

遠隔操作ロボットの自律的な注視行動による現場に関する環境認知と意図推定の促進

静岡大学 情報学部

竹内 勇剛

1. はじめに

インターネット技術の発展や COVID-19 の影響によって、遠隔地間コミュニケーションシステムの利用機会が多くなってきている。しかし、これらを使った会話ではインターネットを介して必要な情報のみを送受信しているため、実際に対面して行うコミュニケーションと比べて表現できる情報が少なく、臨場感が失われていることは明らかである。図 1 のように操作する人物（本稿では「RO(Remote Operator)」「LW(Local Worker)」「ROR(Remote Operated Robot)」と呼称する）による入力を遠隔地にあるロボットに適用することで、ROR を RO のアバターとして扱うことができ、これはテレプレゼンスアバターロボットと呼ばれる。テレプレゼンスアバターロボットによって生成される臨場感は、RO の感じる没入感と LW の感じる存在感の両方を指す。このうち前者の RO の感じる没入感とは、RO が遠隔地（LW と ROR の存在する空間）にまるでいるかのように覚える感覚を指し、この感覚を生成するためには RO が対面と同様の円滑なコミュニケーションを LW と行う必要がある。しかし、テレプレゼンスアバターロボットにおいて互いの環境の違いによって RO が LW と円滑なコミュニケーションを行うことは難しい。

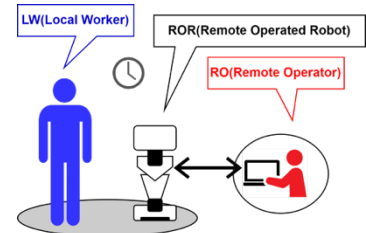


図 1 遠隔共同作業の構造

そこで本研究では視線追従動作による共同注視という人の動作に注目し、これをシステムに自律的に行わせることで、RO に LW が視線を向けている対象を確認させ、LW の願望を認知させるというアプローチを提案する（図 2）。視線追従動作による共同注視とは人が対面でのコミュニケーションにおいて無意識的に行う動作であり、この動作によって他者と同じ対象を注視することで、他者がその対象を注視していることを認識して他者の願望を認知することができる[1][2]。そのため、テレプレゼンスアバターロボットにおいても、同様に視線追従動作を発生させた場合、遠隔地にいるはずの LW の願望を RO が認知するのではないかと予想する。この際、対面において視線追従動作は動作する人物が無意識のうちに発生させるため、テレプレゼンスアバターロボットでは RO の能動的行為とは別に、システムによる自律動作で視線追従動作を実装する。このアプローチであれば、従来の研究のように遠隔会話システムにおける情報伝達の精度を気にせずに RO は LW と環境を共有し、RO と LW の円滑なコミュニケーションが達成されることで、RO が得る没入感の向上が期待される。

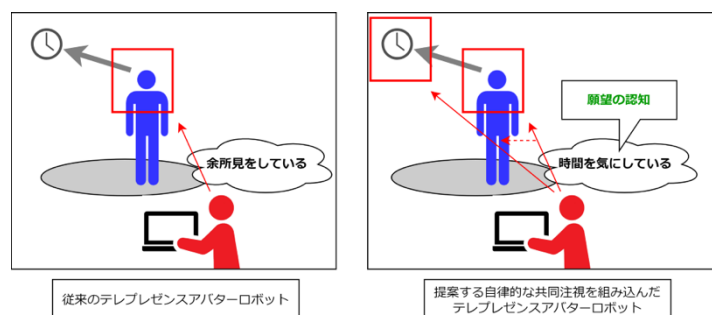


図 2 提案するアプローチ

2. 実験 1: 共同注視が願望の認知に寄与する可能性の検証

2-1 実験目的

システムの自律動作による RO と LW の共同注視が、RO による LW の願望の認知に寄与する可能性を検証するために実験を行う。RO が LW の願望を認知しているのかを直接観測することは難しいため、実験では RO が LW の願望を認知することで LW の意図を推定できるような実験設定を行い、そのうえで RO が LW の意図を推定した振る舞いを行うか観測する必要がある。そのため、LW の意図を推定した RO の振る舞いを観測するうえで、実験設定やそれに伴う実施環境が適切であることを確認するために実験の前に 40 名の大学生、大学院生を対象に予備的な実験を実施する。

