

第6項 AR/VR 技術へのメタマテリアル応用

はじめに

従来のウェーブガイド方式 AR レンズで用いられている透明平板状光学素子の回折格子領域を特殊なメタサーフェス構造に置き換えることで、十分な FOV・アイボックス・輝度均一性を維持したまま、単層でフルカラー(RGB 3色)に対応した AR レンズの実現が可能となる。本項では、上記技術の解説を行うとともに、その設計指針について言及する。

1. 背景

情報化社会が進展する中、政府は、サイバー(仮想)空間とフィジカル(現実)空間を高度に融合させたシステムを活用することで、経済的豊かさと社会的課題の解決を両立させる“Society 5.0”を提唱している。この理念の下、フィジカル空間で収集した様々な情報をサイバー空間における大規模データ処理技術を用いて分析や知識化を行い、産業の活性化や社会問題の解決を目指すサイバーフィジカルシステム(CPS; Cyber Physical System)の重要性が高まっている。このような二つの空間が相互に連携し合った社会において、データの収集から蓄積、解析、フィードバックまでを一貫して行うサイクルを実現するために、サイバー空間の情報を人々に提示する手段が必要不可欠となる。

上記のような、CPS を基幹とした社会運営がされる世界を目指す上で、拡張現実(AR; Augmented Reality)技術に注目が集まっている。拡張現実とはその名のとおり、現実を拡張する技術である。実際の世界に仮想的な情報を重ね合わせるのは勿論のこと、遠隔地の現実空間にいる人々や物体を、まるでその場に存在しているかのように見せ、複数人でリアルなコミュニケーションや体験を共有できるようにする。このような背景から、仮想と現実が融合した世界を体現する際に必須のデバイスと言える AR グラスに大きな注目が集まっている。

AR グラスは、シースルーディスプレイに、プロジェクタから投影された画像をどのように眼に届けるかで、プリズム方式・バードバス方式・ウェーブガイド方式の三種類に大別される。これまでのところ、プリズム方式とバードバス方式が市場規模では先行しているが、視野角(FOV; Field of View)・シースルー性・サイズの面で問題も多く、拡張現実というコンセプトから多少外れていることは否めない¹⁻³⁾。その一方で、ウェーブガイド方式は、半導体レベルの微細加工と複雑な光学設計が必要になるものの、これらの課題を解決する次世代 AR グラスとして、近年、俄かに注目を集めている⁴⁻¹²⁾。

そのような中、当グループでは、メタマテリアル技術を活用することで、医療用に特化した

ウェーブガイド方式の AR グラスを開発している。体制としては、光半導体製造技術として国内有数の知見・設備を有するとともに、ヘッドマウントディスプレイによる VR 手術に黎明期から取り組んできた「東京科学大学（旧 東京工業大学、旧 東京医科歯科大学）」、国内最大の AR グラス系スタートアップ「Cellid(セリッド)」、メガネレンズ素材で世界シェアトップの「三井化学」の 2 社 1 大学で連携し、素材開発から光学設計、製造技術の確立、ソフトウェアアプリケーションを含めた実装、臨床現場での検証に至るまで、一気通貫の流れを構築している(図 1 参照)。

民生用の AR グラスの使用用途は、日常生活内におけるアミューズメント用途を中心とした仕様だが、医療用 AR デバイスはあくまでも医療処置を補助するものであり、従来の医療処置の遂行を妨げることがあってはならない。ここでは、医療用 AR グラスの必須要件の一つである軽量化について言及し、単層でフルカラー(RGB 3 色)に対応した AR レンズの設計指針について解説する。



図 1 当グループが推進している医療用 AR グラスの開発フロー

2. 各種 AR/MR デバイスの比較と医療用に特化した AR グラス

AR/MR デバイスは、シースルーディスプレイに、プロジェクタから投影された画像をどのようにに眼に届けるかで、プリズム・バードパス・ウェーブガイドの三種類に大別される(図 2 参照)。プリズムは、Google glass で採用された方式で、原理上、FOV が 20 度前後しか得られず、さらに、1 cm 厚のプリズムを通して実世界を見ることは不可能などの問題がある。また、バードパスは、Nreal 社が採用している方式で、FOV が 50 度前後まで拡大可能だが、アイボックス確保のために眼前のハーフミラーとディスプレイパネルのスペースが必要な上、ハーフミラーを使用することからシースルー性も悪い。

