



周辺環境への気づきやインタラクションが可能な HMD に関する検討

A Study for HMD that Allows Users to be Aware of Their Surroundings

遠藤勇¹⁾, 工藤義礎¹⁾, 高嶋和毅¹⁾, 藤田和之¹⁾, 北村喜文¹⁾

Isamu ENDO, Yoshiki KUDO, Kazuki TAKASHIMA, Kazuyuki FUJITA, and Yoshifumi KITAMURA

1) 東北大学 電気通信研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1, isamu@riec.tohoku.ac.jp)

概要: 没入型 HMD では、ユーザは高い臨場感を得ることができる一方、周辺環境(手元の物、周囲の物や人)との簡単なインタラクションすらできず、周囲の人もまた HMD 装着者の状況を把握することができない。そこで本研究では、HMD 装着者の周辺環境への気づきやインタラクションを可能にする、新たな遮蔽度を制御可能な開閉扉型・透過扉型の 2 つの HMD を設計、実装した。また両方式の HMD を用いた場合における HMD 装着者と周囲の人の両者からのフィードバックを得るため、2 つの予備的実験を行った。最後に、その結果をもとに将来の HMD の設計可能性について議論した。

キーワード: HMD, 視覚, 機構・アクチュエータ, 作業支援・評価

1. はじめに

没入型 HMD (Head-Mounted Display) の普及に伴い、VR コンテンツの体験や製作が一般的に行われるようになった。現状の HMD は、ユーザを現実世界の視覚・聴覚情報から遮断し、VR 体験の臨場感や没入感を高めることに特化している。しかしこれは同時に、日常生活で発生する人と物[1][2][3][4][5][6]、あるいは人と人[7][8]とのインタラクションを困難にし、HMD 装着者だけでなく周囲の人にも不利益をもたらす恐れがある。

HMD 装着者が VR 体験中も周囲を確認できるよう、VE (Virtual Environment) 内へ周辺環境の情報を提示する手法が活発に研究されている[1][2][3][4][5][6]。しかしこれらの手法では、外部カメラ映像の加工段階での遅延[9]や位置ずれ等の影響により、ユーザは周辺環境との正確な距離感を把握することができず、キーボードタイピングなど細かいインタラクションを行う際に支障が出る。そこで近年では、外部カメラの映像を通さず、HMD 装着者が外部を直接目視できるように、HMD の設計を見直す試みがなされている[10][11]。Kien らは、HMD の周辺部に遮蔽と透過の切り替えが可能な窓を設置し、ユーザが必要に応じて周辺環境への視野を確保できる MDI (Multi-channel Dynamic

Immersion)を提案した[11]。しかし、この研究は HMD 装着者が周囲を確認できない問題は概ね解決できるものの、周囲の人への手掛かりに関して検討されておらず、HMD 装着者の状況を把握しづらいという課題が残っている。なお、HMD 装着者の視線等を外部ディスプレイにより周囲へ提示することは、周囲の人々との暗示的なコミュニケーションに有用であることは既に示されている[7][8]。

そこで我々は、HMD の構造を再考し、HMD の外部との遮蔽度を状況に合わせて制御する HMD について検討する。これにより、HMD 装着者が VR 体験を保持したまま、周辺環境への気づきやインタラクションを可能にする HMD を設計する。MDI[11]では、HMD の周辺部に設置した窓部分の遮蔽度を、液晶素子を用いて光学的に制御していたが、本研究では、現実世界における扉や窓のメタファを用いた機械的な機構をもつ HMD について検討する。窓や扉は、



図 1: 開閉扉型 HMD (左) と透過扉型 HMD (右) の外観

空間と空間を物理的に隔てたり繋げたりする役割を持ち、その開閉の程度で、内部の人の意図（部屋に侵入してほしくない、してもいい、外の状態も知りたい等）を周囲の人がある程度推測することができる。本稿では、このシンプルな考えに基づき、扉のように周辺部分が開閉する機構を持つ開閉扉型 HMD と、周辺部分に設置した窓の透過度を制御することができる透過扉型 HMD を考案し、その制御や利用方法について議論する。透過扉型 HMD は、液晶シャッターを用いる MDI と本質的に似ているものであるが、対となる開閉扉型の特徴を議論するために設計・実装した（図 1）。さらに実装した 2 つの HMD を用いて予備的実験を行い、各方式の HMD の効果を検証した。最後に、その結果をもとに将来の HMD の設計可能性について議論した。

