

# 究極のARディスプレイ 未来のウィンドウを拡げる光学技術

ヤニク・P・ローランド

拡張現実ディスプレイはテキストや画像を重ね、私たちの周囲の世界を見る能力を拡張する。しかし理想的で視野の広いソリューションの設計は、優秀なオプトエレクトロニクス設計者にとっても依然として課題となっている。

究極の拡張現実(AR)ディスプレイは、ユーザーと周囲の間にある透明ディスプレイであると考えられる。すなわち、現実とバーチャル情報を完全に統合し、現実世界に仮想世界を空間的に重ねる、パーソナルかつモバイルなウィンドウだ。ARディスプレイは、場所や建造物、物体、人々に重ねた視覚情報(記号や画像)をユーザーに与えるために、光学的な手法によって光を調節する。

これらのディスプレイは、バーチャル情報によって現実世界をさまざまな形式で拡張するため、強力で頼もしい。たとえば、周囲で動く物体の特徴を同定して強調したり、意思決定の手助けとなる重要な情報にズームインしたり、ヒトの目には見えないが代わりに利用可能なテキストやデータ、モデルデータベースによる隠された情報を提供したりできる。

データは広範な技術を通じて取得で

き、偏光感度や、赤外線やテラヘルツのイメージングのような超人能力を疑似できる。われわれが知る世界の空間、物体、人々のすべてを塗り重ねることで、これらのディスプレイはわれわれの能力を拡張して本来の感覚を超えたものを見ることができ、ユーザーの文脈や行動に関わるあらゆる情報をもたらす。

残念ながら、物理的に快適で、眼精疲労を防止し、現実を覆い隠さずに希望する拡張情報をもたらし、そしてアプリケーションが決定する一般消費者または工業ユーザーに受け入れられる小売価格をどうするかという、究極のARディスプレイを開発するアプローチが、光学エンジニアとオプトエレクトロニクスエンジニアで異なる。幸いなことに設計者は、ARディスプレイが成熟して普及するような新たな光学やフォトリソグラフィの進展に合わせて、足並みをそろえて上記の課題に向き合っている。

## アプリケーション

ARのさまざまな新興アプリケーションを考えよう。数あるなかでもボーイング社(Boeing)は、技術者のためによりよい将来を作り続けている。1990年代以降ロードマップを掲げており、航空機の電気配線を設置するときにスマートARグラスを導入しようとしている。修理やメンテナンス時に航

