

# 日常生活支援を可能にするスマートグラス

清 川 清

## Smart Glasses Enabling Support for Daily Life

Kiyoshi KIYOKAWA

In this article, we discuss three key functions necessary for smart glasses to support daily life: advancement of display hardware, examination and correction of visual functions, and problem-solving through specific daily life support applications. We present our research cases, including an head mounted display (HMD) with expanded downward field of view and an add-on device that adds occlusion functionality to a conventional optical see-through HMD. For the examination and correction of visual functions, we introduce methods such as estimating eye refractive power using electrooculography and foveated rendering based on visual acuity distribution estimated from fMRI. As daily life support applications, we showcase a lost item search assistance system, a work concentration support system using smart glasses, and goggles for Alzheimer's disease treatment using light stimulation.

**Key words:** visual function examination and correction, problem-solving, daily-life support

### はじめに

一般にスマートグラス (smart glasses) とは、ディスプレイ機能、カメラ機能、通信機能、各種センサー、使いやすいユーザーインターフェースなどを備えており、情報処理能力に優れる眼鏡型のウェアラブルデバイスである。眼鏡型のスマートフォンと言ったほうがよいかもしれない。スマートグラスの実例として、Google Glass や Vuzix Blade などさまざまな製品が登場してきた。拡張現実 (augmented reality, AR) や空間コンピューティングに特化した Microsoft HoloLens 2, Magic Leap 2, Apple Vision Pro などもその範疇に含めてよいだろう。スマートグラスを用いることでハンズフリーで情報にアクセスでき、生活や仕事のさまざまな場面で役立つことができる。その高いポテンシャルはもう 20 年以上喧伝されている。一方で、現状のスマートグラスは必ずしもスマートとはいえず、日常生活に不可欠なツールとして広く受け入れられるには至っていない。

では、具体的にスマートグラスをスマートにし、日常生活の支援を可能とするためにはどのような機能が必要だろうか。まず、ユーザーと文字通り知的にスマート (賢い)

なやりとりができる必要があるだろう。ユーザーの意図、興味、感情などを察知して<sup>1)</sup>、ユーザーが明示的に要求することなく、システムが自動的かつタイミングよく情報提供してくれる機能や、優れた秘書と接するかのように自然言語で会話しながら作業支援してくれる機能などが考えられる。LLM (大規模言語モデル) をベースとした現在のチャットボットの驚異的な進化を鑑みれば、このような知的インターフェースは数年のうちに当然の機能として実現されていくことが期待される。

それ以外に必要な機能として、ここでは以下の3つを挙げたい。

1. ディスプレイハードウェアの高度化 (Hop)
2. 視機能の検査・補正・矯正 (Step)
3. 日常生活の問題を解決するアプリケーション (Jump)

まず、Hop として引き続きヘッドマウントディスプレイ (head mounted display, HMD) としての性能向上は必要だろう。理想的には、小型軽量で長時間使用しても快適な装着感、人の視界をすべて覆うような広視野角、視力限界に匹敵する高い角度分解能、高いダイナミックレンジ、輻輳

奈良先端科学技術大学院大学 (〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5) E-mail: kiyo@is.naist.jp

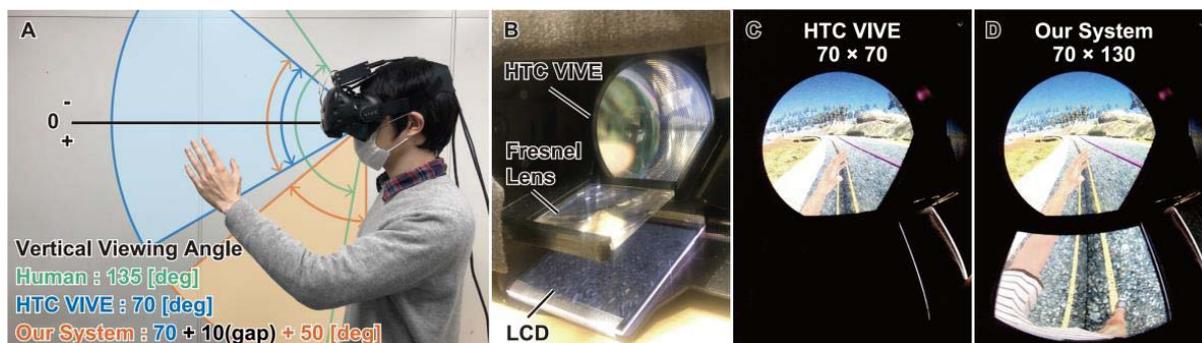


図1 下方視野拡大HMD. (A) 側面図. 通常のHMDと異なり, ほぼ真下まで映像が見える. (B) フレネルレンズとLCDによる下方視野ディスプレイ. (C) HTC VIVEの視野角(約 $70 \times 70^\circ$ ). (D) 下方視野拡大HMDの視野角(約 $70 \times 130^\circ$ ).

