

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19785

研究課題名（和文）遠隔マルチタスクのための多重身体認知型代理身体システムの研究

研究課題名（英文）Multibody cognition in a remote multitask system

研究代表者

池井 寧（Ikei, Yasushi）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：00202870

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では遠隔でロボットを用いて実施するマルチタスクでの認知について実験的に検討した。開発したアバターロボットを遠隔から同時に制御できる構成として、ロボット視点の映像・音声、センサ情報をクラウドサーバを経由して共有し、かつ身体フィードバックを与える機構を複数構築した。これらを用いて複数ロボットの認知と操作法について特性を調べた。各ロボットの同時的認知のための視野の分割切替提示と重畳提示を検討したところ、空間を分割して提示する場合は特定方向の視野の継続性は有効だが臨場感の取得に懸念があること、重畳提示ではロボット視点への定位は有効だが品質に懸念があることから、タスク適合設計の基礎が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遠隔通信の超高速化と超高齢社会を目前にして、遠隔操作で複数の労働を実現しうる代理身体アバターは重要性がますます高まっている。しかしながら複数のアバターロボットの操作によるマルチタスクの実行は、まだ十分な議論が行われていない。本研究は複数のアバターロボットに主観視点で没入し、それら进行操作する際の認知特性を調査したものであり、上記の問題に答えるものである。臨場感に重要な視覚提示の構成法について比較を行い、その特性について基礎的な知見を得ており、タスクに依存した利用法について今後検討を進めることを可能としている。実空間の複数ロボットの同時遠隔操作の研究例はほとんどないため意義のある成果である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we experimentally investigated cognition in multi-task scenarios involving the remote operation of robots. We developed an avatar robot configuration that enables simultaneous remote control, in which robot viewpoint video, audio, and sensor information are shared via a cloud server, and multiple mechanisms are constructed to provide bodily feedback. Using these mechanisms, we examined the characteristics of cognition and operation for multiple robots. To facilitate simultaneous cognition of each robot, we investigated splitting and overlaying viewpoint presentations. Our findings suggest that while splitting the space and presenting viewpoints in specific directions preserves continuity, there are concerns regarding the acquisition of a sense of presence. On the other hand, while overlaying viewpoints enables effective localization to the robot's viewpoint, there are quality concerns. These results provide a foundation for designing task-appropriate systems.

研究分野：XRシステムとテレエクスペリエンス

キーワード：remote avatar robot tele XR

## 1. 研究開始当初の背景

Beyond 5G 移動通信によって、将来どこでも高解像度でリアリティの高い遠隔地没入体験が可能になると期待されている。これは Society 5.0 の IoT 目標としての遠隔制御の要求にも対応するものであり、また人口減少の労働力不足に対応して実空間でのテレワークの実現に寄与すると考えられる。従って有効な実世界遠隔操作手法が非常に重要になっている状況だが、現在、一般の実世界では複数の代理身体を遠隔操作し、有効活用する方法論は未開拓である。

研究代表者らは、遠隔地の身体的体験を再現（追体験）する多感覚（視覚、聴覚、前庭覚、固有感覚、触覚、嗅覚）提示装置（五感シアタ）を構築し、別の身体（他者）の身体運動を含む過去の活動を再現する手法を示した。遠隔地に送った全天周立体視カメラを現地の共同作業者が徒歩または車両で移動させ、リアルタイムの移動視点とその際の身体感覚（視点の運動に対応する身体加速度、歩行や車両運動による振動）を表わす多感覚刺激が映像酔いを除去可能であることを示してきた。

これは他者の体験の追体験を成立させるために、視覚情報と身体感覚の認知的統合を受動刺激で行うものであるが、遠隔で自己の代理身体を能動的に操る場合にも適用できる部分があると考えられる。さらに、複数の代理身体を所有すると仮定した場合、オペレータが複数の実空間タスクを行うことができ、上記の要求に答えることが可能となる。このための多重身体認知インタフェースの構築が求められていると言える。

## 2. 研究の目的

本研究では、1人のオペレータが遠隔に送った4台の代理身体（アバタロボット）を同時に操って、移動を伴った異なるタスクを並行に実行する際に必要となる代理身体認知の手法を探求する。代理身体は、遠隔の現実世界において、移動、観測、対話、操作を実施する装置であり、各タスクに適合した特定装備を備える。共通の装備は、移動機能と全周立体視映像立体音響取得機能、音声対話機能である。オペレータは一人称の視点と身体保持感を持ったもう1つの「自己（状況）」としての代理身体内に没入し、その身体と環境を認知する。代理身体をほぼ同時に操作する際の提示と制御方法により、多重身体認知がどのような特性を持つかを調査する。

