

# 他者認知モデルに基づくエージェントの配慮が インタラクションに及ぼす影響

## Effects of Agent Consideration for Others on Spacial Interaction

坂本孝丈<sup>1\*</sup> 竹内勇剛<sup>1</sup>

Takafumi Sakamoto<sup>1</sup> Yugo Takeuchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学

<sup>1</sup> Shizuoka University

**Abstract:** エージェントが公共場面において他者に配慮するためには、他者の行動から内部状態を推定し、自身の内部状態と行動を調整する必要がある。本研究では、他者への配慮を伴うインタラクションを計算モデルで記述し、VR 環境上でモデルに基づき動作するエージェントと人とのインタラクションを観察・分析した。ベイズ統計による分析の結果として、エージェントの配慮を表すパラメータの値に応じて、実験参加者がエージェントを回避する行動の増加傾向が異なることが示された。このことから、本研究のモデルを用いることで、エージェントの役割や場面に応じた行動の最適化が可能であることが示唆された。

### 1 はじめに

自律的に動作するロボットが人と関係を構築・維持するためには、ロボットが人社会における儀礼に従い人とインタラクションする必要がある。例えば、公共場面では見知らぬ他者同士が同一の空間内を行き交うことから、過度にコミュニケーションが生じないように、移動方向や移動速度、視線方向などが制御されている [1]。このようなコミュニケーションのダイナミクスをモデル化することで、人社会に受け入れられやすいロボットの振る舞いを設計できると考えられる。

ロボットが人とのコミュニケーションを開始するための接近行動や、衝突の回避や不快感を低減するための回避行動に関する研究は数多くみられる（レビューとして [2] や [3], [4] を参照）。また、公共場面においてロボットが人の行動を分類または予測し、適切な話しかけ相手の選択と接近を行う手法が提案されている [5, 6]。一方で、エージェント同士のインタラクションをシステムダイナミクスとして記述したモデルはほとんど見られない。エージェントは目的に応じて自律的に行動する存在であるため、自身の行動を促進（または抑制）する内部状態を持つ。エージェント間の社会的なインタラクションは、自身の内部状態の値を、状況や他者に応じて調整することで成立し得る。そのため、他者の内部状態を認知するプロセスも含めてインタラクションをモデル化する必要がある。

これに対して、これまでの研究ではコミュニケーション開始場面における接近・回避行動を生成するためのモデルを提案し計算機シミュレーションによる検証を行ってきた [7]。また、配慮を伴う行動を含めたインタラクションのモデルについて検討を行ってきた [8]。しかし、実際にモデルに基づき行動するエージェントと人との間のインタラクションの観察と検証は行われていない。

そこで、本研究では先行研究のモデルを拡張し、配慮を伴う行動生成するエージェントのモデルを提案する。本研究のモデルでは、相手エージェントの内部状態の推定値に応じて自身の内部状態を調整する関数と、その調整量を表すパラメータにより他者への配慮を表現する。提案モデルの妥当性を検証するために、VR 環境を用いた実験を実施する。実験では、VR 環境上でモデルの動作に従うロボットと人のインタラクションを観察し、配慮を表すパラメータが人とのインタラクションに及ぼす影響について検証する。また、モデルに基づきシミュレーションした配慮のパラメータの値による影響と、実際に観察されたデータの傾向を比較することで、提案モデルが配慮を表現できているか否かを検証する。

\*連絡先： 静岡大学  
〒 422-8037 静岡県静岡市駿河区大谷 836  
E-mail:sakamoto@sapientia.inf.shizuoka.ac.jp

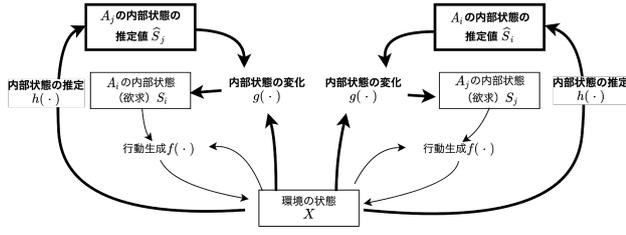


図 1: 他者への配慮を伴うインタラクションを記述するために必要な関数と変数

## 2 他者への配慮を伴うインタラクションのモデル

他者への配慮を伴う行動は「他者の行動や内部状態（欲求）の推定値に応じた自身の内部状態の調整とそれに伴う行動」としてモデル化することができる。そのため、他者への配慮が可能なエージェント間のインタラクションを記述するためには、図 1 に示す変数と関数を規定する必要がある。特に配慮を伴う行動は、相手の内部状態の値を推定する関数と、推定値に応じて自身の内部状態の相対を調整する関数により表現し得る（図 1 の太線部分）。本研究では、相手が持つ欲求の値の推定値と自身が持つ欲求の値の差分を小さくする関数により、コミュニケーション開始時の配慮を表現する。また、この差分を時間当たりどれくらいの量で小さくしていくのかを表す量的なパラメータにより、他者への配慮の量を表現する。

以下では、2体のエージェント間のコミュニケーション開始場面における接近・回避行動に基づくインタラクションのモデルについて述べる。内部状態と行動生成、内部状態の推定について、先行研究 [7, 8] と重複する部分については概要のみを示す。