調節矛盾のない自然な奥行き手がかりの再現, 体感できない程度の低遅延, といった条件をすべて同時に満たすことが望ましい.

次に Step として, ユーザーの見え方の個人差や眼疾患による経年変化などに対して柔軟に適應する能力があるとよいだろう. 視覚提示技術が進展してどんな映像でも表現できる HMD が実現すれば自由自在な視覚提示が可能かという, 実はそうではない. 一般に HMD の設計やレンダリングは定型の視機能・視知覚を前提にしているが, 実際には一般的な眼鏡では矯正できない非定型のさまざまな視機能・視知覚を有する人々が存在する. スマートグラスはそうした非定型の視機能・視知覚の補正・矯正を行うデバイスとして, 現在の眼鏡のように, 将来的には日常生活に必要不可欠になると考えられる. その際, 視機能・視知覚を矯正・補正する前提として, 個人ごとの見え方の違いや, その経年変化などをセンシングする機能も必要になってくる.

最後に Jump として, さまざまな日々の問題を解決する具体的なアプリケーションが求められる. 現状のスマートグラスのアプリケーションでは, 現実環境でユーザーの眼前に起こっている事象を積極的に支援するような機能はほとんど提供されていない. 単に, スマートフォンや PC でも利用できるようなアプリケーションを「いつでもどこでも」使えるに過ぎない. ヒアラブルデバイスがヘルスマニタリング, 翻訳, 聞き逃し防止, 音場の演出やパーソナライズなどの機能を備えているように, 「今だから, ここだから」という TPO に特化した問題解決力の提供が不可欠である.

以下では, これらの項目について筆者の関わった研究事例を交えながら議論する.

## 1. ディスプレイハードウェアの高度化

ディスプレイハードウェアの性能は徐々に向上しており, 特に画質面の向上は顕著である. 例えば, VR (virtual reality) 元年とよばれた 2016 年に発売された Oculus Rift CV1 の角度分解能は約 10 ppd (pixels per degree) であったが, 2020 年の Varjo XR3 の中心部では 70 ppd に達しており, 換算視力 1.0 を超えている. しかし, 上下方向を含めた広視野映像の提示, 自然な奥行き手がかりの提示, 画素単位の光学遮蔽など, 一般的な HMD での実現が待ち望まれる機能は枚挙にいとまがない. ここではそうしたユニークな機能を実現した研究事例を紹介する.

### 1.1 視野角

スマートグラスの多くは光学シースルー HMD (optical see-through HMD, OST-HMD) であるが, 今後は Apple Vision Pro のようなビデオシースルー HMD (video see-through HMD, VST-HMD) も増えていくと考えられる. しかし, 現状の VST-HMD は下方視野角が狭く, 歩くことすらおぼつかなくなるため, 日常生活支援には不向きである.

われわれは下方視野角を拡大した HMD を開発し, そのメリットを調査している (図 1 参照)<sup>2)</sup>. 地面に描かれた線をたどって歩くタスクを用いた実験の結果, 下方視野角の拡大により参加者の IPQ スコア (没入感の指標) が向上し, 線をより正確に辿れることが示された. 火災から逃げるタスクを用いた実験の結果, 下方視野角の拡大により頭を下げる角度が小さくなり, 自然な頭部姿勢で作業できることが示された. さらにわれわれは, この HMD に魚眼カメラを追加して VST-HMD を構成し, 卓上の作業<sup>3)</sup>や歩行動作における有効性を検証している. 卓上の作業では下方視野角の拡大による有意差はみられなかった. 一方, 歩行動作を伴うタスクでは, 下方視野角を拡大することで容易に障害物を避けることができ, 歩くことが怖くないと感じ

