原著論文

話しかけ場面における相手の受容度に応じた 接近行動のモデルに基づく分析†

坂本 孝丈*・吉岡 源太*・竹内 勇剛*

本研究では、人のコミュニケーション開始時の内部状態と接近行動に注目し、提案モデルに基づく接近行動の軌道の分析を行った。実験は人と想定した相手（マネキン）に道を尋ねるシナリオで、参加者は教示により相手の内部状態を想定したうえで話しかけを行った。結果として、参加者の接近行動の軌道は直線ではなく、相手の正面方向を避けるように回り込みながら接近する軌道となることが示された。また、参加者が想定する相手の受容度に応じて話しかけのタイミングを調整していることが示唆された。人が正面方向を避けて相手に接近する行動は提案モデルにより近似的に生成可能であり、同時にその理由についてもモデルの内部状態から説明可能である。そのため、提案モデルの行動生成と内部状態の推定をロボットに実装することが、人-ロボットのコミュニケーション開始場面のインタラクションをデザインするうえで有用であるといえる。

キーワード：Human-Agent Interaction, 接近行動, コミュニケーションの開始場面

1. はじめに

人とのコミュニケーションを目的とするロボットが普及することで、日常生活において人とロボットが遭遇する機会も増加している。ロボットの社会的な振る舞いを設計する際には、ロボットがロボット自身の内部状態を人にとって読み取りやすい形式で表出することが求められる [1]。また、ロボットが人の内部状態を推定し、推定した内部状態に合わせ行動を調整することで、人に対して配慮のある振る舞いが可能になると考えられる。本研究では、知覚可能な変数に応じて自律的に行動を生成する存在をエージェントと定義する。このときエージェントの内部状態は、そのエージェントの行動選択に影響する変数のうち、そのエージェントの外部からは直接観測できない変数を表す。例えば、人がエージェントであるとした場合、感情や信念、願望、目的などの変数が人の内部状態に対応する。人と社会的なインタラクションが可能なエージェントのモデルを構築することができれば、ロボットの社会的な振る舞いが実装可能となる。

人間社会にコミュニケーションを目的とするロボットが浸透するうえで、ロボットと人の遭遇場面におけるインタラクションの設計が不可欠となる。そこで本研究では、コミュニケーション開始時の接近行動に注目する。人同士の遭遇場面では、接近や視線のやり取りなどの身体的なインタラクションを通して相手とコミュニケーションするか否かの判断が行われている [2, 3]。また、人同士で会話が開始される場面では、距離に応じた挨拶行動や身体配置の調整などの行動パターンが存在し [4]、距離や視線方向を互いに調整する行動が行われている [5, 6]。

実際に、これらの人同士で見られる行動はロボットの振る舞いに実装されており、ロボットが人に接近する際に与える心理的負荷の軽減などが期待される [7, 8]。しかし、これらの研究の多くは接近行動や回避行動そのものをモデル化しており、人に対して表出されるロボットの内部状態についてはあまり検討されていない。それゆえに、特定の状況に即した行動をモデルに基づき実行しているだけで、異なる状況や目的のもとでは、別の行動のモデルが必要となる。

これに対して、状況ごとに行動モデルを作成し統合するだけではなく、例えば、相手と関わりたい状態から相手と関わらない状態までを連続的に扱うことができるような内部状態のモデルをロボットに持たせるアプローチが必要である。このような連続的な内部状態をロボットに持たせることで、ロボット自身の内部状態に応じて接近・回避行動を動的に生成することが可能になると考えられる。同時に、相手が同じ内部状態に基づき行動を生成していると仮定することで、相手の振る舞いから相手の内部状態を推定することが可能となる。これにより、互いに相手の内部状態に合わせて行動を調整することが可能になると推察される。

そこで本研究では、自身の内部状態に基づいて接近・回避行動を生成するエージェントのモデル [9] に基づき、実際の人の接近行動の分析を行う。人同士で取り交わされるメッセージには「内容」と「関係」に関する側面が混在しており、自身と相手が同じ場に存在している限り、お互いのいかなる行動もメッセージとして解釈可能となる [10]。それゆえに、相手と関係を構築するつもりがない場合であっても、「お互いに関わらない」関係を了承し合う必要がある。人-ロボットのインタラクションにおいても、ロボットが人と関わろうとしているのか、あるいは関わらないよう行動しているのかを相手との間で了承し合う必要がある。そこで、自身から相手への関与と相手から自身への関与に対する選好を内部状態として持つエージェントのモデルを提案する。このモデルでは、エージェントの内部

† Analysis of Approaching Behavior Adjusting Involvement Intensity in Initial Interaction Based on a Model

Takafumi SAKAMOTO, Genta YOSHIOKA, and Yugo TAKEUCHI

* 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

状態と相手との空間的な配置から行動が生成されると同時に、接近や回避といった行動から内部状態を推定することも可能である。これにより、コミュニケーションの初期段階における関係の調整が可能であると考えられる。しかし、これまでの研究 [9] では、モデルに基づく行動のシミュレーションのみが行われており、実際の人の行動データとの対応づけは行われていない。