2. 関連研究

2.1 周辺環境の情報を VE 内へ提示する手法

HMD 装着者が周辺状況を把握できない問題に対し、外部カメラ等を用いて、VE 内に外部映像を提示する手法が提案されている[2]。また外部カメラで取得した映像を加工することで、実物体の映像を VE に馴染ませる手法も提案されている[1][6]。しかしこれらビデオスルー型の手法では、映像を加工する際に遅延が発生することや、外部カメラと目の位置のずれから、HMD 装着者は周囲の物や人との距離感を正確に掴むことができず、タイピングなど周辺環境との細かいインタラクションには向かない。

物体や人をシステム側で認識し、VE 内のコンテンツに合わせて 3D オブジェクトに置き換えて提示する手法も提案されている[3][4][5]。これらの手法により、VR 空間への臨場感を極力下げることなく、周辺の物や人の情報を HMD 装着者へ提示することができる。しかし、これらの手法では、HMD 装着者に提示できる情報はコンテンツ制作者が事前に想定したもののみであり、日常的に発生する様々な場面に柔軟に対応できない。

2.2 HMD 装着中に現実空間への視界を直接提供する手法

HMD 装着者に現実空間への視界を直接提供する方法もある[10][11]。例えば、頭部を覆うドーム型のスクリーンを使うことで、広視野コンテンツの体験と現実世界とのインタラクションが両立できる[10]。しかし機構上、立体視が不可能であり、一般的な HMD の標準的な機能を持たないという課題がある。Kien らは従来の没入型 HMD の左右と下部に液晶シャッターの窓を設置し、その透過度を調節することで、ユーザが必要に応じて周辺環境への視界を確保する MDI[11]を考案した。これにより、HMD を装着しながら、臨場感に特化した状態と周辺環境とのインタラクションが可能な状態の切り替えが可能となった。しかし MDI は HMD 装着者の問題は解決できるものの、周囲の人が HMD 装着者の状況を把握し辛いという課題が残っている。

2.3 HMD 装着者の状況を外部に提示する手法

周囲の人が HMD 装着者の状況を把握できるようにするために、HMD に外向きのディスプレイを取り付け、装着

者の体験しているコンテンツや視線等を周囲へ提示する手法が提案されている[7][8]。これらのように、HMD 装着者の視線等を周囲の人に提示することは、周囲の人が HMD 装着者の状況を把握する手がかりとなり、コミュニケーションを開始するうえで有用である。

3. 遮蔽度を制御可能な HMD の設計

物理的な遮蔽と、他者とのインタラクションをどれほど許容するかを暗黙的に表現する役割を果たす媒体として、現実世界では扉などがよく用いられる。例えば部屋の中にいる人は、部屋の扉を閉めることでプライベートな空間を確保することができるが、扉を開けると外部の人が部屋の様子を伺えるようになり、「外部の人が自身にコンタクトを取っても良い」という意思を暗黙的に表現できる。本研究では、こうした扉などのメタファを HMD の周辺部に設置する窓に適用することで、HMD 装着者による周辺状況の把握を可能とするだけでなく、周囲の人に HMD 装着者の状況を伝えることができるのではないかと考えた。

HMD の設計にあたり、まずは現実世界の扉に注目し、大きく開閉扉型と透過扉型に二分した。開閉扉型とは開き戸や引き戸のように、遮蔽される領域を物理的に変化させる方式であり、透過扉型とはブラインドや偏光素子などを用いて、透過度を徐々に変化させられる方式である。以降の項ではこの区分に従い、各方式を適用した開閉扉型 HMD、透過扉型 HMD の利点や欠点、利用場面に関して検討する。また、現実の扉に存在する重要な機能の一つとして、ユーザの立ち位置に応じて扉が自動開閉するものがある。この自動機構は、HMD 装着者に周囲の人が近づいたタイミングなど、特に HMD 装着者が扉を開閉すべきタイミングが分からない状況で有用であると考えられるため、追加で扉の開閉の自動化についても検討する。

