



仰臥位での VR 体験向け非装着型空中浮遊 HMD の基礎検討

Initial design of a mountless aerial HMD for VR experiences in the supine position

古谷佳輝¹⁾, 矢作優知²⁾³⁾, 菊池知世⁴⁾, 余合彩子, 清川清⁵⁾, 福嶋政期¹⁾

Yoshiki FURUYA, Yuchi YAHAGI, Tomoyo KIKUCHI,

Ayako YOGO, Kiyoshi KIYOKAWA and Shogo FUKUSHIMA

- 1) 九州大学大学院システム情報科学府 (〒 819-0395 福岡市西区元岡 744 番地, {furuya.yoshiki.317@s, shogo@ait}.kyushu-u.ac.jp)
- 2) 東京大学大学院学際情報学府 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, yahagi@hc.ic.i.u-tokyo.ac.jp)
- 3) 日本学術振興会特別研究員 DC
- 4) 東京大学大学院総合文化研究科 (〒 153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1, tkikuchi474@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)
- 5) 奈良先端科学技術大学院大学 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地の 5, kiyo@is.naist.jp)

概要: HMD の普及に伴って様々な VR 空間の使い方がユーザーによって開拓されている。本研究ではそのうち、「VR 睡眠」をはじめとする、仰臥位で VR コンテンツを体験する場面に注目する。従来の HMD は頭部に直接デバイスを装着する必要があるため顔の圧迫感や寝返りの打ちにくさが体験の妨げになっている。そこで本研究では奥行反転が起らない再帰透過光学系である TRISFER と回転鏡を用いて頭部にデバイスを装着せずに VR コンテンツを体験できるシステムを提案する。さらにプロトタイプの実験を通して検討した設計パラメータ同士の影響を報告する。

キーワード: HMD, 空中像ディスプレイ, VR 睡眠

1. はじめに

2016 年、「VR 元年」と呼ばれるこの年には Oculus 社の Rift, ソニーインタラクティブエンターテインメント社の PlayStationVR などの家庭向けヘッドマウントディスプレイ (HMD) が続々と発売され, VR 体験の敷居が低くなった。それ以降, さまざまな VR 空間の使い方がユーザーによって開拓されてきた [1]。多くのユーザーが VR 空間で交流するためのプラットフォームである VRChat では音楽イベントや CG 作品の展示会などの催し物が頻繁に開催されるだけでなく, 仲間内で集まって仕事をしたり, 飲み会をしたりなどのパーソナルな使われ方もされている。本研究ではそのうち、「VR 睡眠」をはじめとする, 仰臥位で VR コンテンツを体験する場面に注目する。

従来の HMD は映像提示のために頭部に装置を装着する必要があり, 仰臥位での VR 体験においては課題があった。HMD のずれや圧迫感, 寝返りの打ちにくさにより VR 体験が妨げられる。それに加えて, 頭部装着型の HMD の長時間使用は身体疲労の原因となる [2]。そこで本研究では再帰透過光学素子 (本研究では Dual SMAs[3] を用いた) を用いて頭部に装置を装着せずに VR 体験ができる HMD を開発し, HMD による顔の圧迫や HMD と顔の摩擦などの重量に起因する負担からユーザーを解放することを目指す。本発表ではこの目的に向けて, 非装着型空中浮遊 HMD システムを提案し, 設計パラメータについて議論する。

2. 関連研究

提案システムに関連するシステムを表 1 に列挙する。表の列見出しが表す内容は下記のとおりである。

移動性: HMD を装着しながら移動できる

頭部追従性: 頭部を回転させても映像を視聴し続けられる

非装着性: 装置を装着せずに映像を視聴できる

ハードウェア構成: システムを構成するハードウェアの配置方法

2.1 HMD の軽量化

VR 体験の快適さを向上させるアプローチの 1 つに, HMD の軽量化がある。例えば, Itoh らの Beaming Displays[4] はユーザーが装着するデバイスにはスクリーンと凹面鏡, ビームスプリッターのみを取り付け, 映像はステアリングプロジェクタから HMD 上のスクリーンに投影することで HMD の軽量化を達成した。Akşit らの HoloBeam[5] はユーザーがホログラフィック光学素子のみを装着し, その素子に対してホログラフィックプロジェクタの光を照射することで映像をユーザーに提示する。これらのシステムは既存の HMD から重量増の原因となる映像生成部を取り除くことで HMD を大幅に軽量化した。しかし, 仰臥位での VR 体験では寝返り動作や頷き動作によって HMD がずれてしまい, 体験に支障が出る。したがって, 仰臥位での VR 体験においては HMD の軽量化だけでは不十分である。