実験 1 では LW が「ゴミ箱に対して何らかの関与を持とうとしている」という願望を持っているという設定にする。この願望を RO が認知することで LW の「ゴミ箱へ進行する」という意図を推定し、その進行の邪魔にならないように避ける振る舞いを行うか観測する。

2-2 使用するテレプレゼンスアバターロボット

実験 1 では、ROR として、図 3 に示した temi を採用した。このサイズは幅 35cm、奥行き 45cm、高さ 100cm であり、モニター部分の傾きを上下に動かすことが可能である。また、カメラから目の前の人を認識し、ロボットの足元に装着しているホイールでその人物を自動で追跡することができ、移動することで AI がマップを作成して指定した箇所に自動で移動することも可能である。



図 3 テレプレゼンスアバターロボット temi

2-3 実装するテレプレゼンスアバターロボットの自律動作

実験 1 では、対面における視線追従動作による共同注視と同様の動作を ROR に自律動作として行わせる。そのため、Tomasello(2009)が示した視線追従動作による共同注視の手順を参考にシステムの自律動作を決定する[1]。これに基づく、実験 1 での自律動作は図 4 のように以下の手順で行われる。

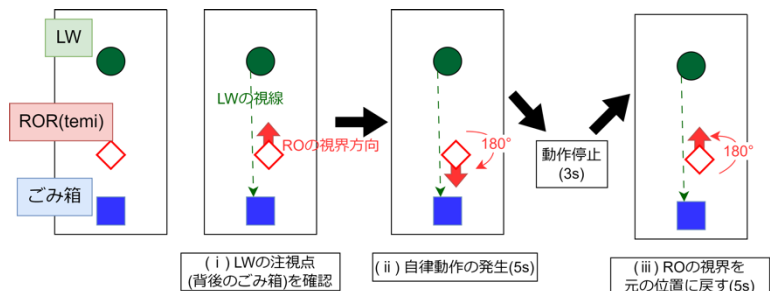


図 4 実験 1 における ROR の自律動作

1. 注視点を定める。

PC から temi に注視点とする場所の座標を送る手順である。ここで使う PC は RO が扱う端末ではなく、自律動作を制御するために利用する別 PC の事を指す。実験 1 では、自律動作を発生させるタイミングで実験者が背後のゴミ箱がある座標を temi に送っている。

2. 注視点に対して ROR のモニターが向くように、胴体部分とモニター部分を動作させる。

1 にて取得した注視点の座標を元に、temi の向きとモニター部分の動作角度を計算する。その後、計算した値の分だけ temi を動作させる。実験 1 では背後のゴミ箱を注視点とし、約 5 秒間かけて 2 を行った後に 3 秒停止させた。これは、振り返った先

の視界を PO に認識させるためである。ゴミ箱の座標は固定で RO の背後にあるため、自律動作では 180° 振り返るように回転した。また、この際に下にあるゴミ箱を注視するためにモニター部分も 5° 下に傾ける動作も行った。なお、この際の経過時間は temi の足場の状況によって動作性に変化が生じるため一定ではない。

3. 2 と逆の動作をし、元の視点へ戻る。

2 の動作に対して逆の動作を行わせることで、temi を 2 の手続きを行う前の状態に戻す。

2-4 実験環境と手続き

実験 1 では、ROR のいる空間と、RO が ROR に設置されたカメラの映像をモニタを介して確認することのできる空間の 2 地点で実施する。ROR のいる空間は図 5 のように外部のオブジェクトを考慮したうえで $4\text{m} \times 2\text{m}$ 程の長方形の広さであり、空間内にはゴミ箱が設置されている。ROR はゴミ箱から 1m 離れた場所に、ゴミ箱に背を向けるようにして配置されている。その後、LW には ROR から 2m 離れた場所に、ROR の正面に相対するようにして立たせる。

