

# 低遅延で視点に追従するプロジェクション バーチャルリアリティディスプレイの試作

羅程<sup>\*1</sup>

李万龍<sup>\*1</sup>

渡辺 義浩<sup>\*1</sup>

**Abstract** – 近年、バーチャルリアリティディスプレイ技術は様々な領域で幅広い応用が期待されている。そのうち、ヘッドマウントディスプレイは、大きな進歩を遂げたが、未だいくつかの欠点がある。一方、プロジェクションバーチャルリアリティディスプレイはヘッドマウントディスプレイと同程度の低遅延を実現することが困難である。そこで、本稿ではネットワークを介した複数台の高速プロジェクタの制御によって、低遅延で広範囲な投影を実現する。具体的には、高速カメラを用いて、低遅延の視点トラッキングを行う。また、ネットワークを介して、複数台の高速プロジェクタを用いる低遅延で広範囲なプロジェクションディスプレイを提案する。

**Keywords** : 低遅延プロジェクションディスプレイ, プロジェクションバーチャルリアリティ, 視点トラッキング, 広範囲プロジェクションディスプレイ

## 1 はじめに

バーチャルリアリティ技術は、本来存在しない環境や物体を実在しているかのように体験させるものである。近年、バーチャルリアリティ技術は急速に開発が進んでおり、完成度の高い没入体験が可能となっていて、エンターテインメント、教育、医学などさまざまな業界で活用されている [1]。その視覚部分として、バーチャルリアリティディスプレイは、身体の運動に追従した仮想物体の視覚刺激を提示する体験である。特に、映像を提示するための要素技術として、Head Mount Display (HMD) の進化が目覚ましい。

このようなバーチャルリアリティのディスプレイでは、「Motion to Photon」と呼ばれる性能が重要視されている [2]。これはユーザーの動作が画面に反映されるまでの遅延時間を指すことである。最新の HMD 製品における例を挙げると、「HTC Vive」では 5.1ms で、「Oculus CV1」でも 5.8ms 程度の低遅延が達成されている [3]。

しかし、HMD にはいくつかの欠点もある。まず、デバイスを頭部に装着する必要があるため、身体拘束性が高い問題がある。また、HMD は視野角を大きく設計することが難しい。

これに対して、プロジェクションバーチャルリアリティディスプレイ (Projection Virtual Reality Display: PVRD) も提案されている。これは大画面のスクリーンを空間内に配置することで、利用者が提示された映像空間を体験するものである。

代表例として、Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) に基づいた多くの研究が報告されてい

る [4][5]。CAVE は、ユーザを正面、左右側面、床面の計 4 つの大画面スクリーンで覆う構成である。このほかに、CABIN と呼ばれるシステムも報告されている [6]。同システムでは、CAVE のような 4 面のスクリーンに加え、天井にもスクリーンを加えて面数を計 5 面と増やし、パフォーマンスが上昇した。また、CAVE2 は直径 24 フィート、高さ 8 フィートの円筒形システムで、72 個の LCD パネルで構成されている [7]。

PVRD の利点は、HMD に比べて、視野角が広い点や、頭部デバイスの必要がない点である。これより、HMD の高い身体拘束性と大きい視野角設計の欠点を解消する。しかし、欠点として、視点の追従・映像の高速化が難しい問題点と実験環境が複雑である問題点がある。もし PVRD においても現在「HTC Vive」や「Oculus CV1」での「Motion-to-photon」と同様の遅延時間 5~6ms を達成できれば、様々な応用が期待できる。

そこで本稿では、高速プロジェクタ [8] と高速カメラを用いて、人間の視点に追従する低遅延のプロジェクションバーチャルリアリティディスプレイを提案する。投影遅延を計測した結果、従来 HMD の「Motion-to-photon」の時間の要請である 6ms の遅延に抑えられることが分かった。

## 2 提案手法

### 2.1 システムの概要

図 1 に提案システムの構成を示す。本システムは、2 台のコンピュータ、2 台の高速プロジェクタ、1 台の高速カメラから成る。マスターコンピュータには投影のための高速プロジェクタ 1 台と視点を認識するため