2.2 非装着型 HMD

HMD を装着せずに VR 体験ができるシステムも提案されている。HoloArm[6] はオートステレオスコピックディスプレイをロボットアームの先端に取り付け、常にユーザの視線方向にディスプレイを提示するシステムである。このシステムはディスプレイを大きくすると視野角が広がるが、ディスプレイの重量が大きくなるほど、機械的な位置合わせの応答性能は制約されるというトレードオフを生じる。したがって視野角を大きくするにはより大掛かりなロボットアームが必要であり、視野角を大きくするためのコストが高い。提案システムは視野角の拡大のために TRISFER と回転鏡を大きくする必要があるが、システムの動作時に重心が動かないものなので視野角を大きくするコストは低い。

2.3 再帰透過光学素子を用いた HMD

再帰透過光学素子の主たる用途は空中ディスプレイであるが、光学素子に対して対称な位置に映像を転送できるという特性から、HMD にも応用されている。Otao らの Air Mounted Eyepiece[7] は既存の HMD の映像を再帰透過光学素子を用いて目の前に結像することで視野角が広い光学シースルー型 HMD を実現した。Ochiai らの Make your own Retinal Projector[8] はレーザープロジェクタと再帰透過光学素子を組み合わせることで網膜に映像をプロジェクションしている。これらのシステムは再帰透過光学素子を用いた HMD ではあるが、ユーザの身体的負荷から解放するために HMD の非装着化を目指す本研究とは、目的を異にする。

3. 設計

3.1 設計要件

本研究では仰臥位における非装着型 HMD の要件として下記の事項を設定し、システムを設計した。

1. 仰臥位のユーザの眼球正面に HMD の空中像を提示できる。
2. ユーザは一切装置を装着せず立体映像を鑑賞できる。
3. 常に眼球正面に HMD を提示するため、ユーザの頭部回旋に追従して HMD を移動できる。

3.2 原理

提案システムは市販の HMD、回転鏡、松村らが開発した TRISFER[9] から構成される。HMD から出た光は回転鏡に入射して向きを変え、TRISFER に入る (図 2(a))。TRISFER に入った光は Dual SMAs を通り、上側の鏡で反射された後、TRISFER 内部に HMD の空中像を結ぶ。一度集光された光は再び広がりながら下側の鏡で反射され、Dual SMAs を通る。そして TRISFER から出た光は再び HMD の空中像を結ぶ (図 1(b), 図 2(b))。この空中像を覗き込むと映像を見ることができる (要件 1)(図 1(c))。

さらに提案システムはユーザの周囲を見回す動きに追従して HMD の空中像を回転させることができる。ユーザの頭の回転はカメラの映像から検出しており、頭の回転を検出すると回転鏡を動かす。回転鏡を θ° 回転させると HMD の虚像は $2\theta^\circ$ 回転するので検出した頭の回転角の変化量の $\frac{1}{2}$ だけ回す。この円運動を伴った映像を奥行反転が起こらない光学系である TRISFER をつかってユーザの目の前に転送する。一般的に再帰透過光学系は Dual SMAs に近い輝点を Dual SMAs の近くに結像し、Dual SMAs から遠い輝点は遠くに結像するため光源に対して空中像は奥行方向に反転したものになる。しかし TRISFER は入射した光が 2 回 Dual SMAs を通るため 2 度奥行反転が起こり、光学系全体では奥行が反転しない。つまり HMD の虚像の軌道と HMD の空中像の軌道が一致する。回転鏡の回転によって HMD の虚像は接眼レンズを回転中心に向けながら円運動をするため (図 2(c)), HMD の空中像は接眼レンズを常にユーザに向けながら動かすことができ (図 2(d)), ユーザは一切装置を装着することなく頭を回しても映像を見続けることができる (要件 2, 3)。