LW は ROR に搭載されたカメラを 2 秒注視した後に、ROR の奥にあるゴミ箱への注視を開始する。この時、LW には空き缶を ROR のカメラに映るように持たせている（図 6）。LW の注視後、RO には ROR を自由に操作することを許してある。その際、RO が操作する ROR の前に LW を立たせ、LW は同空間内に配置されているゴミ箱へ注視を行う。そして RO がその注視行為を視認した際に、LW の意図を認知した振る舞いを行うか観測する。具体的には、LW の「ゴミ箱に対して何らかの関与を持とうとしている」という願望を RO が認知し、LW が「ゴミ箱へ進行する」意図を推定したうえで邪魔にならないように、ROR を通して RO が避ける振る舞いを行うかを観測していることになる（視線意図認知課題 A）。なお LW には実験開始前にゴミとして空き缶を持たせており、「ゴミ箱にゴミを捨てたい」という願望を設定してある。

なお実験 1 においては、テレプレゼンスアバターロボットによる自律的な動作の有無に基づく次の 2 条件の比較を行う。

- A) インタラクション中にテレプレゼンスアバターロボットによる自律動作が発生する（自律的に視線追従が行われる）。この条件を「自律動作あり条件」と呼ぶ。
- B) インタラクション中にテレプレゼンスアバターロボットによる自律動作が発生しない。この条件を「自律動作なし条件」と呼ぶ。

2-5 実験 1 の結果と考察

40 名の大学生が、各条件 20 人ずつ実験 1 に参加した。その結果、自律動作あり条件では 11 名、自律動作なし条件では 8 名の実験参加者が LW を避ける振る舞い（LW の願望の実現に協

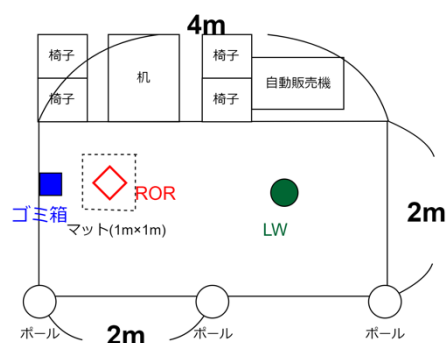


図 5 実験 1 を実施する環境

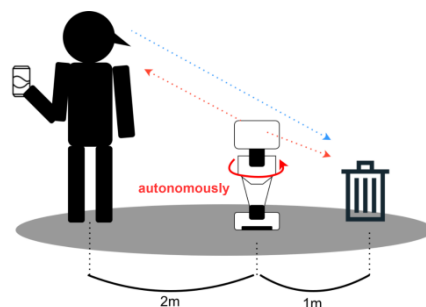


図 6 視線意図認知課題 A

力的な振る舞い)を行っていた。この結果から、各条件における ROR の振る舞いにおいて「避けた」と「避けなかった」人数の割合を示したものが図 7 である。また実験結果のデータに対して、自律動作の有無と避ける振る舞いの発生に関連があるかを確認するために、フィッシャーの正確確率検定を両側検定で行った。その結果、 $p=0.5273$ (*n.s.*) <有意差なし>となった。また、効果量の値については相関関係の一種である ϕ の値を参照したところ $\phi=0.151$ となった。

