

遠隔地の作業者との体験共有のための実験システム

床井 浩平^{1,a)} 大山 英明² 河野 功³ 岡田浩之⁴

概要：遠隔地にいる作業者の視界を指示者に伝送し、そこに相互の姿勢を互いの視界に重畳することにより、作業者と指示者が体験を共有して各種の実験を行うためのシステムについて報告する。このシステムでは作業者と指示者の双方が HMD を装着し、作業者側に設置した全天球カメラで取得した遠隔地の光源環境、もしくは作業者の HMD に装着したステレオカメラの映像をネットワーク経由で指示者に伝送して、指示者が作業者の環境下にいる臨場感のもとに作業者に指示を行うことが可能である。

Experimental System for Sharing Experiences with Remote Workers

KOHE TOKOI^{1,a)} EIMEI OYAMA² ISAO KAWANO³ HIROYUKI OKADA⁴

Abstract: In this presentation, we report on a system for performing various experiments in which the instructor shares the experience of the remote worker by transmitting the field of view of the worker to the instructor and superimposing mutual attitudes there. In this system, both the worker and the instructor wear HMD, and the remote light source environment captured by the omnidirectional camera placed in the worker side or the images of the stereo camera attached to the operator's HMD is transmitted via the network to the instructor. As a result, the instructor can instruct the worker under the presence as if he/she were in the environment of the worker.

1. はじめに

作業現場にいる作業者に対して、指示者が遠隔地から作業内容や機器の操作等を指示しようとする場合、言葉による指示だけでは作業者において指示内容があいまいになったり、解釈に齟齬が生じたりするという問題がある。また指示者の側にも、作業者の状況や作業現場の環境の把握が難しいという問題がある。

このため、このような用途には以前から双方向の映像通信システムを用いた手法が用いられている。しかし、通信回線が狭帯域である場合には、注目する領域について重点的に情報を伝送するなどの工夫 [1] が求められる。また、単純な映像通信では細かな作業の際の意思疎通に十分な情報を交換できない場合があり、立体映像を用いて空間的な位置の把握や存在感の伝送を試みた例 [2] もある。

本研究では、このような遠隔作業支援のための各種の実験を目的とした、テレグジスタンス技術にもとづく遠隔行動誘導や体験共有を行うシステムを開発している [3]。

テレグジスタンスは、遠隔地の人型ロボットの感覚情報を共有しロボットを操縦者の動きに追従させることにより、遠隔地の人型ロボットを操縦者自身の身体のように操る技術である [4], [5]。

また遠隔行動誘導技術は、拡張現実 (Augmented Reality, AR) 技術を用いた遠隔作業支援システムである [6], [7]。体験共有技術とは様々な体験をしている人 (実体験者) の感覚情報を、実体験者が体験した状態 (体勢) で追体験者に提示することにより、追体験者が臨場感を持って実体験者の体験を追体験する技術である [8], [9], [10]。

これらの技術の情報処理には共通した部分が多数存在する。そのため本研究は、テレグジスタンス型ロボット操縦/遠隔行動誘導/体験共有の実験において、共通に使用できるプラットフォームの開発を目指している。本発表では作業者と指示者を人として、作業者の環境の指示者への伝送による体験共有のデモンストレーションを行う。