3.3 プロトタイプの構成部品

HMD は底面が平らで設置が簡単なことからハコスコ社の段ボール製 VR ゴーグルであるタタミ 2 眼を用いた。回転鏡はガラスミラーとサーボモータで構成されており、ガラスミラーはコーワ社の 200 mm × 200 mm × 5 mm のものを、サーボモータは DSSERVO 社の DS3218 を用いた。TRISFER は Dual SMAs と 2 枚のガラスミラーで構成される。Dual SMAs はアスカネット社の 420 mm × 420 mm

表 1: 従来システムと提案システムの設計方針の違い

	移動性	頭部追従性	非装着性	ハードウェア構成
一般的な HMD	○	○	×	一体型
Air Mounted Eyepiece[7]	○	○	×	一体型
HoloArm[6]	△	○	△	一体型
HoloBeam[5]	×	○	△	分離型
Make your own Retinal Projector[8]	×	×	○	分離型
BeamingDisplays[4]	×	○	△	分離型
提案システム	×	○	○	分離型

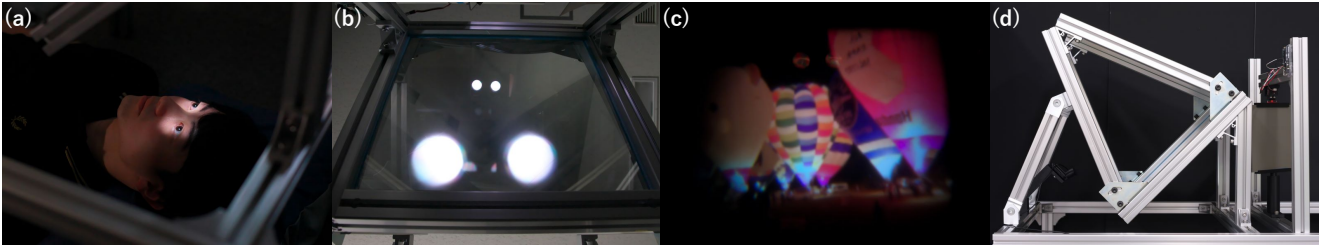


図 1: (a) プロトタイプを使って映像を鑑賞している様子 (b) 仰臥位のユーザーの目の前に結像する HMD の接眼レンズ (c) 空中像の HMD を覗いたときに見える映像 (d) プロトタイプの全体像

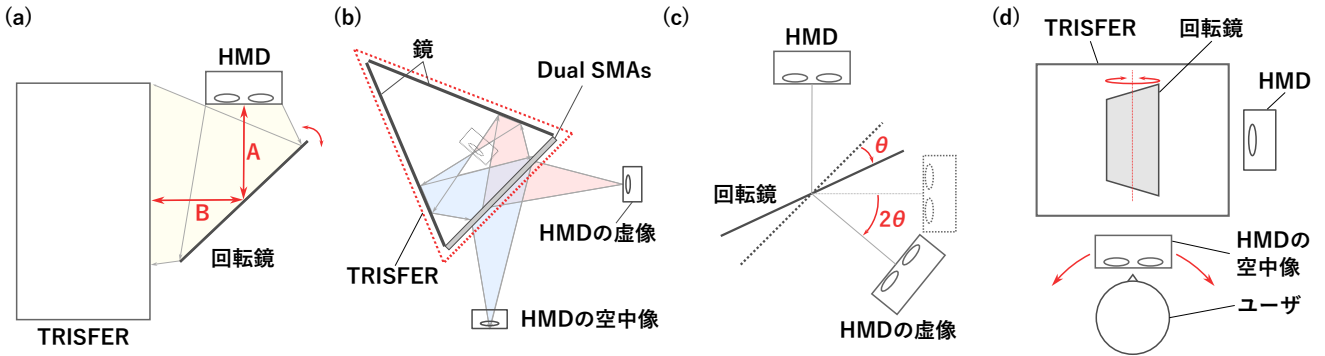


図 2: (a) プロトタイプを上から見た模式図 (図 3 の V_1 視点) (b) 回転鏡によって作られた HMD の虚像が TRISFER を通って空中像を結ぶ光路 (図 3 の V_2 視点) (c) 回転鏡の回転角と HMD の虚像の回転角の関係 (図 3 の V_1 視点) (d) HMD の空中像の動き (図 3 の V_3 視点)

