

展望 1: ARのハードウェア AR用ヘッドマウントディスプレイ技術 の動向と展望

清川 清

大阪大学サイバーメディアセンター

ARとヘッドマウントディスプレイ

ARで用いられる視覚ディスプレイの中でもヘッドマウントディスプレイ (HMD, Head Mounted Display) は、他の視覚ディスプレイにはない特徴がある。まず、HMDは利用者の視界に直接働きかける装置であり、本質的に視覚的ARとの相性がよい。また、HMDは個人向けであり他人の視界に影響を与えたり覗き込まれたりする心配がない。何より、装着型でハンズフリーのため利用場所の制約が少なく広範囲で利用できる。HMDに求められる視野角や解像度などのさまざまな要件は、ターゲットとなる具体的なARアプリケーションによって大きく異なる。たとえば、次は典型的なARアプリケーションと、それに用いるHMDに求められる要件の例である。

- 屋外の歩行者にナビゲーション支援を行う場合は、軽量で装着性に優れ、周辺視野を閉塞しないことが最優先である。また、近景から遠景まで視距離が変化するため虚像の焦点深度が深い(あるいは可変)ことが望ましい。一方、視野角や解像度はある程度犠牲にできる。
- ヘリコプターの操縦士に地理情報を提示する場合は、強い日差しに負けない映像をコックピットからの視界に提示するため、広視野・高輝度であることが重要である。一方、軽量性や装着性はある程度犠牲にできる。また、視距離が遠方のため立体視の重要性は低い。
- 外科医の手術支援のため患部に医療データを提示する場合は、手元の患部に精度の高い映像を提示するため、高い角度分解能と立体視が重要である。一方、広視野・高輝度である必要性は低い。
- 建築予定地に建造物モデルを重畳表示する景観アセスメントの場合は、実環境とバーチャル環境の画質的整合性が重要であり、バーチャル環境のダイナミックレンジや色再現域などが実環境のそれと一致することが望ましい。また、実環境とバーチャル環境が隠しあう相互遮蔽の表現ができることが望ましい。

しかしながら、これらの要件をすべて満たし、人の視覚能力に匹敵するような「完璧な」HMDを実現することはきわめて困難である。そのため、トレードオフ関係にある多くのパラメタの妥協点を探り、目的に合ったHMDを選択あるいは設計することが重要である。本稿では、まずARに用いられるHMDの大まかな分類について説明する。そして、AR用途により適したHMDを目指して研究開発されてきた、「尖った」特性を備えたHMDの研究開発の動向をいくつか紹介し、今後の展望について述べる。

ヘッドマウントディスプレイの分類

HMDは、実環境を透過(シースルー)する方式と、映像チャンネルの数によって大別できる。透過方式については、HMDは利用者が計算機映像のみを観察し外界を観察できない非透過式と、双方が同時に観察できる透過式に分類される。さらに、透過式は映像合成の方式によって、ハーフミラーやプリズムなどの光学コンバイナを用いる光学透過式と、クロマキーやフレームグラバ(ビデオキャプチャ)を用いてアナログまたはデジタルの信号レベルで合成するビデオ透過式に分類される(図-1参照)。AR用途では当然ながら、これらいずれかの透過方式を利用することとなる。2種類の透過方式を比較すると、一般に光学式は構成が簡単で実環境の見えが自然である利点があり、ビデオ式は映像合成結果が均質でさまざまな画像処理の適用に向いている利点がある。

一方、映像チャンネル数については、映像の入力数(映像ソースのチャンネル数)と出力数(映像提示ユニットの個数)の組合せにより主に3種類に分類される(図-2参照)。単眼(monocular)HMDは右目または左目のいずれかのみに対応する映像ユニットを備える。比較的軽量のため、ウェアラブルコンピューティングなどの用途では好まれるが片眼ごとに異なる画像が見え同時に認識しづらくなるなどの問題がありARでは一般的ではない。このため、単眼HMDをARに用いる場合は非透過式ではなく

