

焦点調整可能レンズによる シースルー型ARグラスの強化

ポール・カイン

プッシュプルレンズは拡張現実 (AR) アプリケーションをどのように向上させるだろうか。

拡張現実 (Augmented Reality : AR) グラスは、実世界に応用できる強力なツールへと進化し続けている。米アップル社 (Apple) の「Vision Pro」や米メタ社 (Meta) の「Quest」シリーズのような、最近発売された複合現実 (Mixed Reality : MR) ヘッドセットは、実世界にデジタル情報を重ねて表示し、ゲームやエンターテインメントから仕事や教育にいたるまでのあらゆるものを向上させる、ARの可能性を示している。

この10年間を振り返ると、ARグラスの進歩は目覚ましい。米グーグル社 (Google) が2013年に発表して発売し

た「Glass」は、ウェアラブルでインタラクティブな単眼ディスプレイで、どのような機能が必要かという点と、どのようにしてそのようなデバイスを社会的に受け入れられるようにするかという点の両方において、未来の拡張現実および仮想現実 (Virtual Reality : VR) デバイスの方向性を打ち出すものだった。

初期のAR/VRデバイスの多くは、パーソナルコンピュータ (PC) に接続することによって、コンテンツとグラフィック処理能力を提供するか、あるいは、スマートフォンに挿入することによって、ディスプレイそのものを含

むすべてを提供していた (韓国サムスン社 (Samsung) の「Gear VR」やグーグル社の「Daydream」を思い浮かべてほしい)。

今日のAR/VRグラスは、それよりもはるかに洗練されていて高性能である。独自のディスプレイやプロセッサを内蔵している場合が多く、外部機器との接続は不要である。歩きながら道順を表示し、リアルタイムで言語を翻訳し、さらには、自動車の問題を診断するのに役立つメガネを装着するという概念は、もはやSFの世界の話ではなく、近い将来の現実である。

技術的課題

ARグラスを広く普及させてその潜在能力を最大限に解き放つために、デバイスメーカーはまだいくつかの技術的課題を乗り越える必要がある。そうした課題としては、ディスプレイ技術、バッテリー寿命、サイズと快適性、ユーザーインターフェースとインタラクション、プライバシーとセキュリティ、価格の制約などがある。性能とユーザーの快適性の間で、トレードオフを強いられる場合が多い。例えば、より小さなバッテリーを使用すればデバイスを軽量化できるが、バッテリーが小さいと、使用可能時間が短くなり、充電頻度が増加する。同様に、品質や寿命とコストや製造のしやすさとの間のバランスを図るために、フォームファク



図1 輻輳調節矛盾 (画像提供: フレックスイネーブル社)

タや素材も考慮しなければならない。

ARデバイスの究極の目標は、通常のメガネのような外観とかけ心地を実現すること、すなわち、カメラや内蔵ディスプレイを搭載せずに、軽量かつ真にシースルーとすることである。実世界を遮断する一般的なVRヘッドセットとは異なり、シースルー型ARグラスでは、重ねて表示されるデジタルコンテンツによって実世界は拡張されるが、ユーザーは周囲の実世界を直接目で見て、相互に作用することができる。そのため、より軽量・小型で高度なディスプレイと光学部品や、効率的な投影方法を開発することが重要である。

固定焦点距離と輻輳調節矛盾

ほとんどのARデバイスが、同じ原理に基づいて動作する。ライトエンジンまたはディスプレイ（基本的には小型プロジェクター）からの光を、誘導してユーザーの視界で焦点が合うように投影する。一般的には、光導波路を介してこれが行われる。光導波路は、光をディスプレイからユーザーの視野まで誘導することにより、画像を実世界の視界に投影するシースルー構造である。この方法は軽量化につながり、よりメガネに近いフォームファクタを可能にする。

