



映像投影を用いた広視野 HMD における 周辺映像の遅延補償の検討

A Study on Delay Compensation of Peripheral Images
in a Wide-Field-of-View HMD using Image Projection

齋藤和人¹⁾, 橋本直己¹⁾

Kazuto SAITO and Naoki HASHIMOTO

1) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 情報学専攻

(〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1 西 9-603, {ksaito, naoki}@hashimoto.lab.uec.ac.jp)

概要: 我々は、動的プロジェクションマッピングを利用してユーザの周辺視野を覆う身体装着型のスクリーンを実現し、これを用いて HMD の周辺視野を拡張する研究を行っている。しかし、映像の補正処理やプロジェクタの投影遅延によって周辺に提示する映像に遅れが生じ、没入感を低減することが危惧されている。そこで本研究では、本システムの処理に遅延時間後のスクリーンの位置姿勢を予測する遅延補償処理を導入し、その効果について評価を行った。

キーワード: HMD, 広視野化, 動的プロジェクションマッピング, 周辺視野

1. はじめに

近年、人間の視野に迫るほど広視野な映像を提示可能な広視野角 HMD[1] の開発が行われている。さらに、HMD 内部に下方視野用の液晶パネルを追加した HMD[2] や LED を組み込んだ HMD[3] など、内部に別の映像提示デバイスを組み込んで視野角を拡大する研究等も行われている。しかし、これらは複数のディスプレイや複雑な光学系を内蔵することを前提としており、ハードウェアの重量増とそれに伴う利用者の装着負担の増大が問題となる。そこで、外部に設置したプロジェクタから部屋の壁への投影映像を用いて HMD の周辺領域を拡張する手法 [4] が提案されており、さらに我々は、これを部屋の壁ではなく、頭部に装着したスクリーンへのプロジェクションマッピングにより拡張する手法を提案した [5]。

しかし、本システムにおける映像補正処理やプロジェクタの投影遅延により、スクリーンに投影する映像 (以下、周辺映像) に遅延が生じており、VR 体験における没入感が低減することが危惧されている。そこで本研究では、本システムの周辺映像の生成処理の中に新たに遅延補償処理を導入し、周辺映像の遅延を解消することで没入感の低下を防ぐことを目指す。

2. 提案手法

2.1 映像投影を用いた広視野 HMD

本研究では、狭視野角な HMD の外側に頭部装着型のスクリーンを装着し、外部環境に設置したプロジェクタからスクリーンに対して、映像をプロジェクションマッピングすることで広視野な映像提示を実現する。提案システムの

概要を図 1 に示す。このスクリーンは、HMD だけでは覆いきれない人間の周辺視野を覆っており、HMD の映像の外側周辺の映像を提示する身体装着型のスクリーンである。また、本手法で用いるプロジェクションマッピングは、ユーザの動きと共に位置姿勢が変化するスクリーンを追跡しながら投影を行う動的プロジェクションマッピングを採用している。本研究では、この動的プロジェクションマッピングを利用してユーザの周辺視野を覆う身体装着型のスクリーンを Dynamic Screen と呼び、これを用いて HMD の周辺視野拡張を行う。これにより、ユーザに提示する映像の視野角を大幅に拡大し、より没入感の高い VR 体験を実現することを目指す。

また本システムは、人間の視野のうち知覚能力が高い中心視野領域を HMD の高精細な映像でカバーし、知覚能力が低い周辺視野をプロジェクタの低精細な投影映像でカバーする設計となっている。これにより、中心視野では精細な 3D 映像を観察しながら、周辺視野では広範囲に低精細な投影映像を知覚することができ、全体として 1 つの広視野かつ高没入感の映像を体験することが可能となる。また、周辺視野は知覚能力が低いため、HMD と周辺映像の境目や周辺映像の解像度の低さを認識しにくい構成となっている。

2.2 周辺映像の生成処理

本システムで提示する周辺映像は、中心視野で観察する 3D 映像と空間的かつ時間的に連続し、位置姿勢が変動するユーザの広視野範囲に提示される映像である。これを生成する手順を図 2 に示す。まず、1. スクリーンの 3 次元位置と姿勢を計測し、2. そのデータに基づいて、左右の目の中心位置から周辺用の広範囲な映像をレンダリングする。次に、