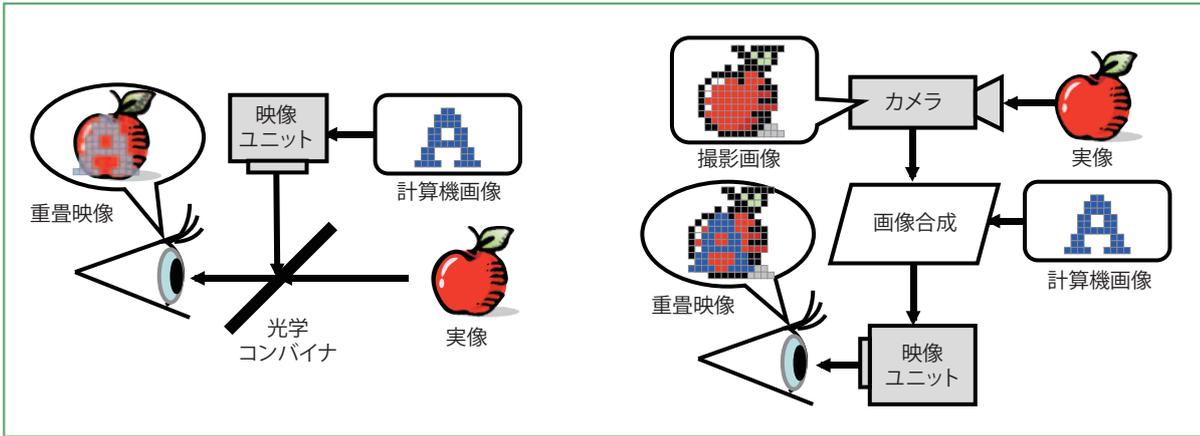


図-1 光学透過式HMD（左）とビデオ透過式HMD（右）

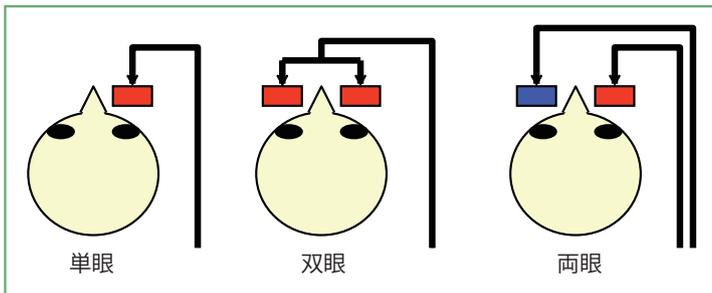


図-2 HMDの映像チャンネル

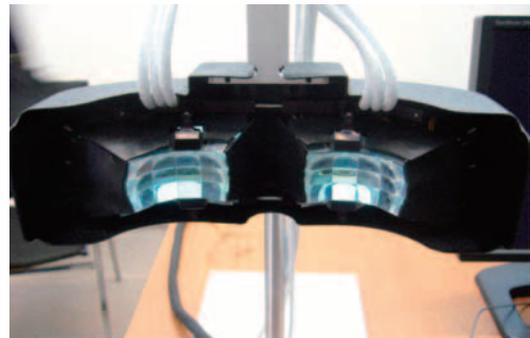


図-3 Sensics社 piSight（筆者撮影）

光学透過式のほうが好ましい。双眼 (biocular) HMD は 2つの映像ユニットに対して、共通の映像ソースが入力される。すなわち、同一の映像を両眼で観察する。民生用HMDで多く採用されているが立体視ができない。ARに用いる場合は、単眼HMDとは逆に光学透過式では利用しづらく、非透過式に単眼カメラを取り付けたビデオ透過式とするのが一般的である。両眼 (binocular) HMD は 2つの映像ユニットに対して独立に映像ソースが入力される。両眼HMDに対して適切に2種類の映像ソースを入力して初めて立体視が可能となる。両眼HMDは光学透過式とビデオ透過式のどちらの場合もARに適する。

広視野映像の提示

人の視野は全体で水平約 200 度、垂直約 125 度(下 75 度、上 50 度)に達する。一方、人の眼の解像力は視力 2.0 の場合視角にして約 0.5 分(1/120 度)であるので、この値が映像の高精細化を目指す場合の目安となる。仮に、人の眼の最大解像力に合う映像を視野全体にわたって提供しようとするれば、水平約 12,000 画素、垂直約 7,200 画素が必要となる。これは現在の技術では実現が難しい。このため、低解像・広視野と高解像・狭視野のトレードオフが生じる。このトレードオフを解決するために、複数の映像ユニットを併用するHMDも多い。具体的には、映像ユニットを縦横に並べて(タイリング)高解像・広視

