

博物館におけるテレプレゼンスロボットのデザインに基づいた遠隔訪問システムの開発

老田葵^{†1} 松村耕平^{†1} 野間春生^{†1}

概要：テレプレゼンスロボットの普及によって様々な施設への導入が予想される中，先行研究においては博物館でのユーザ利用の際にロボットがどうデザインされるべきかについても調査されている．我々はこのようなデザイン調査を基に，テレプレゼンスロボットを利用した博物館の遠隔閲覧システム及びインタフェースを開発した．本稿では開発したシステムの詳細について示す．

1. はじめに

テレプレゼンスロボットが低価格化によって普及してきており，その用途の多様性に注目が集まっている．例えば Sutable Technologies 社のテレプレゼンスロボット Beam は遠隔会議を目的とした自立走行が可能なビジネス向けのテレプレゼンスロボットである [1]．Revolve Robotics 社のテレプレゼンスロボット Kubi は遠隔会議に加え家庭での利用も考慮されている [2]．任意のスマートフォン端末やタブレット端末を装着することで遠隔地との会話ができる．また警備，会話，子供の安全確保などの家庭向けの用途を目的としたテレプレゼンスロボットも販売され始めている．

テレプレゼンスロボットの可能性として，身体が不自由である，子供と長期間離れられないといった身体や家庭環境などに問題がある者が利用することで，目的の催事に遠隔地から参加する機会を得ることができるという手法も考えられており，実際に Ubicomp [3]や WISS [4]などの一部の学会においてはテレプレゼンスロボットを用いた遠隔参加が可能となっている．テレプレゼンスロボットのさらなる他分野への導入が想定される中，我々はテレプレゼンスロボットが博物館に導入されることを想定し，テレプレゼンスロボットがどのようにデザインされるべきかを検討した [5]．実際の博物館に Sutable Technologies 社のテレプレゼンスロボット Beam を持ち込み，複数の学芸員とのワークショップを開催した．ワークショップやその後のインタビューを基に課題抽出を実施し，主題分析を行った．主題は「自由視点の提供」「相補的關係性の構築」「ソーシャル・インクルージョン」「空間の飛躍」の4つを導出した．

「自由視点の提供」とはテレプレゼンスロボットが人間では進入が困難な狭い場所へ進入したり，カメラの機能を用いて細かい部分に注目したりすることで，人間に比べ自由な視点を獲得することを指す．「相補的關係性の構築」とは遠隔操作されるテレプレゼンスロボットとその場にいる来訪者が，各々の利点および欠点を相互に補完し合うよう

な関係性の構築を指す．我々はテレプレゼンスロボットを利用した博物館訪問の問題点として，テレプレゼンスロボットの遠隔操作者が現地の来館者に比べ，博物館の全体像を把握することが難しい点を挙げた．対してテレプレゼンスロボットのカメラが展示物の細かい部分や照明が暗い場面でも明るく映し出せることを利点として挙げ，テレプレゼンスロボットと来訪者がこれらの点を相互に補完し合うような関係を構築する可能性を示した．「ソーシャル・インクルージョン」とは社会的に立場の弱い人々を社会の一員として取り込み支えあっていく概念を指す．老人ホームやグループホームなどと博物館を，テレプレゼンスロボットを介して連携させることで回想法を行うなどといった展開への可能性を示した．「空間の飛躍」とはロボットが異なる場所に複数台存在する際に，操作するロボットを切り替えることによって疑似的に空間を飛躍できる状態を指す．博物館においては，テーマ展示を行っている場合などに関係性のある他博物館にロボットを設置し連携させることで，特定のテーマに関して構成された一つの博物館を来館しているかのような体験を提供できる可能性を示した．

本研究では「自由視点の提供」「相補的關係性の構築」「ソーシャル・インクルージョン」「空間の飛躍」の4つの主題が持つ課題を分析し，テレプレゼンスロボットの操作モデルに求められる技術的要素の抽出を通して，テレプレゼンスロボットの操作システムの提案及び開発を行う．

2. 関連研究

博物館を含む，様々な施設での活用を目的としたテレプレゼンスロボットの研究はこれまでも数多く行われてきた．ロボットの身体的な性質として頭の動き（例えば傾き [6]，振り返り [7]）や体の動き（例えば指差し [8]，身振り手振り [9]）のような非言語的手がかりを用いることで，人間とのコミュニケーションを円滑にすることができると示されている．またカメラを搭載したロボットにおいては，視野角の広い映像によって対面環境に近いコミュニケーションを行うことが可能であり，カメラの性能によってコミュ

^{†1} 立命館大学

ニケーションの質が左右されると示されている [10][11].