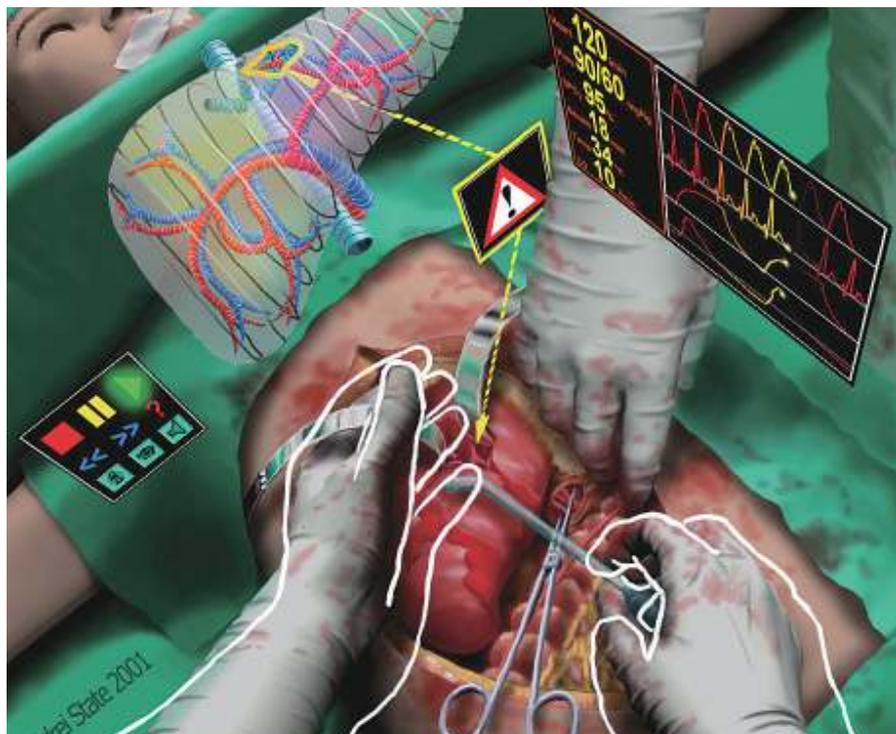


図1 拡張現実、は、患者のアウトカムを向上させるため、実際の手術中に患者に関する重要な情報を重ねることで特に有益な役割となり得る。(画像クレジット: 米ノースカロライナ大(University of North Carolina)のアンドレイ・ステート氏(Andrei State))

空機の内部設計図のテキストをARディスプレイに重ねることで、労働者の生産性やエラーなしの業務の可能性を拡大する<sup>(1)、(2)</sup>。

情報のプライバシーの権利がニュースの見出しを飾っているが、クラウド中の自発的な市民によって作られた個人情報を重ねることを考えてほしい。ある場所に入ると、ディスプレイのインターフェイスは周囲の人々に関する高度な視覚情報とやり取りするだろう。この情報は、人々の会話や交流を刺激する手助けとなるかもしれない。

魅力的拡張例のもう1つは、医療領域だ。医師は、医療デバイスを通じて得られる患者の内部組織を明らかにするデータベースから、データやモデルを重ねて見ることができる(図1)。対象人物の組織に関する空間的情報と強固に重ねられたものを用いることで、将来の執刀医は手術時間の減少やアウトカムの劇的な向上を実現する可能性がある。データと合わせてメスを動かすことで、拡張は、組織への予期せぬ損傷と関連する医療ミスリスクを低減できるかもしれない。脳手術では、わずかなミスが顔面神経に永続的なダメージを与えるが、こうした空間的事故はARディスプレイによっていつか根絶させるかもしれないと考えていた<sup>(3)</sup>。

## 究極ディスプレイへの道

イワン・サザーランド氏(Ivan Sutherland)が究極ディスプレイと呼ばれたものを思いつき、試作したのは1960年代にさかのぼる。最初のAR立体視の頭部装着型ディスプレイ(HWD)であり、有線で物理的に追従する(図2)。次世代の開発は軍用の頭部搭載型ディスプレイ(HMD)に焦点が当てられ、さらなる高レベル化は現在に至ってい



図2 サザーランド氏による1960年代のAR究極ディスプレイは、最初の立体視ヘッドマウントディスプレイに認定されている。装着者の頭部にかかる重量を軽減するために天井からつるされたことから、ダモクレスの剣と呼ばれた。(画像クレジット：マーク・リチャーズ氏(Mark Richards)、提供：米コンピュータ歴史博物館(Computer History Museum))

る。同時に、新たなアプリケーションが、1990年代に保守管理や医療拡張向けに最初にターゲットとなった完全なモバイルHWDの誕生を必要とし、今日までに開発、進展が続いている。

現在、ARは個人ユーザーに迫っており、幅広い消費者を支える十億ドル市場の可能性をもつとして拍車がかかっている。このレースは、世界に向けた窓となるARディスプレイの製作の最中であり、ロバストで無線、そして美しいものである必要がある。究極のゴールは、60度以上の視野(FOV)とフルカラーをもち、流行の眼鏡やサングラスに完全に埋め込まれたモバイルウィンドウだ。

眼鏡は、光学素子の背面で、アイボックス内を自然に走査するため、人間の目の動きを把握しなければならない。アイボックスとは、デジタル世界を見失わずにわれわれの目が自由に走査できる、目周囲の空間領域である(図3)。