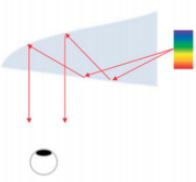
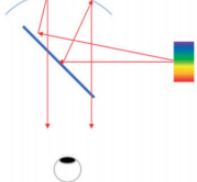
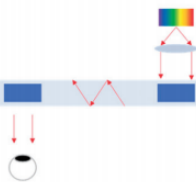
	プリズム	バードパス	ウェーブガイド
概略図			
実際のデバイス	 google glass	 XREAL Air 2	 Vuzix Z100

図 2 各種 AR/MR デバイスの方式の比較

これらに対して、透明で平板状の回折格子を有する導光板を用いて、マイクロプロジェクタからの光を全反射によって導波させて瞳へ伝達するウェーブガイド方式は、FOV・シースルー性・サイズの観点から良好な性能を提供できる方式として、近年、注目を浴びている。しかしながら、ウェーブガイド方式の AR グラスにおいては、回折格子を有する導光板の回折角と全反射条件に強い波長依存性があることから、広い視野角を保ったまま、単層の導光板でフルカラーの映像を投影することは困難となる。そのため、RGB スペクトル毎に使用する導光板を分離した多層導光板が標準となっているが、複数枚のレンズを重ね合わせる工程が必須になるなど、製造面に煩雑性があるとともに、重量もそれに比例して重くなる。アミューズメント用途であれば数十グラム程度の増加は問題にならないが、医療現場において長時間の仕事をすることは、無視できないレベルである。

そのような背景のもと、当グループでは、一般的なウェーブガイド方式の AR レンズで用いられている透明平板状光学素子の回折格子領域を特殊なメタサーフェス構造に置き換えた素子を提案している。これにより、十分な FOV・アイボックス・輝度均一性を維持しつつ、単層でフルカラーに対応した AR レンズを実現することができ、複数枚のレンズを重ね合わせたデバイスに比べて、大幅な軽量化が可能となる¹³⁾。以下、その詳細を述べる。

3. 回折格子を有する導光板を用いたウェーブガイド方式の AR グラスの原理

図 3(a) はウェーブガイド方式の AR グラスで用いられている導光板の模式図である。導光板は主に 3 つの回折格子領域を有しており、投射レンズによってマイクロディスプレイを物体面として無限遠を像面とする信号光を Input 回折格子に入射する構成となっている。