¹ 和歌山大学 Wakayama University

² 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

³ 宇宙航空研究開発機構 Japan Aerospace Exploration Agency

⁴ 玉川大学 Tamagawa University

^{a)} tokoi@sys.wakayama-u.ac.jp

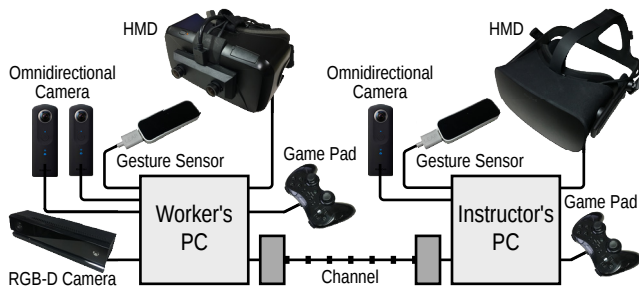


図 1 システム構成

Fig. 1 System configuration



図 2 ロボットヘッドに取り付けた全方位カメラ

Fig. 2 Omnidirectional camera attached to the robot head

2. システムの概要

2.1 システム構成

本システムのハードウェア構成を図 1 に示す。このシステムは作業者と指示者の双方がヘッドマウンテッドディスプレイ (Head Mounted Display, 以下 HMD) を装着して使用する。使用可能な HMD は Oculus Rift DK1/DK2 あるいは CV1 である。これらの HMD のほかに、通常のディスプレイや 3D ディスプレイに表示することも可能である。対応している 3D ディスプレイの映像方式は、トップアンドボトム方式、サイドバイサイド方式、およびフレームシーケンシャル方式である。

作業者の視野は HMD に装着したカメラ (一般的な Web カメラ 1 台あるいは 2 台、もしくは Ovrvision Pro) のほか、等距離射影方式の魚眼カメラ (Kodak PIXPRO SP360 4K など) や全方位カメラ (RICOH THETA S) が使用できる。これらも HMD に装着して使用するほか、据え置きで使用することもできる。全方位カメラをロボット (川田工業 NEXTAGE) の頭部に取り付けた例を図 2 に示す。

ジェスチャセンサ (Leap Motion) は HMD に装着し、作業者と指導者の双方の手の動きを取得する。これを相互に伝送して自分の手と相手の手の動きを示すモデルを双方

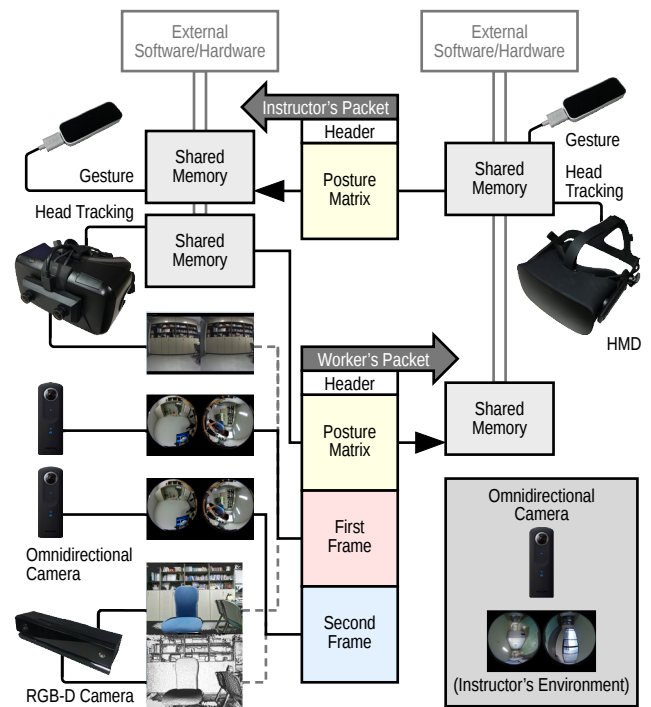


図 3 通信の概要

Fig. 3 Communication overview

の視野に重畳して表示する。これにより遠隔地にいる作業者と指示者が協調して作業することが容易になる。ゲームパッドはこの手のモデルや環境に配置するモデルの視点に対する位置の微調整のほか、HMD に表示する映像の画角や位置などの調整に用いる。

作業者側の RGB-D カメラは作業者の目にある物体の見かけと三次元形状の取得に用いる。対応している RGB-D カメラは Microsoft 社 Kinect, Kinect for Windows, Kinect for Windows v2, Kinect for Xbox One, SoftKinetic 社 DepthSense 311/325, および Creative 社 Senz 3D である。これを用いる場合はカラー画像とデプス画像を作業者側から指示者側に伝送し、指示者側で形状を再構成してから、指示者側の全方位カメラで取得した環境に合成して表示する。