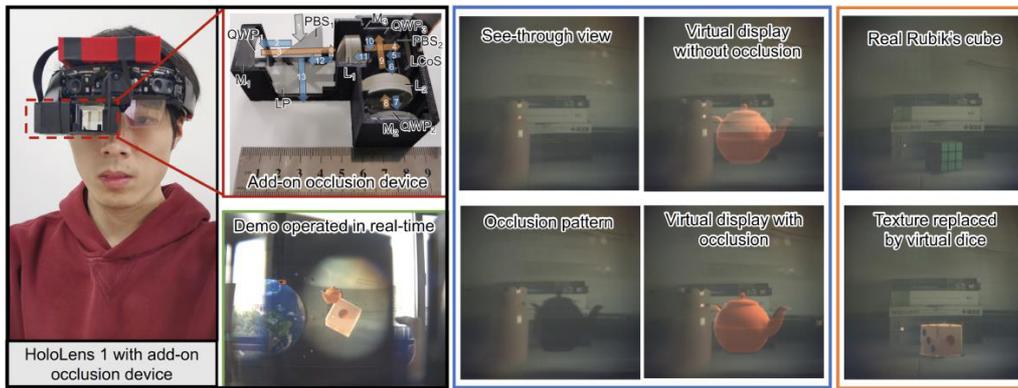


図2 (左) HoloLens 1 にアドオンの光学遮蔽モジュールを組み込んだ状態. 右上のような光学系を経て, 右下のような視界が得られる. LCoS や波長板を用いて光路をコンパクトに折り畳んでいる. (中央) 遮蔽マスクのない状態 (上段) とある状態 (下段). 左側は右側のバーチャル物体に対応する遮蔽マスクの様子. (右) 現実のルービックキューブ (上) がバーチャルのサイコロ (下) に置換されている様子.

ることが示された.

なお, 現実環境における作業支援という観点からは, HMD の映像を視野全域に表示することが常に最適とは限らない. 例えば, われわれは視野を構成するディスプレイモジュールの一部を着脱可能な HMD を提案している<sup>4)</sup>. これにより, 下方視野を担うモジュールを取り外してテキスト入力用デバイスに転用したり, 側方視野を担うモジュールを共同作業者に渡して同一の VR シーンを観察したり, といった新しい利用方法が可能となる. また, 顔の正面には何も装着せず周辺視野のみに映像を提示する HMD も提案している<sup>5)</sup>. われわれの実験では, 周辺視野に他者の様子を提示することで, ユーザーの寂しさを軽減し, 楽しさを向上させられることが明らかになっている. スマートグラスで日常生活を支援するためには, 用途に合わせて視野の構成を選択することも重要であると考えられる.

## 1.2 光学遮蔽

OST-HMD によるスマートグラスを用いて環境によらず見やすい情報提示を実現するためには光学遮蔽の機能は検討する価値がある. 光学遮蔽とは現実環境の一部を暗くしたりその手前に映像を提示したりすることであり, 一般的な OST-HMD ではサポートされていない. このため, バーチャル物体が現実の床に落とす影を表現できない, 日差しの強い屋外で視認性の高い情報提示ができない, といった問題が発生する. Magic Leap 2 などの HMD は透過型液晶マトリクスを用いて光学遮蔽を実現するが, 粗く分割されたエリアごとでしか遮蔽できず, 遮蔽マスクの境界もぼやけて不鮮明である. 画素単位で鮮明な光学遮蔽を実現する HMD も存在するが, 大掛かりになりがちという問題があった<sup>6,7)</sup>. そこでわれわれは, 市販の OST-HMD に外付

けの小型光学遮蔽モジュールを組み合わせる新たな相互遮蔽のソリューションを提案している (図2参照)<sup>8)</sup>. 提案手法は, 映像提示に専用の光学系を必要とせず, 市販の OST-HMD に外付けで適用できるため, コストを抑えつつ光学遮蔽機能を導入できる利点がある. 実証として, HoloLens 1 に光学遮蔽モジュールを組み合わせたシステムを構築した.

光学遮蔽モジュールのみを用いて, プログラマブルなサングラスを構成したり<sup>9)</sup>, 黒いテキストを表示するなどの減算的な情報提示を行うことも考えられる. その際, 鮮明な遮蔽マスクを観察するためのユニークな構成として, われわれは動的なピンホールアレイを構成する手法を提案している<sup>10)</sup>. 遮蔽マスク用に加えてもう1つの透過型液晶マトリクスを用い, そこに動的なピンホールアレイを形成する. ピンホールアレイにより, 遮蔽マスクから眼に至る光束を制限し, 眼の焦点距離にかかわらず鮮明な遮蔽マスクを観察可能としている.