これらの研究が主にロボットの博物館におけるガイド行動を目的としている背景に対し、我々はユーザがテレプレゼンスロボットを用いることで博物館へ訪問することを目的として、ロボットがどうデザインされるべきか調査し、1章にて示した4つの主題を導出した [5]. 加えて、これらの研究がロボットの操作者の存在を対話者がどの程度感じたか注目している背景に対し、村上らはロボットの操作者が対話者の存在をどの程度感じたかに注目し、カメラ及びロボットの「可動性」によってロボットのテレプレゼンスが強化される可能性を示した [12].

またテレプレゼンスロボットを操作するためのインタフェースについても数多く研究されている. Ferland et al. はテレプレゼンスロボットシステムの中心的要素としてユーザインタフェースを挙げ、視覚化の手法によってオペレータの認識や操作性に大きく影響すると主張した. 佐藤らの報告によると、ユーザインタフェースにはインタフェース側から見た場合に人間への出力部分と人間からの入力部分が存在し、人間側から見た場合にはそれぞれが「理解しやすさ」「使いやすさ」に対応する [14][15]. 「理解しやすさ」はインタフェースを通してロボットの情報をどのように人間に提示するかが重要であり、遠隔操作が行われるテレプレゼンスロボットにおいてはロボット自身の状況が考慮されるべきである [16]. また「使いやすさ」においては入力デバイスによる操作負荷の軽減が行われるべきである [14].

3. システムが達成すべき技術的要素の抽出

我々の先行研究 [5]にて導出した、博物館においてテレプレゼンスロボットがユーザ利用される際に必要な要素を表した主題として「自由視点の提供」「相補的關係性の構築」「ソーシャル・インクルージョン」「空間の飛躍」の4つが挙げられる. これらの主題から、テレプレゼンスロボットの操作システムに求められる技術的要素を抽出する.

自由視点の確保

「自由視点の提供」から、ロボット自体の方向にかかわらず自由に視点を動かせる機能の必要性を抽出した. テレプレゼンスロボットとカメラの関係を調査した関連研究 [10][11][12]を基に、自由視点の確保には2軸以上で回転が可能なジンバルカメラを外部的に搭載する手法が最適であると考えた.

映像出力機器の搭載

「相補的關係性の構築」「ソーシャル・インクルージョン」から、カメラ搭載ロボットが取得した展示物や資料についての映像を現地にいる来館者(以下、現地来館者)と共有する機能を実装することで、ロボットが現地来館者の閲覧行動を補助できることが分かった. そのためロボットに搭載されたカメラの映像を出力す

る機器として外部的にディスプレイを搭載する手法が最適であると考えた. また博物館における照明についての関連研究 [17][18][19][20]から、照明を用いない方法での閲覧のためロボットに搭載するカメラの性能に「明度調整」の機能を持たせることが必要である. さらにユーザ利用を前提としたテレプレゼンスロボットでの博物館訪問に関する研究から、展示品を肉眼と比べより詳細に閲覧する要求が明らかになった [5]. そのためロボットに搭載するカメラの性能に「ズーム」の機能を持たせる. これらのカメラ機能はいずれも、ロボットに搭載したディスプレイに映像を投影することで現地訪問者の閲覧補助になりうる.

操作権限の移譲

「空間の飛躍」の実現のためには、異なる博物館へロボットをそれぞれ設置した環境において操作するロボットを切り替えることで、複数の博物館を擬似的に一つの博物館として訪問する体験を提供する必要がある. このため、操作ロボットの切り替えを管理するシステムが必要である.