2.2 通信の概要

作業者と指示者の間の通信には UDP を用い、データ送信をステートレスで行う。作業者側では HMD により取得されるヘッドトラッキング情報と、ジェスチャセンサで取得した手の姿勢情報を、共有メモリ (ファイルマッピングオブジェクト) 上に同次座標の変換行列の形で格納する。HMD のヘッドトラッキング情報は並進と回転を表す四元数の組み合わせで得られるため、これを一つの行列にまとめている。またジェスチャセンサーからは骨格の絶対位置情報が得られるが、これも並進と回転からなる同次座標の変換行列に変換している。

```

{
  "position": [ <x>, <y>, <z> ],
  "rotation": [ <x>, <y>, <z>, <angle> ],
  "scale": [ <x>, <y>, <z> ],
  "controller": <番号>,
  "remote_controller": <番号>,
  "model": "<形状データファイル名>",
  "children": [
    <シーングラフのノード>,
    :
    <シーングラフのノード>
  ]
}

```

図 4 シーンファイルの書式

Fig. 4 Scene file format

変換行列を共有メモリ上に置くことにより外部プログラムから変換行列を読み書きすることが可能になり、任意のコントローラを追加することが容易になっている。また、ここに格納されたデータは相互に相手方に伝送されるため、遠隔地の外部機器の操作に利用することもできる。

作業側からは、これに作業側のカメラやセンサで取得した画像を追加して送信している。現状はヘッドトラッキング情報やジェスチャ情報と映像フレームとの同期を容易にするため、フレーム毎に JPEG で符号化している。

2.3 ソフトウェアの機能

これらのほか、開発したソフトウェアは以下の機能を持つ。

- 映像の取得に魚眼カメラや全方位カメラを用いた場合は、それを平面投影像に展開し、環境映像から操縦者の視野の映像を切り出す機能をもつ。また、パンチルトカメラの映像を合成して全天球画像として用いる機能も実験的に実装している。
- 広角ステレオカメラ Ovrvision Pro や 2 台の Web カメラにより取得した立体視映像を表示する機能をもつほか、HMD あるいはパンチルトヘッドに装着した 2 台の全天球カメラ (RICOH THETA S) の映像を安定化する (映像からカメラの方向変化を除去して並進のみにする) 機能を持つ。
- 表示映像に Alias OBJ 形式の三次元形状データを半透明で重畳表示する機能をもつ (図 5)。この配置はマウスやゲームパッドを用いて調整することができる。

Alias OBJ 形式の三次元形状データはパーツ間の階層構造や骨格などのロボットの表現に必要な機能を持たないため、JSON (JavaScript Object Notation) による独自形式のシーングラフでシーンの記述を行う。階層化されたパーツ間の相対的な位置関係はシーングラフ内に記述できるほか、共有メモリの変換行列を指定することにより、自分側と相手側の双方のヘッドトラッキング情報やジェス