十分に広いアイボックスがなければ、拡張情報を見失うという経験をしたときにユーザーはブラックアウト(パッチャル情報が突然消滅)したと感ずるかもしれない。これは、技術の採用が阻害されうる失敗だ。

## 光学設計者の課題

ウェアラブルディスプレイの光学設計者は、広いアイボックスと広い視野という要求の厳しい仕様と向き合うのは手強い挑戦だと理解している。しかも同時に、ロバストでパッケージングされており、低コストで大量生産プロセスという、消費者製品の実現可能性として必須である制約下で満たす必要がある。加えて、前述の特徴はARディスプレイバッテリーにより使用時間を最大化させるため、電力効率が高くないといけない。

ラグランジュの不変量(3次元への一般化の場合はエタンジュ)の光学コン

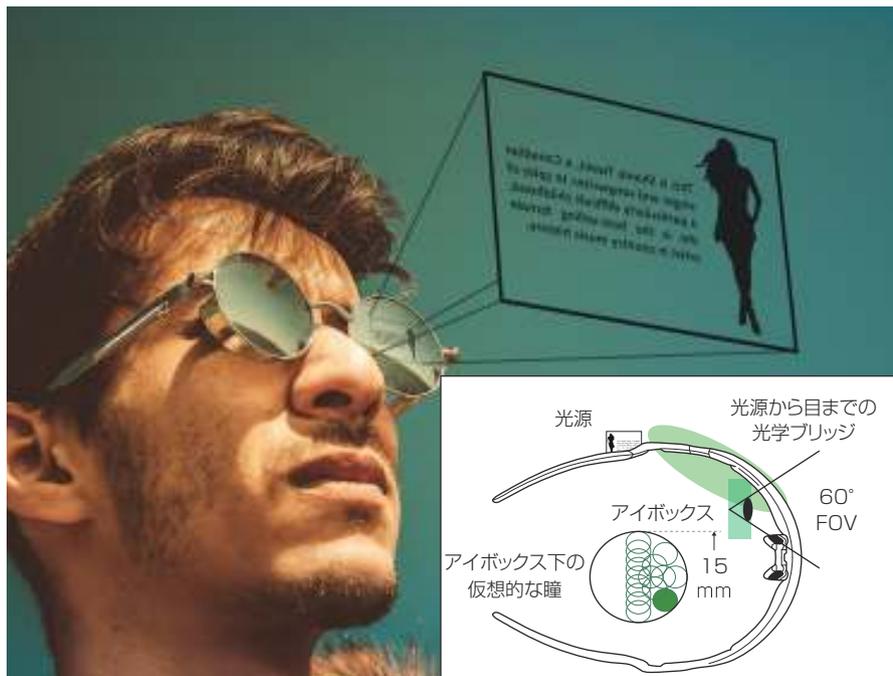


図3 21世紀の究極ARディスプレイ。(画像クレジット：米ロチェスター大 (University of Rochester)のヤニク・P・ローランド氏)

セプトによって、FOV角度とアイボックスサイズが光学システムの複雑さを決定するという数学的結果が得られる。さらに、目に関わる最初の光学素子のサイズは、素子と目の間の距離にFOV角度を乗したものによって決まる。

眼鏡やサングラスのフォーマットは、そのコンポーネントの条件に合ったサイズの範囲に決まる。そして、FOV角度と距離は、ソリューションの範囲を決定する手助けとなり得る。もしFOVは60度以上と譲れないならば、アイボックスの要求を満たすのは困難になるだろう。光学設計者は、特定の経路設計を決める前に、知識ベースと前提を慎重に考慮すべきである。

アイボックスを拡大するアプローチには、アイボックスの複数化や複製が含まれる。目は仮想世界と物理世界がマージした周辺を凝視するため、リアルタイムかつ劇的にディスプレイのアイボックスの位置をユーザーの虹彩の現在位置に補正することを目的に、設