まず、Input 回折格子は投射レンズからの信号光を回折させ導光板内に閉じ込める役割を果たす。そのため回折効率は 100% に近いことが要求される。

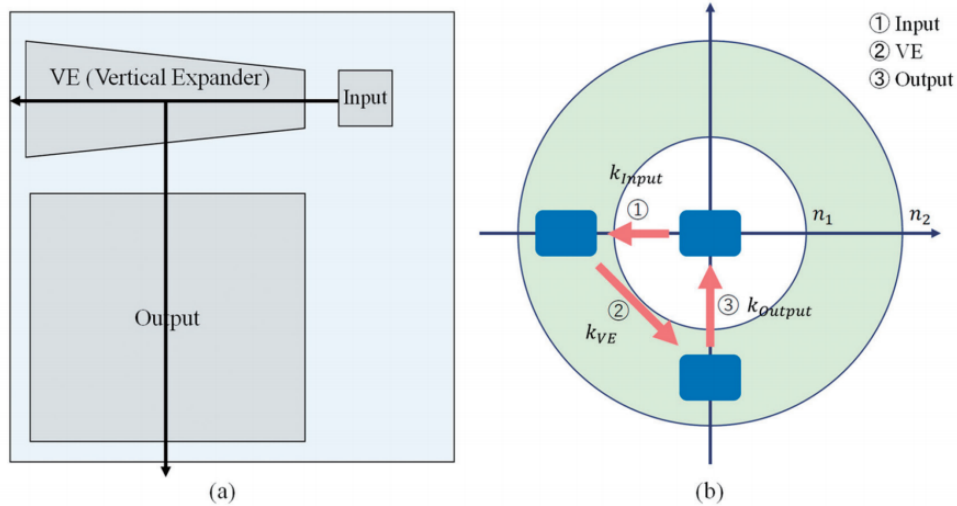


図 3 (a)ウェーブガイド方式の AR グラスで用いられている導光板の模式図 (b)各回折格子の幾何学的関係(マジックサークル)

次に、VE (Vertical Expander) 回折格子は垂直方向のアイボックスを拡張させる役割を持ち、全反射条件を維持したまま、信号光をいくつかのパスに分岐させる。VE 回折格子の奥側まで信号光を届ける必要があるために、回折効率を若干落とすことが必要となる。

最後に Output 回折格子は水平方向のアイボックスを拡張させ、瞳へ信号光を射出させる役割を持つ。こちらも VE 回折格子と同様に回折格子の奥側まで信号光を届ける必要があるため、回折効率を若干落とすことが必須となる。

図 3 (b) は各回折格子の幾何学的関係を表した図である。ここで、Input 回折格子の格子ベクトルを k_{Input} 、VE 回折格子の格子ベクトルを k_{VE} 、Output 回折格子の格子ベクトルを k_{Output} と表したとき、各格子ベクトルが以下の関係式を満たすように導光板内の各回折格子の構造パラメータを設計する必要がある。

$$k_{Input} + k_{VE} + k_{Output} = 0 \quad (1)$$

これは、Input 回折格子に入射した光は、導光板内で各格子ベクトル k_{Input} 、 k_{VE} 、 k_{Output} の作用を受けて回折し、最終的にそれらが完全にキャンセルされることを意味する。これにより、投射レンズから出力される信号光と全く同じ光を Output 回折格子から出力させることが可能となる。

本構成において、回折格子を有する導光板の回折角と全反射条件に強い波長依存性がある。例として、図 4 に赤色向けに設計された AR グラスにおいて導光板を構成する材料屈折率と波長 460 nm, 635 nm における画角 40 度の信号光の導光板内での伝搬角度の許容範囲を示す。ここで、回折格子の構造パラメータは、式(1)の条件を満たし、かつ画角 40°の範囲内で、全反射臨界角と回折格子領域への入射回数を満たしうる条件として設定されている。このとき、導光板を構成する材料屈折率をどのように変えても、青色の光は導光板内で全反射条件を満たせず、信号光は出力回折格子に到達できない。このため、FOV を保ったまま単層の導光板でフルカラーの映像を投影することは極めて難しく、実際には RGB スペクトル毎に使用する導光板を分離した多層導光板を用いることが業界標準となっている。

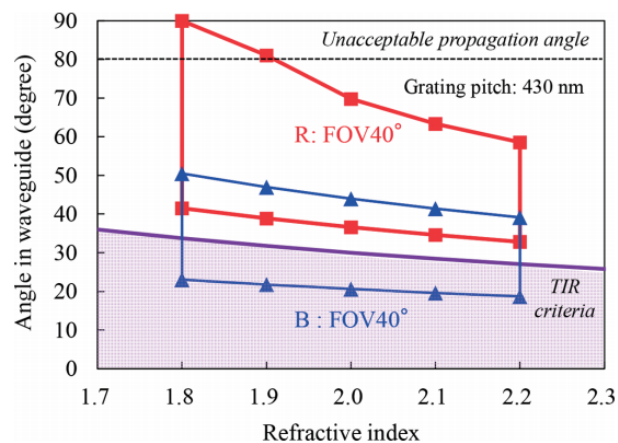


図 4 信号光の導光板内での伝搬角度の許容範囲

なお、最近の AR グラスは、Output 回折格子に 2 次元構造を用いることで、Input 回折格子から直接、水平・垂直両方向にアイボックスを拡張するとともに、大きな FOV を実現する構成となっている¹⁴⁾。ただ、回折角と全反射条件に強い波長依存性があることは変わりなく、単層でフルカラーに対応した AR レンズを実現することは依然として難しい。