3.1 開閉扉型 HMD の設計と利用場面

開閉扉型の HMD は、物理的に遮蔽を取り入れたり除いたりするため、外光を完全に遮断もしくは通すことができるという利点が挙げられる。これを活かし、透過扉型 HMD 以上に臨場感に特化した状態、周辺環境の把握が可能な状態を作り出すことができる。また、周囲の人にとっては、扉の開閉という変化は明快であり、透過度の変化と比較して、周囲の人が HMD 装着者の状態をより把握できる手がかりになると考えられる。一方で、透過扉型のように遮蔽度を徐々に変化させることは出来ず、扉が開くと同時に HMD 内部に強い外光が差し込むため、HMD 装着者の VR コンテンツへの臨場感は急激に低下すると考えられる。以上の点を考慮すると、開閉扉型 HMD は、重要な人が近づいてきた場合など、HMD 装着者の臨場感を犠牲にしてでも外部への視界が必要、もしくは注意を向けさせる必要のある場面において有効ではないかと考えられる。

3.2 透過扉型 HMD の設計と利用場面

透過扉型 HMD の利点は、透過度を徐々に変化させることが可能な点である。これにより、HMD 装着者にとって



図 2: 開閉扉型 HMD の内部と外部からの見え方

は、透過度の変化を段階的に行うことで瞬間的な外光の差し込みによる臨場感の低下を避けたり、透過度を中程度に設定することで、現実空間への視界を必要最低限のみ確保するといった使い方が可能となる。欠点としては、偏光素子を用いる特性上、遮蔽度を 100%、または 0%の状態に出来ないことが挙げられる。これにより、特に外光が強い環境において、偏光素子の遮蔽力不足により不必要に HMD 内部へ外光が差し込み、VR 体験が阻害される恐れがある。一方で周囲の人にとっては、透過度の変化は扉の開閉と比較すると気づきづらく、状態を把握する手がかりとしては不十分となる可能性がある。以上の特徴を考慮すると、透過扉型 HMD は、周囲の人が存在せず、HMD 装着者が VR コンテンツへの臨場感を保ちつつ自分の意志で外部への視界を確保する時などに有効ではないかと考えられる。

3.3 HMD 装着者に外部への視界を提供するタイミング

HMD 装着者に外部への視界を提供するタイミングにはユーザ主体とシステム主体のものに分類できる。ユーザ主体のタイミングとは、ユーザが能動的に外部への視界を確保したくなった時のことである。一方システム主体のタイミングとは、周囲から人が近づいてきたときなど、HMD 装着者の能動的な判断が不可能であり、システム側で開閉の判断が不可欠な時のことである。また、それ以外に、ユーザがトラッキングエリア外に出た場面やコンテンツ内で周辺機器との連携が必要となった場面など、明らかに臨場感よりも周辺環境の把握、インタラクションが優先されるタイミングである。

4. プロトタイプ

3章で述べた設計案に基づき、プロトタイプを実装した。基本的な形状や寸法は Google CardBoard を参考に設計し、作成したモデルを 3D プリンタで出力した。

3章で述べた 2 つの方式の HMD に関して、開閉扉型 HMD はスライド機構を採用し、透過扉型 HMD は 2 枚の偏光板同士の角度を変化させる機構を用いた。図 2、図 3 に各方式における HMD 装着者の周辺視野の様子と、外部から HMD 装着者を見た時の様子を示す。ここで透過扉型 HMD では、明るい部屋において、3.2 章で懸念した遮蔽力