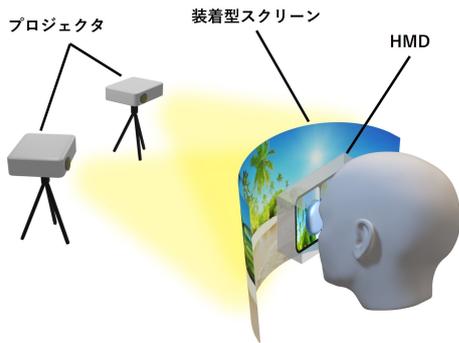


図 1: 提案システムの概要

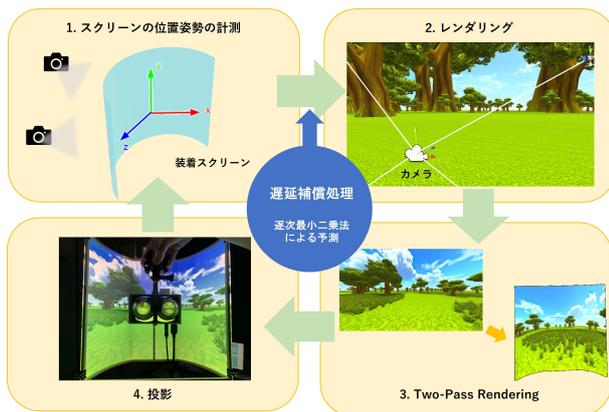


図 2: 周辺映像の生成処理フロー

3. スクリーンの位置姿勢データに基づいて、周辺用の映像に Two-Pass Rendering による幾何補正処理を行う。そして、4. 補正した映像をスクリーンに投影する。この 1～4 までの処理を 1 フレームごとに行う逐次的な処理によって、周辺映像の生成及び投影を行い、動的なスクリーンへのプロジェクションマッピングと HMD の周辺視野拡張を行う。ただし、2. ではユーザの左右の目から見える視差のある 2 つの HMD 用映像のレンダリング、3. では HMD 用映像の歪み補正処理、4. では生成した 3D 映像を HMD から出力する処理も行っている。

2.3 投影映像の遅延補償

本システムでは、幾何補正計算やプロジェクタの投影遅延、レンダリング処理等により周辺映像に遅延が生じており、位置姿勢が計測された時点から映像が投影されるまでにスクリーンが動いてしまうと映像はズレて投影されてしまう。そこで本研究では、逐次最小二乗法 (Recursive Least Squares Method; RLSM) による予測を用いて、全体の遅延時間後のスクリーンの位置姿勢を予測し、それに基づいて幾何補正を行うことで、周辺映像の遅延を補償する。

逐次最小二乗法では、図 3 に示すように、時刻 t_0 から t_n までのデータ $(t_0, y_0), (t_1, y_1), \dots, (t_n, y_n)$ を用いて一次式の線形近似を行う。そして、得られた傾き a と切片 b を用いて遅延時間後の y の値を予測する。今回使用した逐次最小二乗法における誤差関数は以下の式 (1) で表される。

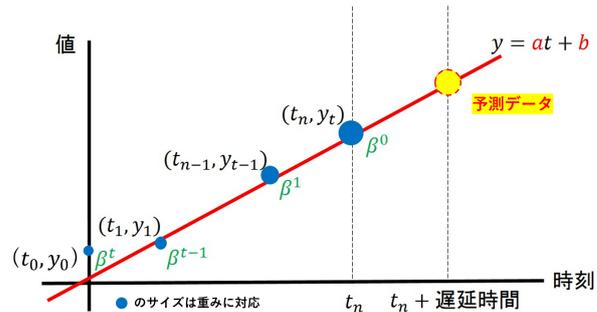


図 3: 逐次最小二乗法 (Recursive Least Squares Method; RLSM)

$$\begin{aligned}
 E &= \beta^0 \{y_{t_n} - (at_n + b)\}^2 \\
 &+ \beta^1 \{y_{t_{n-1}} - (at_{n-1} + b)\}^2 \\
 &+ \dots \\
 &+ \beta^{n-1} \{y_1 - (at_1 + b)\}^2 \\
 &+ \beta^n \{y_0 - (at_0 + b)\}^2 \\
 &= \sum_{i=0}^n \beta^{n-i} \{y_i - (at_i + b)\}^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式 (1) のうち、 β は忘却係数 ($0 < \beta \leq 1$) であり、新しいデータほど重みを大きくすることで、急な動きに対しても高い応答性を実現している。実装したシステムでは、 β の値は 0.8、計算フレーム数 n は初期値が 1 で、 $n = n * \beta + 1.0$ の式で増加し、最終的に 5 に収束するように設定している。