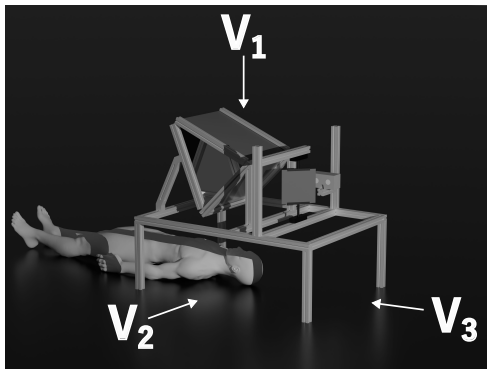


図 3: プロトタイプのイメージ図

の ASKA3D プレート [10] を用いた。ガラスミラーはコーワ社の 530 mm × 420 mm × 5 mm のものを用いた。後述する頭部のトラッキングのためのカメラは Logicool 社の C922n を用いた。以上の部品を配置するためにミスミ社の 8 シリーズアルミフレームで筐体を製作した (図 1(d))。

3.4 回転鏡の位置と大きさの影響

HMD 回転鏡間の距離 (図 2(a) 中の A) と回転鏡 TRISFER 間の距離 (図 2(a) 中の B) は提案システムにおいて重要な設定パラメータである。A の長さが HMD の空中像の回転半径となるため、頭の回転軌道への追従性を決めるパラメータである。そして TRISFER は光源-Dual SMAs 間距離と Dual SMAs-空中像間の距離の和が Dual SMAs の幅と常に等しくなる性質がある (TRISFER の飛び出し距離

の性質と呼ぶ)。よって A と B の長さの合計が大きくなるほど TRISFER とユーザーの顔が近づくことになるため、B はユーザーに与える圧迫感を左右するパラメータである。これに加えて A の長さや鏡の大きさによって映像がどの程度見切れるか決まり、A と B のどちらか短い方が回転鏡の半径の最大値になるため A と B の比も注意深く決める必要がある。

今回製作したプロトタイプに搭載された Dual SMAs の大きさでは頭を 20° 以上回転させると空中像が見えなくなってしまうため、頭の回転角が 20° 以内であると仮定して A と B の長さを決定した。はじめに理想的な空中像の回転半径を求める際に頭の回転軌道を直線上を転がる楕円に近似して求めた。楕円の長半径と短半径は日本人頭部寸法データベース 2001[11] を参考にそれぞれ 94.55 mm と 79.35 mm に設定した。頭の回転角が 0°, 10°, 20° のときの座標を求め、この 3 点から回転半径を求めると約 444 mm であった。しかし、TRISFER の飛び出し距離の性質から Dual SMAs と光源の距離は Dual SMAs の幅以下である必要がある、A+B は 420 mm 以下である必要がある。そのため A を 444 mm にすることはできない。これに加えて本プロトタイプは筐体の昇降機能を搭載していないため、ユーザーは筐体の下に潜り込んで映像を見る必要がある。日本人男性の背肩幅の平均は 439.5 mm[12] なので少なくとも 400 mm は高さが必要だと考えた。枕の高さは 100 mm 程度であり頭長は 190 mm 程度なので TRISFER とユーザーの距離は 100 mm 以上は確

保したい。TRISFER の飛び出し距離は Dual SMAs の幅と光源 TRISFER 間距離の差と等しいので光源 TRISFER 間距離は 320 mm 以下となる。したがって A+B は 320 mm 以下である必要がある。

以上を踏まえて本プロトタイプのパラメータを決定した。楕円モデルの頂点位置と空中像の高さの差が平均 10 mm 以内ならば許容できると考え、頭の回転角が 20° までの範囲ならば A を 200 mm に設定すれば問題ないと判断した。そして、B の長さが鏡の最大サイズになってしまうこと、鏡は大きいほど映像の見切れがなくなることから B を制限内で最大の 120 mm とした。鏡の半径の最大値は B の長さであるが、実際はフレームに厚みがあるのでそれを考慮して 100 mm とした。