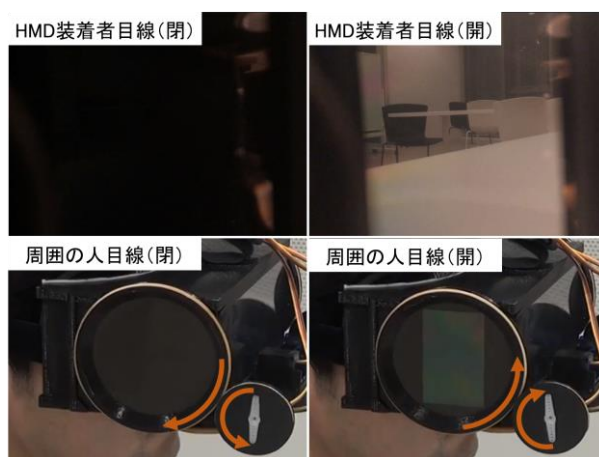


図 3: 透過扉型 HMD の内部と外部からの見え方

不足が発生した。そこで、HMD 内部への外光の差し込み防止を優先し、偏光板に加え遮光板を重ねた。これにより外界遮蔽時には十分に外光を抑えることができたが、図 3 右上に示すように、外界透過時に、外部からの光量が少なくなる課題が発生している。

両方式ともに、サーボモータの角度制御により実装した HMD の周辺部の右・左・下にあけた扉はそれぞれ別々のモータで開閉される。開閉型 HMD では、図 2 のようにサーボモータの回転と共にレバーが動き、扉を引き戸のようにスライドさせる。透過型 HMD では、サーボモータの回転を図 3 のように偏光板を装着したフレームに直接伝えることで、偏光板が回転し透過度に変化する。この機構は、各方式の右・左・下部において共通である。遮断と透過を制御するタイミングは、3.3 節で述べたように、ユーザ主体とシステム主体の 2 種類がある。それを実現するために、図 4 に示すワークフローを設計した。周囲の状況認識には、スマートフォンの外部カメラを用いる予定だが、現段階ではスイッチからとコンテンツからの入力のみを実装した。



図 4: 各入力から開閉までの流れ

5. ユーザスタディ

実装した開閉扉型と透過扉型の HMD が実利用可能かどうかを調査するために、HMD 装着者と周囲の人の両方の立場から主観評価に基づく予備の実験を実施した。

5.1 実験 1: HMD 装着者による周辺環境の把握

HMD 装着者の立場として、HMD の使用経験がある 3 名を対象に実験を行った。実験では、参加者は HMD を装着し、キーボードが置かれた机に向かって椅子に座る。そこで、VE 内で指定された文字を入力するタスクを 3 つの条件（開閉扉型および透過扉型 HMD で手元への視界が与え

られる状態、手元への視界が与えられない状態)で比較した。その後、開閉扉型と透過扉型の両方式に対する、好み、視認性、利用可能場面等を中心にインタビューを行った。

結果として、開閉扉型 HMD に対しては、視認性は十分であり、今回のタスクではより好ましいといった意見が得られた。利用場面としては、タッチタイピングに不慣れな人がキーボードを見ながら文字入力するなど、周辺環境と密にインタラクションを行う場面が有用との意見を受けた。透過扉型 HMD に対しては、まず視認性に関して、予想していたことではあるが、外部からの光量が少なく見づらいという意見が得られた。利用場面としては、透過度を中程度に設定することでキーボード入力の際にホームポジションを確認するなど、周辺環境を大まかに把握する場面が有用との意見を受けた。また開閉扉型 HMD と比較し、HMD 内部に入る外光の量が少ないため、没入度の低下を抑制できるという回答が得られた。

5.2 実験 2: 周囲の人による HMD 装着者の状況の把握

周囲の人の立場として、普段から周囲に HMD 装着者が存在する 3 名を対象に実験を行った。実験中、実験者は実装した HMD を用いて、下と左右の窓を解放した状態で机に向かい作業をしている。参加者は HMD 装着者に用事があって近づき、コミュニケーションを取ろうとする。これを開閉扉型と透過扉型の開閉状態においてそれぞれ実施し、窓の開閉への気づきやすさ、HMD 装着者の目の見えやすさ、話しかけやすさの観点からインタビューを行った。

