

VR空間における触れる前インタラクション： 対接触前距離の計測とその応用

齊藤 青葉^{†1,2} 木本 充彦^{†1,3} 飯尾 尊優^{†1,4,5} 下原 勝憲^{†1,2} 塩見 昌裕^{†1}

概要：人は、他者が一定の距離まで近づいてくると反応する。同様に、他者の手が自身に触れようとした場合にも、一定の距離で反応する。このような対人距離・対接触前距離の研究は実空間で進められつつあるが、VR空間においてはまだ対人距離の研究が取り組まれている段階である。VR空間における対接触前距離の計測は、VR空間上で活動するアバターや自律的に行動するエージェントにおける接触インタラクション、特に触れる前インタラクションへの応用が期待できる。そこで本研究では、まずVR空間において人がエージェントから触れられる際の対接触前距離を計測するためのデータ収集を行った。分析の結果、人々の対接触前距離がNear群(約9cm)、Far群(約25cm)に分類出来ること、およびその平均が約18cmであることが明らかになった。次に、VR空間において人がエージェントに触れようとする際に、エージェントが反応を行う対接触前距離によって受ける印象がどのように変化しうるのかを検証する実験を行った。実験の結果、対接触前距離が近いほどエージェントに対する親しみやすさや、自身に対するエージェントの親しみやすさを強くすることが明らかになった。また、対接触前距離が近い人は対接触前距離が遠い人に比べて、対接触前距離が近いエージェントを好むことも示された。

1. はじめに

VR空間において触覚を利用したインタラクションの研究が進んでいる。より自然な情報提示を行うための様々な触覚刺激を提示するデバイスの開発や[1]、人間の触覚に対する認知を利用して効果的に触覚刺激を提示するアルゴリズムの開発も進んでいる[2]。これらの研究を通じて、VR空間内においてエージェントとの物理的刺激を伴うインタラクションも可能になりつつある[3-5]。

しかしながら、これらの研究はエージェントや物体が人と触れる際の状況や、触れた後の状況におけるインタラクションを前提としており、触れる前のインタラクションに着目したものではなかった。例えば物理空間におけるエージェントであるロボットの場合、触れられる前に反応する距離を人と同じように設定することが、より自然で人間らしい印象を伝えるために重要であることが報告されている[6]。一方VR空間においては、エージェントに物体が触れた際の動作制御などの研究は進むものの[7]、触れられる前の反応距離に着目したものはなかった。VR空間での対人距離[8, 9]や対ロボット距離の研究も行われているが[10]、触れる前の状況に着目したものはなかった。

そこで本研究では、触れられる前に反応する距離である「対接触前距離」をVR空間で計測し、かつその応用に取り組む。具体的には、VR空間でエージェントが人に触れようとする際に、人が不快感を受け始める距離に関するデータ収集を行う。そこから得られたデータを分析し、VR空間における対接触前距離の特徴を明らかにする。次に、VR空間上のエージェントに人が触れようとする際、エー

ジェントが人から計測した対接触前距離データに基づいて反応することで(図1)、より自然な触れる前インタラクションを実現することが出来るかどうかを検証する実験を行う。以下に、本研究で解明に取り組むリサーチクエストionsを記載する：

- ・VR空間における対接触前距離はどの程度か
- ・VR空間において計測した対接触前距離を用いて反応するエージェントは、触れる前インタラクションを通じて人にどのような印象を与えるのか



図1 エージェントとの触れる前インタラクションの様子

2. 関連研究

エドワード・T・ホールは、人が他人に近づかれると不快に感じる空間や距離の関係を分類した[11]。対人距離に関する研究はVR空間で活動するエージェントの振る舞いや[8, 9]、物理空間で活動するロボットの振る舞いに多数利用されている[12-15]。また、VR空間と物理空間においてロボット型のエージェントに対する対人距離の違いを検証した研究も行われるなど[10]、対人距離の理解は物理・VR空間を問わず人とインタラクションを行うエージェントの動作設計に利用されている。特に、人とエージェントの対話インタラクションを成立させるには、お互いの位置関係や近づき方が重要であるため[16, 17]、対人距離の理解は対話前インタラクションにおいて重要な役割を担っている。

†1 ATR

†2 同志社大学

†3 慶応義塾大学

†4 筑波大学

†5 国立研究開発法人科学技術振興機構、さがけ

物理空間で人と関わりあうロボットは、その身体性を生かして人との接触を伴うインタラクションにも利用されつつある。過去の研究では、人とロボットの触れ合いインタラクションが様々な良い効果をもたらすことが報告されている[18-23]。一方、それらはいずれも触れた後の状況に着目したものであった。つまり、対話前インタラクションにおける対人距離のように、触れる前インタラクションにおける対接触前距離に着目した研究はさほど行われていない。

過去に我々は、物理空間において人・人間および人・ロボット間における対接触前距離の計測と、ロボットへの応用に関する研究に取り組んだ[6]。しかし、物理空間で計測した対接触前距離がそのまま VR 空間で活動するエージェントに利用可能であるかは明らかではない。そこで本研究では、VR 空間における対接触前距離を計測し、エージェントとの触れる前インタラクションへの応用を試みる。

