423 (2010).

[17] Morales, Y. et al.: How Do People Walk Side-By-Side? -Using A Computational Model Of Human Behavior For A Social Robot, *ACM/IEEE Int. Conf. on Human Robot Interaction (HRI)*, pp.301-308 (2012).

[18] Bennewitz, M., Burgard, W., Cielniak, G. and Thrun, S.: Learning Motion Patterns of People for Compliant Robot Motion, *International Journal of Robotics Research*, Vol.24, pp.31-48 (2005).

[19] Henry, P., Vollmer, C., Ferris, B. and Fox, D.: Learning to Navigate Through Crowded Environments, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.981-986 (2010).

[20] Garrell, A. and Sanfeliu, A.: Model validation: robot behavior in people guidance mission using DTM model and estimation of human motion behavior, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.5836-5841 (2010).

[21] Ferrer, G., Garrell, A. and Sanfeliu, A.: Robot Companion: A Social-Force based approach with Human Awareness-Navigation in Crowded Environments, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.1688-1694 (2013).

[22] Kidokoro, H., Kanda, T., Brscic, D. and Shiomi, M.: Will I bother here?-A robot anticipating its influence on pedestrian walking comfort, *ACM/IEEE Int. Conf. on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp.259-266 (2013).

[23] Brscic, D., Kanda, T., Ikeda, T. and Miyashita, T.: Person tracking in large public spaces using 3D range sensors, *IEEE Trans. Human-Machine Systems* (2013).

[24] Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D.: *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*, The MIT Press (2005).

[25] Ikeda, T. et al.: Modeling and Prediction of Pedestrian Behavior based on the Sub-goal Concept, *Robotics: Science and Systems* (2012).

[26] Shiomi, M., Zanlungo, F., Hayashi, K. and Kanda, T.: A Framework with a Pedestrian Simulator for Deploying Robots into a Real Environment, *Simulation, modeling, and programming for autonomous robots (SIMPARG)* (2012).

[27] Kanda, T. et al.: Analysis of people trajectories with ubiquitous sensors in a science museum, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.4846-4853 (2007).



城所 宏行 (学生会員)

2012年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程入学。2013年より国際電気通信基礎技術研究所連携研究員、日本学術振興会特別研究員。人とロボットの相互作用

の研究に従事。



末廣 芳隆

2014年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。2012年富士通株式会社に入社。



ブルシュチッチ ドラジェン

2008年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年ミュンヘン工科大学電気・情報工学部ポスドク研究員。2011年より国際電気通信基礎技術研究所知能ロボティクス研究所研究員。人とロボットの相互作用

の研究に従事。博士(工学)。



神田 崇行 (正会員)

2003年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻博士課程修了。2000年より国際電気通信基礎技術研究所知能ロボティクス研究所研究員。現在、国際電気通信基礎技術研究所知能ロボティクス研究所室長。人とロボットの

相互作用の研究に従事。博士(情報学)。