本研究では、このモデルを相手の内部状態に応じた話しかけ場面における行動の分析に適用する。具体的には、初対面の相手に話しかける場面を再現した実験 [11, 12] における人の接近行動の分析にモデルを用いる。この実験では、話しかける相手の受容度を相手が従事する作業（読書）の集中度合いによって表し、教示により参加者に提示する。先行研究では、相手の内部状態に応じて話しかけ行動に違いが生じるかが検証されている [11, 12]。その一方で、参加者が生成する接近行動の軌道については分析が行われていない。本研究では、モデルを用いて実験状況における接近行動のシミュレーションを行い、生成した軌道と話しかけ場面における参加者の軌道とのフィッティングを行うことで参加者の内部状態を推定する。そこから、参加者の内部状態や接近行動の特徴について検証を行う。これにより、人の話しかけ場面における接近行動の特徴を明らかにするとともに、モデルを人の行動の分析に用いることの妥当性について検討する。

2. 接近・回避行動のモデル

本節では分析に用いるモデルの詳細について記述する。本研究では、話しかけ場面における空間的なインタラクションを記述するためのエージェントモデル [9] に基づき、人の行動を分析する。以下では、提案モデルで取り扱う内部状態と行動について説明する。

2.1 内部状態

あるエージェントから見た相手エージェントとの関係は、自分から相手に関与することに対する積極性と、相手から自分への関与に対する受容性の2つの側面により記述できると考えられる。提案モデルではエージェントの内部状態のうち、自身から相手へ関与することに対する選好（Control）と、相手から自身へ関与することに対する選好（Acceptance）に注目する。Control の値を c 、Acceptance の値を a で表し、本研究で扱うエージェントの内部状態は $z = (c, a)$ とする。

内部状態 z の値はだまかに、Control と Acceptance の正と負を組み合わせた4つの状態と、いずれの選好も持たない状態との5つの状態に分類される（図1）。この5つの状態は以下で表される。

- $c > 0, a < 0$ のとき：自身から相手への関与のみが可能な状況を選好する状態（支配的状态）。
- $c < 0, a > 0$ のとき：相手から自身への関与のみが可能な状況を選好する状態（服従的状态）。
- $c > 0, a > 0$ のとき：自身と相手が互いに関与可能な状況を選好する状態（互惠的状态）。

図1 本研究で扱う内部状態の変数

図2 関与の強さの計算に用いる距離と身体方向

- $c < 0, a < 0$ のとき：自身と相手との間のいずれの関与も避けられる状況を選好する状態（忌避的状态）。
- $c = 0, a = 0$ のとき：自身と相手との間の関与に対して選好を有さない状態（態度留保状態）。

2.2 関与と空間配置の対応づけ

エージェント間の身体の相対的な位置関係から、相手から自分、あるいは自分から相手への関与の強さを求める関数を定義する。人による対象への働きかけは近距離正面方向の Transactional segment で行われる [4]。これに基づき関与の強さ α は、身体の相対的な位置関係のうち、エージェントと相手間の距離 r と相対角度 θ により、以下の式で表される。

$$\alpha = f(r, \theta) \quad (1)$$

ただし、 $f(r, \theta)$ は r と θ に対する単調減少関数であり、 α は非負の値を取るものとする。

エージェント i とターゲット j が同一空間内に存在する場合、 i から j への関与の強さ $\alpha_{ij} = f(r, \theta_{ij})$ と、 j から i への関与の強さ $\alpha_{ji} = f(r, \theta_{ji})$ が求められる。よって、エージェントが行動を生成するために用いる相対的な位置関係は距離 r と2つの相対角度 θ_{ij}, θ_{ji} であり、これらを図2に示す。

2.3 行動の生成

本研究では、エージェントの行動は図3に示されるように、平面の移動と身体方向の回転のみとする。エージェント i の平面の移動はベクトルで表すことができ、相手（ターゲット j ）との距離方向の成分と相手の周りを回転する成分に分けること

図3 エージェントの接近・回避行動を構成する成分

ができる。

エージェント i にとって移動ベクトルの距離方向の成分は、自身から相手への関与の強さ α_{ij} と相手から自身への関与の強さ α_{ji} の両方を変化させ得る。いずれの関与の強さについても、相手との距離を縮めることで値が大きくなり、距離を拡げることで値が小さくなる。よって c と a の合計値によって、距離方向成分の向きが決まる。従って移動ベクトルの距離方向成分 $\Delta_i r$ は次の式で求められる。なお、 Δ_i はエージェント i による変数を変化させる作用を表し、 $\Delta_i r$ はエージェント i が距離 r を変化させる作用（行動）を表す。

$$\Delta_i r = v_{\text{dis}}(c + a, r) \quad (2)$$

ただし、 v_{dis} は $c + a > 0$ のとき 0 以下の値、 $c + a < 0$ のとき 0 以上の値、 $c + a = 0$ のとき 0 となる関数とする。