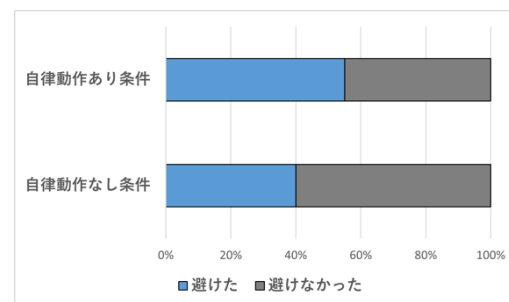


図 7 視線意図認知課題 A の結果

図 7 に示した結果より、自律動作あり条件の RO では全体の 55%が LW を避ける振る舞いをしたことに對して、自律動作なし条件の RO では 40%しか LW を避ける振る舞いをしなかった。本実験において、結果は「避ける振る舞い」か「避けない振る舞い」の 2 つであったため、RO が避ける振る舞いを行うチャンスレベルは 50%である。したがって、自律動作なし条件で RO が避ける振る舞いを行った割合が 40%であったということは、本課題はチャンスレベルよりも 10 ポイント避ける振る舞いが起こりにくい環境であったことになる。これに對して自律動作あり条件では、チャンスレベルよりも 5%避ける振る舞いが増加していた。つまり、自律動作の発生によって自律動作なし条件の結果だけでなく、刺激を与えない自然な状態よりも RO に避ける動作を行わせた可能性を示しており、この結果は ROR の自律動作が RO の行動決定に寄与している可能性を示唆している。すなわち実験 1 において RO が LW を避ける振る舞いを、ROR を通して示したことは、それ以前に与えられていた刺激、すなわち ROR の自律的な視線追従動作が遠隔地間での共同注視を起こし、LW の願望を RO に認知させることで RO に LW の意図を伝達させた可能性を予見させるものと考えられる。

3. 実験 2: 共同注視が遠隔環境への没入感に寄与する可能性の検証

3-1 実験 1 を通して得られた課題点と対策

実験 1 を通して、自律的な視線追従動作による共同注視が RO による LW の願望の認知に寄与した可能性が示されたため、実験環境や実験設定が適切であったことは確認できた。しかし、実験結果からの統計的な有意差はなく、下記の通り、これらの実験環境や実験設定にいくつかの課題点があることも判明した。これらの課題点を踏まえた上で実験 2 を行った。

【課題点】

- ROR のモニター部分の傾きの操作と移動操作が一体になっていた。実験 1 では、自律動作中に ROR を動かすため、RO はその間は操作できない仕様となっていた。これは、RO の意図とシステムの自律動作の衝突による RO の没入感の低下に繋がる可能性がある。本来であれば、ROR の自律動作と、RO によるその動作を受けた際の操作は別に行われるべきであった。
- ROR の操作媒体が手先によるボタン操作であったことが、RO の没入感を低下させた要因として挙げられる。実験 1 では ROR である temi の操作を、「temi center」によるタッチパネルの操作で行った。そのため、指先の操作のみで ROR を動かすことで、そもそもの操作による RO の没入感の低下が発生している可能性がある。身体動作が直接入力となる操作媒体の方が没入感の低下を抑え、RO の LW との共同

注視による願望の認知の発生をより顕著に示す可能性がある。

これら判明した課題点に対して、実験 2 では次のような対策を講じた。

まず、RO が ROR である temi を操作する媒体を「temi center」からヘッドマウントディスプレイ (HMD) とジョイスティックに変更した。これにより、HMD から ROR に装着した 360° カメラの映像をみること、並びにジョイスティックから ROR の移動操作を行うことが可能になったため、視線操作と移動操作を分割して行えるようになり、余分な没入感の低下を抑えることが出来る。また、HMD やジョイスティックによる操作にしたことで、首振りや腕、手の動きといった身体動作が入力となり、RO が直感的に理解しやすい操作方法になった。この点でも没入感の低下を抑制することが期待される。

さらに実験設定としては、LW の願望を「ゴミ箱に対して何らかの関与を持とうとしている」ではなく「ROR の奥に何らかの関与をもとうとしている」に変更した。実験 1 における設定の場合、RO は LW のゴミとゴミ箱の存在から文脈的に LW の願望を認知する可能性がある。本研究においては LW と RO の共同注視によって RO が LW の願望を認知するのか検証したいため、それ以外の要因で RO が LW の願望の認知を行うような実験設定は望ましくない。これを踏まえ、LW の注視先をゴミ箱ではなく何もない空間に変更することで、余計な RO による LW の願望の認知を発生させないようにした。