3. エージェントに対する対接触前距離の測定

本章では、VR 空間上での触れる前インタラクションに関する、対接触前距離のデータ収集について説明する。

3.1 データ収集概要

本データ収集では、人が VR 空間上でエージェントから顔に向かって手を近づけられた時に、どの程度の距離で不快感を受け始めるのかを測定する。距離の測定方法は、対人距離計測に最も多く利用されている停止距離法[12-15, 24, 25]を基に設計した。エージェントがその手を被験者の顔に徐々に近づけ、被験者が不快だと感じた際の距離を計測した。なお、VR 空間上の対接触前距離は、本研究においては、エージェントの右手中指の付け根と、ユーザの視点（ヘッドマウントディスプレイの座標）との距離として定義した。

人に触れるエージェントの性別がもたらす影響も検証するため、男女らしい外見を備えた二種類のエージェントを用いて対接触前距離を計測した。被験者は、18~24 歳の男性 10 名、女性 10 名の合計 20 名であった。

3.2 実験システム

本実験で使用する 3D モデルや空間、エージェントの動作などはユニティ・テクノロジー社が提供するゲーム開発プラットフォームである Unity を用いて作成した。また、近づいてくる手の停止操作や対人距離の測定、ヘッドマウントディスプレイとの連携なども Unity で実装した。



図 2 実験の風景



図 3 エージェントの外見

3.2.1 実験環境

VR 環境の構築には Oculus 社が開発・販売しているパナソニック向けヘッドマウントディスプレイの Oculus Rift を用いた。Unity との連携により、ヘッドマウントディスプレイの位置や向きが VR 空間に反映され、自分がその空間にいるかのように感じることができる。

実験は被験者が椅子に座った状態でヘッドマウントディスプレイを装着し、コントローラーを握った状態で行われた(図 2)。データ収集において、自身の顔に近づいてくるエージェントの手を停止するための操作には、Microsoft 社が販売する家庭用ゲーム機 Xbox 用のコントローラーを用いた。被験者は任意のタイミングでボタンを押すことが可能であり、そのタイミングで対接触前距離を計測した。

3.2.2 エージェント

対接触前距離を測るためのエージェントとして、Unity asset で購入可能な、アニメ調の男女の 3D モデルを用いた(図 3)。両エージェントは同様の関節部位を備えており、データ収集において必要となる、人の顔に触れる動作を行うことが可能である。



図 4 接近する手

3.2.3 接触動作

データ収集のための接触動作として、椅子に座った状態の被験者に対し、VR 空間上で立ったエージェントが右手を近づける動作を実装した(図 4)。手を近づける角度は、被験者の顔正面方向に対して縦方向が-45 度から 45 度までを 5 度刻みで 19 通り、横方向が-30 度から 30 度までを 5 度刻みの 13 通りで、合計 247 通りの角度からランダムな順番で設定した。

エージェントの手は全ての角度において被験者の顔から 70cm 離れたところに現れ、5 秒間で顔に到達する速さで接近するように調整した。エージェントの立ち位置は、手の表示角度に応じて変化し、エージェントは手のひらを常に被験者に向けたまま手を移動させる。その際、エージェントの手のひらが最も被験者の顔部分に近くなるよう、角度を調整しつつ触れる動作を行うように設計した。エージェントの出現や接近、停止タイミングは、被験者のコントローラーによるボタン操作で自動的に切り替わるように設定した。

3.3 実験手順

被験者は実験参加に関する同意書に記入した後、ヘッドマウントディスプレイの装着・調整を行い、実験の説明を受けた。実験開始後、被験者がコントローラーのボタンを押すと、エージェントが右手を出して停止した状態で表示される。被験者は手の位置を確認した後、任意のタイミングでボタンを押してエージェントの動作を開始させることが可能である。被験者が不快と感じ始めた距離でもう一度ボタンを押すことで、エージェントの手を停止させることが可能であり、システムはその時点での距離を計測した。これらの計測手順を全ての対象角度に対して行った後、3分程度の小休止を挟み、エージェントのモデルを切り替えて再度計測を行った。

4. 接触動作に対する対人距離データ分析

本章では、VR空間上で計測した対接触前距離データの処理方法とデータ分析結果を示す。その結果をもとに、VR空間上のエージェントが顔に手を近づけられた時に反応すべき距離の基準を決定する。

4.1 データ処理

被験者がコントローラー操作によって、近づいてくるエージェントの手を停止した時、被験者の視点の座標とエージェントの右手中指の付け根部分との距離を計測し、角度情報やエージェントの性別情報などと共に記録した。被験者がボタンを連打するなど、操作ミスによって意図しない距離でエージェントの手を停止させた試行については、分析の対象外とした。

4.2 分析結果

4.2.1 データ概観

取得したデータにおいて分析対象となったデータ点数は、10名の男性被験者で4934点（男性型エージェント：2467点、女性型エージェント：2467点）、10名の女性被験者で4918点（男性型エージェント：2457点、女性型エージェント：2461点）であった。全20名の被験者における平均対接触前は17.93cm（標準誤差1.98cm）であった。なお、過去に実施した物理空間での人同士の計測による対接触前距離の平均は、約20cmであった [6]。

当該研究では、対接触前距離の分析において、被験者の性別や触れようとする際の角度、触れる動作の速度や慣れなどの影響が検証されていた [6]。そこで本データ分析においても、まず性別と角度に関する分析、慣れを考慮して対接触前距離に関する傾向分析を行う。なお、本データ収集においてエージェントの触れる動作の速度は一定としたため、速度に関する分析は行わないものとする。