4. システム実装

3章にて抽出した技術的要素を基にシステムの開発を行う. なお「操作権限の移譲」については「自由視点の確保」及び「映像出力機器の搭載」の要素を十分に満たした上で実装が可能な手法であるため、本研究では「自由視点の確保」及び「映像出力機器の搭載」に注目しシステムの開発を行う.

4.1 ハードウェア部

我々は博物館におけるテレプレゼンスロボットのデザインを検討した際、Suitable Technologies社のテレプレゼンスロボット Beam を利用した [5]. そのため本研究ではシステムの実装にあたり、使用するテレプレゼンスロボットに Beam を採用した. カメラ搭載ロボットのテレプレゼンス強化に関する研究よりロボットの「可動性」が重要であると言えることから [12], 本研究においては遠隔閲覧システムを実現するにあたりテレプレゼンスを強化できるデザインのもと開発されたロボットを利用することが好ましい. Beam は遠隔プレゼンを目的として開発されたテレプレゼンスロボットであるため、この条件を満たすことが期待される.

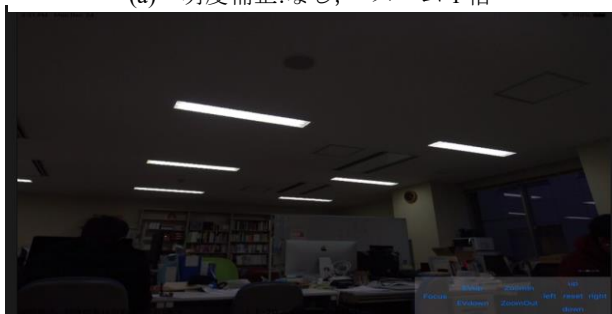
外部的に搭載するカメラとして DJI 社の OSMO+を採用した [21]. 採用の理由は「自由視点の確保」にて2軸以上で回転が可能なジンバルを搭載したカメラが求められており、加えて「映像出力機器の搭載」にて「ズーム」「明度調整」機能が求められていたためである. OSMO+はこれらの条件を満たす. なお本システムにおいてジンバルはx軸とy軸に動く設計となっている. ズーム機能は3.5倍の光学



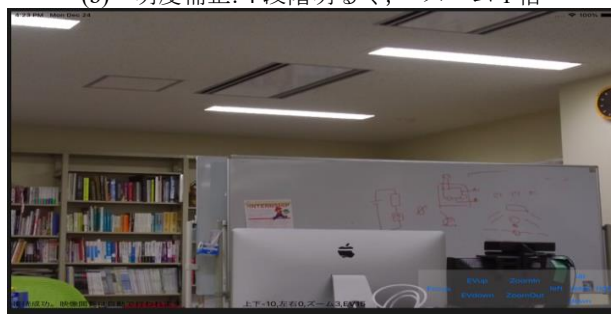
(a) 明度補正:なし, ズーム 1 倍



(b) 明度補正: 4 段階明るく, ズーム 1 倍



(c) 明度補正: 4 段階暗く, ズーム 1 倍



(d) 明度補正: 3 段階明るく, ズーム 3.5 倍

図 1 ズームと明度調整の例 (iOS アプリ「DataBeam」の画面より)