本システムでは、この手法を用いてスクリーンの 3次元座標の位置及び姿勢 (クォータニオン) の計 7 パラメータの値を予測する。各パラメータについて、逐次最小二乗法による直線近似で一次式を求め、それらを用いて遅延時間後のパラメータの値 (図 3, 黄色丸の予測データ) を計算する。後は、ここで計算した位置姿勢データを用いて図 2 の 2. 以降の処理を行うことで、周辺映像の遅延を補償し、ずれの少ないプロジェクションマッピングを実現する。

3. 実装

本システムは、ユーザが頭部に装着する装着部と外部の環境に設置する環境部から構成される。システムの全体構成を図 4 に示す。装着部は、2560 × 1440 ピクセルの映像を 50Hz で出力可能な自作 HMD と、水平 200 度以上をカバーできる曲面スクリーンから構成される。環境部は、周辺映像を投影するプロジェクタ (ViewSonic PX701-4K, 3200 ANSI lm) と光学式モーションキャプチャシステム OpiTrack Flex3 から構成される。トラッキングは、ユーザを囲うように配置したカメラでスクリーンにつけたマークを撮影することで行う。また、HMD 及びプロジェクタは同じ Windows PC (Intel (R) Core (TM) i7-10700 2.90GHz, 32.0GB RAM, NVIDIA GeForce RTX 2060) に接続されており、この PC で全ての CG 映像の処理とレンダリングを行う。

本システムを動作させたときの装着部の様子を図 5 に示



図 4: システムの全体構成



図 5: HMD の周りを拡張している様子

す。装着部の HMD のレンズに目を近づけると、正面では HMD の 3D 映像、周辺ではスクリーンに投影された周辺映像が観察され、全体として非常に広視野な映像を知覚することができた。また、ユーザが場所を移動したり、顔の向きを変えたりした場合でも、プロジェクタの投影範囲内であれば、周辺映像はきちんとスクリーン上にプロジェクションマッピングされていた。

次に、処理に遅延補償を入れない場合と入れた場合のプロジェクションマッピングの様子を比較するため、装着部を八の字軌道で動かしたときの様子をハイスピードカメラ(960FPS)で撮影した。撮影した動画から装着部が図の右下に示す位置にあるときのフレームを取り出した画像を図 6 に示す。図 6 上段の遅延補償なしの場合では、投影のずれが比較的大きく、特に速い速度で動いている位置でのずれはかなり大きくなっている。一方、図 6 下段の遅延補償ありの場合では、遅延補償なしと比べて全体的に投影のずれが小さくなっており、速い速度で動いている位置でもずれは小さく抑えられていることがわかる。

4. 評価

4.1 デモ展示での評価

大学のオープンキャンパスにおいてデモ展示を行い、参加者には遅延補償ありのシステムを用いて自然のシーンの中を歩いたり、飛び回ったりする VR 体験を行ってもらった。そして、体験について簡単なアンケート評価を行った。

アンケートでは、1.HMD のみの VR 体験に比べて、周辺拡張ありの体験では没入感が向上したか、2. 周辺拡張ありの VR 体験に違和感を感じたか、の問いに対して、それぞれ 5 段階で評価を行ってもらった。デモ体験に参加してくれた 100 名の評価結果を図 7 に示す。図 7 左の没入感についての結果では、体験者の 72 % が没入感を 5 段階中の 5 と評価しており、その他の 28 % も 4 と高く評価していた。これより、HMD のみの体験と比べて、周辺拡張ありの体験では没入感がかなり向上していることがわかる。

次に、図 7 右の違和感についての結果では、違和感が 2 と評価した人が 47 % と最も多く、続いて 1 と評価した人が 19 % であった。これより、周辺拡張ありの VR 体験にそれほど違和感を感じなかった人が 6 割以上を占めており、システム構成や遅延補償の有効性を感じられる一方で、まだ 4 割弱の人たちが違和感を感じていることがわかった。参加者からは HMD のレンズやモニタの縁、HMD から出ているコードが気になるという意見があり、デバイスの設計が違和感の原因ではないかと考えられる。一方で周辺映像の遅れについて気になったという意見はなかった。