## 3. 研究の方法

- (1) 代理身体ハードウェアの構築---4台の代理身体を構築した。移動の機能は、車体を2輪、3輪とする代理身体を製作、および4足型は既存の装置を利用した。これらの代理身体には、ローカルオペレータの視聴覚を受け持つ2眼全天周カメラとマイクを搭載し、Local 5G 移動通信またはwifiを利用した大容量低遅延伝送で全周の立体映像・立体音響を提示した。代理身体の一つにはアームを搭載しpick/place機能を、別の代理身体には環境オブジェクト認識カメラと処理系を搭載した。代理身体の自律移動機能に必要なレンジセンサと画像センサおよび処理用プロセッサ、バッテリーを搭載した。オペレータが使用する多感覚提示装置は、代理身体の移動時の前庭感覚、脚の歩行感覚の運動感覚をfeedbackするマスタ装置を利用した。
- (2) 多重身体認知の評価---代理身体を操作する方法と代理身体の構造および視覚提示の方法を変えて、身体認知の状態を調べた。代理身体の位置・方位の知覚、操作性、自己の身体感覚としての知覚について評価した。また、シミュレーションの可能性を調べた。代理身体の操作を各条件で行った後に、質問紙等にて認知の状態をまとめた。

## 4. 研究成果

本研究では、遠隔に送った4台の代理身体（アバタロボット）を1人のオペレータが同時に操ってタスクを並行に実行するために必要となる身体認知の手法を探求した。自己の身体となるロボットの視点とその移動、物体操作を遠隔地で再現する代理身体について、タスクに対する評価を行った。最初に、代理身体ハードウェアの構築として、2台のアバタロボットを制作し、室内を3輪で全方向に移動可能な構成とした。これは、全天周立体視カメラを搭載しているが、カメラが回転できると同時にロボットも回転可能かつ並進も任意方向に可能であった。運動の自由度が高いのは、狭隘な室内の移動に適している一方で、体幹と頭部の相対回転が自由であると、カメラの安定化に供する部分はあるが、代理の身体としての身体方位に関する相似性がなくなり、身体状態と方位の認知には適切なガイド表示等が必要となった。

他の代理身体として、2輪駆動型の構成を構築した。これは屋外を走行することが可能な走破性を持ち、Local 5Gが使えるキャンパス内で、全天周4K映像2チャンネルとステレオ音声、お

よび遠隔操作コマンドで任意の方向にアバタロボットを移動することが可能となっている。映像と制御コマンドは、クラウドサーバを経由することで、インターネット接続がある地点からアバタロボットを代理身体として使用可能とした。さらに4足歩行ロボットをベースとしたアバタロボットも同様に構築した。これは運動が特徴的な歩容となっていることと、全高が低いことで代理身体として固有の特性を持っている。これらを用いて、遠隔の現場の人とのライブコミュニケーションを行いながら屋外移動を実施し、探索作業やメンテナンス等作業が行える構成が設定できた。全天周画像で立体視可能な構成のため、下を見ればアバタロボットの姿勢や障害物を確認できるため、ナビゲーションは容易だが、至近距離の障害物とのクリアランスの値などは肉眼での目視と同等とはいえず、自己の身体認知の精度とは大きく異なることが確認された。

遠隔で移動する身体感覚を与えるために、加速度と角加速度を体験者にそのまま伝えるのではなく、移動を歩行で行ったと感じられる運動刺激を提示した。これは、移動にともなう一人称視点映像の変化について、自己の身体認知の運動という解釈との矛盾を低減する身体感覚の供給であり、これによって映像酔いを大幅に軽減あるいは除去することが可能となっている。実際は車輪および4足による視点移動であるが、歩行の身体感覚が矛盾の原因になることはなかった。

シミュレーションによる検討はライブの体験の中に位置付けるには高速な計測とモデリングを必要として、この時点のAIの処理性能で可能な対象が限定される問題が挙げられた。Peg-in-hole 課題のような実装においても環境の記述を前提とした画像認識となるため、作業に特化したライブラリを構成したうえで利用可能と考えられる。意図する操作を予行し、後にそれを自律実行する代理身体感覚を身体的な追体験で知覚し修正を行う遠隔操作手法の概要を検討した。代理身体自律性と時間シフトの遠隔体験を統合した設計は、将来の実空間タスクを実用化する際の構成法の選択肢になりうる。

