



光線の計測と変調に基づく光学シースルー 頭部搭載型ディスプレイによる視覚的質感再現

Visual Appearance Reproduction by Optical See-Through Head-Mounted Display
based on Light Measurement and Modulation

廣井裕一¹⁾, 伊藤勇太¹⁾

Yuichi HIROI, Yuta ITOH

1) 東京工業大学 情報理工学院 情報工学系 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, yuichi.hiroi@ar.c.titech.ac.jp)

概要: 光学シースルー頭部搭載型ディスプレイにおいて、現実と視覚的に不可分な質感を再現することは、拡張現実感や視覚拡張を実現する際に重要な役割を果たす。従来のカメラやディスプレイによる計測や提示は、画像化プロセスにおいて実環境の光線情報の一部が失われることに着目し、本研究では眼に入る光線情報を受光素子や空間光変調器を用いて直接計測し変調することで、実物体と同等の質感提示を実現する技術を確認する。

キーワード: 拡張現実感、光学シースルー HMD、視覚計測、質感提示

1. はじめに

光学シースルー頭部搭載型ディスプレイ (Optical See-Through Head-Mounted Display, OST-HMD) は、装着者の視野に映像を直接重畳することで、視界にバーチャル情報を統合する。OST-HMD は、拡張現実感 (AR) 技術による多数の応用が期待されるほか、視覚補助に関する応用も期待されている。

AR 技術において、現実とバーチャル物体を違和感なく融合させるには、バーチャル物体の質感を実環境と一致させる必要がある。物体の質感は、私たちが素材を認識し、価値を見定め、意思決定や行動選択をする際に大きな役割を果たす。そのため、現実と視覚的に区別がつかないほどに自然な質感を OST-HMD 上で再現することは、装着者に正しい価値判断や行動を促す上で非常に重要である。

質感を知覚するとは、物体表面の光学特性 (色彩・材質・状態・陰影) を、個々の眼球の視覚特性 (水晶体・瞳孔・角膜) を通して網膜に結像した 2 次元画像から推定することである。よって、視覚的質感の再現には、視覚特性に応じた画像処理と、光学特性を十分に表現できる広色域かつハイダイナミックレンジ (HDR) なディスプレイが求められる。

広色域かつ HDR 表現が可能な OST-HMD として、我々はこれまで、プロジェクションマッピングと OST-HMD を組み合わせた視点依存性を持つ HDR での質感再現手法 [1] や、視点上の環境光を取得し、適応的に広色域・HDR 表現を行う OST-HMD [2] を提案した。しかし、OST-HMD による現実と視覚的に等価な質感実現には、さらなる広色域化・HDR 化に加え、眼の焦点距離や視力などの個々の視覚特性を推定した上で、推定した視覚特性に応じた提示が求められる。

従来の OST-HMD は、カメラにより視線情報を計測し、ディスプレイによりバーチャル情報を提示する。しかし、これらの計測・提示手法は、画像化プロセスにおいて光線方向や位相、スペクトル分布など、実環境の光線情報の一部が失われるという課題がある。

本研究では、眼に入る光線情報を波面センサや空間光変調器を用いて直接計測・変調することで、実物体と視覚的に不可分な質感提示を実現する OST-HMD 技術を確認することを目的とする。本研究は、視覚的質感の再現に求められる、視覚特性の推定および視覚特性に応じた自由度の高い映像提示の双方において、カメラやディスプレイに基づく既存手法を、光線の計測と変調に基づく手法に代替する。これにより、個々人の詳細な視覚特性や環境の高度な質感情報を活用し、目的の達成を目指す。具体的には、以下の 3 点に関して検討を行う。

- A. 眼光学計測における波面収差解析と網膜走査型 OST-HMD を組み合わせたウェアラブル視力特性推定 (2 章)
- B. 実環境の光線変調に基づく OST-HMD 上での自由度の高い映像提示 (3 章)
- C. 光線の計測と変調に基づく OST-HMD による実環境の質感再現 (4 章)