4.2.2 性別および角度の影響検証

収集したデータに対して、被験者の性別（男性・女性）、エージェントの性別（男性・女性）、上下方向（被験者の顔正面を含む上方向・下方向）、および左右方向（被験者の顔

正面を含む左方向・右方向）を考慮した4要因分散分析を行った。その結果を、表1に示す。この分析においては、上下方向要因と左右方向要因の主効果、および上下方向要因とエージェントの性別要因の交互作用において有意な差がみられた（図5、図6）。なお左右方向要因に関しては、左側から触れるほうが右側から触れる場合よりも有意に大きな距離を示すことが明らかになった（右側：17.4cm、左側：18.4cm）。この理由として、被験者の視界に提示されるエージェントの身体の割合の違いが影響したと考えられる。左側から触れる場合にはエージェントの身体が被験者の正面方向に存在するが（図4）、右側から触れる場合はその身体が視界外となる場合が多くなっており、提示される視覚刺激の違いが影響を及ぼした可能性がある。

上下方向要因とエージェントの性別要因の交互作用に関して、Bonferroni法による多重比較を行った結果、エージェントの性別が男性の場合に、下側から触れるほうが上側から触れる場合よりも有意に大きな距離を示すことが明らかになった（ $p=0.010$ 、上側：16.8cm、下側：19.3cm）。

これらの結果から、触れる方向、およびエージェントの性別との組み合わせが対接触前距離に影響を及ぼすことが示された。一方、絶対値としての差は1cm~2.5cm程度であることも明らかになった。

表1 分析結果（ $p<.05$ を太字で表示）

| 要因 | p 値 | 要因 | p 値 |
|---------------|--------------|--------------|-------|
| 被験者性別 (PG) | 0.536 | AG * LR | 0.758 |
| Agent 性別 (AG) | 0.785 | TB * LR | 0.910 |
| 上下 (HL) | 0.024 | PG * AG * HL | 0.968 |
| 左右 (LR) | 0.019 | PG * AG * LR | 0.957 |
| PG * AG | 0.186 | PG * HL * LR | 0.156 |
| PG * HL | 0.182 | AG * HL * LR | 0.469 |
| PG * LR | 0.888 | PG*AG*HL*LR | 0.917 |
| AG * HL | 0.010 | | |

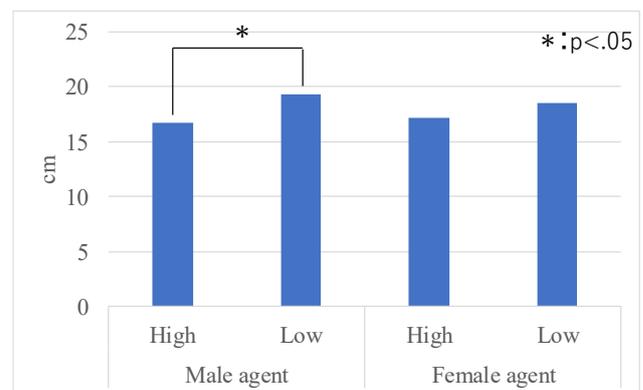


図5 上下方向および性別要因による対接触前距離の変化

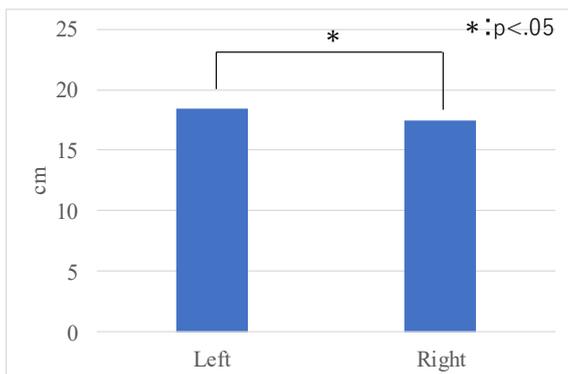
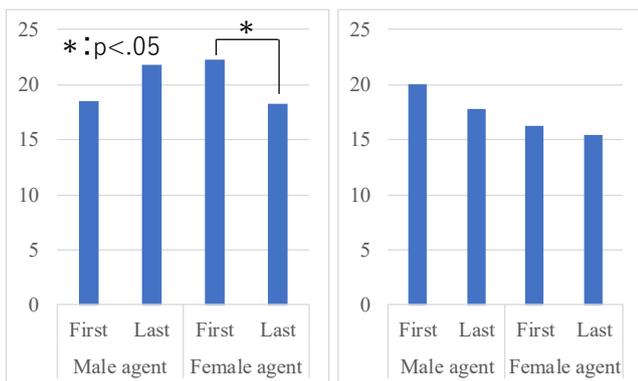


図 6 左右方向要因がもたらす対接触前距離の変化

表 2 分析結果 ($p < .05$ を太字で表示)

| 要因 | p 値 | Source | p 値 |
|---------------|-------|--------------------|--------------|
| 被験者性別 (PG) | 0.486 | PG * T | 0.644 |
| Agent 性別 (AG) | 0.104 | AG * T | 0.166 |
| 時間経過 (T) | 0.449 | PG * AG * T | 0.043 |
| PG * AG | 0.066 | | |