### 2.1 内部状態と行動生成

内部状態の値に応じたエージェントの行動生成の関数については先行研究 [7] のモデルを用いる。このモデルでは2体のエージェント  $A_1$ ,  $A_2$  の間の身体的なインタラクションを環境  $\mathbf{x}_{12} = \{r_{12}, \theta_{12}, \theta_{21}\}$  の時間的な変化により表す。なお、 $r_{12}$  は  $A_1$ - $A_2$  の距離を表し、 $\theta_{12}$  と  $\theta_{21}$  はそれぞれ  $A_1$  からみた相対角度の絶対値と  $A_2$  からみた相対角度の絶対値を表す。

エージェントの内部状態は行動を促進または抑制する変数を表す。コミュニケーション開始場面における内部状態の変数として、ここでは自身から相手への関与に対する選好 (Control) と、相手から自身への関与に対する選好 (Acceptance) の2つの変数を扱う。  $A_1$

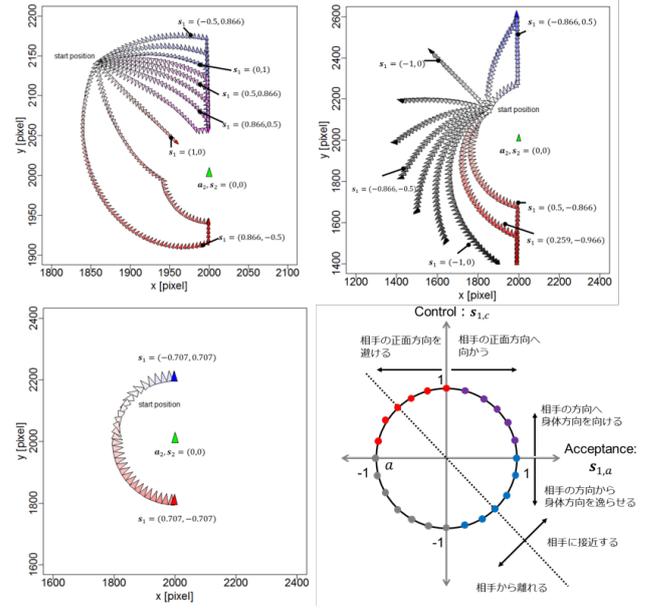


図 2: 内部状態の値に応じて生成される接近・回避行動の例 [7]

の  $A_2$  に対する内部状態を  $\mathbf{S}_{1 \rightarrow 2} = (c_1, a_1)$ ,  $A_2$  の内部状態を  $\mathbf{S}_{2 \rightarrow 1} = (c_2, a_2)$  で表す。

エージェントの行動それぞれは  $\mathbf{x}_{12}$  の時間的な変化により表される。  $A_1$  の行動を  $\Delta_1 \mathbf{x}_{12}$  は行動生成の関数  $f$  を用いて以下の式で表される。

$$\Delta_1 \mathbf{x}_{12} = f(\mathbf{x}_{12}, \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}; \phi_1) \quad (1)$$

ただし、 $\phi_1$  は移動速度の最大値などの行動特性を表す値とする。  $\mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}$  は  $A_1$  の内部状態の値を表し、  $\mathbf{s}_{1 \rightarrow 2} = (c_1, a_1) \in [-1, 1]^2$  とする。

内部状態と行動生成の関数  $f$  のみを規定した場合に生成される接近・回避行動を図 2 に示す。

### 2.2 内部状態の推定関数

配慮を伴う行動を生成するうえで、他のエージェントの内部状態を推定するプロセスを扱う必要がある。ここでは、先行研究と同様に式 1 の行動生成の関数を用いて内部状態の推定を行う [8]。  $A_1$  が  $A_2$  の行動  $\Delta_2 \mathbf{x}_{12}$  から内部状態を推定する場合、  $\mathbf{x}_{12}$  は観測可能な変数である。また、  $\phi_2$  は推定しなければならないが、行動特性を表す変数であるため、行動を観察することでおおよそ推定可能であると仮定する。そのうえで、  $A_1$  により  $\mathbf{s}_{2 \rightarrow 1}$  の推定値  $\hat{\mathbf{s}}_{2 \rightarrow 1}$  は関数  $h$  を用いて以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_2^{(t)} &= h\left(x_{12}, \Delta_2 \mathbf{x}_{12}, \hat{\phi}_2\right) \\ &= \underset{\hat{\mathbf{s}}}{\operatorname{argmax}} \left( L\left(\Delta_2 \mathbf{x}_{12}; \hat{\phi}_2\right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし

$$L(\cdot) = 1 - l \left( f(x, \hat{s}) - \Delta_2 \mathbf{x}_{12}; \hat{\phi}_2 \right) \quad (3)$$

とする.  $l$  は  $0 \leq l(\cdot) \leq 1$  となる  $f$  により生成可能な行動と  $\Delta_2 \mathbf{x}_{12}$  の差を規格化する関数を表す. これにより,  $\Delta_2 \mathbf{x}_{12}$  と最も類似している行動を生成し得る内部状態が推定値になる. このとき,  $\mathbf{s}_{2 \rightarrow 1}$  は 2 次元の変数であるため, グリッド探索により近似的に解を求めることができる.