2. 波面収差解析による OST-HMD 上の視力推定

2.1 概要

レーザプロジェクタを用いた網膜走査型 OST-HMD に、眼科臨床における網膜上の反射光の波面収差解析を組み合わせた視力特性の推定手法に関する検討を行う。OST-HMD において装着者の視覚特性 (焦点距離および近視・遠視・乱

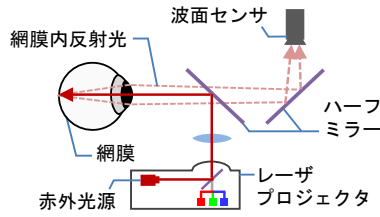


図 1: 眼の波面収差測定を行う網膜走査型 OST-HMD

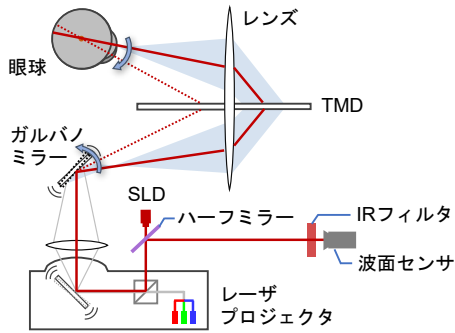


図 2: 眼球移動を考慮した視力推定対応網膜走査型 OST-HMD

視等) を推定することは、自然な質感再現や視覚拡張において重要である。しかし、一般の視線追跡カメラは視線方向や限定環境下での焦点しか推定できず、度付き眼鏡のように眼の光学状態を計測して補正することは困難である。

眼科臨床では赤外光を眼に照射し、網膜上で乱反射し水晶体を通して眼外に出た光の波面を解析することで、水晶体の収差、すなわち視力を直接観測する。一方、網膜走査型 OST-HMD では、レーザープロジェクタから発せられる光線を水晶体の中心で収束させることで、網膜上に直接映像を投影する。本研究では両者の類似性に着目し、OST-HMD で眼の焦点と収差を測定できるシステムの開発を目指す(図 1)。本研究は、OST-HMD による眼への映像提示と計測を同時に行える点が特色であり、眼光学計測をウェアラブル端末に応用する点に独創性を持つ。

2.2 検討状況

模擬眼(屈折率調節範囲 $-5D \sim 4D$)、波面センサおよびレーザープロジェクタによる実験系を構築し、可視光帯における原理検証を行った($D = \text{diopter, m}^{-1}$)。本実験系は映像提示を行いながら、模擬眼上で中等度の近視($0D \sim 4D$)を計測できることを確認した。一方で、現状の光学系の課題を確認し、これらを解決する OST-HMD 光学系の着想を得た。

2.2.1 赤外光による測定

レーザープロジェクタが投射する可視光を直接使った測定は環境光による外乱に弱い。これを解決するため、医療イメージング等で用いられるスーパーluminescentダイオード(SLD)による IR 光源を用いた計測を行う。同様に、波面センサの前面に IR フィルタを挿入し、可視光による外乱を抑える。

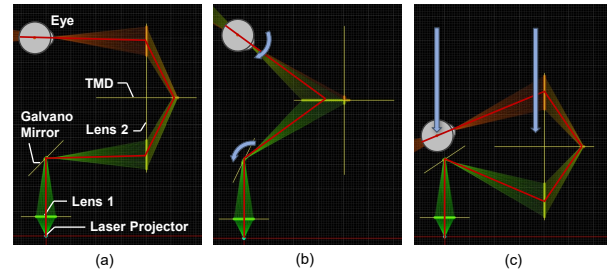


図 3: レイトレーシングによる提案システムの眼球移動に対するシミュレーション。赤線は IR 光の光路を示す。(a) 眼球が光学系に対して垂直に相対する場合、(b) 眼球が回転した場合、(c) 眼球が水平移動した場合。

2.2.2 眼の回転や水平移動に対応する光学設計

網膜走査型 HMD は、レーザープロジェクタからの光線束を水晶体の中心に収束させるという特性上、アイボックス(眼球がバーチャル物体を視認できる空間領域)が非常に狭いという問題がある。そのため、眼の回転や平行移動に追従しながら視力計測と映像提示を同時に行うための光学設計が求められる。