計者は視線追跡手法との統合も利用するかもしれない。後者のアプローチは、ユーザーの広い多様性に対応するために正確でロバストでなければならない。より広い有効なアイボックスを作るこれらのアプローチは、ARディスプレイにシームレスに光を調節する工学的課題に著しい複雑性を付加する。

### ARディスプレイと人的要因の交差点

究極のARディスプレイは、ユーザーの体の一部となることである。インタフェースは、物体や物事だけでなく、ほかの人々ともインタラクトするウィンドウだ。人的要因の知識は、できる限り自然で直感的な視覚経験を作ることが中心となっているが、ウェアラブルディスプレイが社会的交流をサポートするために外観とユーザビリティの両方を取り込めば、社会は受け入れるだけだろう。2016年、R・E・パターソン氏 (R. E. Patterson) と私は情報ディ

スプレイの利用の背後にある意図を議論した。ディスプレイコンテンツの意味を含む認知工学と関連するからだ<sup>(5)</sup>。

認知拡張に向けて偏在するARシステム設計は、認知技術問題および社会技術問題の熟慮を刺激する。われわれの論文では、これらのARディスプレイを開発するための道筋に1つの不足が同定されたと述べる。それは、エンジニアと認知科学者の協力が欠けていることである。この流れは変わり始めており、協力は将来増えることは疑いがないだろう。認知工学は、どのウェアラブルディスプレイ製品においても、光学と人的要因の仕様との間で必要とする情報をガイドするのに役立つだろう。

### ディスプレイ開発を導く疑問

もし、あるパラメータと性能の指標がターゲットとなる光学仕様があれば、ほかの仕様がゴールとして設定されるかもしれない。たとえば、どのタイプの光源を採用するのだろうか。拡張した極小ディスプレイ (照明光学系の有無を問わず) は、網膜にフルカラーイメージを一気に描写するためのカスタム光学とともに使われるのか。微小電気機械システム (MEMS) ベースのスキヤナや走査ファイバチップのような走査デバイスと接続する点状の光源は、網膜に高速かつ多色でイメージを連続的かつ逐一に描写するために使われるのか。補助光学のため、薄い導波路を重ねて目の前面で薄いシート内に光を制限するのだろうか。もしそうならば、フォームの美しさの要素を向上させる曲がり導波路のアプローチはあるのだろうか。各色からの光をどのようにして導波路に接続するのか、ユーザーの目へ出力するのか。全FOVを通じてほかのシャープなイメージへの容認できないもやを作るかもしれないクロストーク

と迷光に、システムはどの程度障害されるのか<sup>(6)</sup>。今日採用されているさまざまなアプローチに共通の問題であるが、導波路は大量生産できるのか。導波路を通じて現実世界の景色をどう美しく見せるのか。そのアプローチは、現実とデジタル世界を組み合わせる光学素子として、従来型もしくはホログラフィックのような結合器を用いてサングラスのインタフェースを利用するのか。

幸い、これらの疑問に対する回答によって、究極のARディスプレイの至高の目標が描かれる。課題は、多くのユーザーが無条件に身に付けたいと思う眼鏡やサングラスのフォーマットに収めつつ、目標とする60度の視野で、望む画質につながる全光学コンポーネントのシームレスな配置を確立することだ。

## 自由形状光学へ

これは、自由形状光学の新たな技術がARソリューションの場所を革命的に変化させると期待されているものだ。「自由曲面」というフレーズはしばらくの間、複雑で連続的、セグメント化された表面が光を調節するよう設計された照明光学系で使われた。1980年代、米ポラロイド社 (Polaroid Corporation) はSX70一眼レフカメラのファインダーで自由曲面プリズムを最初に採用した。自由曲面プリズムはその後1990年代に仮想現実 (VR) 向けにさらに発展したものの、残念ながらこれらのプリズムは没入形の広いFOVを作ることができなかった。