移動ベクトルの回転方向の成分は、相手の位置を中心とする円運動の成分であり、相手から自身への関与の強さ α_{ji} を変化させる。相手の正面方向に回り込む場合、 α_{ji} の値が大きくなり、相手の背面方向に回り込む場合は小さくなる。よって、移動ベクトルの回転方向成分は a の値により決まる。従って、移動ベクトルの回転方向成分 $\Delta_i \theta_{ji}$ は次の式で求められる。

$$\Delta_i \theta_{ji} = v_{\text{rev}}(a, \theta_{ji}) \quad (3)$$

ただし、 v_{rev} は $a > 0$ のとき 0 以下の値、 $a < 0$ のとき 0 以上の値、 $a = 0$ のとき 0 となる関数とする。

エージェント i が自身の身体方向を回転させる場合、自身から相手への関与の強さ α_{ij} が変化する。身体方向を相手に向けてすることで α_{ij} の値が大きくなり、身体方向を逸らすことで小さくなることから、身体方向の回転方向成分は c の値により決まる。よって、身体方向の回転成分 $\Delta_i \theta_{ij}$ は次の式で求められる。

$$\Delta_i \theta_{ij} = v_{\text{turn}}(c, \theta_{ij}) \quad (4)$$

ただし、 v_{turn} は $c > 0$ のとき 0 以下の値、 $c < 0$ のとき 0 以上の値、 $c = 0$ のとき 0 となる関数とする。

これらの関数に基づいて、エージェント自身の内部状態と相手との位置関係から、エージェントの移動と身体方向の回転が決定される。

3. 相手の内部状態を想定した話しかけ実験

本研究は、話しかけ場面における人の行動を提案モデルに基づき分析することを目的とする。本研究では、先行研究 [12]

図4 実験環境 [12]

図5 実験の様子 [12]

により得られた椅子に座り読書している人に見立てたマネキンに対する人の接近行動の再分析を行う。この実験は、相手（マネキン）の読書に対する集中度合いが異なる状況において、道を尋ねるために話しかけるというシナリオで行われた。本節では、実験方法の概略を示す。

3.1 実験方法

3.1.1 手順

実験環境の概略を図4に示す。実験課題は、フィールド（4,500 mm の円形）の中央に配置されたマネキンに対して、正面方向の端（ $x=0$ mm, $y=2,250$ mm となる位置）または背面方向（ $x=0$ mm, $y=-2,250$ mm となる位置）から接近し、話しかける課題である。実験に用いるシナリオは「道に迷っている状況であり、初対面の相手に道を尋ねる場面」である。

実験は以下の手順に従い行った。

1. 参加者に実験のシナリオを教示する。
2. 相手が読書に集中している度合いを後述する実験条件に応じて参加者に想定させるための教示を行う。
3. 参加者はフィールド上の開始位置に誘導され、開始の合図とともに話しかけ行動を開始する（図5）。
4. 話しかけ終了後、同じ状況設定のまま、3と反対側の開始位置から再度話しかけを行わせる。
5. 2に戻り、異なる相手の集中度合いを想定させるための教示を行い、3、4をすべての実験条件が終了するまで繰り返す。
6. 事後アンケートへの回答を行わせる。

本研究では、主に参加者の位置座標の変化を分析対象とす

る。参加者の位置座標はフィールドの端に設置したレーザレンジファインダにより取得された。また、Web カメラの映像により話しかけ開始や終了のタイミングの計測を行った。これらのデータに基づき各条件の接近行動の分析、比較を行う。なお、事後アンケートは参加者が状況の想定を行えたかどうかの確認および社会的スキルの測定を行っているが、本研究の分析では扱わない。

3.1.2 実験条件

実験は教示要因と開始位置要因の2要因被験者内計画で行われた(表1)。教示要因は相手の受容度合いに対する教示の要因であり、以下の3つの水準である。各水準の教示内容を以下に示す。

受容度 L (集中)： 相手は集中して本を読んでいる

受容度 M (中間)： 相手は本を読んでいる

受容度 H (散漫)： 相手は本を読み終え、本を持っている

なお、先行研究[12]では、教示要因の各水準は参加者が想定する相手の「本に対する集中度合い」として扱っている。これに対して本稿では後の議論のために、「読んでいる本に対する集中度合い」を「参加者に対する受容の度合い」と見做す。よって本稿では各水準のそれぞれについて、先行研究の集中を受容度 L、中間を受容度 M、散漫を受容度 H と表記する。開始位置要因は、マネキンに対する話しかけ開始位置の要因であり、マネキンの正面方向(F)と背面方向(B)の2水準である。

実験参加者は15名で一人の参加者は全ての条件の試行を行った。各実験条件の順序は、カウンターバランスを考慮し、参加者ごとに入れ替えを行った。

3.2 先行研究の分析結果のまとめ

先行研究[11]では、正面からの話しかけ開始位置について教示要因により差が生じることが示されている。具体的には、話しかけ開始時の参加者の位置とマネキンとの距離について、マネキンの正面方向を開始位置とする場合は受容度 L < 受容度 M < 受容度 H であり、背面を開始位置とする場合はこの差が生じないことが示されている(図6)。また、各条件の話しかけ位置の平均を図7に示す。

4. モデルに基づく人の接近軌道の分析

本研究では、前節の実験について参加者の接近開始位置から接近終了位置までの軌道について分析を行う。前節の実験では、ほとんどの参加者がマネキンに対して直線的に接近するのではなく、回り込むような接近軌道を示した。そこで以下の分析では、参加者の接近行動が提案モデルに従うと仮定し、相手(マネキン)の内部状態(受容度)によって接近軌道の曲がり度合いに差があるのかを検証する。

4.1 参加者の接近軌道の比較方法

参加者の接近行動から数値計算により、提案モデルの内部状態と対応づいたパラメータを推定する。このパラメータはエージェントの移動ベクトルの向きに相当し、接近軌道の曲がり度

表1 実験条件

		開始位置要因	
		正面 (F)	背面 (B)
教示要因	受容度 L (集中)	L-F	L-B
	受容度 M (中間)	M-F	M-B
	受容度 H (散漫)	H-F	H-B