眼の回転への対応として、反射鏡が水平・垂直方向に傾くガルバノミラーを用い、眼球の回転方向に応じてレーザーの向きを変える手法が考えられる。しかし、ガルバノミラーのみで眼球を追従しながら映像を提示する場合、ガルバノミラーの向きに従い光学系全体を回転させる必要がある。

これを解決する手法として、光源を線対称の位置に集光できる透過型ミラーデバイス(Transmissive Mirror Device, TMD)とレンズを組み合わせた光学系(図 2)の着想を得た。この光学系は、レーザープロジェクタの前面に置かれたレンズの焦点と眼球の水晶体の位置が線対称の位置にある(図 3a)。よって、眼球の回転に応じてガルバノミラーを回転させることで、常に水晶体に光線束を集光させた状態で映像を提示できる(図 3b)。ここで、TMD と交差して置かれたレンズは、提示系の光路長を延ばす $4f$ 光学系として機能するとともに、TMD への入射角を最適な入射角である 45° に近づける役割を果たす。また、図 3 の赤線で示すように、レーザープロジェクタ内にビームスプリッターを置き、可視光源と同じ光軸上で IR 光を照射することで、眼球やガルバノミラーの回転方向に依存せず、常に同じ位置で網膜からの反射光を計測できる。さらに、光学系全体をモータ付き直線型ステージなどの機構で水平移動させることにより、眼球の水平移動に対応した視力計測および映像提示を可能とする(図 3c)。

2.3 今後の計画

2.2.1 節の SLD を用いた実験系を設計し、外乱に対する計測精度に関して評価する。その後、2.2.2 節で述べた光学系を設計する。模擬眼を用いた実験を通して、眼球の回転および水平移動に対する提案システムの視力推定精度を評価したのち、模擬眼をユーザ視点カメラに置き換え、映像提示系である OST-HMD の性能(視野角、解像度、ケラレ)

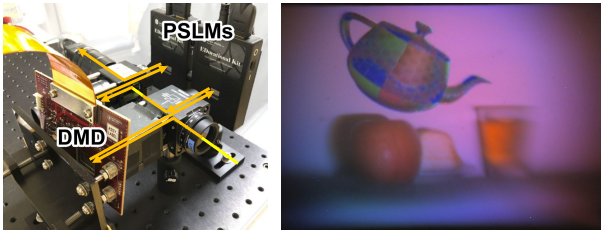


図 4: 2 台の PSLM と DMD による広色域、HDR の光減衰型 OST-HMD [5]。(左) システム構成、(右) OST-HMD を通した表示画像。実環境上にバーチャル物体のティーポットが表示されている。

を評価する。各評価で十分な性能が得られない場合、光学系の再設計と評価を繰り返す。

3. 空間光変調に基づく OST-HMD の映像最適化

3.1 概要

空間光変調器 (Spatial Light Modulator, SLM) は、入射光の振幅や位相を空間的・時間的に変調するデバイスであり、代表的なものとして、LCD や LCoS などの液晶マイクロディスプレイや、多数の微小鏡面を制御することで空間的な振幅変調を行うデジタルマイクロミラーデバイス (DMD) が知られる。特に、位相空間光変調器 (Phase-only SLM, PSLM) は、入射光の位相を変調することで、画素単位での偏光制御や、動的に制御可能なマイクロレンズアレイとしての役割を果たす。

本研究では PSLM の特性を利用し、眼に入る光線を直接制御することで、OST-HMD の映像表現の自由度を向上させる手法を検討する。具体的には、以下の内容に関して検討する。

3.2 光減衰型 OST-HMD の広色域化・HDR 化

OST-HMD で現実と視覚的に不可分な AR 体験を提供するためには、環境光の遮蔽を実現する必要がある。従来の OST-HMD は、ビームコンパイナにより内部ディスプレイの光を実環境に重畳するため、背景が透過される。光学遮蔽を実現する手法として、DMD や透過型 LCD などのモノクロパターンを表示する SLM を眼前に挿入し、視界の一部を黒く塗りつぶしたのち、内部ディスプレイによりバーチャル物体を加算する手法 [3] が一般的である。しかしこの手法は実環境の色情報を活用できず、表現できる色域やダイナミックレンジは内部ディスプレイのスペックに制約される。