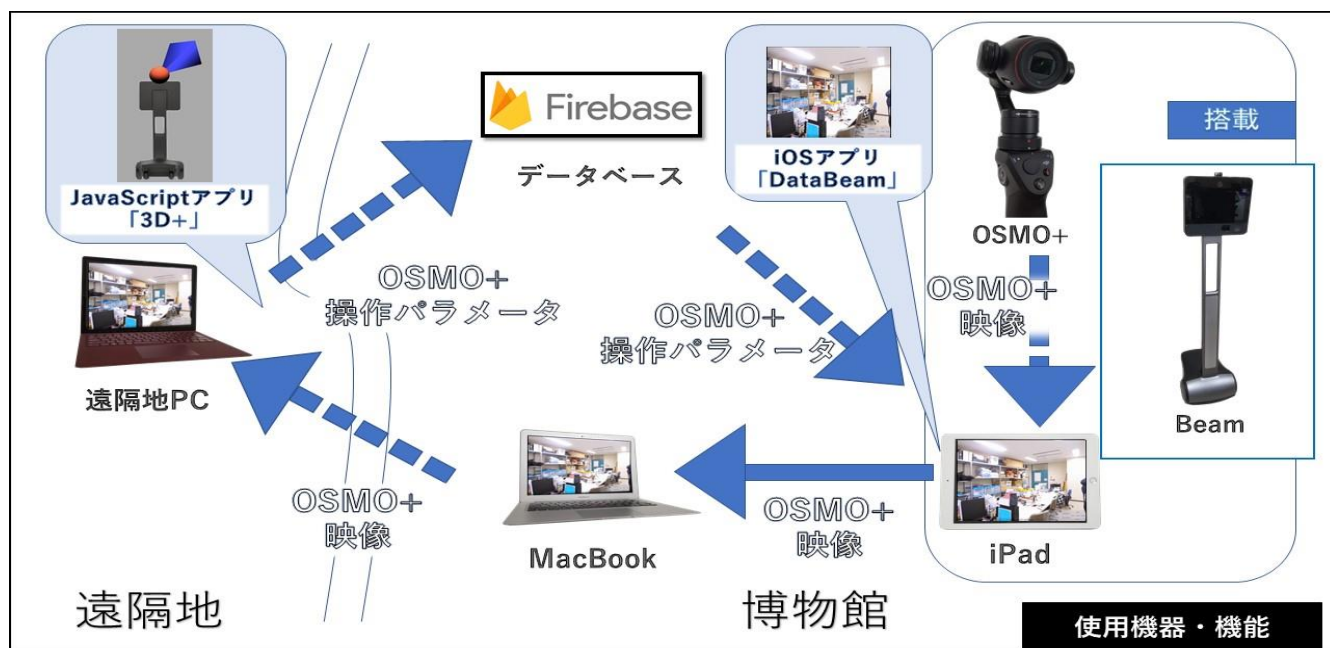


図 2 システム全体の使用機器・機能

ズームをサポートしており, 1~3.5 倍の間を 44 段階で調節することができる. 明度調整機能はシャッタースピードと絞りを自動で調節することによって, 映像の露出を標準の明度から 15 段階明るく, あるいは 15 段階暗く設定することができる. 「ズーム」及び「明度調節」を行った OSMO+ の様子を図 1 に示す.

外部的に搭載するディスプレイとして Apple 社の iPad 9.7inch を採用した [22]. 採用の理由は「映像出力機器の搭載」にて外部的に搭載するカメラの映像を投影できるディスプレイが求められていたためである. 加えて OSMO+は Wi-Fi 回線を介した iOS 及び Android 向けアプリケーションに対する映像配信・操作受付のみをサポートしている.

4.2 ソフトウェア部

システム全体から見たソフトウェアとして必要な機能には「ロボット制御」「外部カメラ制御」がある. システム全体の使用機器及び機能を表した図を図 2 に示す. また実際にシステムを操作している様子を図 3 に示す.

ロボット制御

ロボット制御は以下の 2 つの機能から成り立つ.