野を実現するHMDや、中心視野と周辺視野を分担するHMDが知られている。Sensics社の piSight は非透過式ではあるが、最大で片眼あたり 4 × 3 の映像ユニットをタイリングし、水平視野角 187 度、垂直視野角 84 度を提供する(図-3 参照)。ただし、タイリング方式では、色ムラや製造コスト、重量などの点で問題があり、映像ユニット数が増えると光学透過性の確保が難しくなる。

片眼ごとに単一の映像ユニットを用いるタイプでは、水平視野角 80 度程度以上を実現することが難しくなる。広視野HMDの例として、長原らは双曲面ミラーおよび楕円ミラーを用いて、水平視野角 180 度、垂直視野角 60 度を達成している¹⁾。楕円ミラーを半透明にすれば光学透過性も確保できる。ただし、楕円ミラーの焦点から観察眼が外れると映像がほとんど見えなくなるという問題がある。

筆者らはHMDの一種である頭部搭載型投影式ディスプレイ(HMPD, Head Mounted Projective Display)に着目し、その広視野化を実現するHHMPD(Hyperboloidal HMPD)を提案している(図-4 参照)²⁾。HMPDは接眼光学系に起因する問題が存在せず、広い両眼視野を確保できるなどの優れた利点があるユニークなディスプレイである。HMPDではハーフミラーを介して観察眼と光学的に等価な位置から映像を実環境側に投影し、実環境に配置した再帰性反射スクリーンで折り返した映像を観察眼に提示する。再帰性反射スクリーンとは、入射方向



図-4 双曲面ハーフミラーを用いた頭部搭載型投影式ディスプレイ (HHMPD)

に反射光が戻る特殊なスクリーンで、自転車の反射板などもその一種である。利用者は実環境をハーフミラー越しにそのまま観察し、その視野内の再帰性反射スクリーンのある領域にのみ映像が見える。通常のHMPDでは平面ハーフミラーを用いるのに対し、筆者らの提案するHHMPDでは双曲面ハーフミラーを用いることにより、一般的な投影画角の映像を広範囲に投影し、広視野化を達成している。理論的には水平視野角180度以上を達成することも容易である。HMPDやHHMPDでは再帰性反射スクリーンにのみ映像が観察され、その領域は背後の実環境が透過しない。また、木島らは再帰透過という新しい光学特性を有するディスプレイを提案している。この考え方をいけば再帰性反射スクリーンを半透明にでき、HMPDやHHMPDをモバイル環境で利用できる可能性がある。

時間遅れへの対処

ARやVRの用途でHMDを用いる場合、一般に頭部の運動を計測してその位置や姿勢に応じた画像を提示する。このとき、利用者の頭部が運動してから、それに応じた画像が実際に利用者へ提示されるまでの時間遅れはARシステムの使用感や利便性に大きな影響を与える。時間遅れが存在すると、頭部を動かしてもしばらくは映像に変化が生じず、視野に張り付いたようについてくる。その結果、実環境とバーチャル環境の幾何学的整合性が破綻し、たとえば本来実環境に静止するべきバーチャル物体が空中を漂うように揺れ動くこととなる。

時間遅れの影響を抑えるため、運動予測フィルタの利用、フレームレスレンダリング、映像更新範囲の限定、などが行われる。また、あらかじめ広範囲を描画しておき最新の頭部姿勢に合わせてその一部を表示するイメージシフト手法も広く利用されている。イメージシフト手法の考え方をハードウェアで実装したシステムもい

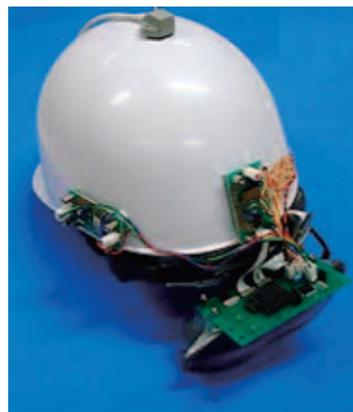


図-5 Reflex HMD (岐阜大学 木島竜吾氏 提供)