## 2. 視機能の検査・補正・矯正

スマートグラスが高性能な映像提示を実現したとしても, ユーザーの視力や眼疾患などの個人差によっては, その恩恵を十分に受けられない可能性がある. そのため, スマートグラス自身がユーザーの視機能を検査し, 補正・矯正する機能を備えることが重要である. これに関連して, 筆者らは 2022 年から科研費基盤研究 (A) 「日常生活の持続的視覚支援のための眼を見守るスマートグラスの開発」を推進している (図3参照). このプロジェクトでは, 1) 全自動視機能検査手法, 2) ユーザーの見え方や周囲状況に配慮した視覚支援決定モデル, 3) 視機能矯正・視覚拡張・人工網膜などを併用する視覚情報提示手法の3つの要

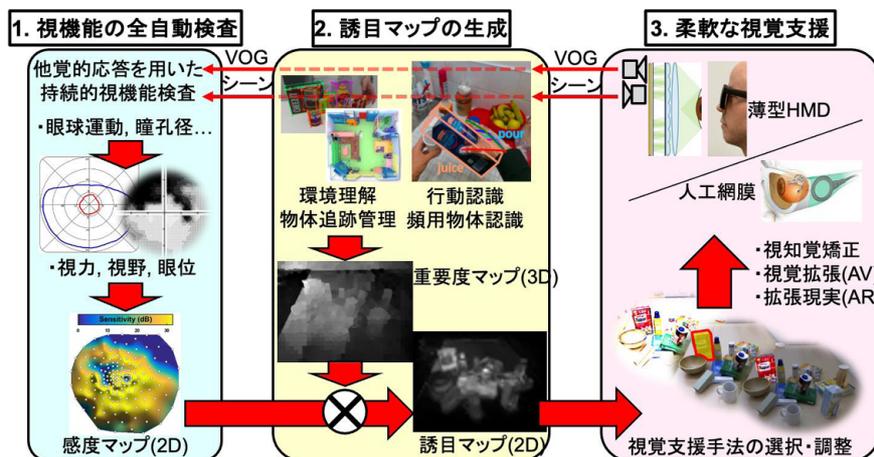


図3 科研費プロジェクト「日常生活の持続的視覚支援のための眼を見守るスマートグラスの開発」(2022~2025)の概念図。スマートグラス単体で、1) ユーザーの視機能を全自動で検査し、2) ユーザーの行動や環境を認識し、3) ユーザーの見え方や物体の重要度などを考慮した柔軟な視覚支援を行う。(VOG: video-oculography, ビデオを用いた眼球運動計測法。)

素技術を開発し、持続的な視覚支援を実現することを目指している。

特に、全自動視機能検査に関しては、スマートグラスに搭載した各種センサーでユーザーの視行動を観測し、それによりユーザーのさまざまな視機能を全自動で検査することを目指している。現在世界中で何らかの視覚障害を有する人々は2億人に達し、その多くは早期治療で防げた可能性があると考えられる。眼疾患の多くは自覚症状に乏しく、気づいたときには進行してしまっている。スマートグラスを着けて日常生活を送るだけで全自動かつ継続的に視機能検査ができれば、個々のユーザーの見え方を考慮した視覚支援ができるだけでなく、眼の健康管理の観点からも利点が大きい。以下では、視機能の検査・補正・矯正に関する研究事例を紹介する。

### 2.1 眼電図からの屈折力の推定

スマートグラスによる全自動視機能検査の例として、われわれはEOG (electrooculography, 眼電図) を用いて眼の屈折異常とその程度を推定する手法を提案している<sup>11)</sup>。実験参加者は正常な視力をもつ5名(うち女性1名, 平均年齢28.2歳)であり、-3Dから+3Dまでの度数の異なる7種類の視力矯正レンズを使用して、さまざまなレベルの屈折異常をシミュレートした。頭部を顎台に固定してモニター上で注視タスクや追跡タスクを行わせ、その間のEOG信号を記録した。ResNetベースのニューラルネットワークで分類器を学習したところ、ユーザー依存モデルでは99%以上の精度でEOGデータからどの矯正レンズを掛けていたかを推定できた。この結果から、EOGデータのみから屈折異常とその程度を高い精度で推定できることが