<sup>\*1</sup>東京工業大学

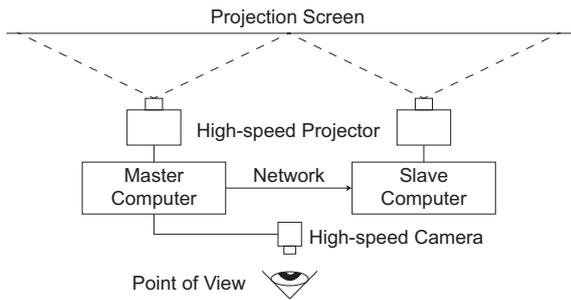


図1 システムの構成  
 Fig.1 System configuration

の高速カメラ1台が接続されている。スレーブコンピュータには、もう一つ投影用の高速プロジェクタ1台が接続されている。また、高速カメラは2台の高速プロジェクタの中央に置かれていて、投影面の反対の方向に向ける。マスターコンピュータとスレーブコンピュータはUDP (User Datagram Protocol) で通信を行う。

以上の構成のもと、高速カメラによって、低遅延で視点の位置を捉え、同結果に基づいて映像を生成し、投影する。以上の構成により、撮像からプロジェクションまでの遅延を6ms程度に抑えている。

なお、本稿では、複数台の高速プロジェクタをネットワークを介して制御している。これは、1台のコンピュータでは複数台の高速プロジェクタを接続することが難しいためである。この構成でも低遅延が達成されることは、すでに検証済みである [9]。本稿では顔の画像ではなく、画像から得た視点の座標データをマスターコンピュータからスレーブコンピュータへ転送する。

また、今回はCAVEやCABINと異なり、両眼視差による立体提示は組み込んでいない。本機能は今後の課題とする。

## 2.2 視点トラッキング手法

本稿での視点とは両眼の中央位置を指す。マスターコンピュータでは、視点を識別してその座標を取得する。これを視点トラッキングと呼ぶ。また、本稿では  $x, y$  座標系の原点を投影面の中央位置から距離  $d$  離れた場所に設定し、その  $x, y$  平面は投影面と平行とした。この原点位置にカメラの画像中央が位置するように、カメラを配置した。投影範囲角度は視点の  $x$  方向と  $y$  方向の動きに応じて変化する。視線が投影面の中央を常に向くように、奥行き方向に動かず、既知の奥行を維持して動くことと仮定する。このため、視点の座標は2次元とする。カメラで取得された視点座標  $(X, Y)$  から、下式で視点の座標  $(x, y)$  に変換する。

$$x = p \times (X - 0.5W) \quad y = p \times (0.5H - Y) \quad (1)$$

ここで、カメラの解像度は  $W \times H$  とする。また、 $(X, Y)$  の単位はピクセルとする。  $p$  はピクセルから mm へ単位系を変換するための係数である。今回は、ユーザとカメラ間の距離を固定としたため、  $p$  はあらかじめ得ることができる。なお、コンピュータ間では視点の座標データが転送される。座標は float 型で表現し、転送されるデータサイズは8byteとなる。

## 2.3 視点に追従する映像の生成

スレーブコンピュータはネットワークによって視点の2次元座標データを受信したあと、同座標に基づいた投影画像を生成する。図2に示すように、  $w$  は複数台のプロジェクタによって投影された投影面の幅、  $h$  は同投影面の高さ、  $d$  は投影面と視点の間の距離とする。  $\theta_{x1}$  と  $\theta_{y1}$  は  $x$  方向と  $y$  方向で、視点から投影面への垂直線と投影面の右頂点への直線の間の角度である。  $\theta_{x2}$  と  $\theta_{y2}$  も  $x$  方向と  $y$  方向で、視点から投影面への垂直線と投影面の左頂点への直線の間の角度である。  $\beta_x$  と  $\beta_y$  は投影面の左頂点への直線と右頂点への直線の間の角度である。これを投影範囲角度と呼ぶ。