一方で、PSLM により入射光の偏光を制御することで、入射光の振幅を波長に応じて変化させ、画素単位でカラーフィルタを実現する光減衰型 OST-HMD [4] が提案されている。この OST-HMD はステンドグラスのように入射光を着色させながら減衰させる性質があり、実環境の色情報を活用できるが、色域やコントラストが狭い。本研究では、PSLM や振幅変調の SLM を多段に組み合わせることで、光減衰型 OST-HMD の広色域化や HDR 化を目指す。

3.2.1 検討状況および今後の計画

2 台の PSLM と DMD を組み合わせた、広色域、HDR の光減衰型 OST-HMD を提案した [5] (図 4)。提案システムは、1 台の PSLM を用いたシステムに対して 1.8 倍の色域で映像提示が可能であるとともに、振幅変調によりダイナミックレンジを向上させた。今後は、スペクトルカメラにより取得した環境光のスペクトル分布に対する適応的かつリアルタイムの色減衰手法の検討や、従来の光加算 OST-HMD を組み合わせることによるさらなる広色域化、HDR 化を検討する。

3.3 複数物体への焦点ブラーを考慮した光学遮蔽

実用的な AR では、バーチャル物体は実空間中の様々なデプスにレンダリングされる場合が多い。複数のデプスにある物体に対して遮蔽を適用する場合、それぞれのデプスに対して整合性のある焦点ブラーを与える必要がある。しかし、現在の光学遮蔽対応 OST-HMD では、複数のデプスに対して同時に整合性を保った焦点ブラーを提示することは難しい。一方で VR-HMD においては、PSLM を自由曲面レンズとして用い、光学平面を立体的に歪曲することで、連続的なデプスを持つ複数物体に対して同時に焦点ブラーを与えるフォーカルサーフェス法が提案されている [6]。本研究ではこの手法を OST-HMD に応用し、複数物体への焦点ブラーを考慮した光学遮蔽を行える OST-HMD の検討を行う。

3.3.1 検討状況および今後の計画

入射光を透過型 LCD により遮蔽した後に、PSLM により光学平面の歪曲を行うことで焦点ブラーを再現する OST-HMD の検討を進めている。透過型 LCD による遮蔽マスクはモノクロパターンとなるため、塗りつぶされたマスク内部については焦点ブラーを知覚できない。よって、理論的には遮蔽マスクのエッジ部分のみに適切な焦点ブラーを提示すればよい。

計画として、まず 1 台の PSLM に対する自由曲面レンズパターンの計算を行ったあと、実験系を構築し視点からの画像を観測する。光学設計は前節で検討した図 4 の構成を応用する。一方で、OST-HMD 上で焦点面を歪曲させる場合、現実の見えも歪曲されることを考慮する必要がある。1 台の PSLM による現実の見えの歪曲を計測したのちに、2 台目の PSLM を導入し、現実の見えの歪曲を最大限打ち消すようなパターンを計算する。

3.4 視力に応じた OST-HMD 映像の最適化

前節では、バーチャル物体を提示する際に視覚的整合性を保った焦点ブラーを与えることを目的に、PSLM を自由曲面レンズとして扱うことで収差の光学補償を行った。この収差補償を、2 章で計測した水晶体の収差に対して適用することにより、度付き眼鏡のように眼の視力に応じた映像の最適化ができる。既に PSLM の自由曲面レンズをプログラマブル眼鏡として応用する研究 [7] が行われており、これにより、3.3 節の検討で得た光学補償の知見を組み合わせることにより、個々人の詳細な視覚特性に応じた映像提示が実現



図 5: 光線の空間振幅変調に基づく煙霧除去 [8]。(左) システム構成、(中) 煙霧による視界不良の状態、(右) システムによる煙霧除去後の視界

できると考えられる。

4. 提案する OST-HMD を用いた質感再現

4.1 概要

2章および3章で検討した光線の計測と変調に基づく OST-HMD を用い、目的に応じて実環境の質感を変調・再現するアプリケーションを検討する。具体的には、視力特性および視界上の環境光を取得し、適応的に光変調を行うことによる視覚補助システムや、実物体の光学特性を取得し、求める質感への変調を行うウェアラブル質感ディスプレイの検討を行う。