示唆された。今後は電極数の削減や電極配置の最適化、アイトラッカーや皮膚変形センサーなどを併用した精度向上、より多様な視行動を用いた精度評価などを行う予定である。

### 2.2 視力分布推定に基づく中心窩レンダリング

近年、脳科学が進進し視覚機能を脳科学の立場から解き明かす試みが増えている。例えば、fMRI (functional MRI) を用いて点滅する視覚刺激を提示しこれに反応する視覚野の部位や面積を調べることで、視野内の視力分布を詳細に推定する試みがされている。視覚刺激に反応する大脳皮質の面積が大きいほど、その部位の視力は高いと推定される。その結果、視力の分布には非対称性があり、例えば、視野の上方よりも下方のほうが視力が高いことがわかってきた。われわれは既存のfMRIデータベースから、多くのユーザーを代表する視力分布モデルを構築し、このモデルにしたがってこれまでよりも効率的な中心窩レンダリングアルゴリズムを開発している(図4)<sup>12)</sup>。中心窩レンダリングは中心視野を詳細に描画し周辺視野を粗く描画することで、知覚的な精細度を保ちつつレンダリング負荷を下げる手法である。本研究では、この非対称性を考慮した中心窩レンダラーを開発し、その効果を検証した。その結果、非対称性を考慮しない場合と比較して、知覚的な画像品質を維持したまま、フラグメントシェーダーの処理を27%削減し、フレームレートを17%向上させることができた。

スマートグラスにfMRIを統合することは困難であるが、例えば指標を視野のさまざまな位置に提示してその応答の有無や応答速度をみることで、簡易な視力分布推定を

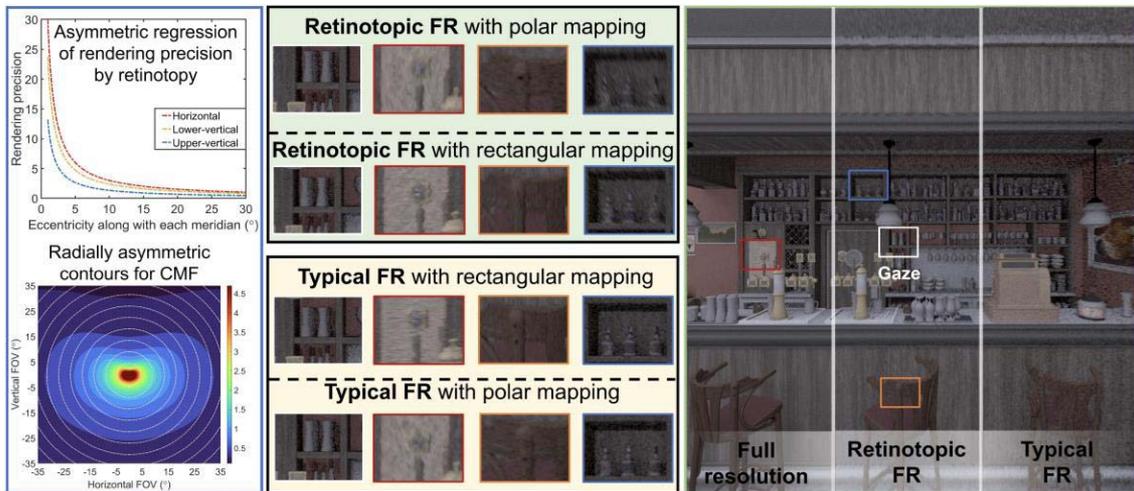


図4 fMRIから推定した視力分布を考慮した効率的な中心窩レンダリング。(左下) 推定された視力分布。(左上) 視力分布に沿うように設定した水平・垂直下方向・垂直上方向のレンダリング精度。(中央) 右のVRシーンの中心を注視した場合の、矩形座標と極座標のマッピングを用いたレンダリング例。上段が提案手法、下段が従来手法。(右) VRシーンの例。