図2に示すのは  $x$  方向での各角度の計算方法である。  $y$  方向の場合でも同じように計算できる。以下の式によってそれぞれのパラメータを計算する。

$$\theta_{x1} = \arctan\left(\frac{0.5w - x}{d}\right) \quad \theta_{y1} = \arctan\left(\frac{0.5h - y}{d}\right) \quad (2)$$

$$\theta_{x2} = \arctan\left(\frac{0.5w + x}{d}\right) \quad \theta_{y2} = \arctan\left(\frac{0.5h + y}{d}\right) \quad (3)$$

$$\beta_x = \theta_{x1} + \theta_{x2} \quad \beta_y = \theta_{y1} + \theta_{y2} \quad (4)$$

投影範囲角度の2等分線を視線の方向  $\mathbf{v}(x, y, z)$  とする。以下の式を介して視線の方向を求めることができる。

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_{x2} - \frac{\beta_x}{2}) \\ \sin(\frac{\beta_y}{2} - \theta_{y2}) \\ -\cos(\frac{\beta_y}{2} - \theta_{y2}) \times \cos(\theta_{x2} - \frac{\beta_x}{2}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

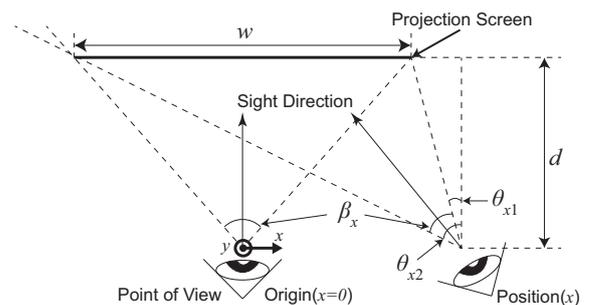


図2 CG生成のメカニズム  
 Fig.2 Mechanism of CG generation

これ以上、視線の方向の角度を計算され、視点の位置とともに、各角度からの投影画像を完成した。最後に、投影画像を高速プロジェクタに書き込み、スクリーンに投影をした。

### 2.4 全体の遅延について

システム全体の遅延を図3に示す。図3の $t_1$ は撮像時間、 $t_2$ は視点トラッキングの処理時間である。 $t_3$ はネットワーク遅延であり、 $t_4$ は投影画像の生成時間、 $t_5$ は投影の転送時間、 $t_6$ は投影時間である。以上より、マスターコンピュータ側の「Motion-to-photon」の遅延時間は、ネットワーク遅延 $t_3$ を除く $t_1$ から $t_6$ までの総和であり、 $T_1$ と表す。一方、スレーブコンピュータ側の「Motion-to-photon」の遅延時間は、ネットワーク遅延 $t_3$ を含める総和であり、 $T_2$ と表す。 $T_1$ と $T_2$ を、従来HMDの「Motion-to-photon」の時間の要請である6msの遅延に抑えられることが望ましい。

## 3 PVRDの高速化実験

### 3.1 実験環境

本実験では、システム全体遅延の計測を行った。具体的には、図3の時間 $T_2$ を検証した。2台の高速プロジェクタが2台のコンピュータに接続され、高速カメラがマスターコンピュータに接続されている。マスターコンピュータとスレーブコンピュータはケーブルとハブを介して互いに接続され、ネットワークシステムを構成した。マスターコンピュータは Precision Tower 7910 (CPU Xeon E5-2620 v4, メモリ 16GB, Windows10) であり、スレーブコンピュータは Dell Precision T7910 (CPU Xeon E5-2687W v4 dual, メモリ 64GB, Windows7) である。実験のシステム構成を図4に示す。カメラのフレームレートは500fpsで、プロジェクタのフレームレートは1000fpsである。