## 2.3 内部状態の変化を表す関数

内部状態の変化は関数  $g$  を用いて表す. 行動結果に基づく内部状態の変化のみを扱う場合  $A_1$  の内部状態の変化  $\Delta \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}$  は以下の式で表される.

$$\Delta \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2} = g(\mathbf{x}_{12}, \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}; \psi_1) \quad (4)$$

ここで,  $\psi_1$  は  $A_1$  の内部状態の変化の速さなどの認知的な特性を表す. 先行研究と同様に,  $A_1$  が  $A_2$  に対して配慮する場合の内部状態の変化を表現するために, 関数  $g$  を以下の式に拡張する.

$$\Delta \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2} = g(\mathbf{x}_{12}, \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}, \hat{\mathbf{s}}_{2 \rightarrow 1}; \psi_1) \quad (5)$$

関数  $g$  やパラメータ  $\psi$  の値をどのように規定するかによって, そのエージェントがどの程度, 相手に配慮するのかが決まる.

## 2.4 他者への配慮を表すパラメータ

本研究では, 他者への配慮を一つのパラメータ  $\psi$  の値で表す. 内部状態の変数である 2 つの選好は, 一方から他方への関与に対する選好の方向による違いを表していることから, 一方の Control の値が他方の Acceptance の値に対応している. すなわち, 一方のエージェントの Control の値と他方のエージェントの Acceptance の値が一致していれば互いの選好が満たされることになる. そこで, 内部状態の変化の関数  $g$  を Control と Acceptance の値のギャップをフィードバックするように規定する. 具体的には,  $A_1$  の内部状態の変化を以下の式で表す.

$$\Delta c_1 = -\psi_1 \cdot (\hat{a}_2 - c_1) \quad (6)$$

$$\Delta a_1 = -\psi_1 \cdot (\hat{c}_2 - a_1) \quad (7)$$

このとき, パラメータ  $\psi_1$  は  $A_1$  が  $A_2$  に配慮し自身の内部状態を変化させる量を表す.  $\psi_1$  が正の値であるとき,  $A_1$  は  $A_2$  に配慮した行動を示すようになる. また,  $\psi_1$  の値が大きければ,  $A_1$  の内部状態の調整がより速く行われることになる. 一方で,  $\psi_1$  が負の値を取る場合も考えられる. この場合, 相手の選好を満たさないように行動することになり, 配慮とは逆の作用を表すことになる.

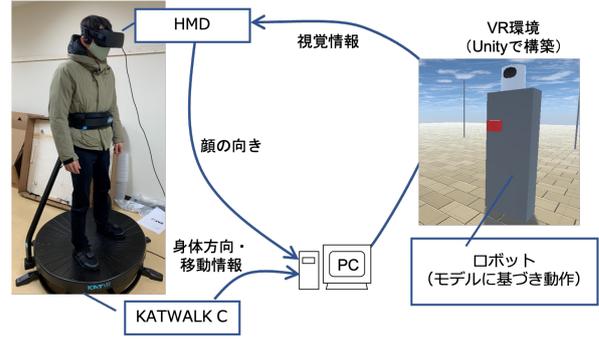


図 3: 実験環境

## 3 VR 環境を用いたインタラクション実験

前節のモデルを用いて, 実際に人とエージェントがインタラクションをする場合に, 配慮を表すパラメータがインタラクションに及ぼす影響を検証するために実験を行う. 実験は VR 環境を用いて実施し, VR 環境内で移動するロボットに対する人の反応を分析する.

### 3.1 実験環境

図 3 に実験環境の概略図を示す. 実験環境は Unity で構築した VR 環境により行われる. 実験参加者は HMD (Oculus Rift) を装着することで VR 環境上の視覚情報を得る. また, センサーを取り付けた靴を履き, すり鉢上のトレッドミル (KATWALK C) の上で行動することで, VR 環境上の移動や方向転換を行う.

図 4 に示すように, VR 環境上のフィールドの 6 箇所にポールが設置され, 中央にロボットが位置する. ポールは実験課題の目的位置に利用される. ロボットの身体は外観から与えられる情報を少なくするために抽象的な形状のオブジェクトを組み合わせてより構成される. 具体的には, 体部分は直方体, 頭部は円柱のオブジェクトにより構成され, 身体方向を示すために頭の一部が黒色に着色されている (図 3). ロボットは実験条件に応じて前節のモデルに基づき動作する.

### 3.2 実験課題

実験課題はフィールド内の指定されたポール, または, ロボットが持つオブジェクト (ターゲット) に接近することである. ターゲットの指定はポールやオブジェクトの色を赤色に変更することで行われる. 実験参加者には「ロボットはターゲットの色を判断できず, 実験参加者が与えられる課題については知らない」ということが教示される. また「ロボットは自身が持つ

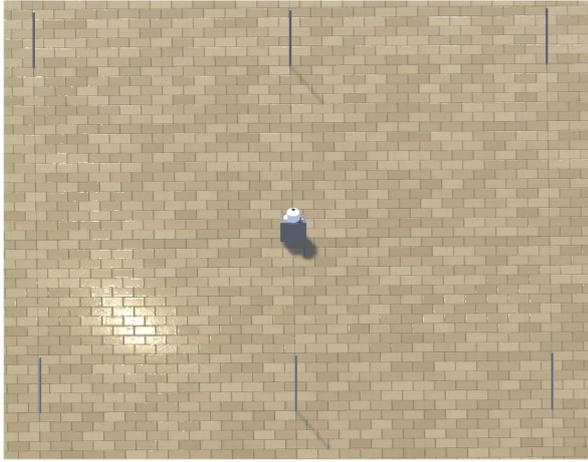


図 4: 実験フィールド

オブジェクトを手渡す役割に従事している」ということも教示される。実験参加者が VR 環境上での移動に慣れるために、実際の試行の前に 5 回程度、ポールからポールへの移動を行わせる。