(a) 男性被験者

(b) 女性被験者

図 7 慣れがもたらす対接触前距離の変化

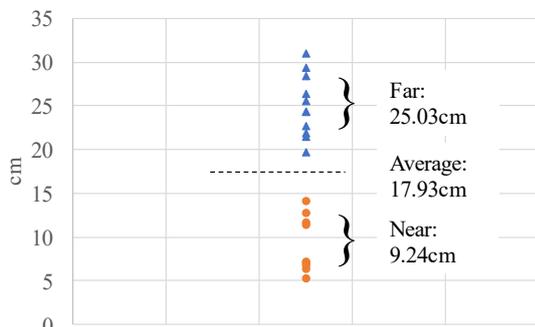


図 8 平均対接触前距離のクラスタリング結果

4.2.3 慣れの影響検証

慣れの影響を検証するため、被験者の性別(男性・女性)、エージェントの性別(男性・女性)、およびデータ収集における時間経過(最初の10回・最後の10回)を考慮した3

要因分析を行った。その結果を、表2に示す。この分析においては、被験者性別要因、エージェント性別要因、および時間経過要因の交互作用においてのみ有意な差がみられた(図7)。

Bonferroni法による多重比較を行った結果、被験者の性別が男性で、エージェントの性別が女性の場合に、最初の10回のほうが最後の10回よりも有意に大きな距離を示すことが明らかになった($p = .028$, 最初の10回: 22.3 cm, 最後の10回: 18 cm)。

4.3 対接触前距離に関する傾向の分析

各被験者の平均対接触前距離は、全員の平均である17.93 cmを境に、二つのグループへと分離していることが示唆された(図8)。そこで、これらのデータが平均未満・以上の2種類のクラスタに分類できると仮定し、クラスタ数2のk-means法によるクラスタリングを行ったところ、平均未満・以上のグループで属するクラスタが異なる結果となった。なお、平均未満・以上のグループに属する人々の平均対接触前距離はそれぞれ9.24 cmと25.03 cmとなった。

これらの結果は、人間が好む対接触前距離は必ずしも一様ではないことを示唆していると考えられる。そこで本研究では、全員平均を含む各グループの平均対接触前距離を用いてエージェントが人からの接触到反応した場合に、どのような印象の違いをもたらすかの検証を行うこととした。

5. 接触動作に対するエージェントの反応動作構築と評価実験

5.1 仮説

人とロボットの対接触前距離を扱った研究では、物理空間において人がロボットに触れようとしている状況で、ロボットが人の平均対接触前距離を用いて反応させることでより自然な印象を与えることが報告された[6]。しかし、VR空間におけるエージェントに対しても同様に人から収集した対接触前距離が有効であるかは明らかではない。

収集したデータの分析結果から、全員の平均距離を閾値として2つの異なる対接触前距離群(Near/Far)が存在することが示唆された。エージェントがこれら人から収集したデータに基づく対接触前距離を用いて人からの接触に対する反応動作を行う場合、対人距離と同様に、より近い距離までの接近を許容することで、エージェントに対してより良い印象を与えたり、エージェントが自身に対してより良い印象を持っていると感じさせたりすることが期待できる。また、エージェントの対接触前距離が、触れようとする人自身の好む対接触前距離と同じ場合に、そのエージェントをより好むことも期待できる。これらの考察を踏まえ、以下の仮説を検証する。

仮説 1: エージェントの対接触前距離が近いほど、エージェントに対して親しみやすい印象を感じる。

仮説 2: エージェントの対接触前距離が近いほど、エー

エージェントが自分に親しみやすい印象を持っていると感じる。

仮説 3 : 自分が属する対接触前距離群の平均値で反応するエージェントを、他の対接触前距離で反応するエージェントより好む。

5.2 実験条件

本実験では、被験者内要因である対接触前距離条件 (3 要因) とエージェント性別要因 (2 要因 : 男性・女性)、および被験者間要因である被験者性別要因 (2 要因 : 男性・女性) と被験者の対接触前距離群 (2 要因 : Near/Far) の、4 要因による比較実験を行う。以下に、対接触前距離条件における各要因の詳細を示す。

Near 条件 : バーチャルエージェントの対接触前距離として、データ収集を行った被験者のうち Near 群の平均値である 9.24cm を用いる。

Average 条件 : バーチャルエージェントの対接触前距離として、データ収集を行った被験者全員の平均値である 17.93cm を用いる。

Far 条件 : バーチャルエージェントの対接触前距離として、データ収集を行った被験者のうち Far 群の平均値である 25.03cm を用いる。

5.3 実験システム

これらの仮説を検証するため、本実験においても VR 空間内での被験者実験を行う。VR 空間の構築には、3 章で実施したデータ収集実験と同様のシステムを用いる。

本実験では、被験者がエージェントの顔に手を近づける動作を伴う。そこで、被験者の右手にワイヤレスコントローラーを装着し、物理空間における被験者の手の位置が、VR 空間上に反映されるよう設定した。この際、被験者および被験者のアバターは立位状態とし、触れられるエージェントは着座状態とした。