これらを実現するために、実験 1 で用いた課題に加えて新たな課題（危険反応測定課題）も続けて実施することにした。

3-2 実験目的

実験 2 では、実験 1 と同様に一部を改良した視線意図認知課題 B（後述）を 2 回連続で行ったのちに危険反応測定課題 1 回を行う手順とする。これにより、テレプレゼンスアバターロボットの自律動作による RO と LW の共同注視が、RO による LW の願望の認知に寄与する可能性を検証することを目的とすると同時に、この共同注視が、没入感の向上に寄与する可能性についても同時に検証する。

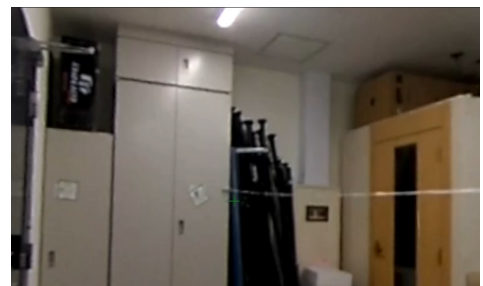


図 8 HMD から 360°観測できる環境

3-3 実験手順

実験 2 における ROR は、実験 1 と同様に「temi」を採用した。これに加えて、実験 2 では HMD とジョイスティックも機器として使用する。HMD は「VIVE Pro 2」を採用し、ジョイスティックは「ロジテック Extreme 3D Pro」を採用する。実験 2 では、ここで示した HMD と 360° カメラを接続し 360° カメラを ROR に設置することで、

ROR から見える風景を RO は首振りによって観測できるように実装した（図 8）。また、ROR の前後左右やその場での回転はジョイスティックにて行うように実装する。

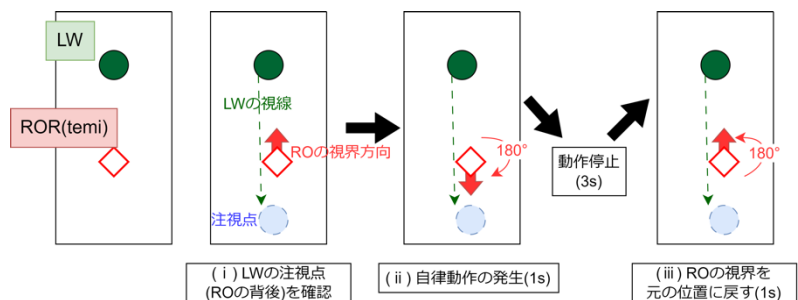


図 9 実験 1 における ROR の自律動作

実験 2 における ROR の自律動作は次に示す通りに実施する（図 9）。

1. 注視点を定める．

PC から ROR に注視点とする場所の座標を送る手順である．実験 2 では，自律動作を発生させるタイミングで，実験者が背後の座標（正面座標から x 軸に 180° 回転させた座標）を ROR へ入力する．

2. 注視点を向くように VR による映像が移動する．

1 で取得した注視点の座標を元に，RO の見ている景色を直接動かした．具体的には，注視点の座標が VR における視界の中心に当たるように，景色を出力しているオブジェクトを回転させる．実験 2 では RO の背後を注視点とし，約 1 秒間かけて 2 を行ったのちに，3 秒画面の動作を停止させた．これは，振り返った先の視界を RO に認識させるためである．注視点は RO の背後であるため， 180° 振り返るように RO の視界を動かす．その後，3 の視界を戻す際も同様に約 1 秒かけて動作する．

3. 2 と逆の動作をし，元の視界へ戻る．

3-4 実験環境と実験条件

実験 2 では，ROR と LW のいる空間と，RO が ROR に設置されたカメラ映像を HMD によって確認することのできる 2 地点間で実施する．実験を行う部屋の内壁やロッカーとテープによる仕切りを空間内に設置することで，ROR と LW のいる実験環境は $5\text{m} \times 1.5\text{m}$ の長方形の広さに限定した（図 10）。