行えると考えられる。こうした機能により、個々のユーザーの見え方をきめ細かく反映した視覚支援が可能になると思われる。

### 2.3 さまざまな視機能の補正・矯正

視覚の光学的機能や神経系機能をデジタル画像処理における射影幾何や時空間フィルターのアナロジーとして捉えれば、視機能の異常はこれらのパラメーターが正常でない状態といえる。したがって、この視覚システムの逆問題を解き、正常な画像が出力されるように、入力画像をあらかじめ変調できれば、視機能異常は補正・矯正できることになる。われわれは、この考えに基づき、視機能を補正・矯正するいくつかのシステムを提案している。例えば、VST-HMDを用いて斜視を矯正するシステムでは、魚眼カメラで撮影した入力画像を適切に回転してからHMDに提示することで、斜視を有するユーザーが立体視を回復することを実証している<sup>13)</sup>。また、視覚過敏者を対象としたスマートサングラスに関する研究では、透過型液晶マトリクスで視界のダイナミックレンジを下げ、眩しい部分は大幅に暗くする一方で、すでに暗い部分はあまり暗くしないといった柔軟な明るさ制御を実現している<sup>9)</sup>。HMDを用いてさまざまな視機能異常の補正・矯正をする事例が研究されており<sup>14)</sup>、将来のスマートグラスにはこうした機能も搭載されることが期待される。

### 3. スマートグラスによる日常生活支援

われわれは、スマートグラスを用いた日常生活支援に関するさまざまな研究を実施してきた。例えば、注視することで注視対象を拡大するシステム<sup>15)</sup>、色情報を保持しつつ

温度情報を可視化するシステム<sup>16)</sup>、高速な動きをスローモーション再生するシステム<sup>17)</sup>、食べ物の見かけを変調することで異なる風味・食味を感じさせるシステム<sup>18)</sup>、聴覚障害者向けに周囲の音の種類を認識し対応する位置にオノマトペを表示するシステム<sup>19)</sup>、などがある。以下では、最近の研究事例を3つ紹介する。

#### 3.1 もの探し支援システム

われわれは共有スペースにおけるもの探し支援システム LocatAR を提案している(図5)<sup>20)</sup>。LocatARは、ユーザーが物を把持し移動させる動作をスマートグラスのカメラで自動的に認識し、その物体の種類と移動前後の位置をデータベースに記録する。ユーザーのプライバシーを保護するため、認識に用いた画像自体は保存せず、物の種類や移動情報のみを保存する。物の検索はテキストまたは場所を手がかりとして行える。場所による検索では、ユーザーが最後にその物を見た場所を指定することで、そこから移動した物に絞り込んで検索できる。物の移動は、移動前後を結ぶ虹のような曲線で可視化し、ユーザーを目的の物まで誘導する。実際に部屋の中でのもの探しをさせる実験では、提案システムを用いることで検索時間が大幅に短縮され、ユーザーが感じる効率性や快適性が向上し、不安や疲労が軽減することが示された。このように、スマートグラスは現実環境におけるユーザーや環境の認識に基づく作業支援に適している。

#### 3.2 作業への集中支援システム

われわれは、卓上の視覚的ノイズ(煩わしさを感じる視覚刺激)となる物体の視認性を調整することで、作業に集中しやすい環境を提供するシステム DecluttAR を提案して

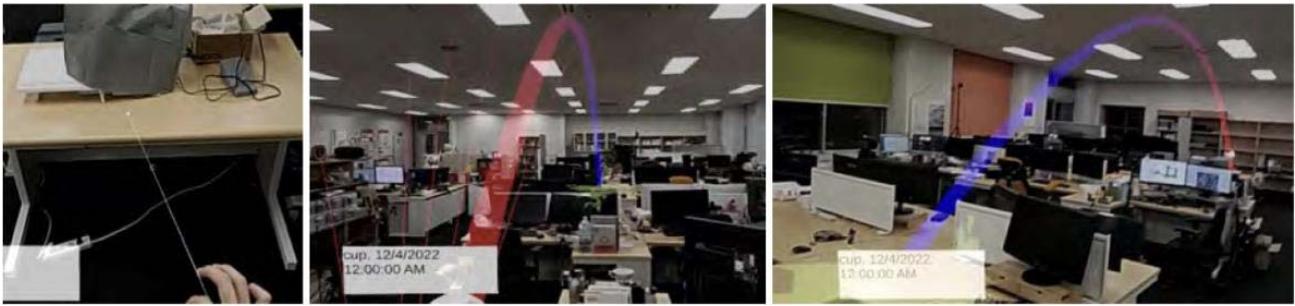


図5 もの探し支援システム。(左) 場所を指定すると過去にそこにあった物体を検索できる。(中央) 検索結果の可視化。虹をたどると物体を見つけることができる。(右) 検索結果を虹の終点から見た様子。左下に探していた物体がある。