1つの大きな課題は、実世界と、重ねて表示する仮想画像の間で、焦点を整合させることである。今日のほとんどのデバイスは焦点距離が固定で、一般的にはユーザーから1~2m離れた位置に仮想オブジェクトがレンダリングされる。これは、さほど不快感を抱くことなく、ユーザーが仮想オブジェクトと実世界に自然に焦点を合わせられる「快適ゾーン」として定義される距離である。

ここでのトレードオフは、固定焦点

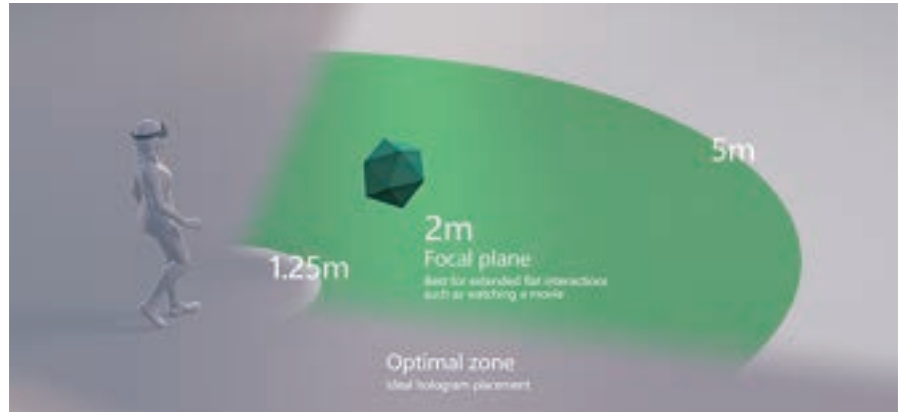


図2 ユーザーからホログラムを配置する位置までの最適な距離(画像出典:マイクロソフト社)

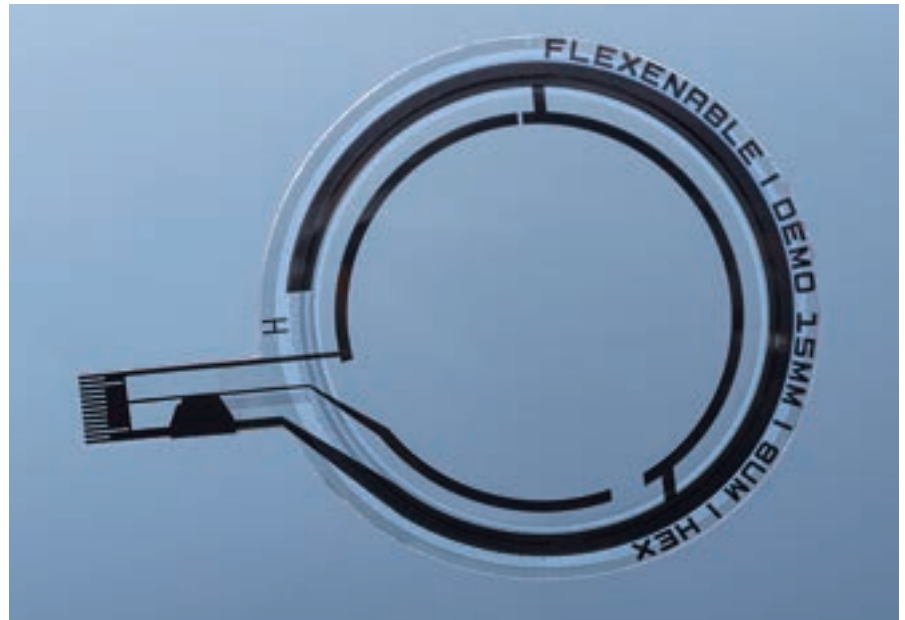


図3 プラスチック製の液晶チューナブルレンズ(画像提供:フレックスイネーブル社)