1 回の試行につきスタート位置のポールから 10 回の移動を行う。10 回の移動のうち 2~9 回目の移動のうち、2 回はロボットが持つオブジェクトがターゲットとして指定される。残りの 8 回は 1 つ前にターゲットとして指定されたポールの反対側の 3 つのポールの中からランダムに選ばれたポールがターゲットに指定される。

1 試行が終了するごとに実験参加者はトレッドミルから降り、HMD を外したのちにアンケートに回答する。アンケートに回答後、疲労や 3 D 酔いの有無を確認し、実験参加者の状況に応じて別の実験条件の試行を行う。1 人の参加者は最大で 3 試行を行う。

### 3.3 実験条件

実験条件は、モデルに従い動作するロボットとして配慮のパラメータの値  $\psi_{Robot}$  を 0.001, 0.005, 0.01 に設定した 3 条件と、ロボットがランダムウォークを行う条件 (RW 条件) を合わせた 4 条件に設定する。それぞれの条件におけるロボットの軌道をシミュレーションしたものを図 5~7 に示す。モデルに従いロボットを動作させる場合、ロボットの内部状態の初期値は  $(c_R^{(0)}, a_R^{(0)}) = (0.5, 0.5)$  に設定する。これは、実験参加者に接近しようとする内部状態の値であり、ロボットがオブジェクトを配布する役割に従事していることを表現している。そこから配慮のパラメータの値と人の行動に応じて内部状態が変化する。人がロボット以外の目標 (ポール) に向かう場合、図 5 のように、配慮の値が大きいほどロボットが人を追いかける量が少な

くなる。また、ロボットの接近に対して人がロボットを回避する場合、図 7 に示すように  $\psi_{Robot}$  の値に応じて人の軌道が変化する。一方で、図 7 に示すように人がロボットに向かって接近してくる場合は、モデルに従い動作するロボットはいずれも人に接近する。

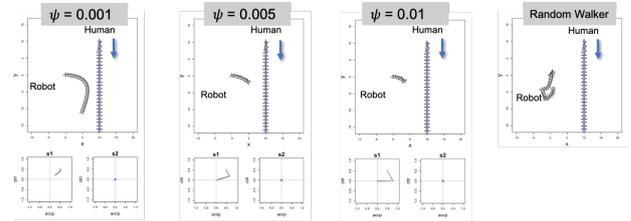


図 5: 各条件におけるロボットの軌道のシミュレーション (参加者がロボットに接近しない場合)

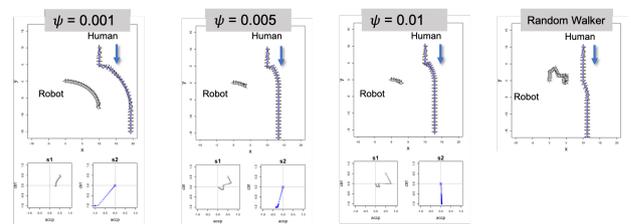


図 6: 各条件におけるロボットの軌道のシミュレーション (参加者がロボットを忌避する場合)

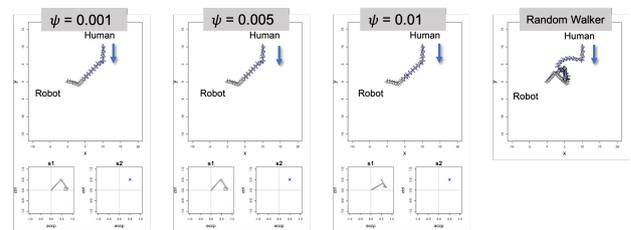


図 7: 各条件におけるロボットの軌道のシミュレーション (参加者がロボットに接近する場合)

### 3.4 実験参加者

実験参加者は 23 名の大学生・大学院生であり、それぞれ 1~3 回の試行を行なった。各試行で割り当てられる実験条件はランダムに決定されており、ロボットの配慮のパラメータが 0.001 の条件が 11 試行、0.005 が 16 試行、0.01 の試行が 14 試行、ランダムウォークの条件が 13 試行であった。

### 3.5 作業仮説

上述のシミュレーション結果に基づき、本研究では以下の3つの作業仮説を検証する。

- H1:** 配慮の値  $\psi_{Robot}$  が小さいロボットの動作は値が大きいロボットと比較して、ロボットに接近する必要がない人の移動をより阻害する。
- H2:** 配慮の値  $\psi_{Robot}$  が小さいロボットとのインタラクションを繰り返すことで、人がそのロボットを回避する傾向が大きくなる。
- H3:** モデルに従うロボットは配慮の値の大きさにかかわらず Random Walker 比較して、ロボットに接近する必要がある人の移動量を低減する。

