



# 遠隔体験の臨場感向上手法に関する研究

## A Study on the Method for Presence Enhancement in a Remote Experience

八木龍之介<sup>1)</sup>, 藤江柊生<sup>1)</sup>, 雨宮智浩<sup>2)</sup>, 北崎充晃<sup>3)</sup>, ヤエム ヴィボル<sup>1)</sup>, 池井 寧<sup>1)</sup>  
Ryunosuke YAGI, Toi FUJIE, Tomohiro AMEMIYA, Michiteru KITAZAKI, Vibol YEM, and Yasushi IKEI

- 1) 首都大学東京 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, ikei@tmu.ac.jp)  
2) 東京大学大学院 (〒113-8654 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1, amemiya@vr.u-tokyo.ac.jp)  
3) 豊橋技術科学大学 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, mich@tut.jp)

**概要:** 本論文では、遠隔地でのプレゼンス向上のための手法について述べる。VR 酔いとモーションブレイカーを軽減する全方位立体テレプレゼンスシステム(TwinCam)を開発し、その特性を評価した。実験の結果、TwinCamは従来の両眼カメラの構成よりもVR酔いとモーションブレイカー低減の点で有効であることが示された。

**キーワード:** テレプレゼンス, 全天球カメラ, VR 酔い, モーションブレイカー

### 1. 緒言

ここに居ながらにして別の場所をリアルタイムに体験できる遠隔臨場感(テレプレゼンス, テレイグジスタンス)技術は、幅広い分野での応用が期待されている。近年新たな遠隔臨場感技術として、単一の全天球カメラを使用した映像取得系や多数のレンズを球や円周上に配置した立体全方位カメラの研究開発が活発に行われている[1][2]。しかし、前者では奥行情報に重要な立体視はできないこと、後者では全周囲に正確な視差を有する映像提示を行うのは困難である等の課題がある。

そこで本研究では、2台の全天球カメラを用いた新規のカメラ系を開発し、低コスト且つVR酔いを抑制し、全方位に正しい視差画像が取得可能な全天球立体視テレプレゼンスシステムを実現することを目的とする。開発したシステムの特徴を明らかにし、従来型のカメラを使用したシステムよりも有効であることを示す。

### 2. 遠隔体験システムの構成

#### 2.1 TwinCamのカメラヘッド

本研究で提案する全天球立体視テレプレゼンスシステム(TwinCam)のカメラヘッドを図1(a)に示す。TwinCamはHMD(Head Mounted Display)を着用したユーザの頭部回転に応じて、2台の全天球カメラが直径64mmの円周上を移動する機構を有している(図1(b))。移動するカメラの光軸が回転しない設計により、従来の並行光軸型二眼カメラ(従来型二眼カメラ)では生じ易かったモーションブレイカーを大きく軽減できる。また、2台の全天球カメラから取得できる全天球ライブストリーミング映像は、仮想空間上に設置された2つの球状スクリーン内面に投影され、それぞれの球の中心に位置する2つの仮想カメラから切り



(a) カメラヘッド  
(b) 挙動  
図 1 TwinCam

出された映像が HMD 内の左右のディスプレイ(LCD)に独立に提示される。これによりカメラ1台による全天球ライブ視覚系と同様、モータが回転される前に頭部回転に対応した映像提示を最小限の遅延で行えたと共に、モータが回転された後は視差の正しい全天球映像を取得できる。なお、機構を動かすモータにはバイポーラスステップモータ ST-42BYH1004(基本ステップ角:0.9 度±5%, 静止トルク:4.4 kgf・cm), HMD には Oculus Rift CV1(解像度:[1080×1200]×2, 90 Hz), 全天球カメラには RICOH THETA V(解像度:3840×1920, 30 fps)を使用した。