のほうが実装は容易であるのに対し、より多くの焦点レベルを追加するとデバイスの光学系の複雑さが増すことである(コスト、サイズ、重量もおそらく増加する)。しかし、仮想オブジェクトの焦点が動的に制御できなければ、デバイスの使用方法、特に長時間の使用は制限されることになる。例えば、仮想モニターとして使用するのが目的ならば、固定焦点のヘッドセットで問題ないかもしれない。しかし、遠く離れた距離と触れられる距離の両方で仮想オブジェクトとの相互作用が必要な場合は、動的に焦点を調整できなければ、

ユーザーに不快感を与えることになる。

焦点距離が固定の場合、ユーザーは近くのオブジェクトや動くオブジェクトに焦点を合わせようとするときに、輻輳調節矛盾(Vergence-Accommodation Conflict: VAC)を体験する可能性がある。「輻輳」とは、特定の距離の物体に焦点を合わせるために両眼が内向きまたは外向きに回転する眼球運動のことで、「調節」とは、網膜に鮮明な像を映し出すための眼球の水晶体の調整のことである。この2つのメカニズムが本能的に連動することで、実世界の明確で一貫性のある像が生成さ



図4 シースルー型ARグラスにおけるプッシュブルの動作原理(画像提供:フレックスイネーブル社)

れる。ディスプレイで生成された仮想オブジェクトの場合は、不整合や矛盾があると、ユーザーは正しく焦点を合わせることが難しくなり、視覚疲労や眼精疲労、さらには頭痛を引き起こす恐れがある。焦点が動的に調整されなければ、このような不整合がARにおいて起こり得る。仮想画像は、固定焦点距離にある固定の2次元(2D)平面上に表示されるにもかかわらず、仮想オブジェクトのサイズとレンダリング位置は異なる奥行きを表すことになり、結果として矛盾が生じるためである(図1)。

輻輳調節矛盾を緩和する方法

現在、固定焦点距離デバイスのVACを低減するための手法はほとんど存在しない。多くのARデバイスメーカーが広範なガイドラインをアプリケーション開発者向けに提供しており、それには、固定焦点システムにおけるユーザーの視覚的快適性を確保するためのオブジェクト配置と焦点ゾーンに関するアドバイスが含まれている場合が多い。一般的に、避けるべき領域(通常は1m以内)と「快適な」領域

(通常は1mから無限遠)がある。例えば、「HoloLens 2」に関する米マイクロソフト社(Microsoft)のガイドラインでは、1.25~5mの距離が理想的とされている(図2)。

調整可能な焦点

メタ社の研究部門Reality Labsは2023年に、プロトタイプVRデバイスの中に搭載された「Butterscotch Varifocal」システムを発表した。これは、アイトラッキングを組み合わせた機械式システムを使用して、ディスプレイ画面全体をユーザーに近づけたり遠ざけたりすることによって、画像の焦点距離を制御するものだったが、望ましくない重量と体積がヘッドセットに加わっていた。

VRに対しては、偏光を利用する光学系など、他の種類のチューナブル光学系が使用できる。VRの場合は、視界全体がディスプレイによって生成されており、それは通常、光が偏光していることを意味するためである。従って、複数枚を積み重ねて一連の離散的な焦点距離を生成できるPancharotnam-Berry位相レンズなど、他のタ

イプのレンズが使用できる。この方法は、メタ社のVRプロトタイプ「Half Dome」でも示されているが、このタイプのレンズは偏光にしか対応しないため、ARには適していない。

スイスのクリアル社(Creal)や台湾ペタレイ社(PetaRay)などの企業によって開発された他のアーキテクチャーも存在する。これらは、ライトフィールド(光線空間)を使用して複数の深度画像を同時に(またはほぼ同時に)目に提供するため、解像度またはフレームレートが犠牲になるか、あるいは、必要な画像処理が増加する。

液晶レンズ

メタ社のButterscotch Varifocalプロジェクトは、焦点が調整可能であればVACの影響が軽減されることを明らかに示している。ただし、このプロトタイプには機械式システムが採用されている。チューナブル液晶(LC)レンズを使用することにより、可動部品なしでこの焦点調整機能を複製することが可能である(図3)。