結果として、開閉扉型 HMD では窓が開いた状態に非常に気づきやすく、また HMD 装着者の目を目視できたため、話しかけやすいという回答が得られた。一方で透過扉型 HMD では窓の変化に気づきづらく、目を目視できなかったため、HMD 装着者が周囲の人を認識しているかを示す追加の手掛かりが欲しいという回答が得られた。

6. 議論

予備的実験の結果から、開閉扉型 HMD を用いることで、HMD 装着者は周辺環境と容易にインタラクションができ、周囲の人もまた HMD 装着者の状況を把握しやすくなるのが分かった。特に話しかけやすさにおいてユーザから高い評価を受けたため、開閉扉型 HMD に適用した扉のメタファは有用であり、MDI のような透過扉型 HMD を用いた際に周囲の人が HMD 装着者の状況を把握しづらいという課題を克服できる可能性がある。また、透過扉型 HMD については、透過度を中程度に設定することが有用である可能性が確認できた。各手法を用いるべき場面は明確に異なることが分かったため、それらを踏まえてシステムを更新し、より詳細な実験をする必要がある。

実験 1, 2 の両方において、透過扉型 HMD は、視認性及び外部からの透過性が不十分であることが分かったが、この原因は偏光板本来の透過度の上限、下限のみではなく、偏光板の遮蔽力不足を解消するために追加した遮光板の影響が大きかった。そのため、今後は透過扉型 HMD の実

装も見直していく。

また、2つの方式の検証結果に基づくと、それらを組み合わせることで遮蔽度を 0% から 100% までスムーズに調節できる HMD が実装できると考えられる。それにより、両方式の欠点を補い、各方式それぞれで利用可能な場面を、一つの HMD でカバーできる手法が実現可能であると考えられるため、今後はその設計に関しても進めていく。

7. まとめ

本稿では、周辺環境への気づきやインタラクションを可能にする開閉扉型、透過扉型の 2 種類の HMD のプロトタイプを実装した。周囲の人が HMD 装着者の状況を把握するための手掛かりを考慮しつつ、HMD 装着者の外部への視界を確保するために、視界を提供する手法・タイミングに関して検討した。実装した各方式の HMD の性能評価、および利用可能な場面に関してフィードバックを得るため予備的実験を実施し、開閉扉型 HMD の有用性を確認するとともに、今後の展望について議論した。

参考文献

- [1] P. Budhiraja et al., Where's my drink? enabling peripheral real world interactions while using HMDs. *ArXiv, abs/1502.04744*, 2015, 5 pages.
- [2] M. McGill et al., A dose of reality: overcoming usability challenges in VR head-mounted displays. *CHI'15*, pp. 2143–2152.
- [3] A. L. Simeone et al., Substitutional reality: using the physical environment to design virtual reality experiences. *CHI'15*, pp. 3307–3316.
- [4] P. Knierim et al., Physical keyboards in virtual reality: analysis of typing performance and effects of avatar hands. *CHI'18*, pp. 345:1–345:9.
- [5] S. Ghosh et al., NotifiVR: Exploring interruptions and notifications in virtual reality. *IEEE TVCG 2018*, Vol. 24, pp. 1447–1456.
- [6] K. Kanamori et al., Obstacle avoidance method in real space for virtual reality immersion, *ISMAR'18*, pp. 80–89.
- [7] J. Gugenheimer et al., FaceDisplay: towards asymmetric multi-user interaction for nomadic virtual reality, *CHI '18*, pp. 54:1–54:13.
- [8] L. Chan et al., FrontFace: facilitating communication between HMD users and outsiders using front-facing-screen HMDs, *MobileHCI '17*, pp. 22:1–22:5.
- [9] J. P. Rolland et al., Optical versus video see-through head-mounted displays in medical visualization, *Presence*, 2000, Vol. 9, pp. 287–309.
- [10] E. Maruyama et al, CompoundDome: A wearable dome device that enables interaction with the real world by controlling the transparency of the screen, *AH'19*, No. 40, pp. 1–4.
- [11] K. T. P. Tran et al., MDI: A Multi-channel dynamic immersion headset for seamless switching between virtual and real world activities, *IEEE VR 2019*, 9 pages.