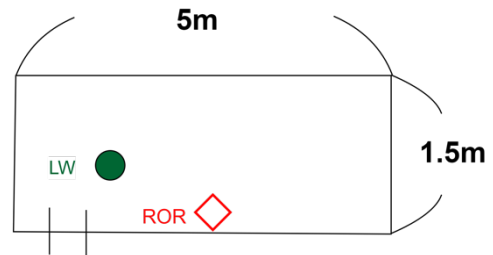


図 10 実験 2 を実施する環境

実験 2 では実験 1 と同様に，テレプレゼンスアバターロボットによる自律的な動作の有無に基づく次の 2 条件の比較を行う．

- A) インタラクション中にテレプレゼンスアバターロボットによる自律動作が発生する（自律的に視線追従が行われる）．この条件を「自律動作あり条件」と呼ぶ．
- B) インタラクション中にテレプレゼンスアバターロボットによる自律動作が発生しない．この条件を「自律動作なし条件」と呼ぶ．

3-5 実験方法

視線意図認知課題 B（後述）では，RO が操作する ROR の前に LW を立たせ，LW は ROR の背後へ注視を行う．RO がその注視行為を視認した際に，LW の「ROR の奥に何らかの関与をもとうとしている」という願望を認知したうえで，「ROR の奥へ進行したい」という意図を推定した振る舞いを行うか観測するものである．危険反応測定課題（後述）では，LW によって ROR に刃物が近づけられることで，本来その場にはいない RO が ROR に対して近づかれた刃物を危険物だと認識し，距離を取るかという点を観測する．なお，視線意図認知課題 B を 2 回行ったのは，危険反応測定課題における没入感の向上効果をより顕著に表すためである．ただし，RO による LW の願望の認知が行われると仮定しているので，多く課題を行うと RO が実験を意識する可能性がある．そのため回数は 2 回に留めている．

【視線意図認知課題 B】

サクラである LW は空間内を動き回りながら、120 秒に 1 回のペースで ROR から約 1m 離れた正面に相対するようにして静止する。その際に、LW は ROR に取り付けられたカメラを 2 秒注視した後に、ROR の背後への注視を開始する。RO の操作する ROR が LW から大きく(約 1m を指標とする)離れるか左右の移動をする、または 15 秒が経過するまで、LW には静止し続けさせその間の RO の振る舞い(実際には ROR の挙動)を観察する(図 11)。なおサクラの LW には、空間内を動き回っている際は ROR になるべく近づかずに「実験環境をチェックする」というカバーストーリーのもと動き回るように指示していた。これは、ROR に近づく際に何度もすれ違う中で RO が「LW が ROR を避ければいい」という思考に至り、実験の結果に影響を与えないようにするためである。

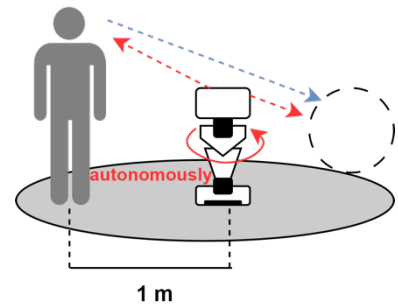


図 11 視線意図認知課題 B

【危険反応測定課題】

RO による LW の願望の認知が行われた際に、LW の願望を認知することで RO の没入感は向上したのか、という点を検証するために危険反応測定課題を行う。テレプレゼンスアバターロボットにおける RO の没入感は、RO が遠隔地の ROR を自分の体のように認識する感覚のことであり、身体所有感と運動主体感(行為主体感)によって得ることができる[3]。これより没入感の向上を検証するためには、RO の遠隔地に対する身体所有感または行動主体感による RO の行動の変化を観測する必要がある。本課題では特に RO の身体所有感に注目し、遠隔地の ROR に対する危険への反応を以降記述する手順によって観測した。RO は自身の身体である感覚(没入感)を強く感じていた場合に、危険を避ける振る舞いを行うと予測する。

実験では視線意図認知課題 B を 2 回行った後に、RO に対して LW が危険性のある物体として刃物を近づけた。もし仮に RO が遠隔地の環境に没入していたとすれば、危険な刃物をもった人物(LW)が近づいてきた際には距離を保とうと移動することが予想される。そこで観察指標として、刃物を視認してからの RO が何かしらの行動を発生させるまでの反応時間を計測する。なお図 12 は実際の危険反応測定課題時に LW が刃物を ROR に向けた際の、RO の HMD 越しに見える視点である。