4. 特殊なメタサーフェス構造を用いた単層フルカラーで動作する AR グラスの原理

本研究で提案する AR 光学系を図 5(a) に示す(実線はマイクロディスプレイからの光線を表しており、マイクロディスプレイからの各信号の色に対応して色分けされている)。ここで、入出力の回折格子には 2 次元の周期構造を有するメタサーフェス構造を採用しており、 x 軸、 y 軸そ

れぞれの方向に対して、特定の波長の光が導光板に結合するように設計されている。2次元回折格子は、光線の入射角が (θ, φ) のとき、以下の幾何光学の式に基づいて二つの出射角 $(\theta_\alpha, \varphi_\alpha)$ 、 $(\theta_\beta, \varphi_\beta)$ をもつ。

$$n_0 \sin \theta \sin \varphi = n_1 \sin \theta_\alpha \sin \varphi_\alpha \quad (2)$$

$$n_0 \sin \theta \cos \varphi + m\lambda/\alpha = n_1 \sin \theta_\alpha \cos \varphi_\alpha \quad (3)$$

$$n_0 \sin \theta \cos \varphi = n_1 \sin \theta_\beta \sin \varphi_\beta \quad (4)$$

$$n_0 \sin \theta \sin \varphi + m\lambda/\beta = n_1 \sin \theta_\beta \cos \varphi_\beta \quad (5)$$

ここで、 n_0, n_1 は回折格子を形成する材料の屈折率、 α, β は x 軸、 y 軸それぞれの方向に対する周期、 λ は光線の波長、 m は回折次数である。上式(2)-(5)に従って、2次元回折格子の周期 α, β を変化させることで、入力メタサーフェスによって、マイクロディスプレイからの光線を赤色(と緑色)、および青色で伝搬方向を変えて導光板に結合させた後、fold grating を介して出力メタサーフェスで再び合体させ、アイボックスが拡張されたフルカラー光を瞳に結合させることが可能となる(図6)。本研究では、入力メタサーフェスについては、結合効率を上げる目的から1次回折が支配的となるブレード構造の2次元メッシュを採用し(図5(b))、一方の出力メタサーフェスについては輝度均一化を図るために、バイナリ構造の2次元メッシュを採用した(図5(c))。