4.2 遅延補償技術の評価

本システムに導入した 3.2 の遅延補償処理について、その効果を検証する評価実験を行った。被験者には、自然と街の計 2 シーンを遅延補償機能をオンとオフの両方で体験してもらい、それぞれの体験について WEB アンケートを用いて評価を行ってもらった。アンケート全 4 問では、1.HMD のみの体験と比べ、周辺拡張ありの体験ではどの程度没入感を感じたか、2. 周辺拡張ありの体験では、どの程度違和感を感じたか、の問いに対して、スライダーバーを用いたビジュアルアナログスケール法 (Visual Scale Analog: VAS 法)、0(全く感じない)~10(想像できる最大の感覚)で視覚的に評価を行ってもらった。さらに、3. と 4. では 2. で答えた違和感を映像のどの部分に、どんな理由で感じたかを選択形式で回答してもらった。

本評価実験は途中ではあるが、現段階で評価実験に参加してくれた 22 ~ 25 歳の男性 5 名の評価結果 (平均値と標準誤差) を図 8, 9 に示す。まず図 8 の没入感の結果については、没入感の評価は全体的に高く、平均値で比較すると両シーンで周辺拡張ありの方が高い値を示しているが、有意差はみられなかった。本項目は、HMD のみの場合と比べ、周辺拡張ありではどのくらい没入感が向上したかを評価しており、HMD のみと周辺拡張ありの没入感の差が大きいものに対して、遅延補償の有無による没入感の差はそれほど大きくなかったため、有意差が見られなかったのではないかと考えられる。

次に、図 9 の違和感の結果については、平均値で比較すると両シーンで周辺拡張ありの方が低い値を示しているが、こちらでも有意差はみられなかった。しかし、違和感の理由について選択してもらう項目では、遅延補償ありの場合で、映像の遅延間や動きの不一致を選択する人の割合が減少し、被験者のコメントでも、遅延補償なしの体験では、頭を動か

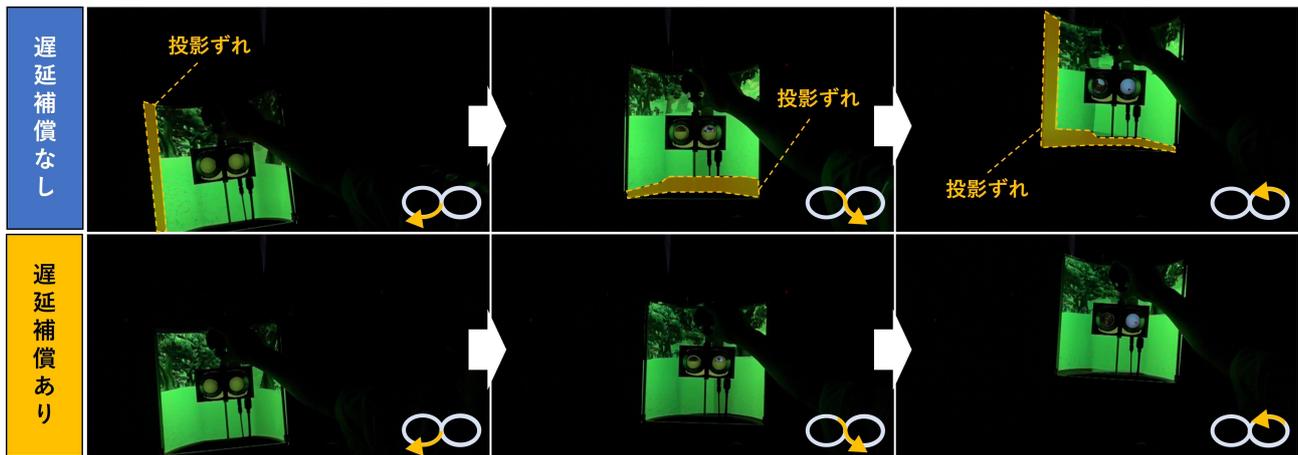


図 6: 遅延補償の有無によるプロジェクションマッピングの違い (八の字軌道)