オペレータはHMDとゲームパッドで複数のアバタロボットを操縦するが、単一時点でどちらのロボットを操作するかは決める必要があり、アバタロボットのカメラを切り替えて選んだ視野を操作する最も単純なインタフェースから評価した。ロボットのカメライメージはクラウドサーバから常時配信される条件で、臨場感と知覚精度のために全周の視野を与えると、選択されないアバタロボットは制御されないため自律モードに移行するが、タスクの継続が可能な条件は限定される。オペレータにとっては、視野にないアバタロボットの状態を管理する方針は停止か自律かであり、自律の場合はその過程の記録と追体験が必要となる。自律モードでは目的地までの移動は実装され、その際の映像を再生して継続の操作に復帰することができる。装備されたロボットアームによりオブジェクトの保持移動操作を遠隔操作で行うことが可能であるが、2つのアバタロボットの身体認知は途切れることになり、切替時の視点獲得と作業の記憶の復帰の認知負荷が小さくない。没入型の視覚提示をしているため、その視野の一部に他のアバタロボットの視野映像を配置することは、遮蔽によって操作対象視野を低減することになり、応用によっては視野と解像度が限定されるために有効性が制限される。

そこで複数台のアバタロボットの視野映像を重畳提示する手法を実装した。これによって、操作対象のアバタロボットを任意の方向に移動しながら他方のアバタロボットの視野を共有することが可能となる。その際に、操作対象のアバタロボットの視野の透明度を小さく、他方のロボットの視野の透明度を大きくすることで、混同することなく操作できると同時に、操作していないロボットの視野の確認と空間記憶の維持を図ることができた。ただし、切替時の視点獲得において発生する認知負荷とは異なり、重畳された映像が認知的に相互に干渉することは否めず視点獲得の安定性を低下させることが欠点と考えられる。

両者の方式において自己の身体認知の態様としては、2つの視野を切替える場合は自己の2つの分身としてロボットが認知される傾向、重畳提示の場合は2つの遠隔空間が身体の周りに融合しているように認知される傾向が強いことが示された。シミュレーション空間においては2箇所身体の視野を切替え表示する場合と1つの空間を小ウィンドウで内包表示する場合は、2つの空間の分身を移動している感覚となる一方で、重畳提示では2つの空間に同時に存在する感覚が優勢となった。遠隔操作の実ロボット身体の場合、視野の空間への定位感は強く2箇所の分身が存在する感覚は、シミュレーションの場合より強く観測された。他方、空間を分割して提示する場合、特定方向の視野の継続性は有効であるが臨場感が制限され情報取得に問題が生ずる可能性がある。記憶の維持はタスクの要求に合致させることが望ましいとすると、没入による定位の品質が分割視野による継続的注意かについて重点配分を考慮する必要性が認められた。