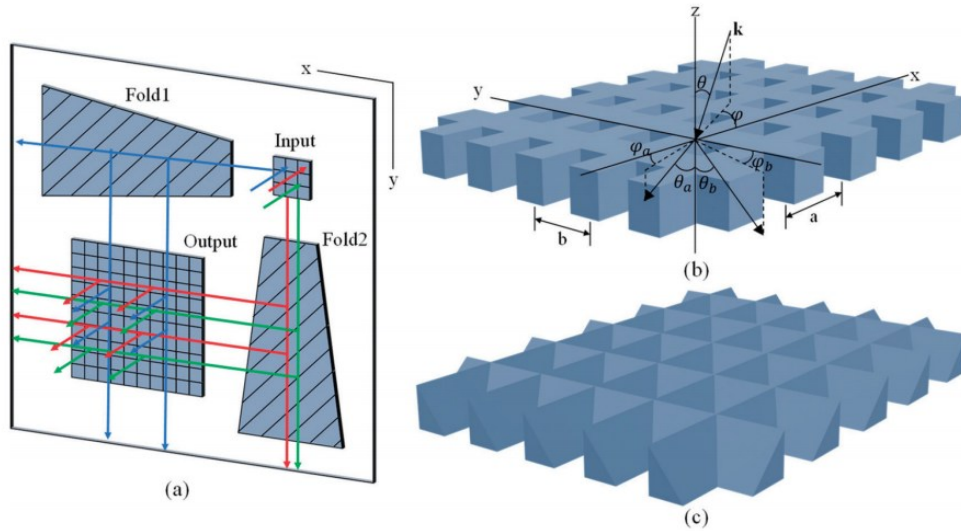


図5 (a)本研究で提案するAR光学系 (b)バイナリ構造のメタサーフェス (c)ブレード構造のメタサーフェス

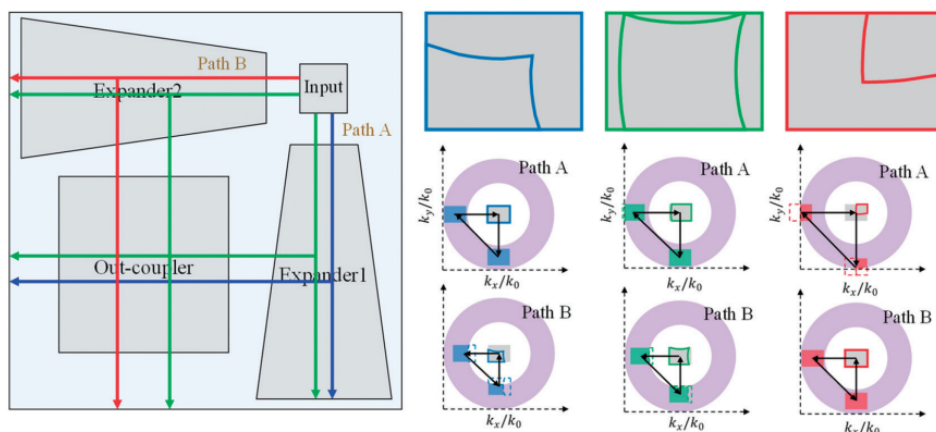


図6 本研究で提案するAR光学系のアイボックスとマジックサークルの概要

5. 単層フルカラーで動作するARグラスの光学特性解析

前述したAR光学系における導光板の性能を正確に評価するために、導光板の輝度均一性と光利用効率の解析を行った。まず、先に述べた式(2)-(5)に基づいて、画角 30° の範囲内で、全反射臨界角とメタサーフェス領域への入射回数を満たしうる条件として、入力側の2次元回折格子、出力側の2次元回折格子、および二つのfold gratingの周期を各々 $317\text{ nm}/438\text{ nm}$, $438\text{ nm}/317\text{ nm}$, 224 nm , 309 nm とした。その後、厳密結合波解析(RCWA; Rigorous Coupled-Wave Analysis)法によって計算されたメタサーフェスの入射光線角度、格子溝深さ、格子溝の方向、偏光方向に対する回折効率をルックアップテーブルとして、Zemax OpticStudioを用いた幾何光学をベースとした光線追跡によって、輝度均一性が高くなるように表示映像の解析を実施した。

図7に各波長((a) 460 nm , (b) 538 nm , (c) 635 nm)における虚像の輝度分布と画面中心にある評価点#3の輝度を基準とした周囲4点の相対輝度を示す(併せて、設計された各回折格子のパラメータも示す)。本解析では、導光板モデルとして対角方向の画角は 30° (水平 $24^\circ \times$ 垂直 18°) に設定し、導光板の屈折率と膜厚は各々 1.9 , 1.5 mm と仮定した。このとき、波長ごとの画面内の輝度の変動係数は 0.58 , 0.30 , 0.17 となり、メタサーフェス構造を用いることで、輝度均一性を確保しつつ単層でフルカラー映像を投影可能な導光板が実現できていることが見て取れた。