ロボットの配慮の値が小さい場合、ロボットに対する欲求の値が小さいと推定された場合であっても、単位時間あたりにロボット自身の内部状態を変化させる量が小さいため、人に対して接近を続ける。そのため、ポールがターゲットに指定された場合に、人がロボットを回避しようとする行動がより顕著に現れると考えられる (H1)。

また、ロボットのインタラクションを繰り返すうちに、人はロボットの行動に対する予測やロボットに対する認識に基づき自身の行動を調整すると考えられる。これにより、配慮の値が小さいロボットに対しては、よりそのロボットの接近を回避するように行動が変化すると予想される (H2)。

人のロボットに対する欲求の値が高く、ロボットに接近する場合、モデルに基づき動作するロボットはその欲求の状態を推定し、人に対して接近し続ける事になる。そのため、ロボットの所持するオブジェクトがターゲットに指定された場合、モデルに基づき動作するロボットを動作させる3つの条件では実験参加者の移動量が減少すると考えられる (H3)。

実際の実験データからこれらの仮説を検証することで、提案モデルが配慮を表現するモデルとして妥当性を有する可能性を検討する。

### 3.6 分析方法

行動データとして、50ms ごとに VR 環境上の実験参加者とロボットの位置座標が記録される。また、HMD とトレッドミルにより計測される実験参加者の身体方向と顔方向が記録される。これらのデータを用いて実験参加者とロボットのインタラクションを分析する。

仮説 H1 と H2 を検証するために、ポールがターゲットに指定されている場合に、参加者がロボットを忌避する量を求める。フィールド内に障害物などが存在し

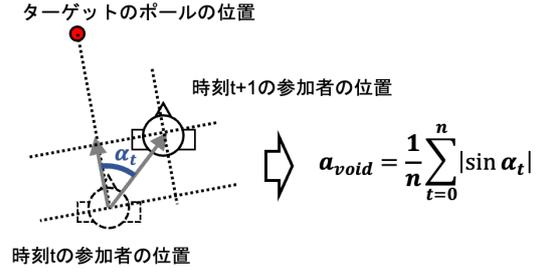


図 8: ロボットを忌避する量の評価に用いる移動ベクトルの垂直成分

なければ参加者はターゲットに対して直線的に進むことができる。逆にいえば、ターゲットの方向と移動方向の間のずれは参加者がロボットに移動を阻害された量を表す。そこで、一つ前のターゲットから次のターゲットのポールへ移動する場合の、ターゲットと移動方向のずれを計算し、これをロボットを回避した量の指標  $a_{void}$  とする。

$$a_{void} = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^n |\sin \alpha_t| \quad (8)$$

なお、 $t = 0$  は一つ前のターゲットに到達した時間、 $n$  は一つ前のターゲットから次のポールへの移動に要したフレーム数を表し、 $\alpha_t$  は時刻  $t$  における参加者の移動ベクトルとターゲット方向の間の角度を表す (図 8)。

仮説 H1 の検証として、各試行のポールへの移動 (8 回分) に対して  $a_{void}$  の平均値を求め、分散分析を用いて条件間の比較を行う。

仮説 H2 の検証では、各試行中の  $a_{void}$  が移動の回数に応じて増加することを示す必要がある。そこで、 $a_{void}$  と移動回数の関係を線形回帰により表現し、ベイズ統計の手法を用いて各条件の回帰係数の分布を推定する。推定に用いるベイズモデルは以下の式で表される。

$$\beta_{0,i} \sim \text{Normal}(\mu_{0,c}, \sigma_0) \quad (9)$$

$$\beta_{1,i} \sim \text{Normal}(\mu_{1,c}, \sigma_1) \quad (10)$$

$$a_{i,m} \sim \text{Normal}(\beta_{1,i}m + \beta_{0,i}, \sigma_2) \quad (11)$$

ここで、 $i$  が各試行、 $m$  がある試行内で行った移動の回数、 $c$  が各条件を表す。 $a_{i,m}$  はある試行  $i$  での  $m$  番目の移動における  $a_{void}$  を表し、その値は  $\beta_{1,i}$  を傾き、 $\beta_{0,i}$  切片とする線形回帰モデルにより表される。すなわち、 $\beta_{1,i}$  により  $i$  番目の試行における  $a_{void}$  の増加量が表現される。 $\beta_{1,i}$  と  $\beta_{0,i}$  は正規分布に基づき生成される値であると仮定し、その平均値は対応する実験条件  $c$  により異なるものとする。つまり、このベイズモデ