図 12 危険反応測定課題での状況例

3-6 実験 2 の結果と考察

22 名の大学生が、各条件 11 人ずつ実験に参加した。視線意図認知課題 B について、各条件における ROR の振る舞いにおいて「離れた」と「離れなかった」人数の割合を示したものが図 13 である。図 14 は、その際の反応時間についてのヴァイオリンプロット、箱ひげ図である。

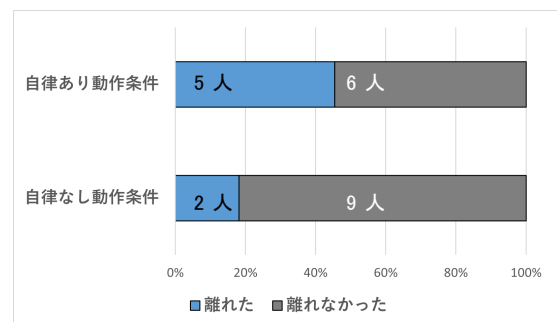


図 13 視線意図認知課題 B の結果

視線意図認知課題 B のデータに対して、システムによる自律動作の有無と ROR の離れる振る舞いに関連があるかを確認するために、フィッシャーの正確確率検定を両側検定で行った。その結果、 $p=0.3615$ (*n.s.*) で有意差は見られなかった。また、効果量の値については相関関係の一種である ϕ の値を参照したところ $\phi=0.195$ となった。危険反応測定課題のデータに対しても、ROR による自律動作の有無と反応速度に関連があるか検討するため検定を行った。本実験環境での反応速度は正規分布に従わないため、t 検定ではなくマンホイットニーの U 検定を採用した。結果は $p=0.3850$ (*n.s.*) < 有意差なし > となった。

本研究を通した実験では、統計的に顕著な条件間の差異は観察されなかったが、自律動作あり条件における RO の反応時間が、自律動作なし条件よりも全体的に短いことから、ROR の自律動作によって RO の遠隔地への没入感が増したために、その帰結として RO の反応時間が多少短くなった可能性も示されている。

4. まとめ

本研究では、テレプレゼンスアバターロボットに視線追従動作による共同注視を自律動作としてシステムに動作させる手法について検討した。実験の結果、定量的に明確な実証はできなかったが、この手法の有用性は一部確認できたといえる。すなわち、人が能動的に操作しないテレプレゼンスアバターロボットの自律的な動作が必ずしも遠隔操作者の認知に違和感を与えるわけでもなく、むしろ遠隔地の状況の把握に関して有効的に機能していた可能性が本研究を通して予見されたということである。このことは運動主体感や身体所有感といった自他の行動および身体の帰属に関する認知的問題を議論に一石を投じる知見として、本研究は人間の認知能力の新たな可能性を示すものだといえよう。

謝辞

この研究を進めていく上で熱心に取り組んでくださった修士課程に在籍していた生駒響君に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Tomasello, M. (2009). "The cultural origins of human cognition," Harvard University Press.
- [2] Wellman, H. M., Cross, D., & Watson, J. (2001). Meta-analysis of theory-of-mind development: The truth about false belief, *Child Development*, Vol.72, No.3, pp.655-684.
- [3] Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.4, No.1, pp.14-21.

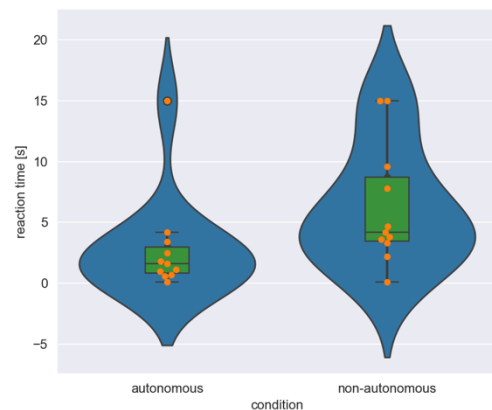


図 14 危険反応測定課題における反応時間