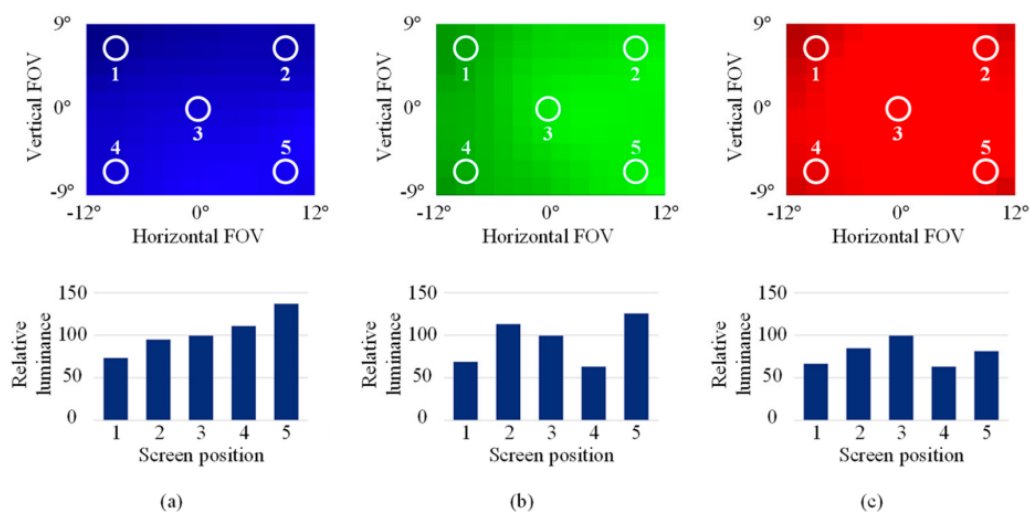


図 7 各波長における虚像の輝度分布と画面中心にある評価点 #3 の輝度を基準とした周囲 4 点の相対輝度

おわりに

ウェーブガイド方式の AR グラスは、近年、市場の期待にデバイスの性能が追いついてきており、これから大きな成長が期待される。そのような中、当グループでは、Application Specific な医療用 AR グラスの開発を行っている。本節では、メタサーフェス構造を用いることで、十分な FOV・アイボックス・輝度均一性を維持しつつ、単層でフルカラーに対応した AR レンズを実現できることを示した。これにより、複数枚のレンズを重ね合わせる必要がなくなり、医療用途に向けたデバイスの大幅な軽量化が可能となる。

参考文献

- 1) D. W. Cheng et al., "Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism," Appl. Opt. **48**, 2655–2668 (2009).

- 2) K. Pulli, "11-2: invited paper: meta 2: immersive optical-see-through augmented reality," Soc. Inf. Disp. Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **48**, 132–133 (2017).
- 3) B. Lee and Y. Jo, *Advanced Display Technology: Next Generation Self-Emitting Displays* (Springer), 307–328 (2021).
- 4) P. Laakkonen et al., "High efficiency diffractive incouplers for light guides," Proc. SPIE 6896, *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XII*. (2008).
- 5) B. F. Bai et al., "Optimization of nonbinary slanted surface-relief gratings as high-efficiency broadband couplers for light guides," Appl. Opt. **49**, 5454–5464 (2010).
- 6) P. Äyräs et al., "Exit pupil expander with a large field of view based on diffractive optics," J. Soc. Inf. Disp. **17**, 659–664 (2009).
- 7) T. Yoshida et al., "A plastic holographic waveguide combiner for light-weight and highly-transparent augmented reality glasses," J. Soc. Inf. Disp. **26**, 280–286 (2018).
- 8) C. Yu et al., "Highly efficient waveguide display with space-variant volume holographic gratings," Appl. Opt. **56**, 9390–9397 (2017).
- 9) X. L. Shi et al., "Design of a compact waveguide eyeglass with high efficiency by joining freeform surfaces and volume holographic gratings," J. Optical Soc. Am. A **38**, A19–A26 (2021).
- 10) J. Han et al., "Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms," Opt. Express **23**, 3534–3549 (2015).
- 11) Y. S. Weng et al., "Liquid-crystal-based polarization volume grating applied for full-color waveguide displays," Opt. Lett. **43**, 5773–5776 (2018).
- 12) Y. H. Lee et al., "Compact see-through near-eye display with depth adaption," J. Soc. Inf. Disp. **26**, 64–70 (2018).
- 13) T. Amemiya and T. Maekawa, Japanese Patent Application No. 2024-179482(2024) (PCT application filed).
- 14) D. Grey and S. Talukdar, "Exit pupil expanding diffractive optical waveguiding device," US Patent 10359635B2 (2019).