これらを通して遠隔の全方位の視聴覚を得て移動・操作する際の、実身体と複数の代理身体認知の関係についてその特性を示した。

このシステムは、海外国際会議展示2回、国内会議3回の学術展示で多数の参加者に体験デモとして提供された。様々な会場でシステム機能が実証され、実装としての信頼度は十分に高いことが示された。本システムの実証実験は引き続き行うとともに、認知特性の解明を継続して行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yem Vibol, Nashiki Reon, Morita Tsubasa, Ikei Yasushi	4. 巻 36
2. 論文標題 Vehicle-ride sensation sharing system with stereoscopic 3D visual perception and vibro-vestibular feedback for immersive remote collaboration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1087 ~ 1099
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2022.2129033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 海野 みのり, ヤエム ヴィボル, 雨宮 智浩, 北崎 充晃, 池井 寧	4. 巻 27
2. 論文標題 歩行VRにおける旋回歩行表現のためのヨー回転前庭刺激の効果に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 29-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 1件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Kikuchi, Y., Kato, R., Yem, V., Nagai, Y., Ikei, Y.
2. 発表標題 Mobile Cross Reality (XR) space for remote collaboration
3. 学会等名 Human Interface and the Management of Information: Applications in Complex Technological Environments (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junya Nakamura, Yasushi Ikei, Michiteru Kitazaki
2. 発表標題 The Effect of Posture on Virtual Walking Experience Using Foot Vibrations
3. 学会等名 Augmented Humans (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sueta, G., Kato, R., Kikuchi, Y., Yem, V., Ikei, Y.
2. 発表標題 Generation of Walking Sensation by Providing Upper Limb Motion
3. 学会等名 Human Factors in Virtual Environments and Game Design, AHFE (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Kikuchi, Yukiya Ojima, Ryoto Kato, Minoru Unno, Vibol Yem, Yukie Nagai, and Yasushi Ikei
2. 発表標題 Dual Robot Avatar: Real-time Multispace Experience using Telepresence Robots and Walk Sensation Feedback including Viewpoint Sharing for Immersive Virtual Tours
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH 2022 Emerging Technologies (SIGGRAPH '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池井 寧
2. 発表標題 遠隔参加のための臨場感情報提示技術の開発
3. 学会等名 総務省戦略的情報通信研究開発 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小島優希也, 菊地勇輔, ヤエム ヴィボル, 池井 寧
2. 発表標題 テレプレゼンスロボットと歩行感覚フィードバックを用いたリアルタイムマルチ空間の体験
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会大会, 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菊地勇輔, 小島優希也, ヤエム ヴィボル, 長井超慧, 池井 寧
2. 発表標題 隔ライブ・記録映像の全方位マルチ視聴XR メタバースシステムに関する研究
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会大会, 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 V. Yem, T. Morita, Y. Ikei
2. 発表標題 Vibro-Vestibular Wheelchair for Vehicle Riding Experiences in Immersive Virtual Reality
3. 学会等名 The 14th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junya Nakamura, Yasushi Ikei, Michiteru Kitazaki
2. 発表標題 The Effect of Posture on Virtual Walking Experience Using Foot Vibrations
3. 学会等名 Augmented Humans 2023 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yem Vibol, Tsubasa Morita, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Feedback of Rotational Sensation Experienced by Body During Immersive Telepresence
3. 学会等名 Siggraph 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minori Unno, Yusuke Kikuchi, Kentaro Yamaoka, Gaku Sueta, Vibol Yem, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Action Reproducer: Virtual Reality Rehabilitation System to Reduce Fear of Walking
3. 学会等名 Siggraph 202 Labs - Installation program (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地勇輔, 加藤 綾斗, YEM VIBOL, 長井 超慧, 池井 寧
2. 発表標題 XRによる対話支援テレエクスペリエンスシステムに関する研究
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八木龍之介, ヤエム ヴィボル, 池井 寧
2. 発表標題 遠隔臨場感体験における身体運動感覚の合成に関する研究
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会VRと超臨場研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤綾斗, 菊地 勇輔, YEM VIBOL, 池井 寧
2. 発表標題 Rアバター表情生成手法に関する研究
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoto KATO, Yusuke KIKUCHI, Vibol YEM, Yasushi IKEI,
2. 発表標題 Real-time Facial Animation of a Reality Avatar based on Japanese Vowels in a Speech Audio Stream
3. 学会等名 IDW2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芹澤尚舜, ヤエムヴィボル, 池井 寧, 西内信之
2. 発表標題 複数空間融合手法とアバタ入力インタフェースの違いによるVR空間での二重身体認知評価の提案
3. 学会等名 日本人間工学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島 優希也、島田 匠悟、米田 悠人、芹澤 尚舜、西内 信之、池井 寧、YEM VIBOL
2. 発表標題 複数リアル空間を体験するXRメタバース
3. 学会等名 VRSJAC2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島 優希也、島田 匠悟、YEM VIBOL、岡本 正吾、池井 寧
2. 発表標題 複数のテレプレゼンスロボットを用いた2重身体感覚に関する研究
3. 学会等名 VRSJAC2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 島田 匠悟、小島 優希也、西内 信之、池井 寧、YEM VIBOL
2. 発表標題 テレプレゼンスのためのLeaning型口コモーションと歩行感覚提示の検討
3. 学会等名 VRSJAC2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島優希也, 島田匠悟, 岡本正吾, ヤエム ヴィボル, 池井 寧
2. 発表標題 遠隔ロボットの多重身体性に関する研究
3. 学会等名 映像情報メディア学会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 池井 寧, 出川 通ほか	4. 発行年 2022年
2. 出版社 日経BP	5. 総ページ数 608
3. 書名 テクノロジー・ロードマップ 2023-2032	

1. 著者名 Unno M., Yamaoka K., Yem V., Amemiya T., Kitazaki M., Ikei Y.	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 370
3. 書名 Human Interface and the Management of Information. Information-Rich and Intelligent Environments.	

1. 著者名 池井 寧, 出川 通ほか	4. 発行年 2023年
2. 出版社 日経BP	5. 総ページ数 602
3. 書名 テクノロジー・ロードマップ2024-2033	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	ヤエム ヴィボル  (YEM Vibol)  (20808258)	筑波大学・システム情報系・准教授    (12102)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	海野 みのり  (Unno Minori)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------