

全天球立体カメラと五感ディスプレイによるテレエクスペリエンスに関する研究

Teleexperience by TwinCam Omnidirectional Camera System and Multisensory Display



池井 寧 (Yasushi Ikei, Ph. D.)

東京大学 大学院情報理工学系研究科 特任教授

(Professor, Graduate School of Information Science Technology, The University of Tokyo)

日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本機械学会, IEEE, ACM 他

受賞: ACM, Best Virtual and Augmented Reality Technology (2018), Innovative Technologies 賞 (2018, 2017, 2012 年), 日本バーチャルリアリティ学会論文賞 (2017, 2014, 2002 年), Best Paper VSMM (2012 年) 他

著書: 五感情報を活用した超臨場感体験システムと応用可能性, 技術情報協会 (2018 年) 超臨場感, エヌ・ディー・エス (2008 年) 他

研究専門分野: 五感インタフェース 超臨場感 バーチャルリアリティ

あらまし

無線通信技術の急速な進展とバーチャルリアリティ用のインタフェースの普及によって遠隔地のリアルタイム体験の実現が近づく中で、リモートワークへの要求もますます高まる状況である。

本研究では遠隔地への参加・活動のライブ体験を実現するため、遠隔地で移動するカメラを全天球の2眼の構成とすることで任意方向の立体視が可能となる視覚システムとそのカメラを移動するためのアバターロボットシステムを構築した。さらにこれらのカメラから得られたライブ映像に対応する他の感覚への情報提示として、前庭感覚提示、音響提示、振動提示、気流提示を行うことで、映像酔いを有意に抑制することが可能となった。これらにより、遠隔地のライブ体験の基礎技術を進展させることができた。

1. 研究の目的

本研究の目的は、遠隔地の全天球リアルタイム立体映像を観察者に提示し、その映像の地点でカメラを移動することで、その場（空間）への没入感・臨場感の高い体験を提供するシステムを実現することである。このためには、全方位への立体映像を得る必要がある

が、本研究では、この視覚機能を五感ディスプレイと共に実現する。

2. 研究の背景

5G 無線通信の普及が期待される中、遠隔地間を結んでバーチャルに共同活動を可能としたり、遠隔の空間でも眼前の空間と同様に作業を行うなどの高速通信の応用が現実的となってきた。しかしながら、遠隔地において移動を伴う活動に参加するには、まだ解決しなければならない問題が多い。高解像度カメラの小型化により臨場感に寄与する映像を取得し、高速に伝送することが可能となったが、それだけで遠隔の体験が可能となるわけではない。

遠隔の体験には、遠隔にいてそこに参加しているという感覚、すなわち臨場感がこれまでとは異なる水準で達成されることが必須となる。このためには、理想的には五感の機能が遠隔地で発揮されなければならないが、まず視覚の機能と視点の移動機能が重要である。しかしながら、それだけではオペレータが実際に長時間使用して遠隔地での作業を行うことは実際には困難である。それは、映像の解像度が向上したなかで、映像の視点（カメラ位置）が動くと、映像酔いが深刻な障害となるためである。これに対処するには、オペレータが実際に遠隔地で行動している感覚が得られるように五感へのディスプレイで情報を提示し、視覚情報だけが身体から乖離することを妨げ、人間の外界知覚と身体知覚の統合を支援することが有効と考えられる。

3. 研究の方法

本研究では、上記の観点から、まず臨場感の高い視覚機能を得るために、全天球カメラを利用した遠隔全方位立体視システムを構成し、これを新たに構築した移動機に搭載した。これらにより、遠隔地を移動する体験の視覚的な情報提示の部分を格段に向上させることとした。また移動機能のために、カメラの回転運動に適合した制御が行いやすい構造の移動ロボットを構築することとした。さらに、移動するカメラの映像（移動する視点の状況）において、視覚以外の感覚を整合させるための身体感覚の提示機能の開発を行った。

全天球立体カメラと五感ディスプレイによるテレエクスペリエンスに関する研究

Telexperience by TwinCam Omnidirectional Camera System and Multisensory Display

3-1. 2 台の全天球カメラによる立体視システム



図1 TwinCam カメラシステム

本研究では、遠隔地における全方位のリアルタイム立体視を可能とするために、2 台の全天球カメラを並置し、観察者の両眼に対応させて視差を正確に再現する構成（TwinCam カメラシステム、図1）を設計し、それを移動機に搭載した。この1 対のカメラの配置は、両眼の眼間距離にほぼ等しく設定されており、仮想的にその位置に眼球が置かれたことに相当している。これらから得られた映像によって、観察者はカメラの中心の光軸方向で遠隔地を立体視することができる。観察者は Head Mounted Display(HMD)を装着することでその映像を見るが、正面だけでなく、頭部を鉛直軸まわりに回転させて方位を変えて見た場合も正しい立体視が可能となるように遠隔のカメラが回転する。ただし、このとき2 台のカメラは、頭部と同じ方向を向くように回転するのではなく、レンズの光軸の方位を変えずに、観察者の頭部における眼球位置と等価な場所にカメラのレンズ中心を置く。カメラは全周の映像を取得できるので、HMD に提示する映像の部分で全周映像の中で回転すれば同じ結果が得られる。