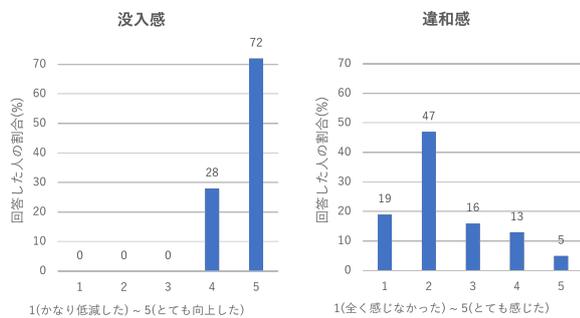


図 7: 評価実験 5.1 の没入感 (左) と違和感 (右) の評価

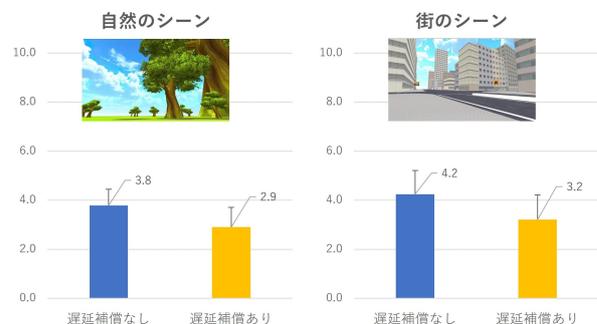


図 9: 評価実験 5.2 の違和感の評価

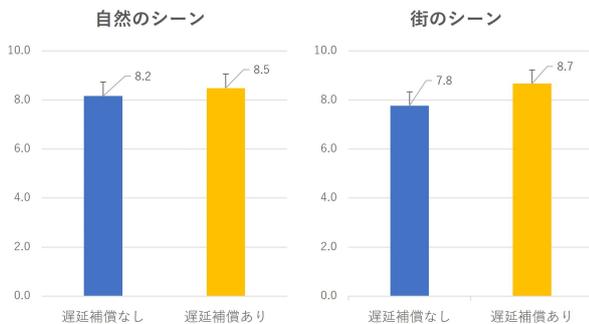


図 8: 評価実験 5.2 の没入感の評価

したとき周辺に違和感が感じたが、遅延補償ありの体験ではその違和感がほとんど無くなった、という意見もあった。それでも結果に有意差が見られなかった原因として、本システムで最も多い動きが左右に首を振る動作であり、水平視野が 200 度以上がカバーされている状態では、左右に首を振って周辺映像に遅れが生じても、遅れている映像が周辺視野に残っているため、それほど違和感を感じなかった可能性がある。これが垂直方向の動きでは、周辺映像が遅れると移動した方向の端部分には一瞬映像が映らず、遅れて映像が流れてくるため、これに違和感を感じる可能性が高い。よって、被験者に細かく動きの指示をすることで結果に有意差が出るのではないかと考えられる。

5. おわりに

本論文では、HMD では覆いきれないユーザの周辺視野を拡張するスクリーンへの動的なプロジェクションマッピングにおいて、そのずれや遅れを低減する遅延補償技術を導入し、本システムを用いた VR 体験と遅延補償技術の効果について評価を行った。現段階では、遅延補償の有無で没入感や違和感に有意な差は見られなかったが、引き続き実験を行い、遅延補償の効果について検証する予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP19H04152 の助成を受けた。

参考文献

- [1] StarVR Corporation: “STARVR ONE”, <https://www.Starvr.com/product/> (参照 2022/01/04) .
- [2] 中野萌士, 磯山直也, 酒田信親, 清川清: “下方視野を拡大した HMD の開発と評価”, 情報処理学会インタラクシオン 2020 (2020).
- [3] Robert Xiao, Hrvoje Benko: “Augmenting the Field-of-View of Head-Mounted Displays with Sparse Peripheral Displays”, Proc. of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (2016) .
- [4] Hrvoje Benko, Eyal Ofek, Feng Zheng, Andrew D. Wilson: “FoveAR: Combining an Optically See-Through Near-Eye Display with Projector-Based Spatial Augmented Reality”, Proc. of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (2015) .
- [5] 齋藤和人, 橋本直己: “プロジェクタを用いた追跡投影による簡易型 HMD の周辺視野拡張”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol46, No.4, pp33-36(2022).