5.4 被験者

本実験には、18~24 歳の男女 28 名 (男性 : 14 名, 女性 : 14 名) が参加した。

5.5 実験手順

被験者は実験参加に関する同意書に記入した後、ヘッドマウントディスプレイの装着・調整を行い、実験の説明を受けた。まず、被験者の対接触前距離を簡易的に計測するため、4 章に記載したデータ収集を簡易版のプロセスによって実行した。具体的には、エージェントが手を近づける角度の解像度を 5 度単位から 15 度単位へと変更し、合計 35 通りの角度で対接触前距離を計測した。

データ収集後、実験を開始した。実験では、VR 空間には座席に座った男性または女性のエージェントが存在しており、被験者は任意のタイミングで右手をエージェントの顔へと近づけることが出来る。エージェントは顔から一定の距離範囲内に被験者の手が近づくと被験者の顔を見る反応を示し、その動作は落ち着かない感じや不快感を示すものであることを説明したうえで、その反応が見られた時点

で手を近づける動作を止めるように依頼した。

各条件において、エージェントが被験者の顔に反応する距離は 5.2 節に示された条件に基づいて決定された。被験者は異なる角度から合計 9 回 (高さ方向 : 上, 正面, 下, 横方向 : 右, 正面, 左の組み合わせ)、自身の手をエージェントの顔に近づけ、その反応を観察した。その後、被験者はヘッドマウントディスプレイを外してアンケートに答えた。アンケート項目の詳細は、次節に記載する。この手順を全ての対接触前距離条件に対して行った後、小休止を挟み、エージェントの外見を変更して再度計測を行った。

5.6 評価項目

エージェントに対する被験者の **Likeability : Godspeed [26]** の Likeability 項目を用いて、被験者がエージェントに対して感じる好意、親しみやすさ、親切さなどを評価するように依頼した。各項目は 7 段階評価のアンケートによって調査した。

エージェントの、被験者に対する **Likeability : Godspeed** の Likeability 項目を参考に、エージェントが被験者に対して感じている好意、親しみやすさ、親切さなどを推定する項目を用意し、それらを実験するよう依頼した。各項目は 7 段階評価のアンケートによって調査した。

対接触前距離の一致 : 実験終了後、Near/Average/Far 条件のうちどの条件が最も好みであったかの聞き取り調査を行い、簡易データ収集を通じて得られた被験者の対接触前距離群 (Near/Far) と一致する割合を計測した。

6. 実験結果

実験前に実施したデータ収集の分析を行った結果、Near 群は 14 名 (男女 7 名ずつ)、Far 群は 14 名 (男女 7 名ずつ) であった。以下に、分析結果の詳細を示す。

6.1 仮説 1 の検証結果

エージェントに対する被験者の Likeability に関するアンケート結果に対して、4 要因 (エージェントの対接触前距離 (AD)、被験者の対接触前距離群 (PD)、エージェント性別 (AG)、被験者性別 (PG)) の混合分散分析を行った (表 3)。その結果、エージェントの対接触前距離要因にのみ有意な差がみられた。

エージェントの対接触前距離に関する多重比較を行った結果 (図 9)、Near 条件が Far 条件の間に有意傾向が ($p=0.083$)、および Average 条件が Far 条件よりも有意に値が高いこと (Average>Far: $p=0.012$) が示された。Near 条件と Average 条件に、有意な差は無かった ($p=1.000$)。すなわち、仮説 1 が部分的に支持された。

6.2 仮説 2 の検証結果

エージェントの、被験者に対する Likeability に関するアンケート結果に対して、4 要因 (エージェントの対接触前距離 (AD)、被験者の対接触前距離群 (PD)、エージェント性別 (AG)、被験者性別 (PG)) の混合分散分析を行った (表

3). その結果, エージェントに対する被験者の Likeability と同様に, エージェントの対接触前距離要因にのみ有意な差がみられた.

エージェントの対接触前距離に関する多重比較を行った結果 (図 10), Near 条件が Far 条件よりも有意に値が高いこと (Near>Far: $p=0.001$), Near 条件が Average 条件よりも有意に値が高いこと (Near>Average: $p=0.002$), Average 条件が Far 条件よりも有意に値が高いこと (Average>Far: $p=0.001$) が示された. すなわち, 仮説 2 が支持された.

6.3 仮説 3 の検証結果

被験者の対接触前距離群と, 各被験者が最も好んだエージェントの対接触前距離が一致した・しなかった割合を, 表 5 に示す. カイ二乗検定を行った結果, 有意な差が得られた ($\chi^2(2)= 7.057, p=0.029$). 残差分析の結果, Short 群は Far 群に比べて Short 条件を有意に好むことが示された. Far 群が Short 群に比べて Far 条件を好む数には有意傾向が示された (図 11). すなわち, 仮説 3 は部分的に支持された.