### 3.2 システム全体の遅延の計測

本実験では、[10]と同様に、LED、フォトトランジスタ、マイコンを用いてPVRDシステムの遅延を計測した。マイコンはArduino UNOを用いた。ここで、

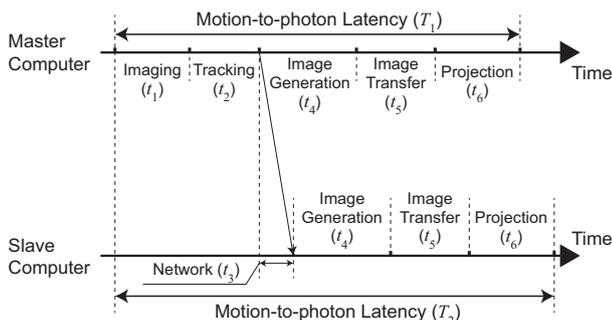


図3 システム遅延構成  
 Fig.3 System latency configuration

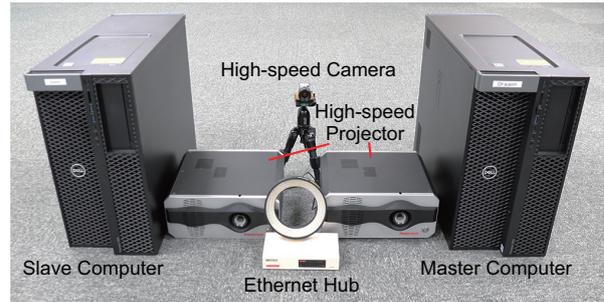


図4 実験装置  
 Fig.4 Experimental device

計測した遅延は、撮像から投影開始までに要する時間である。本稿では、[10]以上CGを生成する部分を加えて計測した。トラッキングの遅延時間は何十usなので、含めなかった。

結果として、マスターコンピュータ側の「Motion-to-photon」遅延時間( $T_1$ )は5.3msで、ネットワーク部分を含めるスレーブコンピュータ側の「Motion-to-photon」遅延時間( $T_2$ )は5.5msのことを検証した。そこで、許容範囲6ms内に収まることが分かった。

### 3.3 実験条件

本実験では、プロジェクションバーチャルリアリティディスプレイの高速化実験を行った。今回の実験では簡単に低遅延で視点トラッキングを行うため、マーカを両眼の中央に貼るという方法を採用した。将来高速の顔認識技術を実装する可能性がある。

図5右下に示されるように、人間は顔にマーカを付与して、スクリーンの前の約1.5mに立っている。スクリーンは2台の高速プロジェクタから投影され、長さは約1.4mで、高さは約0.55mである。作った画像は奥から突き出た長いキューブで、視点の変化に応じて奥行きの変化も分かりやすくなっている。実験場の写真を撮影するため、部屋の電気を付けているが、実際に展示する場合に電気を消した状態で、よりいいパフォーマンスができるようになった。

### 3.4 実験の動作確認

実験の過程では、実験者は高速カメラの前で一定の速度で移動しながら、プロジェクションディスプレイが変わっている。視点は左に移動すればキューブの左の表面を見え、上に移動すればキューブの上の表面を見えるというパフォーマンスが実現された。図5の左下の部分は、本稿で使用した高速カメラが500fpsなので、2msごとにディスプレイが一回変わることを表す。

また、視点は1m/sのハイスピードで移動しても、プロジェクションディスプレイのずれや、遅延などは人間の目でほとんど見られなかった。従って、高速化は実現されると判断した。