1. 遠隔地の PC からロボット操作
2. 遠隔地の PC からロボットに標準で搭載されている内部カメラの映像確認

ロボット制御部分では, Beam に付属している PC 上で動作する標準アプリを使用する(図 3-②, ③). Beam の内部カ

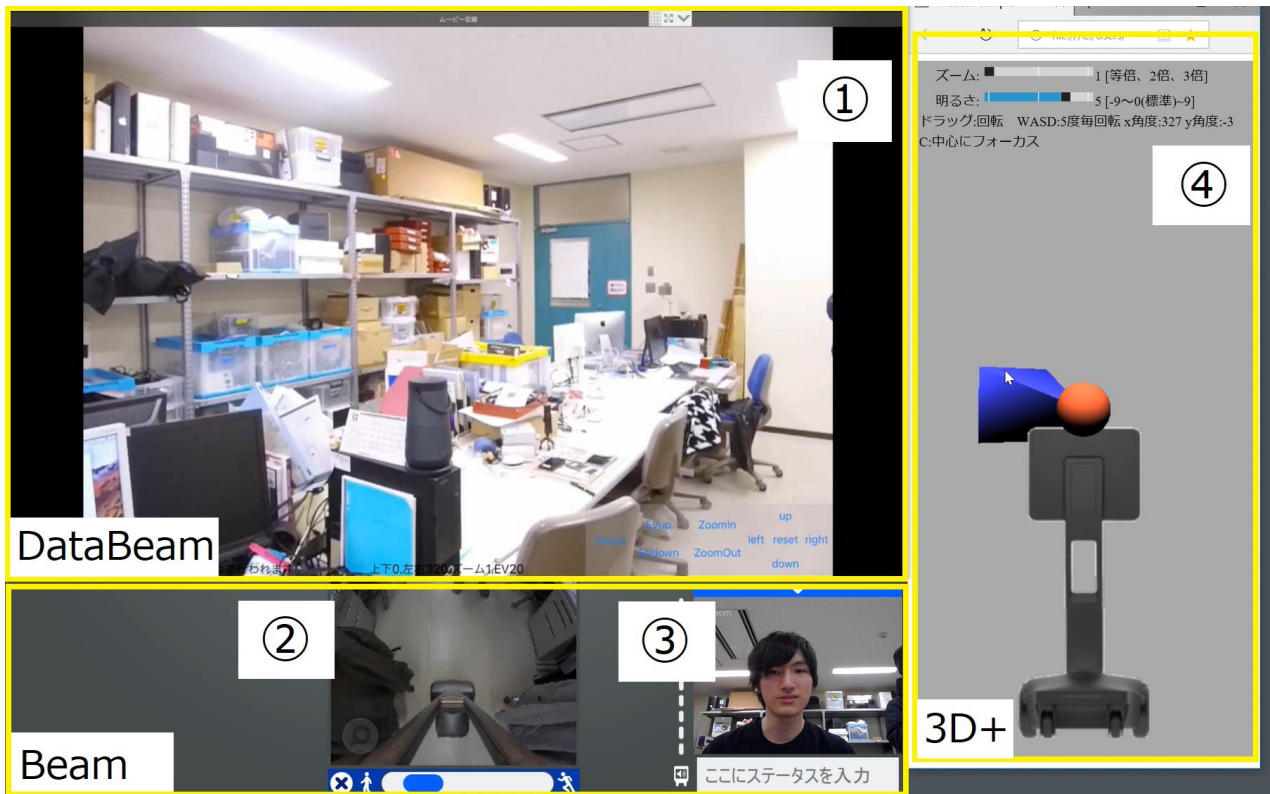


図 3 システム利用中の遠隔地 PC の画面

メラは足元を 360° 確認でき(図 3-②), 足元を照らす照明が搭載されている。標準アプリでは内部カメラの映像が確認でき、映像を直接マウスの左ボタンで押し続けることによって直感的なロボットの移動制御を行うことができる(図 3-②)。標準アプリを利用することで「自由視点の確保」「映像出力機器の搭載」にて求められる技術的要素は達成できていると判断した。

映像の共有には PC 及び Beam 共に Wi-Fi 回線を介したネットワーク通信を行う。

外部カメラ制御

外部カメラ制御は以下の機能から成り立つ。

1. 遠隔地の PC から OSMO+操作
2. OSMO+の映像を iPad に投影する機能
3. 遠隔地の PC から OSMO+の映像確認

OSMO+操作とはジンバルの操作、及び「ズーム」「明度調整」の機能を利用することを指す。OSMO+の操作は我々が開発したブラウザ上で稼働する JavaScript アプリ「3D+」(図 3-④、図 4)及び iOS アプリ「DataBeam」(図 1、図 3-①)を利用して行う。Beam と同様に OSMO+にも標準のアプリは存在するが、遠隔地にいるロボットに搭載するという前提のもと開発されていないため、カメラ自身の状況が明確に把握し難く、インタフェースに必要である「理解しやすさ」[14][15]が実現できていない。これに対しカメラとロボットの関係を 3D モデルにて視覚化したカメラ操作インタフェースを作成することで、カメラ自身の状況を明確にした。また「使いやすさ」については簡便な入力方法であ