表 3 エージェントに対する被験者の Likeability ($p<0.05$ を太字で表示)

| 要因 | p 値 | Source | p 値 |
|-----------|--------------|--------------|-------|
| AD | 0.014 | PD * PG | 0.729 |
| PD | 0.773 | AG * PG | 0.715 |
| AG | 0.866 | AD * PD * AG | 0.706 |
| PG | 0.878 | AD * PD * PG | 0.816 |
| AD * PD | 0.247 | AD * AG * PG | 0.962 |
| AD * AG | 0.061 | PD * AG * PG | 0.484 |
| AD * PG | 0.971 | AD*PD*AG*PG | 0.345 |
| PD * AG | 0.316 | | |

表 4 エージェントの, 被験者に対する Likeability ($p<0.05$ を太字で表示)

| 要因 | p 値 | Source | p 値 |
|-----------|--------------|--------------|-------|
| AD | 0.001 | PD * PG | 0.984 |
| PD | 0.407 | AG * PG | 0.194 |
| AG | 0.461 | AD * PD * AG | 0.671 |
| PG | 0.954 | AD * PD * PG | 0.625 |
| AD * PD | 0.707 | AD * AG * PG | 0.212 |
| AD * AG | 0.216 | PD * AG * PG | 0.401 |
| AD * PG | 0.630 | AD*PD*AG*PG | 0.287 |
| PD * AG | 0.791 | | |

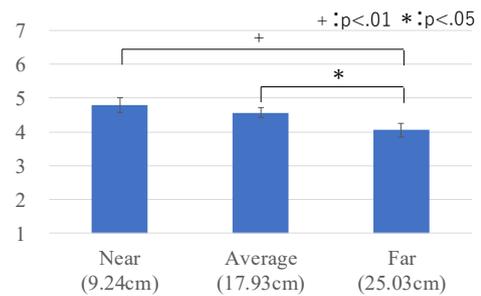


図 9 エージェントに対する被験者の Likeability に関する, エージェントの対接触前距離要因での分類結果

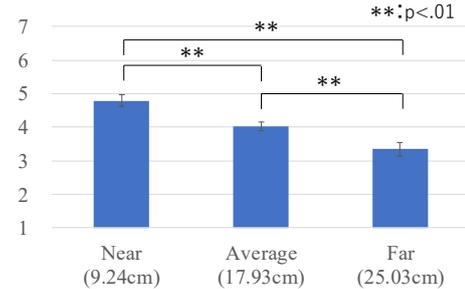


図 10 エージェントの被験者に対する Likeability に関する, エージェントの対接触前距離要因での分類結果

表 5 被験者の対接触前距離と好み (*: $p<0.05$, +: $p<0.10$)

| | | 好みの対接触前距離 | | |
|------|------|-----------|---------|-----|
| | | Near | Average | Far |
| 被験者群 | Near | 5* | 7 | 2+ |
| | Far | 0* | 8 | 6+ |

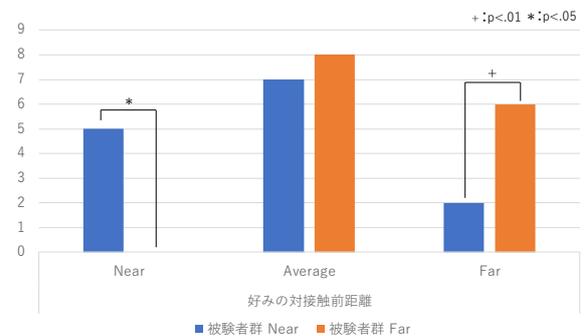


図 11 被験者の対接触前距離と好みに関する結果

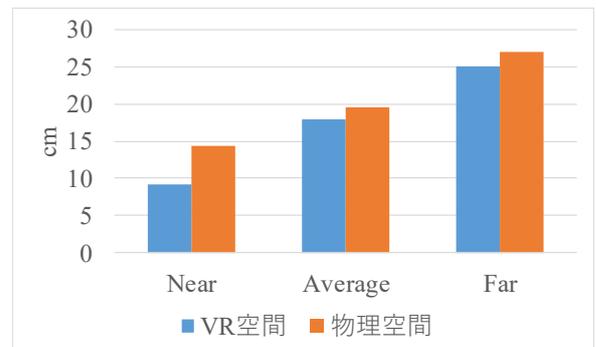


図 12 VR 空間及び物理空間での対接触前距離

7. 考察

7.1 VR空間での触れる前インタラクションから物理空間での触れる前インタラクションへの応用

本研究を通じて行ったVR空間でのデータ収集結果は、物理空間で行ったデータ収集の結果と若干の違いはあるものの、おおよそ類似した傾向が得られることが明らかになった。今回は顔周辺の対接触前距離に関するデータのみを扱ったが、今後全身の各部位に対する対接触前距離の収集・比較を行うことで、VR空間と物理空間での触れる前インタラクションに関する認知がどのように異なるかをより詳細に検証することが可能となる。

仮にVR空間で得られた対接触前距離に一定の係数を加えることで物理空間の対接触前距離を近似することが出来れば、物理空間では（倫理的な観点を含めて）計測が困難な身体部位への対接触前距離を、VR空間で計測した情報を用いて近似できる可能性がある。またVR空間では、人に対して触れようとするエージェントの外見や腕の軌跡、速度などの特徴を統制して検証することも物理空間でのデータ収集に比べて容易であるため、より多様な状況を考慮した対接触前距離のモデルを構築することも可能になると期待できる。

7.2 物理空間における対接触前距離の分布

過去に我々が実施した物理空間における対接触前距離に関する研究では、全体の平均に関する分析は行っていたが、Near/Far群への分類は行われていなかった。そこで、過去に収集したデータに対して同様の分析を行ったところ、平均未満・以上のグループで属するクラスが異なる結果となった（Near: 約 14 cm, Average: 約 20 cm, Far: 約 27 cm）。