しかしながら消費者向け市場のARでは、分厚いプラスチック (低コストで軽量な成形プリズム) を通じて現実世界を見ることがユーザーの採用に貢献するかどうか、正確に評価しなければならない。最も普及してより薄い配列は実際、中間から広いFOVに

おける光学収差の補正に対応していない。この問題は近年、進展する自由形状光学のレンズ設計手法を適用するときに見つかった<sup>(7)</sup>。ユーザーが美しいディスプレイ形状を使って広い視野で高解像度のイメージを探すときには、異なる経路を探索する。

自由曲面は多数の配列で組み合わせられるため、自由形状光学は自由形状プリズムの先で拡大するものだ。自由曲面は、光学収差のほけや反りの両方を補正する性能とともに、利用できる折り重ね配列の有限範囲を同時に提供しながら、光学システムを3次元に組み込む性能をもたらす<sup>(7)</sup>。複雑な表面を設計するときスケールが異なるときは、サブ波長の周期的なナノ構造によって、光照射野をシャープにするユニークな手法をもたらす光学コンポーネントを作る別の経路ができる<sup>(8)</sup>。

反りの補正はソフトウェアで緩和できるかもしれないが、光学の背景にある虹彩の位置を把握できなければ空間のゆがみの原因となる。当然ながら、

ARディスプレイによる目の動きの記録は、現実世界の視覚とより自然に組み合わせるために適切に曖昧にされた文脈情報と、凝視する点での焦点データを提供するために目の収束を追跡する<sup>(9)</sup>、<sup>(10)</sup>。この機能を越えて視線追跡は、ユーザーが見るものを理解するように、ユーザーに関するさらなる情報も抽出できる。また、覚醒や疲労などのユーザー状態を計測する方法ももたらず。

究極のARディスプレイはシームレスを目指しており、常にユーザーと同行し、バーチャル空間と物理空間をマージし、スマートフォンのように普及して必要なものとなり、遍在したものになるということだ。幅広いアプリケーションと関連する人間の視覚と認知プロセスについてより多くのことを学ぶように、未来の究極のARディスプレイのウィンドウを広げる一方で、光学技術が生まれ続け、シームレスに光をガイドするユニークな方法と組み合わせるだろうと確信している。

## 参考文献

- (1) A. Tang et al., "Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly," Proc. CHI, 73-80, ACM Press, New York, NY, (2003).
- (2) C. M. Elvezio et al., "Remote collaboration in AR and VR using virtual replicas," Proc. SIGGRAPH '17, 13, New York, NY (2017).
- (3) T. Sielhorst et al., J. Display Technol., 4, 4, 451-467 (Dec. 2008).
- (4) R. E. Patterson, "Human interface factors associated with HWDs," Handbook of Visual Display Technology, Springer 4, 10, 2171-2181 (2012); second ed. 2016.
- (5) R. E. Patterson and J. P. Rolland, "Cognitive engineering and information displays," Handbook of Visual Display Technology, Springer, 4, 10, 2259-2274 (2012); second ed. 2016.
- (6) D. Cheng et al., Opt. Express, 22, 17, 20705-20719 (2014).
- (7) A. Bauer, E. M. Schiesser, and J. P. Rolland, Nat. Commun., 9, 1756 (2018).
- (8) N. Yu et al., Science, 334, 6054, 333-337 (2011).
- (9) H. Hua, "Enabling focus cues in head-mounted displays," Proc. IEEE, 105, 5, 805-824 (2017).
- (10) G. Koulieris et al., "Accommodation and comfort in head-mounted displays," Proc. SIGGRAPH '17, 36, 11-21 (2017).

## 著者紹介

ヤニック・P・ローランド氏 (Jannick P. Rolland) は米ロチェスター大光学研究所光学エンジニアリングの Brian・J・Thompson 教授である。e-mail: rolland@optics.rochester.edu URL: www.optics.rochester.edu.