#### 2.2 TwinCamの構成

図2はTwinCamの構成図である。図2左側は遠隔地で

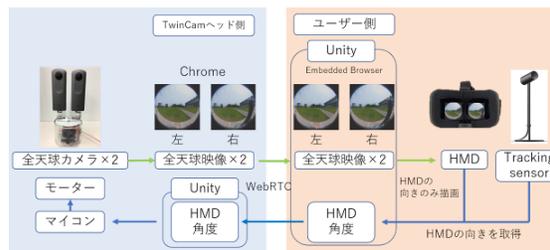


図 2 TwinCam 構成

あり、ユーザー側から HMD で TwinCam ヘッド側カメラの周囲環境を見る構成である。図 2 の緑矢印、青矢印はそれぞれ映像転送、HMD の角度伝送のフローを示している。TwinCam カメラヘッド部の機構は通信処理時間が大きくとも VR 酔いを抑制できることを利点として挙げているが、通信遅延によるモータ回転遅れは正しい立体視の完成までの時間に影響する。そこで TwinCam の通信系では、低遅延で通信が行えるよう WebRTC を用い、PC 間で PtoP 通信環境を構築している。WebRTC は Peer to Peer(P2P)を利用した、ブラウザ同士でボイスチャットやビデオチャットなどのリアルタイムコミュニケーションを実現するためのオープンソース API である。他の規格の WebSocket 等と異なり、サーバーを介することなく直接ユーザー間で通信が行われるため、通信処理の量と物理的伝送時間が削減され、リアルタイム性の高い通信が可能である。本研究では大学の NAT や Firewall を超える通信を実現するプラットフォームとして NTT Communications が提供している Skyway を利用した。PC 間でリアルタイムに映像、および角度データを送受信しながら、ユーザー側では HMD の向きに応じた映像提示を、TwinCam ヘッド側ではマイコンでモータを制御し、角度データに適した位置に回転させている。

### 3. TwinCam の機能評価

テレプレゼンス視覚系としての TwinCam の機能を検証するために 3 つの評価実験を行った。本章では TwinCam のカメラとして RICOH THETA V、通信は有線 LAN を使用し、カメラヘッドはテーブル等に固定した。

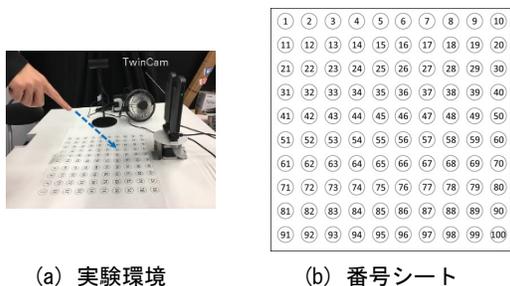
#### 3.1 奥行き知覚精度の評価実験

##### 3.1.1 実験目的および実験参加者

TwinCam の奥行き知覚の精度を調査する。実験参加者は、大学院生 9 人、平均年齢 23.1 歳である。

##### 3.1.2 実験手順

図 3(a)に実験環境を示す。実験参加者は HMD を装着し、机上の番号シート(図 3(b))を、TwinCam カメラの視点から見ると、同じ視点から裸眼で見る。実験者は、紙面から 100 mm の高さに指先が来る位置で任意の番号を指差す。実験参加者はその番号を回答する。実験条件は、3 水準の視認方法{裸眼、HMD による両眼立体視、HMD による単眼視}と 2 水準の指差し角度{45, 90}度である。各水準におい



(a) 実験環境

(b) 番号シート

図 3 奥行き知覚精度の評価実験 実験手順

て、10 回ずつ計 60 回の回答について位置誤差を求めると、

#### 3.1.3 実験結果

実験結果を図 4 に示す。指差し角度 45 度における「裸眼・単眼」間( $p<0.01$ )、および「両眼・単眼」間( $p<0.01$ )において有意差があった。同様の項目( $p<0.05$ )について、指差し角度 90 度においても有意差があった。単眼視の場合、指差し角度によって奥行知覚誤差が変化し、45 度条件では 6 倍程度裸眼より誤差が大きい。両眼立体視では裸眼との有意差はみられず、指差し角度に関わらず奥行知覚が裸眼と同等に可能であることが示された。

### 3.2 モーションブラーの測定実験

#### 3.2.1 実験目的

HMD を着用したユーザーの頭部回転時の提示映像のモーションブラーを測定する。TwinCam と従来型二眼カメラを比較する(図 5(a))。

#### 3.2.2 実験手順

カメラを中心とした半径 1 m の円周上に、白黒の縦縞ストライプ図形(図 5(b))を配置する。カメラを一定速度 3.93 rad/s で 0 度(正面)から 90 度まで右回転させた際の映像を記録し 45 度付近の画像を抽出する。

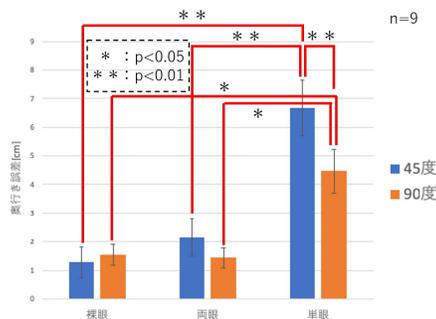
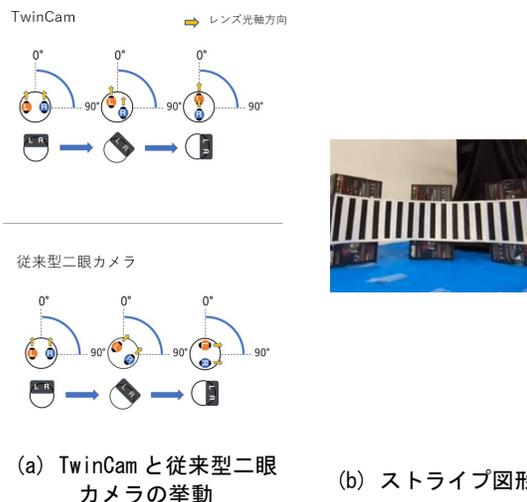