VR空間と物理空間で計測した対接触前距離を図 12 に示す。

物理空間における対接触前距離は、本データ収集を通じて計測されたVR空間での対接触前距離に比べて、若干大きな値となっている。また、AverageおよびFarの距離は物理空間のほうがVR空間に比べてそれぞれ2cmほど大きい値となっているが、Near群ではその差が約5cmとなった。この差異が起きた理由がHMDの視野によるものなのか、環境の違いによるものかを明らかにするためには、さらなる調査が必要になる。

一方でこれらの結果は、VR空間と物理空間での対接触前距離に対する異なる認知、および共通する認知が混在していることを示しているとも考える。すなわち、顔に近い距離ではVR空間と物理空間での対接触前距離に対する認知の違いがより大きくなることが示された。一方、距離が離れるほど対接触前距離の傾向が類似することや、被験者群の対接触前距離の分布が平均未満・以上でクラスタリングできるなど、共通する認知の傾向も同時に示された。今後、同一被験者による物理空間およびVR空間での対接触前距離の計測結果を比較することで、より詳細な認知の違

いを計測することが可能になると考える。

7.3 触れる前インタラクションにおける、対接触前距離の違いによる親密度の表出への応用

本実験を通じて、近い対接触前距離で反応するエージェントのほうが、より親しみやすい印象を与えることが示された。これまで、ロボットやエージェントとの長期的なインタラクションを通じて関係性を構築することを想定した研究では、親しみを表出するために対話内容やその振る舞いを徐々に変更させる取り組みがなされてきた[27-29]。そのような親密度を表出するための振る舞いの一環として、対接触前距離を徐々に近くして親しみのある関係性を表出させる、といった応用が期待できる。

7.4 対接触前距離における性別の影響

4章で行った分析では、被験者およびエージェントの性別の違いによる違いも明らかになった。特に慣れに関する変化においては、被験者の性別によって異なる傾向が示された。変化した距離の絶対値という観点では数cmの差ではあるが、このような慣れと性別の関係がもたらす対接触前距離の変化を考慮してエージェントが振る舞うことで、より親しみのある関係性の構築に貢献できると考える。

7.5 知見の適用限界

本実験で得られた知見には、いくつかの適用限界が存在する。まず、本研究では比較的若い被験者によるデータ収集および検証実験を行ったが、子どもや高齢者などの年齢及び体格の違いによって対接触前距離が異なる可能性がある。また、本研究では、対接触前距離のクラス数を簡易的に平均未満・以上の2種類と仮定して分類を行ったが、より細かい数を考慮したクラスタリングを行うことでさらなる分類も可能になる。

データ収集及び実験ではアニメ調の外見を持つエージェントを用いたが、上記と同様に触れようとするエージェントの外見や年齢、体格、社会的な印象（好意や嫌悪感）によっても好ましい対接触前距離が変化する可能性がある。そのため、本研究で得られた知見をエージェントの触れる前インタラクションに利用する場合には、特にエージェントの外見の違いによる影響を考慮する必要がある。

8. おわりに

本研究では、VR空間における人とエージェントの自然な触れる前インタラクション実現に向けて、まず対接触前距離に関するデータ収集を行った。エージェントの手が自身の顔に触れようと近づいてくる状況で不快な印象を感じ始める距離を様々な角度において収集し、エージェントの外見や触れようとする角度によってその距離が変化すること、および物理空間で計測された対接触前距離と類似した値が得られること、さらには対接触前距離がNear/Far群の二種類に分類出来ることを明らかにした。

次に、VR空間におけるエージェントとの触れる前イン

タラクションに対して、対接触前距離の変化がどのような印象を人にもたらしているのかを検証する実験を行った。実験の結果、平均的な対接触前距離で反応するエージェントは、遠い対接触前距離で反応するエージェントよりも親しみやすい印象を与えること、および対接触前距離が近いほどエージェントから人に対する親しみやすさの印象を増加させることが明らかになった。また、対接触前距離が近い人ほど、対接触前距離が遠い人比べて、対接触前距離が近いエージェントを好むことも示された。