くつか知られている。特に木島らは、システム全体の時間遅れに関係なく運動計測を高速に行えること、および、画像出力そのものを補正すること、の2点を満たすシステムを人の前庭動眼反射になぞらえてReflex HMDと命名し、自らもさまざまなReflex HMDを提案している(図-5参照)³⁾。木島らのシステムでは、まずHMDの視野角よりも広い範囲(液晶ディスプレイ(LCD)より多くの画素からなる画像信号)をあらかじめ生成しておく。LCDの駆動時には、画像信号がLCDのドライバ回路に入力されてから、それがLCDの駆動信号として流し込まれるが、その直前で、同期信号を変調する回路を挿入する。すなわち、HMDに付加したジャイロセンサで遅れ時間分に相当する回転量を求め、その回転量に応じて同期信号つまり走査の開始時刻を調整する。これにより、画像中のどの部分が切り出されて表示されるかが、まさに表示の直前のジャイロセンサの値で決定される。この方法は描画に用いる計算機やOS、アプリケーションなどに依存せず実現も安価に行えるという利点がある。また、描画更新頻度に依存せず、ジャイロセンサの計測頻度での見回しが常に可能である。

奥行き手がかりの再現

奥行きを知覚させる要因(奥行き手がかり)には、単眼性/両眼性、生得的(生理的)/経験的(心理的)などのさまざまな種類がある。一般的なHMDは両眼性の経験的要因に分類される両眼視差など、そのごく一部を再現できるに過ぎない。しかし、研究レベルではさまざまな奥行き手がかりを再現可能なHMDが開発されている。ここでは、調節(焦点距離)と遮蔽を順に取り上げ、それぞれに対応するHMDを紹介する。

--- 調節(焦点距離)に対応するHMD ---

通常の光学透過式HMDでは提示映像の焦点距離は

1～3m程度に固定されており、眼の焦点距離もこれに合わせなければ提示映像はボケてしまう。ところが、ARでは提示対象（たとえばあるレストラン）に提示情報（たとえばレストランの評判）を重畳して同時に見せるという性質上、提示対象の距離に眼の焦点が合っているときに、提示情報が鮮明に見えてほしいという要求がある。これを解決するには、眼の焦点距離によらず常に焦点のあった映像を提示する方法と、提示情報ごとにそれに適した焦点距離に映像を提示する方法がある。前者の方法はユーザの観察距離によらず常にHMDの映像が鮮明に見えるため、映像を確実に見せることができる。これは、レンズ口径を絞り射出瞳を小さくしたり、瞳孔で一度像を集光させるマクスウェル視光学系を用いることで、実現することができる。一方、後者の方法は、実物体のように提示映像の手前や奥に焦点を合わせた場合には映像がボケて見えるため、奥行きをよりリアルに表現しているともいえる。これは、可変焦点の光学系を用いて提示したい情報に合わせてHMDの焦点距離を実時間で変更することで実現できる。たとえば、90年代後半にATRで開発された3DDACは、視線追跡装置とレンズシフト機構を内蔵し、実時間で焦点距離を変化できるHMDとして知られている。第4世代となる3DDAC Mk.4は0.25mから無限遠の範囲で焦点距離を約0.3秒で変化させる性能を有している。また、2001年にワシントン大学では可変焦点ミラーを用いてレーザスキャンを行うことにより、多数の焦点距離に時分割で映像を提示できるTrue 3D Displayが提案されている。ただし、この方式はある像を完全な同一時刻に提示するものではないため、提示距離の制御が難しい。さらに最近では、2008年にアリゾナ大学が小型の液体レンズを用いた方式を提案しており（図-6参照）⁴⁾、高速なレンズを用いれば複数の距離に異なる映像を時分割で提示することも示している。この方式は可動部がないため、小型軽量化に向き、コスト的にも有利であると考えられる。