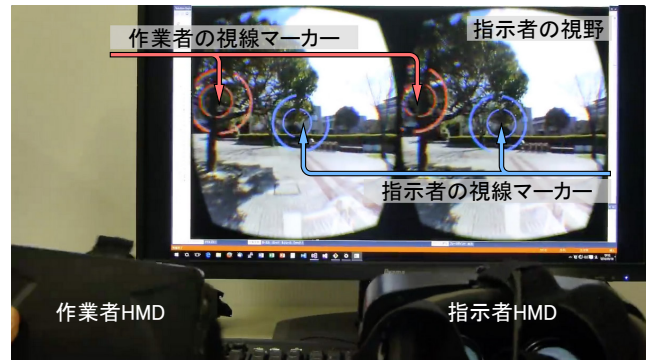


図 5 指示者の HMD の表示

Fig. 5 Display of instructor's HMD



図 6 手のモデルの重畳表示

Fig. 6 Superimposed display of hand model

チャ情報を用いて、シーンのアニメーション表示を行うことができる (図 6)。

このシーンファイルの書式を図 4 に示す。一つのオブジェクトがシーンの一つのノードに対応している。

"position" はパーツの位置, "rotation" はパーツの回転, "scale" はパーツの拡大率を指定する。

"controller" は共有メモリ上に置かれた自分のトラッキング情報やジェスチャ情報の変換行列の番号, "remote_controller" は共有メモリ上に置かれた相手のトラッキング情報やジェスチャ情報の変換行列の番号を指定する。なお、これらは "position", "rotation", "scale" より先にパーツに適用される。

"model" はパーツの形状データ (Alias OBJ 形式) のファイル名, "rotation" はパーツの位置, "children" はこのノードの下位に配置されるノードを列挙する。ここに他のシーンファイルを指定することもできる。

3. 応用

本システムは、月惑星の縦孔・地下空洞探索 (UZUME) システム [11] における、テレグジスタンスロボットの操縦に関連した実験に使用されている。

UZUME システムでは、宇宙飛行士に先駆けて到達が困難な縦孔・地下空洞等の探索を行う人型ロボットプローブを導入し、将来の月探索技術の事前実証を行うことが検討さ

れている [11], [12]. この人型ロボットプロローブは, 地上の科学者に代わって理学的な探査を行う実験遠隔操作型代理科学者 (Experimental Remote-controlled Scientist Agent, ERSA) と呼ばれる [13]. 地上の科学者は拡張現実感技術を活用した広視野・高解像度の HMD を装着し, ERSA が活動する環境に没入することで, ERSA に乗り移ったような臨場感の下で ERSA を操作することができる.

この ERSA の実現には, 月・惑星探査や宇宙ステーション (ISS) で宇宙飛行士を支援することなどを目的に, 月などの超長距離で, 地球上の操作者の思い通りに動かす事ができるスーパーテレグジスタンスロボット (Super-TelExistence Robot, STER) 技術 [14] の開発が必要である.

このような目的に, 本システムの遠隔地にいる作業者の体験を共有する機能が利用可能であると考えられた.

しかし, STER 技術の開発において解決すべき課題のひとつに, 遠隔地のロボットと操縦者の通信の遅延がある. 一般的なテレグジスタンス技術 [4], [5] は, ロボットと操縦者の間に高速・広帯域の通信路があることが前提になっている. ところが地上-月面間の通信では, 帯域が非常に狭いだけでなく, 大きな伝送遅延が存在する. このうち帯域の問題は将来改善される可能性があるが, 伝送遅延は物理的距離に起因するため, 改善手法がそもそも存在しない [15]. このため, このような条件の下で遠隔地の環境をテレグジスタンス技術により操縦者の周囲に再現しても, 操縦者の動作に対する表示遅れのために, 操縦者はロボットを正しく操縦することができない.

そこで, このシステムを用いて遠隔地の光源環境 (環境映像) 全体をあらかじめ指示者 (操縦者) の側に転送し, 指示者の視野を作業者の視野とは独立して提示することにより, 操縦者の頭部の動き (視線の移動) に伴う表示の遅れを見かけ上解消する手法が提案されている [16]. この方法では, 例えば図 2 のようにロボットの頭部にカメラを取り付け, 操縦者のヘッドトラッキング情報に従ってロボットの頭の向きを変更した場合に, 時間遅れによって不正な映像が操縦者に提示されることを抑制できる [15].

4. おわりに

本システムはまだ開発途中であり, 実装はしていても期待通り動作していない機能や, 不安定な部分が多数ある. 特に映像をフレームごとに JPEG で符号化することは, 非常に大きな通信帯域が必要となるため, 現状では目標とする遠隔地との通信に使用するのは困難であることが予想される. この映像の符号化手法の改善は必須である.