謝辞 本研究の一部は JST ERATO 石黒共生ヒューマンロボットインタラクションプロジェクト (グラント番号: JPMJER1401), および JST, CREST, JPMJCR18A1 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1]G. Huisman, "Social Touch Technology: A Survey of Haptic Technology for Social Touch," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 3, pp. 391-408, 2017.
- [2]J. B. F. van Erp, and A. Toet, "Social Touch in Human-Computer Interaction," *Frontiers in Digital Humanities*, vol. 2, no. 2, pp. 2, 2015.
- [3]J. N. Bailenson, and N. Yee, "Virtual interpersonal touch: Haptic interaction and copresence in collaborative virtual environments," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 5-14, 2008.
- [4]G. Huisman, M. et al., "Touching virtual agents: embodiment and mind," in *International Summer Workshop on Multimodal Interfaces*, pp. 114-138, 2013.
- [5]M. Shiomi, and N. Hagita, "Audio-Visual Stimuli Change not Only Robot's Hug Impressions but Also Its Stress-Buffering Effects," *International Journal of Social Robotics*, pp. 1-8, 2019.
- [6]M. Shiomi, K. Shatani, T. Minato, and H. Ishiguro, "How should a Robot React before People's Touch?: Modeling a Pre-Touch Reaction Distance for a Robot's Face," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 3773-3780, 2018.
- [7]杉森健ら, "物体とのインタラクション時に体の硬さを自在に変えられる VTuber アバター," *情報処理学会 インタラクション 2019*, pp. 843-845, 2018.
- [8]F. A. Sanz, A.-H. Olivier, G. Bruder, J. Pettré, and A. Lécuyer, "Virtual proxemics: Locomotion in the presence of obstacles in large immersive projection environments," in *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 75-80, 2015.
- [9]M. Lee, G. Bruder, T. Höllerer, G. J. I. t. o. v. Welch, and c. graphics, "Effects of unaugmented periphery and vibrotactile feedback on proxemics with virtual humans in AR," vol. 24, no. 4, pp. 1525-1534, 2018.
- [10]R. Li, M. van Almkkerk, S. van Waveren, E. Carter, and I. Leite, "Comparing human-robot proxemics between virtual reality and the real world," in *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 431-439, 2019.
- [11]エドワード・ホール, 訳: 日高敏隆, 佐藤信行, "かくれた次元," みすず書房, 1970.
- [12]L. Takayama, and C. Pantofaru, "Influences on proxemic behaviors in human-robot interaction," in *Intelligent robots and systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ international conference on*, pp. 5495-5502, 2009.
- [13]J. Mumm, and B. Mutlu, "Human-robot proxemics: physical and psychological distancing in human-robot interaction," in *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction*, pp. 331-338, 2011.
- [14]M. Obaid, E. B. Sandoval, J. Zlotowski, E. Moltchanova, C. A. Basedow, and C. Bartneck, "Stop! That is close enough. How body postures influence human-robot proximity," in *Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2016 25th IEEE International Symposium on*, pp. 354-361, 2016.
- [15]S. Rossi, M. Staffa, L. Bove, R. Capasso, and G. Ercolano, "User's Personality and Activity Influence on HRI Comfortable Distances," in *International Conference on Social Robotics*, pp. 167-177, 2017.
- [16]S. Satake, T. Kanda, D. F. Glas, M. Imai, H. Ishiguro, and N. Hagita, "A robot that approaches pedestrians," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 29, no. 2, pp. 508-524, 2013.
- [17]C. Shi, M. Shiomi, T. Kanda, H. Ishiguro, and N. Hagita, "Measuring Communication Participation to Initiate Conversation in Human-Robot Interaction," *International Journal of Social Robotics*, vol. 7, no. 5, pp. 889-910, 2015.
- [18]T. Hirano, M. Shiomi, T. Iio, M. Kimoto, I. Tanev, K. Shimohara, and N. Hagita, "How Do Communication Cues Change Impressions of Human-Robot Touch Interaction?," *International Journal of Social Robotics*, vol. 10, no. 1, pp. 21-31, 2018.
- [19]T. L. Chen, C.-H. A. King, A. L. Thomaz, and C. C. Kemp, "An Investigation of Responses to Robot-Initiated Touch in a Nursing Context," *International Journal of Social Robotics*, vol. 6, no. 1, pp. 141-161, 2013.
- [20]T. L. Chen, T. Bhattacharjee, J. M. Beer, L. H. Ting, M. E. Hackney, W. A. Rogers, and C. C. Kemp, "Older adults' acceptance of a robot for partner dance-based exercise," *PLoS ONE*, vol. 12, no. 10, pp. e0182736, 2017.
- [21]T. L. Chen, T. Bhattacharjee, J. L. McKay, J. E. Borinski, M. E. Hackney, L. H. Ting, and C. C. Kemp, "Evaluation by expert dancers of a robot that performs partnered stepping via haptic interaction," *PLoS ONE*, vol. 10, no. 5, pp. e0125179, 2015.
- [22]K. Kosuge, T. Hayashi, Y. Hirata, and R. Tobiyaama, "Dance partner robot-ms dancer," in *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3459-3464, 2003.
- [23]K. Funakoshi, et al., "Smoothing human-robot speech interactions by using a blinking-light as subtle expression," in *Proceedings of the 10th international conference on Multimodal interfaces*, pp. 293-296, 2008.
- [24]Y. H. a. A. Ito, "Influence of the Size Factor of a Mobile Robot Moving Toward a Human on Subjective Acceptable Distance,," *Mobile Robots - Current Trends, Zoran Gacovski (Ed.),*, 2011.
- [25]Y. Kim, S. S. Kwak, and M.-s. Kim, "Am I acceptable to you? Effect of a robot's verbal language forms on people's social distance from robots," *Computers in Human Behavior*, vol. 29, no. 3, pp. 1091-1101, 2013.
- [26]C. Bartneck, D. Kulić, E. Croft, and S. Zoghbi, "Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots," *International Journal of Social Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 71-81, 2009.
- [27]T. Kanda, M. Shiomi, Z. Miyashita, H. Ishiguro, and N. Hagita, "A communication robot in a shopping mall," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 5, pp. 897-913, 2010.
- [28]T. Bickmore, D. Schulman, and L. J. A. A. I. Yin, "Maintaining engagement in long-term interventions with relational agents," vol. 24, no. 6, pp. 648-666, 2010.
- [29]T. Iio, et al., "Human-Like Guide Robot that Proactively Explains Exhibits," *International Journal of Social Robotics*, 2019.