--- 遮蔽に対応するHMD ---

バーチャル物体が実物体と対等に実環境に実在するように見せたい場合、バーチャル物体がそれより奥にある実物体を隠し、手前にある実物体に隠される相互遮蔽が表現されることが重要である。実環境の奥行きが分かれば、隠されるべきバーチャル物体を描かないことで実物体によるバーチャル物体の遮蔽は表現できる。一方、バーチャル物体による実物体の遮蔽は、実物体を何らかの方法で見えないようにする必要がある。ビデオ透過式HMDでは、これは画素値の書き換えだけでよく、まったく問題ではない。一方、光学透過式HMDでは実物体の「画素値」を置き換えることはきわめて困難である。す

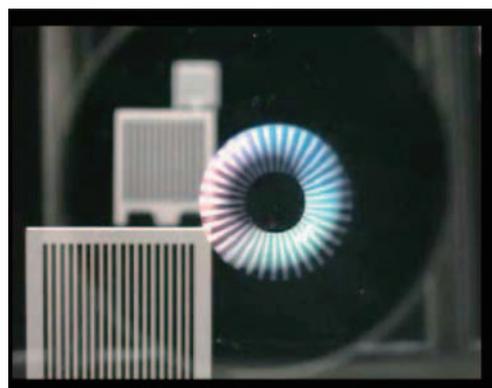


図-6 液体レンズを用いた可変焦点HMD（アリゾナ大学 Hong Hua 氏提供）

なわち、ハーフミラーなどの光学コンバイナによる合成では外光が必ず肉眼に達するため、たとえば黒いバーチャル物体を描くことはできない。HMDの映像ユニットの画素値が暗ければ暗いほど、単にその位置には背後の実像がより鮮明に見えるだけだからである。頭部搭載のデバイス内部で相互遮蔽を実現するには、画素単位で光のオン・オフを切り替えられる光変調素子が必要である。これに適するデバイスとしては、透過型のLCD、反射型の液晶表示用基盤であるLCOSやデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)などがあり、これらのデバイスを用いたHMDがそれぞれ提案されている。画素単位で外光を遮蔽するために透過型LCDを用いる方式は、1992年にソニーが特許を出願している。しかし、単純な方法では、視距離が遠方であるため近距離の遮蔽パターンがボケてしまう。ソニーのアイディアは、これを避けるために一組のレンズを用いて一度LCD面に外光を結像させるというものである。筆者らもこれと同じアイディアに至り、2002年には実時間測距装置を含んだ、実際に頭部装着可能なHMD、ELMOを試作している（図-7参照）⁵⁾。同様の方式を用いたより最近の研究例としては、2007年に北京工科大学がELMOと同様の光学系を用いて実環境の明るさに応じて遮蔽パターンの透過度を調節し、バーチャル環境の輝度とマッチさせる方式を提案している。また、2008年には簡易型の光学系を備えた民生用の遮蔽対応HMDがTrivisioから初めて発表されている。ただし、LCDとレンズ対を用いる方式は、倒立した実像を正立させる光学系が必要で、全体の小型化に向かない。そこで中央フロリダ大学では、2004年にLCOSとXプリズムを用いる小型の遮蔽対応HMDを提案している。一方、大阪大学では2002年に色純度の劣化や光量損失の問題が少ないDMDによる方式を提案している。しかし、これらの反射型デバイスは、特殊なテレセントリック光学系を用いる必要があるなど実用化にはいくつかの課題がある。

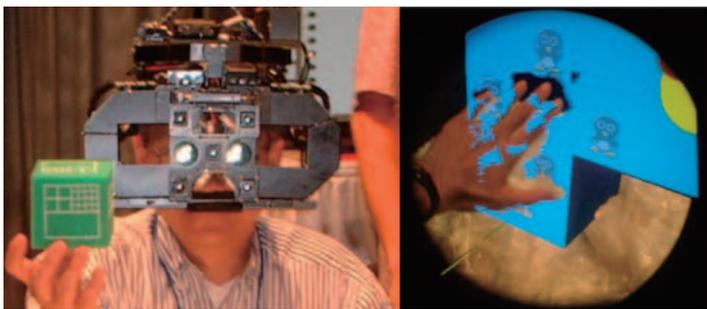


図-7 ELMOの外観(左)と観察画像例(右)