図6 作業への集中支援システム。(左) ユーザーの様子。(中央) 物体の見え方を変調する前の視界。(右) 物体の見え方を変調した視界。物体ごとに消したり目立たなくすることができる。

いる (図6)<sup>21)</sup>。DecluttARでは、VST-HMDとRGB-Dカメラを用いて卓上の物体の3Dモデルが自動生成され、ユーザーはそれらの視認性を対話的に制御できる。物体の見え方は、グレースケールにするか否か、輪郭表示をするか否か、透明度をどの程度にするか、といったパラメーターを独立に制御できる。提案システムの有効性を検証するため、4種類の見た目での単純な計算課題の実験を行った結果、タスクの前半では、透明表示の回答数が通常表示よりも有意に多かった。このことから、透明表示によってより速くタスクに集中できる状態に入れたことが示唆された。また、レゴブロックを用いた組み立てタスクでは、輪郭表示の場合が最もタスク達成時間が短くなった。このように、スマートグラスを用いて現実環境の見え方を変調することで、日常生活のさまざまな場面に適したパーソナルな環境を創出することができる。

### 3.3 低刺激光治療デバイス

われわれは、アルツハイマー病 (AD) に対する光刺激治療の継続性を向上するために、ゴーグル型の光刺激デバイスを提案している<sup>22)</sup>。光刺激治療は40 Hz前後の点滅光を観察することで脳内のアミロイド $\beta$ が一時的に低減するというもので、動物実験ではAD治療への有効性が示され、人間についてもADの進行速度を低下させる可能性が示唆されている。大きな副作用もなくコストも低い光刺激

治療は有望であるが、点滅が煩わしく、長時間の治療に向かない課題があった。われわれは、異なるスペクトル分布をもつ2種類のLED群を交互に点滅させることで知覚的に定常光として感じられる、invisible spectral flicker (ISF) 刺激とよばれる低ストレスな光刺激を用いたゴーグル型の光治療デバイスを開発した。快適性評価実験の結果、ISF刺激は従来の点滅光刺激と比較して有意に快適であり、日常作業との併用も可能であることが示された。また、脳波解析実験の結果、提案デバイスによるISF刺激は、脳波の40 Hz成分を有意に強めることが明らかになった。このため、提案デバイスはADの光刺激治療における継続性向上に寄与する可能性が高いと考えられる。今後は、提案デバイスを用いた長期的な治療効果の検証や、実際のAD患者を対象とした臨床研究などを通して、デバイスの有効性を確認していく必要がある。スマートグラスは、このようなさまざまな機能を有する頭部装着型デバイスと統合し、さらに付加価値を高めていくことが期待される。

### おわりに

スマートグラスを日常生活支援に役立てるためには、ディスプレイハードウェア、視機能検査・補正・矯正、アプリケーションなど、多岐にわたる技術の高度化が必要である。筆者らの研究事例からもわかるように、柔軟な発想

でさまざまなソリューションを提供し、スマートグラスのポテンシャルを広げていくことが重要である。スマートグラスがますます発展し、人々の日常生活に不可欠な存在として社会に浸透していくことを期待する。

本稿で紹介した筆者の研究成果は共同研究者の多大な協力による。これらの一部は JSPS 科研費 JP16H02858, JP18H04116, JP22H00539 の助成を受けたものである。