図6 各条件の話しかけ開始時の参加者-相手の平均距離(エラーバーは標準偏差)

図7 各条件の話しかけ開始位置の平均(エラーバーは標準偏差)

合いを表す。具体的な手順として、まず提案モデルに基づく接近行動の軌道を計算機シミュレーションにより生成する。次に、生成した軌道と参加者の接近行動の位置データを比較し、各点と生成した軌道の最短距離の合計値を誤差として求める。誤差が最小となる軌道のパラメータをその参加者の接近行動の

パラメータとし、実験条件毎に比較を行う。

4.1.1 軌道生成のパラメータの設定

以下では、エージェントが開始位置から移動し、静止するまでの軌道を生成するための式を定義する。また、エージェントの相手への接近方向を軌道生成のパラメータとし、エージェントの内部状態とパラメータの関係について述べる。なお、本研究の分析では特に接近軌道に注目するため、エージェントの身体方向については軌道の生成および誤差の計算に含めない。

提案モデルにおいてエージェントが相手に接近する場合、エージェントと相手の距離が十分に接近し、かつ、相手から見た相対角度が目標値に対して十分に近づいた段階で移動を止めて、静止する。エージェントが移動する場合の移動速度の大きさ $\Delta_i s$ を一定とした場合、エージェントの移動方向は $\Delta_i r$ と $\Delta_i \theta_{ji}$ により求められる。相手（マネキン）の位置がフィールドの中心に固定されていることから、床面上の相手の位置を原点とした xy 平面において、エージェントの軌道は以下の反復式で表すことができる。

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + \Delta_i s \cos \left(\phi + \arctan \left(\frac{y_k}{x_k} \right) \right) \\ y_{k+1} = y_k + \Delta_i s \sin \left(\phi + \arctan \left(\frac{y_k}{x_k} \right) \right) \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 ϕ は移動ベクトルの距離方向の成分 $\Delta_i r$ と回転方向の成分 $\Delta_i \theta_{ji}$ の大きさの比により決まる角度とする。そのため、相手との距離 r が十分に近づいている場合 $\Delta_i r$ は 0 となる。つまり、エージェントが取りうる相手との距離の最小値を $r_{\min}$ とした場合に、 $r < r_{\min}$ のとき、 $\Delta_i r$ は 0 となる。同様に、相手から見たエージェントの相対角度 θ_{ji} がエージェントの Acceptance の値に応じた目標角度 θ_{goal} に十分に近づいている場合、 $\Delta_i \theta_{ji}$ は 0 になる。 θ_{goal} は $a < 0$ のとき 180 度、 $a > 0$ のとき 0 度となる。 $\theta_{\min}$ をエージェントが許容する θ_{goal} と θ_{ji} の誤差とした場合、 $|\theta_{ji} - \theta_{goal}| < \theta_{\min}$ のとき $\Delta_i \theta_{ji}$ は 0 となる。このことから、 ϕ の値は以下により求められる。

$$\phi = \begin{cases} 0 & \text{if } r < r_{\min} \\ \pi & \text{if } |\theta_{ji} - \theta_{goal}| < \theta_{\min} \\ \theta_v & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

θ_v は、距離方向と回転方向の両方について移動する条件における、エージェントの移動ベクトルの向きを表す。よって、 θ_v は v_{dis} と v_{rev} の大きさの比として次の式により表される。

$$\theta_v = \arctan \frac{v_{\text{rev}}}{v_{\text{dis}}} \quad (7)$$

距離方向と回転方向の両方について移動する条件下における v_{dis} 、 v_{rev} として以下の式を用いる。

$$v_{\text{dis}} = -\{c + a\} \Delta_i s \quad (8)$$

$$v_{\text{rev}} = -2a \Delta_i s \quad (9)$$

これにより、エージェントの移動ベクトルの向きを表す θ_v と内部状態の値が図 8 に示すように対応づけられる。また、 θ_v は式 (5)、式 (6) に基づく接近軌道の生成におけるパラメータであり、各参加者の接近行動のログデータから θ_v の推定値 $\hat{\theta}_v$ を求めることで各条件における参加者の接近行動の比較を行う。

図 8 内部状態である Control の値 c および Acceptance の値 a と接近軌道のパラメータ θ_v の関係

図 9 提案モデルに基づき生成した軌道

4.1.2 計算機シミュレーションによる軌道の生成

前節の実験環境と同じ設定の仮想環境において、式 5、式 6 に基づき相手に接近する軌道を生成する。初期位置 (x_1, y_1) は前節の実験状況に合わせて、相手の正面方向を開始位置とする場合は $(0, 2250)$ 、背面方向を開始位置とする場合は $(0, -2250)$ とする。この初期位置から $\Delta_i r = 0$ かつ $\Delta_i \theta_{ji} = 0$ になるまで位置座標を更新していくことで軌道を生成する。 $\Delta_i s$ は 1 フレームあたり 10 mm に設定する。また、 $r_{\min}$ は実際に参加者が相手に最も近づいた距離を各参加者、各条件毎に設定する。 $\theta_{\min}$ についてはいずれの条件においても 1 度とする。