図 4 JavaScript アプリ「3D+」

ることが望ましく [14][23][24][25], タブレットでの操作に最適化された OSMO+標準アプリの操作手法を改変し、PC で操作するという前提のもと、作成したインタフェースを用いて JavaScript アプリ「3D+」を開発した(図 3-④)。OSMO+への操作指示に関しては、Google 社の提供する BaaS

(Backend as a service)サービス、Firebaseの機能の一つである Realtime Database を利用する [26]。遠隔地の PC 上で稼働している JavaScript アプリ「3D+」から Realtime Database へ OSMO+の「ジンバルの角度」「ズームの倍率」「明度」パラメータについて書き込みを行い、そのデータを博物館のロボットに搭載されている iPad で稼働している iOS アプリ「DataBeam」(図 3-①)で読み込む。iOS アプリ「DataBeam」は読み込んだパラメータの値に基づいて OSMO+へ操作指示を行う。遠隔地の PC は Firebase との通信において Wi-Fi 回線を介したネットワーク通信を行う。また iPad は Firebase との通信において LTE モデムを利用したネットワーク通信を行う。

OSMO+の映像を iPad に投影する機能は、現地来館者が OSMO+の映像を閲覧できる環境を構築するために必要である(「映像出力機器の搭載」の技術的要素より)。iPad は iOS アプリ「DataBeam」によって OSMO+との Wi-Fi 回線を介したネットワーク通信を行い、映像の取得及び映像の投影を行う(図 3-①)。

OSMO+はインフラストラクチャモードの Wi-Fi に接続できない制約がある。そのためロボットの内部カメラ映像の送信とは別の手法で映像を共有する。iPad に内蔵されている Wi-Fi モデムは OSMO+との映像共有及び操作指示に利用する。遠隔地の PC への映像共有手法としては iPad の映像を USB 接続にて MacBook にミラーリングし、MacBook によって遠隔地の PC との映像共有を行う手法を採用した。MacBook は遠隔地の PC との通信において Wi-Fi 回線を介したネットワーク通信を行う。

5. まとめ

本研究ではテレプレゼンスロボットが博物館へ普及することを想定し、ロボットに求められるデザインの分析を通してインタフェース及びシステムを開発した。「自由視点の提供」「相補的関係性の構築」「ソーシャル・インクルージョン」「空間の飛躍」の主題から課題を分析し、「操作権限の移譲」「自由視点の確保」「映像出力機器の搭載」の技術的要素の抽出を通して、これらを基にハードウェア部とソフトウェア部に分けてシステムの開発を行った。ソフトウェア部は「ロボット制御」と「外部カメラ制御」からなり、求められた技術的要素を満たす機能を搭載していくことでシステムを開発した。

参考文献

[1] “Beam Pro 遠隔プレゼンシステム”.
<http://www.nihonbinary.co.jp/Products/Robot/Beam.html>, (参照 2018-12-23)

[2] “テレプレゼンスロボット「kubi」”.
<https://www.revolverobotics.com/>, (参照 2018-12-23)

[3] “Ubicomp 2018”. <http://ubicomp.org/ubicomp2018/>, (参照 2018-12-23)

[4] “WISS: 日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステム

とソフトウェア (ISS) 研究会”. <http://www.wiss.org/>, (参照 2018-12-23)

[5] 松村耕平, 柴田太一, 野間春生. 博物館におけるテレプレゼンスロボットのデザイン, 情報処理学会研究報告, Vol.2017-HCI-174, No.5, 1-6 (2017)

[6] Sidner, C. L., Lee, C., Kidd, C. D., Lesh, N. and Rich, C.: Explorations in Engagement for Humans and Robots, *Artif. Intell.*, Vol. 166, No. 1-2, pp. 140-164 (online), DOI: 10.1016/j.artint.2005.03.005 (2005).

[7] Kuno, Y., Ssibwulca, K., Kawashima, M., Yamazaki, K., Yamazaki, A. and Kuzuoka, H.: Museum Guide Robot Based on Sociological Interaction Analysis, *Proceedings of the SICCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, New York, NY, USA, ACM, pp. 1191-1194 (online), DOI: 10.1145/1240624.1240804 (2007).