3.5 視野角・輝度・解像度について

HMD の性能として重要な視野角、輝度、解像度についてそれぞれどの設計パラメータが影響しているのか示す。視野角に影響を及ぼしているのは回転鏡と Dual SMAs の大きさ、HMD 回転鏡間の距離 (図 2(a) 中の A) である。特に回転鏡の位置と大きさが重要で Dual SMAs の大きさのみを大きくしても回転鏡が小さい、または回転鏡の大きさに対して HMD 回転鏡間の距離が長すぎる場合は回転鏡から Dual SMAs に入射する光の幅が狭くなるため視野角が小さくなってしまふ。輝度に影響を及ぼしているのは HMD の輝度、Dual SMAs、全 3 枚の鏡での輝度減衰である。提案システムは一般的な HMD と違って光源の輝度を映像生成部の重さを気にせずに上げることができるので、映像の輝度を上げることが容易な光学系であると言える。解像度に影響を与えるのは HMD と Dual SMAs である。ただ、HMD の解像度に対して Dual SMAs による解像度劣化の影響が大きいので、実質的には Dual SMAs 依存であると言える。

4. おわりに

本研究では非装着型空中浮遊 HMD を設計し、プロトタイプの実装により提案システムにより立体映像を提示可能であることを確認した。そして、設計パラメータ同士の影響を考察した。今回製作したプロトタイプの光源は設置の簡単さから段ボール製 VR ゴーグルとした。3.5 節で述べた通り、提案システムは既存の HMD とは異なり、光源の重さがユーザに負担を与えることはない。そのため、アイボックスが大きく、輝度が高い HMD を開発し、提案システムに搭載するという発展の方向性が考えられる。加えて、頭の回転角を推定する手法の改善が望まれる。プロトタイプではユーザの正面に設置された 1 台の RGB カメラで推定を行っているため、カメラの台数を増やすことや、深度カメラを併用することで推定精度を上げることが考えられる。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP24834281 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] ねほりんばほりん: パ美肉おじさん, NHK, 2020, <https://www.nhk-ondemand.jp/goods/G2019104622SA000/> (2024/6/27 access).
- [2] Souchet, Alexis D and Lourdeaux, Domitile and Burkhardt, Jean-Marie and Hancock, Peter A: Design guidelines for limiting and eliminating virtual reality-induced symptoms and effects at work: a comprehensive, factor-oriented review, *Frontiers in psychology*, Vol. 14, pp. 1161932, 2023.
- [3] International Electrotechnical Commission: 3D display devices - Part 51-1: Generic introduction of aerial display, IEC TR 62629-51-1:2020, 2020.
- [4] Itoh, Yuta and Kaminokado, Takumi and Akşit, Kaan: Beaming Displays, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 27, No. 5, pp. 2659–2668, 2021.
- [5] Akşit, Kaan and Itoh, Yuta: HoloBeam: Paper-Thin Near-Eye Displays, 2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 581–591, 2023.
- [6] Dendo, Koya and Itoh, Yuta and Fabre, Émilie and Rekimoto, Jun: HoloArm: A Face-Following 3D Display Using Autostereoscopic Display and Robot Arm, 2024 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), pp. 581–583, 2024.
- [7] Otao, Kazuki and Itoh, Yuta and Takazawa, Kazuki and Osone, Hiroyuki and Ochiai, Yoichi: Air Mounted Eyepiece: Optical See-Through HMD Design with Aerial Optical Functions, *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, pp. 1–7, 2018.
- [8] Ochiai, Yoichi and Otao, Kazuki and Itoh, Yuta and Imai, Shouki and Takazawa, Kazuki and Osone, Hiroyuki and Mori, Atsushi and Suzuki, Ippei: Make your own retinal projector: retinal near-eye displays via metamaterials, *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, pp. 1–2, 2018.
- [9] 松村 俊輝 and 阪口 紗季 and 苗村 健: 単一の再帰透過光学素子による空中像の奥行き反転を解消する光学系, *ヒューマンインタフェース学会研究報告集*, Vol. 22, pp. 53–58, 2020.
- [10] アスカネット株式会社: 光学結像装置; 特開 2012-014194
- [11] 人工知能研究センター: 日本人頭部寸法データベース 2001, <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/head/index.html> (2024/7/1 access).
- [12] 人工知能研究センター: AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003, <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/fbodydb/index.html> (2024/7/1 access).