$\hat{\theta}_v$ を推定するために、 θ_v に様々な値を設定し、設定した値の数だけ軌道を生成する。相手の正面方向を開始位置とする場合は、正面から逸れるように接近するため θ_v を 90 度から 180 度までの値とする。背面方向を開始位置とする場合は、正面方向に回り込むように接近するため、 θ_v を 180 度から 270 度までの値とする。いずれの開始位置の場合についても θ_v の刻み幅は 1 度とする。

以上の設定に基づきモデルにより生成される軌道の例を図 9 に示す。図 9 では 10 度毎の θ_v の値に対する軌道を実線で表す。また青色の矢印は移動の向きを表す。なお、図 9 の軌道生成では $r_{\min}$ は 500 mm に設定した。相手の正面方向を開始位置とした場合、 θ_v が 180 度に近いほど直線的な軌道となり、 θ_v が 90 度に近いほど円に近い曲線の軌道となる。また、背面方向を開始位置とした場合、 θ_v が 180 度に近いほど直線的な軌道となり、 θ_v が 270 度に近いほど円に近い曲線の軌道となる。

図 10 各条件の参加者 1 の接近軌道とモデルにより生成した軌道（黒色の線は $\hat{\theta}_v$ の軌道で、灰色の線は 10 度毎の θ_v の軌道）

4.1.3 参加者のパラメータの推定方法

各参加者の接近軌道のパラメータ $\hat{\theta}_v$ の推定は数値計算により行う。具体的には、シミュレーションにより生成した軌道と各参加者の相手への接近行動の位置データの誤差を求め、誤差が最小となる θ_v の値を求める。シミュレーションにより生成した軌道は、初期位置 (x_1, y_1) から静止位置 (x_n, y_n) までの点の集合として $X_{\theta_v} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ と表される。参加者の接近行動のログデータにおける t フレーム目の位置座標 (x_t^p, y_t^p) から最も距離が近い X_{θ_v} 上の点を $(x_t^{\min}, y_t^{\min})$ とする。参加者の接近開始 ($t = 1$) から接近終了 ($t = m$) までの位置データの誤差の合計値 $g(\theta_v)$ は以下により求められる。

$$g(\theta_v) = \sum_{t=1}^m \sqrt{(x_t^p - x_t^{\min})^2 + (y_t^p - y_t^{\min})^2} \quad (10)$$

そこから、参加者の接近軌道のパラメータの推定値 $\hat{\theta}_v$ は以下で求められる。

$$\hat{\theta}_v = \arg \min_{\theta_v} g(\theta_v) \quad (11)$$

各接近軌道のうち $r > r_{\min}$ かつ $|\theta_{ji} - \theta_{goal}| > \theta_{\min}$ を満たしている部分から、式 8、式 9 に基づき、 $\hat{\theta}_v$ から Control と Acceptance の推定値 $\hat{c}$ と $\hat{a}$ を求めることができる（ただし、 $\hat{c}^2 + \hat{a}^2 = 1$ とする）。また、 $\hat{\theta}_v$ が 180 度となる（参加者が一直線に相手へ接近する）場合は $\hat{c}$ と $\hat{a}$ の値を一意に求めることはできない。具体的には、直線で接近する軌道について、開始位置が相手の前面となる条件では $\hat{c} + \hat{a} > 0$ 、 $\hat{a} > 0$ 、背面となる条件では $\hat{c} + \hat{a} > 0$ 、 $\hat{a} < 0$ を満たすいずれかの値となる。なお、本研究の分析対象となるデータには $\hat{\theta}_v$ が 180 度となるものは含まれていなかった。

4.2 結果

4.2.1 参加者の接近軌道の例

図 10 に各条件において実際に参加者が示した接近軌道の例を示す。三角形で示されるのが参加者 1 の位置と向きであり、三角形の色は行動データの時間経過とともに濃くなる。参加者

の行動データから推定した $\hat{\theta}_v$ の値により生成される軌道を黒色の線で示す。また、灰色の線は θ_v の値を 10 度間隔で設定し生成した軌道を表す。

参加者 1 の接近軌道から推定した $\hat{\theta}_v$ は、開始位置が正面の場合において、受容度が低い条件（L-F）で 135 度、受容度が中間の条件（M-F）で 135 度、受容度が低い条件（L-F）で 133 度であった。図 8 の関係から、いずれの条件においても a の値は負であり、相手の正面方向を避けるように回り込みながら相手に接近していたことがわかる。

また開始位置が背面の場合においては、受容度が低い条件（L-B）で 194 度、受容度が中間の条件（M-B）で 210 度、受容度が低い条件（L-B）で 207 度であった。図 8 の関係から、いずれの条件においても a の値は正であり、相手の正面方向に回り込みながら接近していたことがわかる。

4.2.2 条件間の接近軌道の比較

図 11 に、各参加者の接近行動から求めた接近軌道のパラメータの推定値 $\hat{\theta}_v$ を計算した結果を示す。相手の正面方向から接近する場合について各条件の $\hat{\theta}_v$ の平均値は、受容度が低い L-F 条件で 144.2 (SD = 12.79), 受容度が中程度の M-F 条件で 149.9 (SD = 17.18), 受容度が高い H-F 条件で 146.1 (SD = 17.73) となった。また、相手の背面方向から接近する場合について $\hat{\theta}_v$ の平均値は、受容度が低い L-B 条件で 206.6 (SD = 17.04), 受容度が中程度の M-B 条件で 198.9 (SD = 15.49), 受容度が高い H-B 条件で 202.7 (SD = 11.81) となった。このことから、参加者の相手に話しかけるための接近行動が描く軌道はいずれの条件においても直線ではなく、曲線であったといえる。