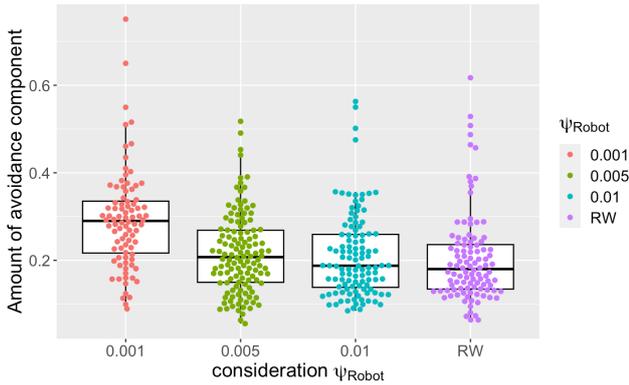


図 9: ポールに接近する際に生じる実験参加者がロボットを回避する動きの量の比較

ルではある条件下の試行ごとに回帰係数と切片が正規分布に基づき生成され、回帰係数と切片の値に応じて参加者がロボットを回避する量が決定される。ベイズ統計により各条件の  $\beta_1$  と  $\beta_0$  の分布を推定することができる。特に仮説 H2 が支持される場合は、配慮の値が小さい条件における  $\beta_1$  の値が正の値をとると考えられる。なお、本研究では RStudio と Rstan (Ver. 2.21.8) を用いた MCMC により、それぞれの分布の推定を行なった。このときチェーン数を 4、チェーンの長さを 10,000、バーンイン期間を 5,000 とし、合計 20,000 のサンプルから事後分布の推定を行なった。

仮説 H3 の検証については、ロボットが持つターゲットに到達するまでの実験参加者の移動量を計算し、試行毎に平均値を求めた。そこから分散分析を用いて条件間の比較を行なった。

### 3.7 結果

図 9 は、各条件において実験参加者がポールに向かって移動する際に、実験参加者がロボットを回避した量の指標  $a_{void}$  を表す。なお、各点は移動毎の  $a_{void}$  を表す (全 54 試行  $\times$  8 回の移動)。図 9 が示すようにロボットの配慮の値が小さい条件  $\psi_{Robot} = 0.001$  では  $a_{void}$  の値が他の条件と比較し大きくなっている ( $M = 0.29, SD = 0.04$ )。一方で、 $\psi_{Robot} = 0.005$  や  $\psi_R = 0.01$  の条件は RW 条件と比較しあまり差がみられなかった (それぞれ順に、 $M = 0.22, SD = 0.06$ ;  $M = 0.21, SD = 0.06$ ,  $M = 0.20, SD = 0.08$ )。分散分析の結果、 $a_{void}$  は条件間で有意な差があることが示された ( $F(3, 50) = 5.08, f = 0.55, p < 0.01$ )。そこで、HSD 法による多重比較を行なった結果、 $\psi_{Robot} = 0.001$  の条件が他の 3 条件よりも有意に  $a_{void}$  が大きいことが示された。また、 $\psi_{Robot} = 0.005$  の条件と  $\psi_{Robot} = 0.01$  の条件、RW 条件の 3 つの条件の間には有意な差は見られなかった。

図 10 に試行内の移動回数毎の  $a_{void}$  を示す。各点は実際に実験により得られた  $a_{void}$  であり、灰色の線は MCMC により推定した  $a_{void}$  の分布の平均値 (横線) および 95% 区間を表す。 $\psi_{Robot} = 0.001$  の条件では試行内の 1 回目の移動から 10 回目の移動までの間で、 $a_{void}$  が増加する傾向が見られる。一方で他の 3 条件については、あまり増加傾向は見られていない。この増加傾向を表す  $\beta_1$  と切片を表す  $\beta_0$  の各条件における分布を推定した結果を図 11 に示す。図 10 の黒色の点が平均値を表し、赤色の太線は 80% 区間、黒色の線は 95% 区間を表す。MCMC のリサンプリングの結果から推定される  $\beta_1 > 0$  となる確率は  $\psi_{Robot} = 0.001$  の条件で 96.2%、 $\psi_{Robot} = 0.005$  の条件で 71.9%、 $\psi_{Robot} = 0.01$  の条件で 36.8%、RW 条件で 76.9% であった。このことから  $\psi_{Robot} = 0.001$  の条件では移動回数が増加するにつれて、参加者がロボットを回避する量が増加することが示された。また、配慮のパラメータが増加するほど、参加者がロボットを回避する量が増加する確率が低くなることを示された。

図 12 は、実験参加者がロボットが持つオブジェクトに向かって移動した際の移動量の合計 (移動距離) を表す。なお、各点はオブジェクトへの移動毎の移動量を表す (全 54 試行  $\times$  2 回の移動)。図 12 が示すように、RW 条件ではロボットが持つオブジェクトがターゲットに指定された際の移動量が大きくなった ( $M = 23.29, SD = 12.24$ )。一方で、モデルに基づき動作する  $\psi_{Robot} = 0.001$ 、 $\psi_{Robot} = 0.005$ 、 $\psi_{Robot} = 0.01$  の条件はいずれも参加者の移動量が小さい (それぞれ順に  $M = 6.15, SD = 2.23$ ;  $M = 7.04, SD = 1.73$ ,  $M = 7.51, SD = 1.55$ )。分散分析の結果、条件間で移動量に有意な差があることが示された ( $F(3, 50) = 21.13, f = 1.13, p < 0.01$ )。HSD 法による多重比較の結果、RW 条件が他の 3 条件と比べて有意に参加者の移動量が大きいことが示された。また、モデルに基づき動作する 3 条件の間では有意な差は見られなかった。

### 3.8 考察

ポールがターゲットに指定された場合に、ロボットを回避する量はロボットの配慮の値が小さい条件 ( $\psi_{Robot} = 0.001$ ) で大きくなり、歩い程度の配慮の値が設定された条件 ( $\psi_{Robot} = 0.005$  と  $\psi_{Robot} = 0.01$ ) では大きくならないことが示された。この結果は仮説 H1 を支持する。また、試行内の移動回数に応じてロボットを回避する量が増加する傾向をベイズ統計により推定した結果、ロボットの配慮の値が小さい条件 ( $\psi_{Robot} = 0.001$ ) において 96.2% の確率で増加傾向が正の値になることが示された。この結果は仮説 H2 を支持する。加えて、ロボットが持つオブジェクトがターゲットに指定された