今後の展望

HMDは90年代前半のブームを経て、ここ数年は大手メーカーが相次いで新しい試作機を発表するなど再び注目が集まりはじめています。たとえば、ホログラフィック導光板などを用いて、厚さ数mmで通常のメガネと変わらない外観を実現した小型軽量HMDがいくつも発表されています。また、完全ワイヤレス化、メディアプレーヤー一体型、超小型カメラ内蔵など、さまざまな拡張機能が発表されてきており、今後もその傾向は強まると予想されます。AR自体の世間的注目と相まって、2010年以降の民生用HMD市場は近年になく活況を呈すると期待されます。ただし、それらの多くはあくまでも映画などの映像コンテンツを手軽に楽しむ「パーソナルテレビ」的な用途を想定していることを強調しておきたい。

本稿で紹介したように、視覚的ARが本来実現したい視覚効果は現在の一般的なHMDでは扱っていない性質のものが多いのである。では、小型軽量で通常のメガネと変わらない外観を備え、広視野で時間遅れ補償も可能で、さまざまな奥行きがかりの再現もできる、といったHMDは実現できるだろうか。たとえば、導光板方式を3×2にタイリングすれば、水平視野角120度×垂直視野角60度程度の映像は提示できると考えられる。Reflex HMDのような手法はディスプレイに依らず利用できるし、可変焦点についても基本的には同様である(ただし、相互遮蔽機能の広視野化は良いアイデアがなく何かブレークスルーが必要と思われる)。個々の機能の進展とともに、今後はこうした機能統合が重要となってくるだろう。中長期的には、ワシントン大学で研

究されているようなコンタクトレンズ型ディスプレイや、BCI (Brain Computer Interface) による人工視覚などが、きわめて大きな可能性を秘めており、注目に値する。

AR用途のHMDに関しては、ビデオ透過式HMDにまつわる話題や認知心理的、生理的、社会的な話題など、ここに掲載できなかった実に多くの事項がある。興味のある読者は文献6)などを参照されたい。また、本稿ではHMDのハードウェアを中心に取り上げたが、ARやHMDなどの技術が本格的に普及するかどうかはコンテンツの果たす役割がきわめて大きい。ハリウッド系の3Dシネマなどの盛り上がりで、長い歴史を持つ立体テレビがようやく日の目をみているように、ARを一時的なブームで終わらせないためには、対応するコンテンツの質と量がその成否を決めるのではないだろうか。

参考文献

- 1) Nagahara, H., Yagi, Y. and Yachida, M. : Super Wide Viewer using Catadioptric Optics, Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST) 2003, pp.169-175 (2003).
- 2) Kiyokawa, K. : A Wide Field-of-view Head Mounted Projective Display using Hyperbolic Half-silvered Mirrors, Proceedings of the IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2007, pp.207-210 (2007).
- 3) Kijima, R. and Ojika, T. : Reflex HMD to Compensate Lag and Correction of Derivative Deformation, Proceedings of the IEEE International Conference on Virtual Reality (VR) 2002, pp.172-179 (2002).
- 4) Liu, S., Cheng, D. and Hua, H. : An Optical See-through Head Mounted Display with Addressable Focal Planes, Proceedings of the IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2008, pp.33-42 (2008).
- 5) Kiyokawa, K., Billingham, M., Campbell, B. and Woods, E. : An Occlusion-capable Optical See-through Head Mount Display for Supporting Co-located Collaboration, Proceedings of the IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2003, pp.133-141 (2003).
- 6) Kiyokawa, K. : An Introduction to Head Mounted Displays for Augmented Reality, in Emerging Technologies of Augmented Reality (Ed. Haller, Thomas and Billingham), Ch. III, Idea Group Inc. (2006).

(平成22年2月12日受付)

清川 清

kiyo@ime.cmc.osaka-u.ac.jp

1998年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年学振研究員。2001年ワシントン大学ヒューマンインタフェーステクノロジー研究所 (HITLab.) 客員研究員。2002年大阪大学サイバーメディアセンター准教授、現在に至る。人工現実感、拡張現実感、CSCWなどに関する研究に従事。博士 (工学)。