$\hat{\theta}_v$ について 2 要因分散分析を行なった結果、開始位置要因について統計的に有意な主効果が見られた ($F(1, 14) = 91.88$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.8678$)。しかし、教示要因の主効果は統計的に有意ではなかった ($F(2, 28) = 0.07$, n.s., $\eta_p^2 = 0.0048$)。また、開始位置要因と教示要因の交互作用について、統計的

図 11 各条件における接近軌道のパラメータの推定値（エラーバーは標準偏差）

に有意であることが示された ($F(2, 28) = 4.15$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.2288$). そこで単純主効果の検定を行った結果, 受容度 L 水準, 受容度 M 水準, 受容度 H 水準のそれぞれについて開始位置要因の単純主効果が統計的に有意であった (それぞれ $F(1, 14) = 4.15$, $F(1, 14) = 57.08$, $F(1, 14) = 85.08$, いずれも $p < 0.01$). しかし, 正面開始水準と背面開始水準のいずれにおいても教示要因の統計的に有意な単純主効果はみられなかった (それぞれ $F(2, 28) = 1.39$, $F(2, 28) = 1.62$, いずれも n.s.). よって, 参加者の相手への接近軌道は教示により想定した相手の受容度の影響を受けているとはいえない.

4.2.3 話しかけのタイミングの比較

参加者が教示を受けた相手の受容度にかかわらず同様の接近行動を示したとする場合, 話しかけ開始時の位置について実験条件間で差が生じたのは, 話しかけのタイミングが異なるからであると考えられる. 図 12 に各参加者の実験開始から話しかけ開始までの経過時間を示す.

2 要因分散分析の結果として, 教示要因について有意な主効果が見られた ($F(2, 28) = 10.15$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.420$). そこで, Holm 法による多重比較を行った結果, 受容度 L の条件が受容度 M の条件と受容度 H の条件に比べて話しかけ開始時間が有意に大きいことが示された (いずれも $p < 0.05$). また, 開始位置要因についても主効果が有意であった ($F(1, 14) = 6.00$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.300$). なお, 教示要因と開始位置要因の間に有意な交互作用は見られなかった ($F(2, 28) = 0.29$, n.s., $\eta_p^2 = 0.021$).

この結果から, 話しかけ開始までの平均時間は相手の受容度が低いほど大きくなり, 相手の前面から接近する条件よりも背面から接近する条件の方が大きくなることが示された. 具体的には, 相手の正面方向から話しかける場合, 受容度 L の条件で 3.61 (SD = 1.84) 秒, 受容度 M の条件で 2.99 (SD = 1.48) 秒, 受容度 H の条件で 2.51 (SD = 1.28) 秒であった. 相手の背面方向から接近する場合については, 受容度 L の条件で 4.67 (SD = 3.24) 秒, 受容度 M の条件で 3.85 (SD = 2.22) 秒, 受

図 12 話しかけ開始までの経過時間（エラーバーは標準偏差）

容度 H の条件で 3.60 (SD = 2.19) 秒であった.

4.3 考察

人が相手（人と想定したマネキン）に話しかける際の接近行動の軌道について分析を行った結果, 人の相手への接近は直線ではなく曲線を描くことが示された. また本研究の分析結果では, 想定する相手の内部状態（受容度）が人の接近軌道の曲がり度合いに及ぼす影響については示されなかった. これに対して, 人が想定する相手の内部状態は, 話しかけのタイミングに影響していることが示唆された.

人が相手に話しかける場面において, 回り込む軌道を示す理由について検討する. 実験では相手（マネキン）が人であると想定するように教示していることから, 実験参加者の接近行動は人に対する接近行動と同様のものではあったと考えられる. このことから, 以下では相手も提案モデルに従うエージェントであると仮定したうえで, エージェント間のインタラクションとしての接近行動について検討する. 相手の背面方向から接近する場合は, 相手の視野範囲内に入るために, 相手の正面方向に回り込むと考えられる. 一方で, 相手の正面方向から接近する

場合、正面方向を避ける理由として以下があげられる。

1. 相手から自身への関与の強さが上昇することで相手からの関与を要求していることになるのを避けるため。
2. 相手の反応により表出される内部状態を明確化するため。

以下ではこの2点について検討し、今後の展望について述べる。

4.3.1 関与の強さによる相手への要求

相手の正面方向から直線的に接近する場合、提案モデルに基づき解釈すると、相手から自身への関与の強さをエージェント自身の行動により上昇させることになる。相手も提案モデルの内部状態を持っていると仮定した場合、相手の **Control** の値にかかわらず相手から自身への関与の強さを上げていることになる。これは相手からの関与を強く要求する行動となり得る。それゆえに参加者の接近軌道は直線ではなく正面方向から逸れるように回り込む軌道であったと考えられる。Dautenhahn らの研究では、ロボットが人に接近する場合について、正面方向からの接近よりも左右方向からの接近の方が好まれることが示されている [13]。これについても正面からの接近は、ロボットが人からの関与の強さを（横からの接近よりも）強く上昇させるために、評価が悪くなった可能性がある。もしこれらの見方が正しいならば、ロボットの内部状態として **Acceptance** の値を過度に高くしないことで、相手からの関与を強く要求しないような接近が可能となる。これにより、相手への配慮を示す接近方法をロボットが生成できると考えられる。