この構成は、遠隔の立体視映像を得るときに次の利点がある。まず、観察者が見回す動作をした場合の頭部回転に対して、通信遅延と制御の遅延によりカメラのレンズ位置の回転が実際の頭部角度に追従していない場合でも、HMD の回転に対応した映像が提示されるので見かけ上、上記の遅延がなくなる。さらに、遠隔地のカメラは頭部回転に対応して位置を変化させるが、レンズの方位は変わらないので映像の運動ぼけが発生しない。これらの特長により、遠隔地の立体映像を全方向で体験でき、他の2 眼方式の問題点を解決してい

る点が本研究の新規性の一部である。

3-2. 遠隔地を移動する立体視システム

前節の全方位立体視カメラシステムを移動機に搭載し、遠隔地で視点の位置を変更可能とした。これは、遠隔地の体験（テレエクスペリエンス）を行うための基本機能である。遠隔地の体験としては、多様な要求があるが、まず視点を移動するための構成である。

遠隔の現実世界での視点の移動のためにカメラを動かす手段として、もっとも実用面で現実的な方法はカメラと送信器を搭載した移動機を現地の操縦者に任せる方法である。この構成はセンターの専門オペレータが、遠隔地の現場に実際に行くことなく、大型施設のメンテナンスや現地作業者と対話しながら共同作業を行うことを可能とする点で有効である。



図2 TwinCam Go システム

図2 は、前項の TwinCam カメラシステムを Segway に搭載した構成である。2 台のカメラ(Theta V、Ricoh)の映像信号は、2 台の制御用 PC (MacBook Pro) で取り込み、webRTC で映像と音声を送信している。通信はこの時点では携帯型無線ルータ (WiMAX) で走行中のデータを送信しているが通信速度は条件に大いに依存する。今後、5G 通信が利用できれば十分な実用性を持つと考えられる。カメラシステムは、スタビライザに固定され、車体の揺動の一部を減衰している。この車体の実際の操作は、センターの専門オペレータの指示に従って操縦者が行うが、Segway は歩行者とほぼ同様の経路を進むことが可能であるため、実際の作業員と同様に近い観点で作業に参加することが可能である。

全天球立体カメラと五感ディスプレイによるテレエクスペリエンスに関する研究

Teleexperience by TwinCam Omnidirectional Camera System and Multisensory Display



図3 アバターロボット

図3は、構築した移動ロボットシステム（アバターロボット）である。上部にTwinCamカメラシステムを搭載し、専門オペレータが操縦コマンドを送るとともに、現地の映像を受け取る構成である。このアバターロボット（TriStar 1）は、全方位車輪を3個装備することにより、任意の方向に進行できると同時に中心回りの回転も行いやすい構成となっている。車輪は個別のDCモータで駆動され、制御器（Nvidia Xavier AGX）が車体の移動方向に応じて各車輪の回転速度を制御している。車体には、カメラのほかに距離センサ、自己位置計測センサが搭載され、障害物検出と部分的自律移動のデータ収集を行っている。このアバターロボットは、遠隔地での移動と作業の支援機能として周囲の物体と人間の顔の認識を内蔵しており、作業環境の自律的な情報収集を行うことが可能となっている。

3-3. 観察者の身体フィードバックの効果

センターのオペレータは、走行の操縦を依頼して自分では行わない場合と、自分で直接操縦を行う場合があるが、そのいずれにおいても映像を見る視覚刺激以外の現地情報の提示がないと、映像酔いが発生する。映像酔いは、取得した運動関連情報の知覚統合の不良状態であり、視覚情報を含む感覚情報が全体として人間の従前の正常な知覚処理範囲に入らないことによるものである。しかしそのメカニズムと根本的な解決方法は明らかになっていない。この映像酔いを緩和するには、本来の運動状態に相当する知覚情報を与える、もしくは酔いを回避できるような統合を誘導する情報を与えることが当面の対策と考えられる。

本研究では、観察者に遠隔地の視覚情報を与える際

にカメラの運動に対応する身体的な刺激を同時に加えることで映像酔いの軽減を行った。手法として、HMDを装着した観察者が電動車椅子に着座し、映像の運動状態に応じた電動車椅子による前庭感覚刺激を提示するもの、振動を足底に提示するもの、気流を顔面に提示するものを検証した。