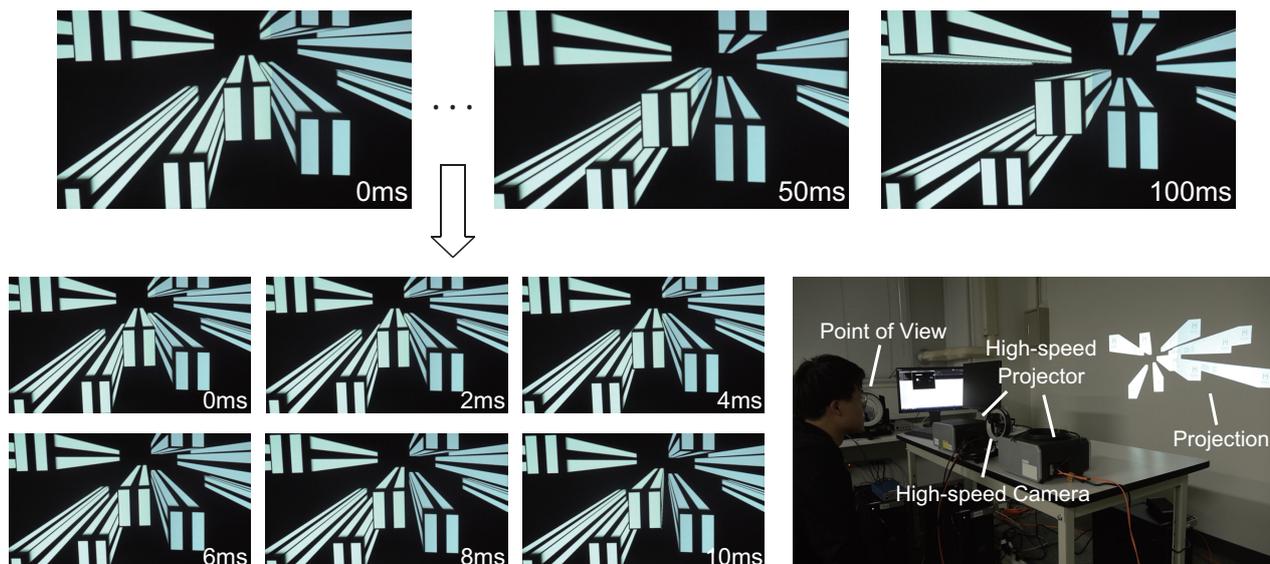


図5 実験結果  
 Fig.5 Experimental result

#### 4 まとめ

本稿では、プロジェクションバーチャルリアリティディスプレイの高速化とネットワーク化の実現に向けて検証した。実際に実験を行った場合、システム全体の遅延は5.5msであり、従来HMDの「Motion-to-photon」の時間6ms程度の要請を満たした。この結果により、低遅延で視点に追従するプロジェクションバーチャルリアリティディスプレイを導入することは可能であると考えられる。

本稿で提案したプロジェクションバーチャルリアリティディスプレイは高速プロジェクタ2台のみの構成である。将来展望として、より広範囲への投影と3次元物体の曲面全体への投影を実現するために、多数台のカメラとプロジェクタのダイナミックプロジェクションマッピングシステムを実装する予定である。また、プロジェクションベースのバーチャルリアリティのメリットに関して、個人的には空間全体をVRコンテンツで埋めるのではなく、半分は現実物体をそのまま生かしたままVRディスプレイを作るのも効果的だと考えている。

#### 参考文献

[1] Aguinias, Herman, Christine A. Henle, James C. Beaty Jr: Virtual reality technology: A new tool for personnel selection; International Journal of Selection and Assessment, 9(1), 70-83 (2001.3)  
 [2] “What is Motion-To-Photon Latency?”, Retrieved 10 November 2016, from <http://www.chioka.in/what-is-motion-to-photon-latency/>.  
 [3] Becher, Armin, Jens Angerer, Thomas Grauschopf: Novel Approach to Measure

Motion-To-Photon and Mouth-To-Ear Latency in Distributed Virtual Reality Systems; arXiv preprint arXiv, (2018.9)  
 [4] Gonçalves, Afonso, Sergi Bermúdez: KAVE: Building Kinect based CAVE automatic virtual environments, methods for surround-screen projection management, motion parallax and full-body interaction support; Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 2, 10:1-10:15 (2018.6)  
 [5] Horan, Ben, et al: Feeling Your Way Around a CAVE-Like Reconfigurable VR System; 2018 11th International Conference on Human System Interaction (HSI), 21-27 (2018.7)  
 [6] Hirose, Michitaka: CABIN-A multiscreen display for computer experiments; Proc. of IEEE International Conference on Virtual Systems and Multimedia, 78-83 (1997.9)  
 [7] Febretti, Alessandro, et al: CAVE2: a hybrid reality environment for immersive simulation and information analysis; The Engineering Reality of Virtual Reality 2013, 8649, 864903.1-12 (2013)  
 [8] Y. Watanabe, G. Narita, S. Tatsuno, T. Yuasa, K. Sumino, M. Ishikawa: High-speed 8-bit Image Projector at 1,000fps with 3ms Delay; The International Display Workshops, 1064-1065 (2015.12)  
 [9] W. Li, C. Luo, T. Nomoto, Y. Watanabe: Preliminary Experiment for Networked Dynamic Projection Mapping; IDY2019-52, 43(34), 29-32 (2019.10)  
 [10] M. R. Mine: Characterization of End-to-end Delays in Head mounted Display Systems; The University of North Carolina at Chapel Hill, TR93-001, (1993)

© 2020 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)