従来の固定光学系において、シンプルなレンズを通過する光が集光される

のは、レンズの物理的な曲率によって異なる光線の経路長が変化して、すべての光線が一点に収束するためである。レンズ上の任意の点において、レンズ内の光路差 (Optical Path Difference : OPD) は、その点における物質の屈折率 (n) とレンズの厚さ (d) の積として計算することができる。従来のレンズでは、一般的に n はどの点においても同じで、d は半径の関数として変化するため、レンズは湾曲した形状になる。

液晶光学系では、レンズの厚さ d の代わりに屈折率 n を変化させることができる。従って、光路差は $\Delta d \cdot n$ ではなく $d \cdot \Delta n$ となる。正味の効果は同じだが、動的に制御可能である点が異なる。このメカニズムは、液晶の異方性を利用するもので、液晶層に電圧を印加すると液晶分子が回転し、それによって層を通過する光から見た屈折率が変化する。電極パターンを注意深く設計すれば、チューナブルレンズを形成することができる。

チューナブルプッシュプルレンズのソリューション

AR デバイスでは、実世界と仮想オブジェクトの両方に正しく焦点が合わなければならないため、仮想オブジェクトの焦点距離を制御するレンズは、実世界の視界に影響を与えることなくこれを行わなければならない。この問題を解決するには、2つのレンズが必要である。1つは導波路 (またはそれに相当するもの) の「目側」、もう1つは導波路の「視界側」に配置される (図4)。

目側の「プル」レンズは、(+N デイオプターを適用することにより) 仮想オブジェクトの焦点を合わせる役割を担う。これによって、実世界の焦点距離も必然的に変わってしまうため、2

つ目のレンズを導波路結合器の視界側に配置する必要がある。この「プッシュ」レンズは、等価で逆符号の屈折力 (-N デイオプター) によって、実世界を元の焦点距離に戻す。逆符号の等価な屈折力で一体となって動作するこれら2つのレンズは、実質的に仮想オブジェクトの焦点距離を調整しているだけである。例えば、これをアイトラッキングと組み合わせることで、焦点を調整してVACを低減するための効率的で快適な手段を実現することができる。

英フレックスイネーブル社 (Flex Enable) の製造プロセスとアーキテクチャにより、光学的に透明な極薄プラスチックで焦点調整可能 LC レンズを製造することができる。これは、ガラス製の LC セルとは異なり、極薄 (各セルは 100 μm 未満) かつ軽量で、複雑な AR 光学系に合わせて二軸で湾曲させることが可能であることを意味する。

今後の展望

視覚的快適性を高めることは、身体的快適性を高めることと同等に重要で、いずれかを改善することで、トレードオフが生じてはならない。特に AR の場合、視覚性能の向上は、光学系のすべての光学部品、特にライトエンジン、導波路、光学系の継続的な進歩の産物である。視覚性能を向上させると同時に、ヘッドセットのサイズと重量を通常のメガネのようなレベルにまで低減することが、快適かつ持続的に長時間使用するために不可欠であり、それができれば、まだ探求されていない多くのユースケースが解き放たれることになるだろう。

著者紹介

ポール・カイン (Paul Cain) は、英フレックスイネーブル社 (FlexEnable) の戦略ディレクター。URL: www.flexenable.com

Newport®

米国ニューポート製品

年度末 特別値引き

SALE

定価より

15% OFF



位置決め装置



光学マウント類



オプティクス



LD制御機器



除振台



光計測機器

2025年2月28日ご注文分まで
国内在庫品 当日・翌日発送

光技術に関するご相談は

<https://www.japanlaser.co.jp/>

E-mail: jlc@japanlaser.co.jp

JLC 株式会社 日本レーザー

本社 〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1

TEL: 03-5285-0861

大阪支店 TEL: 06-6323-7286

名古屋支店 TEL: 052-205-9711