図 4 奥行き知覚精度の評価実験 実験結果



(a) TwinCam と従来型二眼カメラの挙動

(b) ストライプ図形

図 5 モーションブラーの測定実験

### 3.2.3 実験結果

輝度ヒストグラムと輝度プロファイルを図6に示す。従来型二眼カメラでは、高速回転時および図形が遠方ほど大きなモーションブラーが生じた。TwinCamでは回転速度と図形までの距離に依存せずに、常に明瞭な画像が得られることが示された。

## 3.3 VR酔いの評価実験

### 3.3.1 実験目的および実験参加者

TwinCamによる酔いの低減効果を、Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [3]により評価する。実験参加者は、大学院生10人、平均年齢22.9歳である。

### 3.3.2 実験手順

実験環境(図7)中心にTwinCamヘッドを設置し、そこから600mmの位置に1~7の番号が書かれた箱を等間隔に配置する。実験者が3秒に1回のテンポで番号を指示し、実験参加者はHMDの視野中心にその番号を捉える。これを30秒間繰り返した後、実験参加者は、頭部回転時の映像についてSSQに回答する。刺激は、停止状態の全天球カメラ(単眼)、TwinCam(提案型)、並行光軸型二眼カメラ(従来型)の3水準である。

### 3.3.3 実験結果

実験結果を図8に示す。縦軸はSSQのトータルスコアであり、従来型が最も値が大きい。「提案型・従来型」間( $p < 0.05$ )において有意差があり、提案型は単眼と同等程度までVR酔いが低減できることが示唆される。

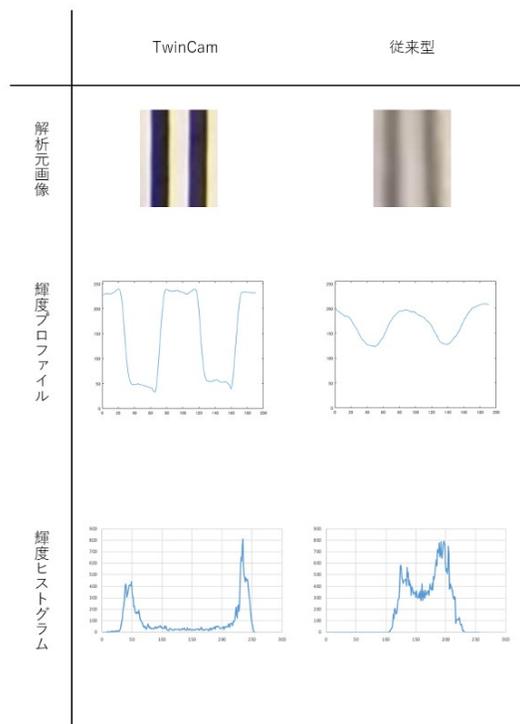


図6 モーションブラーの測定実験 実験結果

## 4. 結言

本論文では、2台の全天球カメラを用いた全天球立体視テレプレゼンスシステム(TwinCam)を開発し、従来のテレプレゼンス用二眼カメラと比較した結果、奥行き知覚精度、VR酔いの軽減とモーションブラーの抑制効果が示された。

**謝辞** 本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A)(課題番号26240029)、総務省SCOPE(受付番号141203019)の支援を得ていることに謝意を表す。

### 参考文献

- [1] Matzen K., Cohen M. F., Evans B., Kopf J., Szeliski R.: Low-cost 360 stereo photography and video capture. ACM Transactions on Graphics (TOG) Volume 36 Issue 4, July 2017 Article No. 148
- [2] Baier H., Buss M., Freyberger F., Schmit G.: Interactive stereo vision telepresence for correct communication of spatial geometry. Advanced Robotics, 17, 3 (2003), 219-233.
- [3] Kennedy R. S., Lane N. E., Berbaum K. S., Lilienthal M. G.: Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. The International Journal of Aviation Psychology. 3, (1993), 203-220

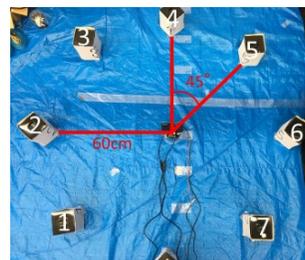


図7 VR酔いの評価実験 実験環境

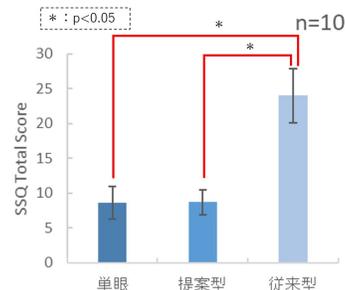


図8 VR酔いの評価実験 実験結果