図4 TwinCamと電動車椅子に登場する体験者

図4は、Segwayに搭載されたTwinCamカメラシステムと体験者側の構成を示している。体験者は、搭乗した電動車椅子から並進（前後）運動の加速度と回転（左右）運動の回転角加速度を受ける。映像は、TwinCamカメラシステムからwebRTCで受信すると、カメラの映像取得と通信で遅延が発生している。これは、カメラ内部で圧縮変換する時間が大きい（300 ms程度）が、その環境での通信遅延時間と電動車椅子の運動の発生までの制御遅延を求めておき、映像に同期した車椅子運動を提示する。



図5 足底振動による歩行感覚の生成

全天球立体カメラと五感ディスプレイによるテレエクスペリエンスに関する研究

Teleexperience by TwinCam Omnidirectional Camera System and Multisensory Display

図5は、アバターロボットに搭載されたカメラシステムからの映像に対して、観察者の足底に歩行時の着地を模擬した振動を加える提示を行っている構成である。

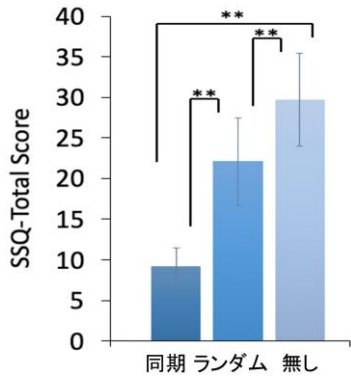


図6 足底振動の歩行運動対応 SSQ

図6は映像中で廊下を進行している際に、足底に速度変動を考慮した歩行時の着地刺激を与えた場合の酔い (Simulator Sickness Questionnaire 指標、SSQ) の抑制効果を示している。

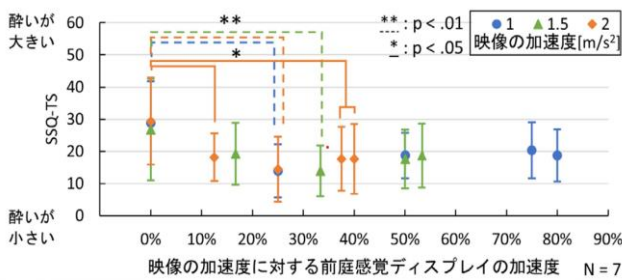


図7 前庭刺激による SSQ の減少

図7は、カメラ映像の直線運動の加減速に対して、電動車椅子の加速度を変動させて提示した際の映像酔い (SSQ) の値を示している。この場合、カメラ映像 (カメラ) の空間中の加速度の 25% 近傍の加速度を提示することにより、映像酔いを 50% 程度抑制することが可能となっている。

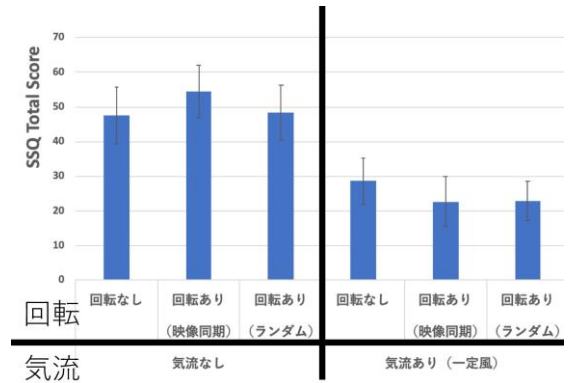


図8 気流刺激による SSQ の減少

図8は、旋回運動する映像 (VR空間を旋回進行する) に対して、着座で頭部運動のないHMDによる観察者に変動する気流方向で顔面・頭部に気流を提示した場合の酔いの評価 (SSQ) を示している。運動視差を持つ映像に対して、気流が有意に映像酔いを抑制していることが示されている。

4. 将来展望

遠隔参加もしくはトレイグジスタンス体験の有用性 はかねてより明確であるが、その際の臨場感を構成する情報は複雑である。臨場感は、本人の身体が存在する眼前の現実空間ではない空間に、自分が存在すると感じることであり、その状態自体は自然な人間の知覚状態ではない。現実的な要求として、遠隔地の周囲の見回しは優先順位が最も高いと考えられるが、これについては我々の研究で全方位リアルタイム立体視が可能となった。次には、視点の移動であるがこれに直接に対応するのは自分自身の身体で移動した結果を遠隔地のカメラの移動量とすることだが、これは歩行のための物理空間またはトレッドミルを用意することになる。しかし、この場合の問題は、自己身体の能動運動に対して遠隔地からの視覚情報と他の感覚情報が必ず遅延するため、それによる酔いの発生が不可避となることである。