また, シーンの記述に用いているシーンファイルには, glTF [17] などの標準化された書式を採用すべきである. 本システムをロボットに応用することを考えれば, ROS (Robot Operating System [18]) の URDF (Unified Robot Description Format [19]) に対応する必要がある.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17K00271 の助成により実施している.

参考文献

- [1] 井口信和, 床井浩平, 内尾文隆. “分散ネットワーク環境における 技術相談のための画像 QoS 設定機能.” 情報処理学会論文誌 41.9, 2651-2660 (2000)
- [2] 床井浩平. “立体ディスプレイを用いたテレプレゼンスの実験.” 3D 映像, Vol. 23, No. 4 (2009)
- [3] 大山英明, 城間直司, 八木下明宏, 根本太晴, 岡田浩之, 鈴木夏夫, 床井浩平. “TelExistence Display System (TED): テレグジスタンス/遠隔行動誘導/体験共有のための AR 表示オープンソースソフトウェア.” 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2017, 2C2-06 (2017)
- [4] Susumu Tachi. “Teleexistence.” 2nd edition, World Scientific (2015)
- [5] 館 “テレグジスタンス.” 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 4, pp.215-221 (2015)
- [6] Maeda, T., Ando, H., Iizuka, H., Yonemura, T., Kondo, D., and Hashimoto, Y. “Immersive tele-collaboration with Parasitic Humanoid: How to assist behavior directly in mutual telepresence.” ICAT 2011, Osaka, Nov. 30 (2011)
- [7] Eimei Oyama, et al. “Behavior Navigation System for Harsh Environments.” Advanced Robotics, Vol. 30, Issue 3, pp. 151-164 (2016)
- [8] Naoji Shiroma and Eimei Oyama. “Development of Virtual Viewing Direction Operation System with Image Stabilization for Asynchronous Visual Information Sharing.” Proc. of IEEE RO-MAN2010 (2010)
- [9] Naoji Shiroma and Eimei Oyama. “Asynchronous visual information sharing system with image stabilization.” Proc. of IEEE/RSJ IROS 2010, pp. 2501-2506 (2010)
- [10] Daisuke Kondo, et al. “View sharing system for motion transmission.” in the 2nd Augmented Human International Conference (AH'11) (2011)
- [11] 河野功, 他. “月火星縦孔地下空洞探査 (UZUME) システムの研究.” 宇宙科学技術連合講演会講演集 60, 6p. (2016)
- [12] 河野功, 他. “月火星の縦孔・地下空洞探査 (UZUME) 計画のシステム検討.” 第 16 回宇宙科学シンポジウム講演集. (2016)
- [13] 児玉浩明, 松尾忍, 河野功. “月惑星探査用代理科学者システムのミッション成立性の研究.” 宇宙科学技術連合講演会講演集 59, 5p. (2015)
- [14] 河野功 他. “月の縦孔・地下空洞探査のためのスーパーテレグジスタンスロボットの研究.” 第 33 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集. (2015)
- [15] 大山英明, 金奉根, 城間直司. “時間遅れの大きい通信下におけるテレグジスタンス型ロボット操縦のための表示システム.” 宇宙科学技術連合講演会講演集 59, 4p. (2015)
- [16] 床井浩平, 大山英明, 河野功. “遠隔地のロボットと視覚を共有する AR 型 HMD システム.” 宇宙科学技術連合講演会講演集 60, 5p. (2016)
- [17] Khronos group. “glTF Overview.” <https://www.khronos.org/glTF/> (1/29/2018 参照)
- [18] “ROS.org — Powering the world's robots.” <http://www.ros.org/> (1/29/2018 参照)
- [19] “urdf - ROS Wiki.” <http://wiki.ros.org/urdf> (1/29/2018 参照)