## 文 献

- 1) F. Dollack, K. Kiyokawa, H. Liu, M. Perusquia-Hernandez, C. Raman, H. Uchiyama and X. Wei: "Ensemble learning to assess dynamics of affective experience ratings and physiological change," *Proc. of International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction Workshops and Demos (ACIIW)* (Cambridge, 2023) pp. 1-8.
- 2) K. Nakano, N. Isoyama, D. Monteiro, N. Sakata, K. Kiyokawa and T. Narumi: *IEEE Trans. Visualization Comput. Graphics*, **27** (2021) 4204-4214.
- 3) K. Nakano, M. Perusquia-Hernandez, N. Isoyama, H. Uchiyama and K. Kiyokawa: "Effects of visual presentation near the mouth on cross-modal effects of multisensory flavor perception and ease of eating," *Proc. of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (Sydney, 2023) pp. 902-911.
- 4) I. Endo, K. Takashima, M. Inoue, K. Fujita, K. Kiyokawa and Y. Kitamura: "ModularHMD: A reconfigurable mobile head-mounted display enabling ad-hoc peripheral interactions with the real world," *Proc. of Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)* (virtual, 2021) pp. 100-117.
- 5) 喜多山湧也, 磯山直也, 内山英昭, 酒田信親, 清川 清: "周辺視野のみに情報提示するディスプレイシステム", 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 (CVIM) 抄録集 (オンライン, 2022) pp. 1-6.
- 6) Y. Zhang, X. Hu, K. Kiyokawa, N. Isoyama, H. Uchiyama and H. Hua: *Opt. Express*, **29** (2021) 42751-42761.
- 7) Y. Zhang, X. Hu, K. Kiyokawa, N. Isoyama, N. Sakata and H. Hua: *Opt. Lett.*, **46** (2021) 4208-4211.
- 8) Y. Zhang, X. Hu, K. Kiyokawa and X. Yang: *IEEE Trans. Visualization Comput. Graphics*, **29** (2023) 2700-2709.
- 9) X. Hu, Y. Zhang, H. Uchiyama, N. Isoyama, N. Sakata and K. Kiyokawa: *Displays*, **81** (2024) 102611.
- 10) X. Hu, Y. Zhang, M. Perusquia-Hernandez, Y. Hirao, H. Uchiyama and K. Kiyokawa: "Pinhole occlusion: Enhancing soft-edge occlusion using a dynamic pinhole array," *Proc. of IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (Orlando, 2024) pp. 719-720.
- 11) X. Wei, H. Liu, M. M. Perusquia-Hernandez, K. Masai, N. Isoyama, H. Uchiyama and K. Kiyokawa: "Unobtrusive refractive power monitoring: Using EOG to detect blurred vision," *Proc. of Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)* (Sydney, 2023) pp. 1-7.
- 12) Y. Zhang, K. You, X. Hu, H. Zhou, K. Kiyokawa and X. Yang: "Retinotopic foveated rendering," *Proc. of IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (Orlando, 2024) pp. 903-912.
- 13) 清川 清: "HMDを用いた視機能検査・矯正システムの可能性," 第63回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI) 論文集 (大阪, 2019) OS08-3.
- 14) G. Aydinoglu, K. Kavakli, A. Sahin, P. Artal and H. Ürey: *Biomed. Opt. Express*, **12** (2021) 511-538.
- 15) J. Orlosky, T. Toyama, K. Kiyokawa and D. Sonntag: *IEEE Trans. Visualization Comput. Graphics*, **21** (2015) 1259-1268.
- 16) J. Orlosky, P. Kim, K. Kiyokawa, T. Mashita, P. Ratsamee, Y. Uranishi and H. Takemura: "Vismerge: Light adaptive vision augmentation via spectral and temporal fusion of non-visible light," *Proc. of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (Nantes, 2017) pp. 22-31.
- 17) T. Tao, P. Ratsamee, Y. Uranishi, K. Kiyokawa, T. Mashita and H. Takemura: "An interactive 4D vision augmentation of rapid motion," *Proc. of the 9th Augmented Human International Conference* (Seoul, 2018) 21.
- 18) K. Nakano, D. Horita, N. Sakata, K. Kiyokawa, K. Yanai and T. Narumi: "DeepTaste: Augmented reality gustatory manipulation with GAN-based real-time food-to-food translation," *Proc. of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (Beijing, 2018) pp. 212-223.
- 19) 有隅惟人, 平尾悠太朗, 磯山直也, 内山英昭, 清川 清: 研究報告アクセシビリティ (AAC), **2024** (2024) 1-6.
- 20) H. Oshimi, M. Perusquia-Hernandez, N. Isoyama, H. Uchiyama and K. Kiyokawa: "LocatAR: An AR object search assistance system for a shared space," *Proc. of the Augmented Humans International Conference* (Glasgow, 2023) pp. 66-76.
- 21) K. Yokoro, M. Perusquia-Hernandez, N. Isoyama, H. Uchiyama and K. Kiyokawa: "DecluttAR: An interactive visual clutter dimming system to help focus on work," *Proc. of the Augmented Humans International Conference* (Glasgow, 2023) pp. 159-170.
- 22) 山岡裕希, 平尾悠太朗, パレスキアエルナンデス モニカ, 内山英昭, 清川 清: *BIO Clinica*, **39** (2024) 339-343.

(2024年6月1日受理)