4.3.2 相手の反応の明確化

次に、直線的な接近ではなく正面方向を避けながら接近することで、相手の反応により表出される内部状態をより明確化している可能性について検討する。相手が提案モデルに従うエージェントであると仮定した場合、相手エージェントが自身に関与するつもりがある場合の反応は **Control** の値が正の値のときに生成される行動である。一方で関与するつもりがない場合の反応は **Control** が 0 以下の値で生成される行動となる。この2つの反応を想定した場合に、直線的な接近により生じ得る状況を図 13、正面を逸れるように接近する場合に生じ得る状況を図 14 に示す。図 13 は、 $a \geq 0$ の接近行動（下向きの変形）と、それに対して身体方向の回転のみが許される場合の相手の反応（上向きの変形）をシミュレーションした結果である。この場合、図 13（左）の相手の **Control** が 0 のときと図 13（右）の相手の **Control** が正の場合の反応の違いが見られない。これに対して、図 14 は、 $a < 0$ の接近行動（下向きの変形）と、それに対して身体方向の回転のみが許される場合の相手の反応（上向きの変形）をシミュレーションした結果である。この場合、図 14（左）の相手の **Control** が 0 のときと図 14（右）の相手の **Control** が正の場合で、反応が異なることが示される。つまり、相手の **Control** の値を相手の反応から推定するためには、正面を開始位置とする場合、回り込むように接近する必要がある。

実際に人が見ず知らずの人に話しかける場面を分析した研究では、実際に声をかける以前に互いに視線を合わせる（mutual gaze）などの行動が観察される [2, 3]。このような行動は、話

図 13 相手の正面方向に直線的に接近する場合 ($a \geq 0$) に相手が関与するつもりがない状態の相手の反応（左）と関与するつもりがある状態の相手の反応（右）

図 14 相手の正面方向から逸れる曲線直な接近を行う場合 ($a < 0$) の関与するつもりがない状態の相手の反応（左）と関与するつもりがある状態の相手の反応（右）

しかける側が相手の内部状態がインタラクション可能な状態であることを伺い、さらに、話しかけられる側もインタラクション可能であることを行動により表出するプロセスであるといえる。このプロセスにより人同士が相互に会話への移行を了承しているのであれば、提案モデルによる内部状態の表出をロボットに実装することで、コミュニケーションの開始場面で適切に振る舞うロボットがデザインできる可能性がある。

4.3.3 今後の展望

本研究では、人が相手に話しかける場面において、想定する相手の内部状態に注目し分析を行った。今後は異なる状況設定において、参加者自身の内部状態が接近行動に及ぼす影響についても検討を行う。具体的には、道を尋ねるという一方的に情報を聞き出す状況設定だけでなく、チャシの配布やティッシュ配りといった話しかける側が相手に情報を与えようとするような状況が考えられる。また、懇親会のような互いに情報を交換し合うことが前提となっているような状況もあげられる。人同士のコミュニケーション開始場面では、これらの相手と構築しようとする関係に応じて、異なるパターンの身体的なインタラクションが行われている可能性がある。さらに、提案モデルは相手とのコミュニケーションを回避する場面の行動についても扱うことが可能である。これらの点について検証するために、教示内容を変更した実験や、実環境での人同士、または人-ロボットの行動の分析を行う必要がある。

コミュニケーション開始場面の振る舞いが、後続する会話などのコミュニケーションに影響する可能性がある。例えば、カ

ウンセリング場面では初対面であっても話しやすい雰囲気をつくるために、カウンセラーとクライアントの距離や向き合う角度の調整が行われている [14]。このような、会話などのコミュニケーションにおける相手に与える印象や雰囲気づくりに対して本研究のモデルが有用であるか、今後検討する余地がある。

現段階のモデルでは、行動のタイミングや動的な内部状態の変化については扱っていない。また、3 人以上がインタラクションを行う状況についても検討する必要がある。さらに、直接表出される内部状態だけでなく、相手を誘導する場面といった、何らかの意図に基づいて相手の行動を変化させるような状況についても検討する。これらを扱うためには、現段階の直接的な行動の生成や推定を行うプロセスに加えて、時系列的に相手の行動を観察し内部状態を推定するプロセスをモデル化する必要がある。今後これらのモデルの拡張を行う。

5. まとめ

本研究では、人のコミュニケーション開始場面における内部状態と接近・回避行動のモデルに基づき、実際の人の接近行動の軌道について分析を行った。結果として、人が相手に話しかける場面では、人は相手に直線的に接近するのではなく、正面から逸れるように曲線を描くように接近することが示された。また、想定する相手の内部状態に応じて、相手に話しかけるタイミングが有意に異なることが示された。これらの結果に対して、提案モデルを用いることで、コミュニケーション開始場面の行動を定量的なパラメータから内部状態と対応づけて解釈することが可能であった。このことから、提案モデルに基づく行動の生成と内部状態の推定をロボットに実装することで、人-ロボットのコミュニケーション開始場面におけるインタラクションのデザインが可能であることが示唆された。