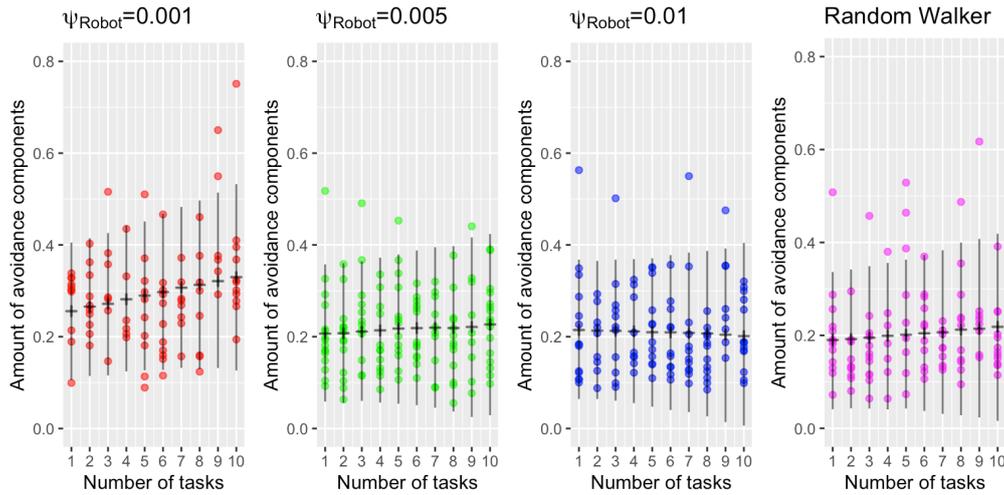


図 10: ポールへ接近する際に生じる実験参加者がロボットを忌避する動きの試行内の変化

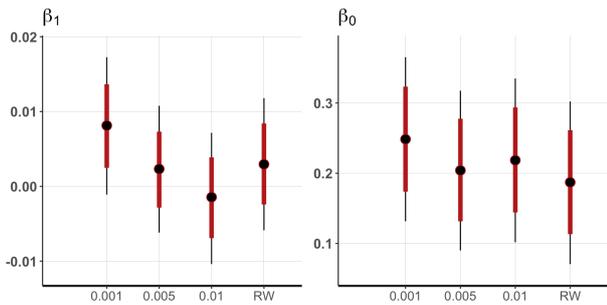


図 11: MCMC により推定した実験参加者がロボットを忌避する動きの増加傾向を表す傾きと切片の分布

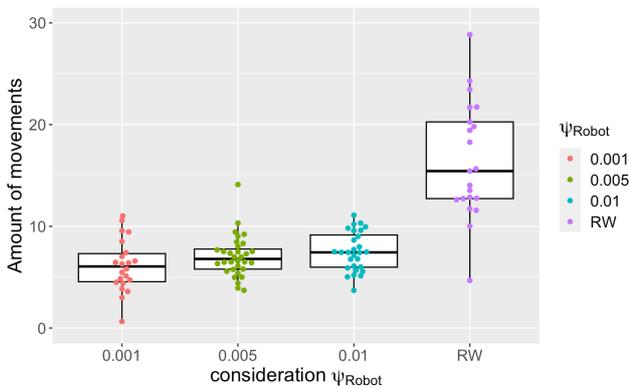


図 12: ロボットに接近する際の実験参加者の移動量

場合、ランダムウォークするロボットの条件に比べてモデルに基づき動作するロボットの条件では、移動量が小さくなることが示された。このことから仮説 H3 が支持された。作業仮説である H1, H2, H3 が支持されたことから、本研究の提案モデルがロボットの配慮を伴う行動を表現するモデルとして妥当性を有することが示唆された。

$\psi_{Robot}$  はロボットが人に配慮する量を表現している。具体的には、人の行動から推定した内部状態に応じて自身の内部状態を調整する量であり、この値が小さい場合は自身の欲求を優先し行動する時間が長くなる。本実験ではロボットがオブジェクトを配布する役割に従事しているという設定であるため、ロボットの内部状態の初期値は高く設定されている。この状態から参加者がポールに接近する状況では、自身への欲求が低いことを推定し、配慮の値に応じて自身の欲求の値を 0 に近づけていく事になる。このとき、自身の欲求の変化量が配慮のパラメータ  $\psi_{Robot}$  であり、 $\psi_{Robot}$  の値が小さい場合は配慮が足りず、参加者に接近し続ける行動を示すことになる。その結果として、参加者がロボットを避けようとする行動が増加し、ポールに対して直進できない状況が生まれたと考えられる。一方で、配慮の値が十分であればより速く自身の欲求の状態を調整できるため、ロボットの接近量は抑えられる。その結果としてロボットを回避する必要がなくなり、直線的にポールに向かうことができたと推察される。図 13 に示す実際の軌道の例からも、 $\psi_{Robot}$  の小さい場合に軌道が直線的でなくなっていることがわかる。一方で、ロボットが持つオブジェクトがターゲットに指定されている場合は、モデルに基づくロボットはいずれの条件も参加者に接近することで、参加者の移動量を抑えられている。ターゲットの指定は実験参加者の内