4.2 検討状況

3章で検討した OST-HMD の構成を応用することで、一人称視点での煙霧除去を行う視覚補助システムを提案した [8](図 5)。煙霧による視界不良は、運転時や災害時の救助活動など、瞬時の判断が重要となる局面において、人間の意思決定や行動を妨げる。提案システムは、煙霧による光の散乱が眼に入る光線の量を増幅させることに着目し、DMD により光線の振幅変調を行うことにより、実環境の見えを保ったまま光学的に煙霧を除去した後の視界を提示することを可能とした。

4.3 今後の計画

現在の煙霧除去システムは、煙霧データセットの画像をモニタ上で表示して評価を行っている。より実用的なシステムの実現のために、視点と同軸の位置にカメラを置くことで、実環境光をリアルタイムに取得して変調を行う手法の検討を行う。また、このシーンカメラを偏光カメラなど目的に応じたセンサに置き換え、3章の映像提示システムと組み合わせることで、実物体の光学特性を取得し質感の変調を行う手法へと応用できると考えられる。

5. むすび

本研究は、波面収差解析に基づく視力特性推定と、SLM を用いた光変調に基づく映像提示により、実物体と同等の質感提示を実現する OST-HMD 技術を確立することを目的とする。本研究は、視覚計測、映像提示、アプリケーション応用を「光線制御」という枠組みで統合的に扱う点に独創性があり、次世代の OST-HMD 技術を構築するための重要な基盤となる研究である。本研究の成果は、短期的には現在開発が盛んな AR 産業に寄与するだけでなく、長期的には個々人の視力特性に応じた視覚機能の制御や映像提示を

可能とすることが期待される。

謝辞 本研究は、JSPS 特別研究員奨励費 (JP20J14971)、JSPS 科研費 (JP20H04222) および JST さきがけ (JPMJPR-17J2) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] T. Hamasaki, Y. Itoh, Y. Hiroi, D. Iwai, M. Sugimoto, "HySAR: Hybrid Material Rendering by an Optical See-Through Head-Mounted Display with Spatial Augmented Reality Projection", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, pp. 1457–1466, 2018.
- [2] Y. Hiroi, Y. Itoh, T. Hamasaki, M. Sugimoto, "AdaptiVisor: Assisting Eye Adaptation via Occlusive Optical See-Through Head-Mounted Displays", The 8th Augmented Human International Conference (AH 2017), 9:1-9:9, 2017.
- [3] B. Krajancich, N. Padmanaban, and G. Wetzstein. "Factored Occlusion: Single Spatial Light Modulator Occlusion-capable Optical See-through Augmented Reality Display." IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 26, No. 5, pp. 1871–1879, 2020.
- [4] Y. Itoh, T. Langlotz, D. Iwai, K. Kiyokawa, T. Amano. "Light Attenuation Display: Subtractive See-Through Near-eye Display via Spatial Color Filtering." IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 25, No. 5, pp.1951–1960, 2019.
- [5] (To Appear) T. Kaminokado, Y. Hiroi, Y. Itoh, "StainedView: Variable-Intensity Light Attenuation Display with Cascaded Spatial Color Filtering for Improved Color Fidelity." IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 11 pages, 2020.
- [6] N. Matsuda, A. Fix, D. Lanman. "Focal surface displays." ACM Transactions of Graphics, Vol. 36, No. 4, 86:1–86:14, 2017.
- [7] Y. Itoh, T. Langlotz, S. Zollmann, D. Iwai, K. Kiyoshi, T. Amano, "Computational Phase-Modulated Eyeglasses", Transactions on Visualization and Computer Graphics, *Early Access*, 11 pages, 2019.
- [8] Y. Hiroi, T. Kaminokado, A. Mori, Y. Itoh, "Dehaze-Glasses: Optical Dehazing with an Occlusion Capable See-Through Display," In Proceedings of the Augmented Humans International Conference (AHs 2020), pp. 1-11, 2020.