[8] Matsumura, K., Sumi, Y. and Gompei, T.: Embodiment of Guidance Robot Encourages Conversation among Visitors, *Journal of Information Processing*, Vol. 25, pp. 352-360 (online), DOI: 10.2197/ipsjip.25.352 (2017).

[9] Ogawa, H. and Watanabe, T.: InterRobot: Speech-Driven Embodied Interaction Robot, *Advanced Robotics*, Vol.15, No.3, pp.371-377 (2001).

[10] Jouppe, N.P.: First Steps Towards Mutually-Immersive Mobile Telepresence, *Proc. CSCW2002*, pp.354-363 (2002).

[11] Tachi, S., Komoriya, K., Sawada, K., Nishiyama, T., Itoko T., Kobayashi, M. and Inoue, K.: Telexistence Cockpit for Humanoid Robot Control, *Advanced Robotics*, Vol.17, No.3, pp.199-217 (2003).

[12] 村上友樹, 中西英之, 野上大輔, 石黒 浩. ロボット搭載カメラの移動がテレプレゼンスロボットに与える影響, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.1, pp.54-62 (2010)

[13] Ferland, F., Pomerleau, F., Le Dinh, C. T., and Michaud, F.: Egocentric and Exocentric Teleoperation interface using real-time, 3d video projection. *Proceedings of HRI*, 37-44. DOI: 10.1145/1514095.1514105 (2009).

[14] Sato, N. and Matsuno, F.: User Interface Technology for Rescue Robot Teleoperation, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.28, No.2, pp.156-159, DOI: 10.7210/jrsj.28.156 (2010)

[15] 誰のためのデザイン?: 認知科学者のデザイン原論. pp.20-43, 新曜社 (1990).

[16] M.R. Endsley, S.J. Selcon, et al.: A Comparative Analysis of SAGAT and SART for Evaluations of Situation Awareness. *Proc. the 42nd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, pp.82-86 (1998).

[17] Nakajima, Y., and Fuchida, T.; Study of Museum Lighting: Optimum Lighting and Color Environment (2) - Color Evaluation Structure for Low Illuminance Level, *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, Vol.99, No.2, pp.74-82 (2015).

[18] Nakajima, Y., and Fuchida, T.; Study of Museum Lighting: Optimum Lighting and Color Environment (3) -New Calculation Method of Color Quality Index for Museum Lighting-, *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, Vol.99, No.5, pp.68-73, DOI: 10.2150/jiej.99.263 (2015).

[19] Nakajima, Y., and Fuchida, T.; Museum Lighting: Optimum Lighting and Color Environment - The Relationship Between Illuminance and Color Rendering Properties -, *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, Vol.98, No.2, pp.68-73 (2014).

[20] 鈴野徳之, 木下史青, 坂東卓, 中村芳樹. 博物館における鑑賞者の視線方向変化を考慮した照明計画: 東京国立博物館を事例として(グレア,環境工学 I), 学術講演梗概集, Vol.2007, pp. 505-506 (2007)

[21] “OSMO+ Motion with zoom”. <https://www.dji.com/jp/osmo-plus>, (参照 2018-12-24)

- [22] “9.7 インチ iPad – Apple(日本)”.
https://www.apple.com/jp/ipad-9.7/?afid=p238CZyYuhe9-dc_mtid_18707vxu38484&cid=aos-jp-kwyh-ipad-slid--, (参照 2018-12-24)
- [23] Fong, T., Thorpe, C. and Baur, C.: Multi-Robot Remote Driving with Collaborative Control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.50, no.4, pp.699-704 (2003).
- [24] 森下圭介, OH Se-sook, 清水紀芳, 杉本麻樹, 稲見昌彦, 松野文俊. バーチャルライントレースによる遠隔ロボット操作に関する研究, 第 25 回日本ロボット学会学術講, 演会予稿集 CD-ROM, 1H19 (2007).
- [25] Sato, N., Mizumoto, H. et al.: Touch-pen interface with local environment map for mobile robot navigation, *Proc. SICE Annual Conference 2008*, pp.1632-1637 (2008).
- [26] “Firebase”, <https://firebase.google.com/?hl=ja> (参照 2018-12-24)