本研究の移動方式は、現地操縦者に任せる場合と直接音声による指示を用いており、この場合は遅延があまり問題とならない。移動の直接的変件事象の情報は、その意味で受動的に与えられるため、それに対応する

全天球立体カメラと五感ディスプレイによるテレエクスペリエンスに関する研究

Teleexperience by TwinCam Omnidirectional Camera System and Multisensory Display

視覚以外の提示情報を用意することが可能となる。上記の能動運動に対応するためには、バーチャルリアリティ空間を用いた遠隔空間の表現が必要となるであろう。遠隔の実際空間ではなく、バーチャルリアリティ空間の場合は、視覚情報に対応する身体感覚を補正して提示することが実空間の場合より行いやすいため、遠隔の場合もこれをうまく利用することが考えられる。

おわりに

本研究では、遠隔地の全天球リアルタイム立体映像を観察者に提示し、映像の地点においてカメラを移動することで、その場（空間）の没入感・臨場感の高い体験を提供するシステムとして必要性の高い部分を実現することができた。全方位への立体映像を得るためのシステムを構築し、その視覚情報とともにそれを補完する五感情報のディスプレイを用いることで、遠隔体験の基礎の一部を実証することができた。

参考文献

- [1] Kento Tashiro, Toi Fujie, Yasushi Ikei, Tomohiro Amemiya, Koichi Hirota, and Michiteru Kitazaki. 2017. TwinCam: Omni-directional Stereoscopic Live Viewing Camera Reducing Motion Blur during Head Rotation. Proceedings of SIGGRAPH '17 Emerging Technologies, Los Angeles, CA, USA, July 30 -August 03, 2017, Article 24, 1–2. doi.org/http://dx.doi.org/10.1145/3084822.3084831
- [2] Yasushi Ikei, Vibol Yem, Kento Tashiro, Toi Fujie, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Live Stereoscopic 3D Image With Constant Capture Direction of 360 Cameras for High-Quality Visual Telepresence, IEEE Virtual Reality 2019, 2019.
- [3] Yasushi Ikei, Kento Tashiro, IMAGE CAPTURING DEVICE, U.S.patent 11006028, 2021.
- [4] Tsubasa Morita, Vibol Yem, Tomohiro Amemiya and Yasushi Ikei, Vehicle-Ride Sensation

Sharing for Immersive Remote Collaboration with Vestibular Haptic Chair to reduce VR Sickness, ICAT-EGVE2019, pp. 19-20, 2019.

- [5] V. Yem, K. Yamaoka, G. Sueta, Y. Ikei, Dual Body: Method Of Tele-Cooperative Avatar Robot With Passive Sensation Feedback To Reduce Latency Perception, E-Tech, Siggraph Asia 2020.
 - [6] Vibol Yem, Reon Nashiki, Tsubasa Morita, Fumiya Miyashita, Tomohiro Amemiya, Yasushi Ikei, TwinCam Go: Proposal of Vehicle-Ride Sensation Sharing with Stereoscopic 3D Visual Perception and Vibro-Vestibular Feedback for Immersive Remote Collaboration, Siggraph Asia 2019, Emerging Technologies (SA '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 53-54., 2019. doi.org/10.1145/3355049.3360540
 - [7] Yujin Suzuki, Vibol Yem, Koichi Hirota, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Yasushi Ikei, Airflow Presentation Method for Turning Motion Feedback in VR Environment, ICAT-EGVE2019, pp. 15-16, 2019.
 - [8] 池井 寧, 広田 光一, 阿部 浩二, 雨宮 智浩, 佐藤 誠, 北崎 充晃, 身体的追体験の概念の提案と一部機能の試験実装—多感覚・運動情報提示による歩行・走行体験の共有, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24(2), pp. 153-164, 2019.
- ### 関連文献
- [9] Reon Nashiki, Vibol Yem, Tomohiro Amemiya, Yasushi Ikei, Footstep Sound for Suppression of VR Sickness and Promotion of Sense of Agency, ICAT-EGVE2019, pp. 11-12, 2019.
 - [10] Ryunosuke Yagi, Toi Fujie, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, Vibol Yem, Yasushi Ikei, VR Sickness Reduction in Stereoscopic Video Streaming System 'TwinCam' for a Remote Experience, ICAT-EGVE2019, pp. 27-28, 2019.
 - [11] K. Yamaoka, R. Koide, T. Amemiya, M. Kitazaki,

全天球立体カメラと五感ディスプレイによるテレエクスペリエンスに関する研究

Telexperience by TwinCam Omnidirectional Camera System and Multisensory Display

V. Yem, Y. Ikei, Rendering of Walking Sensation
for a Sitting User by Lower Limb Motion
Display , ICAT-EGVE2019, 2019

この研究は、平成29年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成30～令和元年度に実施されたものです。