謝辞

本研究は MEXT 科研費 26118002 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] T. Fong, I. Nourbakhsh, and K. Dautenhahn: "A survey of socially interactive robots," *Robotics and autonomous systems*, Vol.42, Nos.3-4, pp. 143-166, 2003.
- [2] L. Mondada: "Emergent focused interactions in public places: A systematic analysis of the multimodal achievement of a common interactional space," *J. of Pragmatics*, Vol.41, No.10, pp. 1977-1997, 2009.
- [3] K. Mortensen and S. Hazel: "Moving into interaction? Social practices for initiating encounters at a help desk," *J. of Pragmatics*, Vol.62, pp. 46-67, 2014.
- [4] A. Kendon: *Conducting Interactions: Patterns of Behavior in Focused Encounters*, Cambridge University Press, 1990.
- [5] E. T. Hall: *Hidden Dimension*, Doubleday Company, 1966 (日高敏隆, 佐藤信行 (訳): かくれた次元, みすず書房, 1970)。
- [6] M. Argyle and J. Dean: "Eye-contact, distance and affiliation," *Sociometry*, Vol.28, pp. 289-304, 1965.
- [7] T. Kruse, A. K. Pandey, R. Alami, and A. Kirsch: "Human-aware robot navigation: A survey," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.61 No.12, pp. 1726-1743, 2013.
- [8] J. Rios-Martinez, A. Spalanzani, and C. Laugier: "From proxemics theory to socially-aware navigation: A survey," *Int. J. of*

Social Robotics, Vol.7 No.2, pp. 137-153, 2015.

- [9] T. Sakamoto and Y. Takeuchi: "Simulation of spatial behavior based on an agent model in Human-Agent Initial Interaction," *Proc. of the 6th Int. Conf. on Human-Agent Interaction*, pp. 310-317, 2018.
- [10] P. Watzlawick, J. B. Bavelas, and D. D. Jackson: *Pragmatics of Human Communication: A Study of Interactional Patterns, Pathologies and Paradoxes*, WW Norton & Company, 2011.
- [11] G. Yoshioka, T. Sakamoto, and Y. Takeuchi: "Polite approach to engrossing person based on two-dimensional attitude of interaction with other," *27th IEEE Int. Conf. on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 98-104, 2018.
- [12] 吉岡源太, 竹内勇剛: "互惠的な関係を築くための配慮に基づく身体的なアプローチ," ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.20, No.4, pp. 417-426, 2018.
- [13] K. Dautenhahn, M. L. Walters, S. Woods, K. L. Koay, C. L. Nehaniv, E. A. Sisbot, R. Alami, and T. Siméon: "How may I serve you?: A robot companion approaching a seated person in a helping context," *Proc. of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conf. on Human-robot interaction*, pp. 172-179, 2006.
- [14] 玉瀬耕治: カウンセリングの技法を学ぶ, 有斐閣, 2008.

(2018 年 12 月 27 日 受付)

(2019 年 5 月 15 日 採録)

[問い合わせ先]

〒432-8011 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

静岡大学

坂本 孝文

TEL: 053-478-1455

E-mail: sakamoto.89d@gmail.com

著者紹介

さかもと たかふみ
坂本 孝文 [学生会員]

2014 年静岡大学大学院情報科学研究科修士課程修了。現在、同大学創造科学技術大学院に在学中。人とエージェント間の身体的、認知的インタラクションのモデル化を目指し研究に従事している。日本認知科学会、人工知能学会、日本知能情報ファジィ学会の学生会員。

よしおか げんた
吉岡 源太 [非会員]

2019 年、静岡大学創造科学技術大学院博士後期課程修了。博士 (情報学)。2019 年 4 月より、香川高等専門学校助教。人の感情状態に応じたロボットの振る舞いの設計について研究を行っている。

たけうち ゆうご
竹内 勇剛 [非会員]

1999 年名古屋大学大学院博士後期課程修了。博士 (学術)。1996 年 11 月より ATR 知能映像通信研究所研修研究員ののち客員研究員。2001 年より静岡大学情報学部情報科学科講師、のちに教授、現在に至る。人の知的活動をコミュニケーションの観点からその構造を説明する認知モデルの構築を目指している。日本認知科学会、人工知能学会、電子情報通信学会、ヒューマンインタフェース学会、情報処理学会、ACM 各会員。

Analysis of Approaching Behavior Adjusting Involvement Intensity in Initial Interaction Based on a Model

by

Takafumi SAKAMOTO, Genta YOSHIOKA, and Yugo TAKEUCHI**Abstract:**

In this study, we analyzed the human's moving trajectories in the encounter scene based on a proposed model. The model of agent possesses preferences for a relationship with a target. The model associates the intensity of aggressive and passive involvements based on the relative distance and the relative angle of the partner. In the scenario of the experiment, the participants approached the target (mannequin) to ask the way. As the results, the participants showed trajectories of a curve deviating from the front direction of the target rather than straight trajectories. The participants also showed adjustment of timing to start speaking based on the assumption of the internal state of the target set by experimental suggestion. The trajectory of human curved approach behavior can be generated approximately by the proposed model. We discuss the reason of these approaching behavior based on the internal state of the model. It can be said that the behavior generation of the proposed model and the estimation of the internal state are useful for designing human-robot interaction in encounter scene.

Keywords: Human-Agent Interaction, approaching behavior, initial phase of communication

Contact Address: **Takafumi SAKAMOTO**

Shizuoka University

3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8011, Japan

TEL: +81-53-478-1455

E-mail: sakamoto.89d@gmail.com