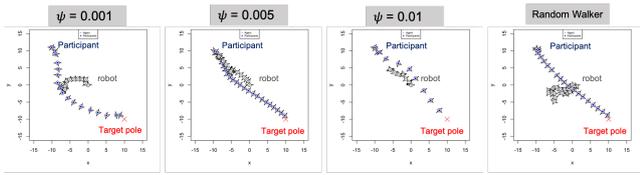


図 13: ターゲットのポールに接近する際の実験参加者の軌道の例

部状態と対応しているとするならば、ロボットが参加者の行動から欲求の値を正しく推定できていたといえる。これらの結果をまとめると、 $\psi_{Robot}$  の値が小さい場合 ( $\psi_{Robot} = 0.001$ ) は、役割に従事しているが配慮が足りないロボットの振る舞いを再現できているといえる。また、ある程度の配慮の値が設定されていれば ( $\psi_{Robot} = 0.005$  と ( $\psi_{Robot} = 0.01$ )) 人の行動を妨害することなく、必要とされている場面で適切に接近することが可能であり、 $\psi_{Robot}$  により配慮の量を表現できているといえる。

ロボットがどの程度、周囲の他者に対して配慮すべきかは、従事している役割やロボットが設置される環境に依存すると考えられる。例えば、ロボットがなんらかの宣伝活動に従事しているのであれば、 $\psi_{Robot}$  の値を小さめに設定しておく方が宣伝効果が期待できるかもしれない。その一方で、ロボットと繰り返し接するような場面では  $\psi_{Robot}$  の値が小さい場合、徐々に人がロボットを忌避する行動が増加する可能性がある。このロボットを徐々に忌避するようになる傾向を本研究では  $\beta_1$  で表しており、実際に  $\psi_{Robot}$  の値が小さいほど、 $\beta_1$  が正の値をとる（すなわち、徐々に忌避するようになる）確率が高くなることが示されている。 $\beta_1$  の分布については、ロボットが設置される環境やその場を往来する人集団の特性によっても異なる可能性があり、どのような配慮の値  $\psi_{Robot}$  が適切であるかは、今後検証していく必要がある。また、本実験では  $\psi_{Robot}$  の値を3つの値のみで検証を行なったが、 $\psi_{Robot}$  の値を連続的に変化させることも可能である。今後はロボットが設置された場面に応じて  $\psi_{Robot}$  の値を最適化する方法についても検討を行う。具体的には、周囲の人のロボットに対する内部状態の推定値 ( $\hat{S}$ ) やその分布、忌避する行動の増加量 ( $\beta_1$ ) をインタラクションを通して推定し、ロボットの  $\psi_{Robot}$  の最適な値を探索する。本実験は VR 環境を用いた実験であり、今後は実際のロボットを用いたフィールド実験を通してモデルの有用性を示す必要がある。

## 4 まとめ

本研究では、コミュニケーション開始場面において接近・回避行動を生成する先行研究のモデルを拡張し、行動から他者の内部状態を推定し、他者への配慮を伴う行動を生成するモデルを構築した。また VR 環境を用いた実験を行いロボットの配慮を表すパラメータの値によって生じるインタラクションの差異について検証した。結果として、配慮を表すパラメータの値が小さい (0.001) 場合は、実験参加者がロボットを忌避する行動が増加し、ある程度の大きさの値 (0.005 や 0.01) であれば増加傾向が抑制されることが示された。このことから本研究のモデルが配慮を伴う行動を生成するモデルとして妥当性を有することが示唆された。

## 参考文献

- [1] Erving Goffman. *Behavior in public place*. Free Press, 1963.
- [2] Thibault Kruse, Amit Kumar Pandey, Rachid Alami, and Alexandra Kirsch. Human-aware robot navigation: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 61, No. 12, pp. 1726–1743, 2013.
- [3] Jorge Rios-Martinez, Anne Spalanzani, and Christian Laugier. From proxemics theory to socially-aware navigation: A survey. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 7, No. 2, pp. 137–153, 2015.
- [4] Yuxiang Gao and Chien-Ming Huang. Evaluation of socially-aware robot navigation. *Frontiers in Robotics and AI*, p. 420, 2021.
- [5] Takayuki Kanda, Dylan F Glas, Masahiro Shiomi, and Norihiro Hagita. Abstracting people's trajectories for social robots to proactively approach customers. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, No. 6, pp. 1382–1396, 2009.
- [6] Satoru Satake, Takayuki Kanda, Dylan F Glas, Michita Imai, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. A robot that approaches pedestrians. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 29, No. 2, pp. 508–524, 2012.
- [7] Takafumi Sakamoto and Yugo Takeuchi. Simulation of spatial behavior based on an agent model in human-agent initial interaction. In *Proceedings of the 6th International Conference on Human-Agent Interaction*, pp. 310–317. ACM, 2018.
- [8] 坂本孝丈, 竹内勇剛. 他者への配慮を伴う接近・回避行動のモデル化. HAI シンポジウム 2021, p. G21, 2021.