

## ニアアイおよびヘッドアップディスプレイのコントラスト、解像度、視差の測定

Richard L. Austin, Bruce S. Denning, Robert C. Calpito Gamma Scientific, San Diego, USA

#### 概要

ヘッドアップ(HUD)やニアアイディスプレイ(NED)のメーカーは、 ディスプレイの品質を定量化するために、さまざまな性能特性を 利用しています。これらの性能パラメータには、コントラスト解像度、 歪み、輝度、色、均一性の測定が含まれます。これらは、拡張現実と 仮想現実(AR/VR)ディスプレイのユーザーが知覚する視野に おいて不可欠な性能評価基準です。両眼ディスプレイの場合、 ユーザーが2つの画像を1つの知覚画像に融合する能力は、角度 アライメントまたは視差が狭い角度許容範囲内になければなりません。 最近の研究では、測光・測色測定結果の再現性・再現性を保証する ために、最低限必要な光測定器(LMD)の特性が定義されています。 (Penczek et al. (Penczek, et al.) これらの知見に基づき、 我々は、QVS(Qualified Viewing Space)の中央領域に 配置された直径5mmの大きな入射瞳孔の回転によるコントラストと 解像度の効果について、より詳細な調査を行いました。人間の 目の瞳孔と同じようにQVS内で瞳孔を動かした場合と、入射瞳面内で 入射瞳孔を回転させた場合の解像度と画像歪みの測定結果を比較 します。また、基準コントラストターゲットを用いた2Dイメージング LMDのマイケルソンコントラスト分解能の限界についても検証 します。参照コントラストターゲットは、撮影画像内のベーリンググレア /迷光を決定するためにも使用できます。最後に、視差測定の基礎 として、LMDの左右の眼のポインティング方向の精度を比較した 結果を報告します。

#### キーワード

AR/VRニアアイ ディスプレイ解像度、AR/VRニアアイディスプレイ マイケルソンコントラスト、AR/VR ニアアイ ディスプレイ Eye-Box、 瞳孔の回転と目の回転、輝度、色

## 1. はじめに

ヘッドアップディスプレイ(HUD)、拡張現実、仮想現実(AR/VR) ニアアイディスプレイ(NED)のメーカーは、表示画像に一貫した 品質を生み出すために光学測定に依存しています。光学性能 パラメータには、測定フィールドの中心の輝度と色、および画像 領域全体にわたる均一性が含まれます。その他の重要な性能評価 基準は、視野(FOV)、解像度、マイケルソンコントラストです。 最近の研究では、測光と測色の測定結果の再現性と再現性を 保証するために、光計測装置(LMD)の入射瞳の大きさは直径5mm 未満でなければならないことが報告されています[1、2、3、4]。 これらの知見に基づき、ダイレクトビューディスプレイ技術に関する 情報ディスプレイ測定基準(IDMS)に規定された方法に従って、 ディスプレイのマイケルソンコントラストと解像度を測定する方法を 示します。LMDのマイケルソンコントラスト測定限界を特徴付ける ために使用される方法を提供します。また、Qualified Viewing Space (QVS)を通じたLMD入射瞳の動きの2つの異なる視点を 備えたEpson Moverio BT-300スマートグラスARディスプレイの 完全なFOVをカバーするマイケルソン コントラスト測定の結果も示 します。測定に有利な点の1つは、入射瞳または瞳回転点(PRP)の 面です。マイケルソンコントラストマッピングのもう1つの有利な ポイントは、眼球回転ポイント(ERP)です。また、ヘッドアップディスプレイ および他の方法と同様の他の双眼ディスプレイでの視差測定に関する 著者の経験に基づいて、視差を決定するプロセス/方法も紹介 します [5、6]。

## 2. NED測定ジオメトリー

IEC技術委員会110、ワーキンググループ12(TC110 WG12)は、 NEDの標準試験方法の作成に取り組んでいます。NEDを見ている ときに視線を向ける方向を説明するための幾何学的座標は、垂直軸と その回転に加えて水平軸を中心とした回転です。これにより、よく 知られた方位角(AZ)および仰角(ELEV)角座標系が作成されます。 座標空間を通るAZ線は、すべてY縦軸に沿った2点を通る縦断大円線を なぞります。座標系の中心から見た場合、AZ角度はZ光軸の右側の 角度を正符号で示します。ELEVポインティング方向の角度は、正の Y軸方向に正で、球体容積をスライスするX Z平面に平行な平面を 定義します。これを図1に示します。座標系の中心から見て、Z軸に 沿った0度のポインティング方向は、NED被試験デバイスの光軸に 対応します。



図1 球面座標系は、仮想画像測定フィールド内のさまざまな測定位置への 角度指示方向を指定します。

測定用の幾何学形状に関する追加の考慮事項は、視点または 球面座標系の中心です。標準的な有利な点として検討されている 選択肢の1つはPRPで、もう1つはERPです。2つの視点の違いを 図2に示します。



図に示すのは、X Z平面の水平断面をY軸方向に見た図です。この断面は、 ARユーザーの視線の中心を通ります。左目はPRP視点での指向方向 角度の変化を示し、右目はERP視点での同じ指向方向角度の変化を 示しています。図に示すARディスプレイの緑色の網掛けQVSから集光 される光の違いに注目してください。この違いは、LMDの入射瞳がこれら 2つの異なるバンテージポイントからデータを収集した場合、測定画像 フィールドと有効FOVのマイケルソンコントラストの測定結果に大きな 違いをもたらします。ERPバンテージポイントは、QVSを通過して回転 する眼がディスプレイをどのように見るかを示しています。



図2 左目は瞳孔回転点(PRP)を示し、右目はARメガネの緑の網掛け QVSに対する眼球回転点(ERP)を示します。

### 3. ディスプレイ測定システム

LMDは分光放射計と2D画像センサーの両方で構成され、図3に示す 全体システムの一部です。



**図3** 全体的な測定システムの設計は示されていませんが、望遠鏡の位置と 指向方向を制御する望遠鏡位置システムです。

このシステムには、被試験デバイス(DUT)上にテストパターンとカラーフィールドを表示するシステムコントローラ内のグラフィックジェネレータ、オートコリメーション基準ミラー、LEDベースの可変式標準光源が含まれます。 LMDは、CCD検出器ベースの回折格子分光放射計に結合された、標準的な 直径5mmから2mmの入射瞳を持つコンパクトサイズの望遠鏡です。 LMDには、選択可能な直径1度または2度のフィールドストップ アパーチャーが含まれています。このコンパクトな望遠鏡は、X、Y、Z位置、 視点の位置、NEDの射出瞳に対する指向方向を制御する精密6軸産業用 ロボットに取り付けられています。望遠鏡の最前部にある直径1mmの 入射瞳まで下げるオプションがあります。システムは、次の3つの異なる データ収集モードに構成できます。

- 測定領域の表示と定義
- 分光放射測定
- 画像キャプチャ

**測定エリアの表示と定義:**測定エリアの表示と定義モードでは、 対物レンズは虚像を中心とする円形の角度測定エリアを定義する選択 可能なFOV開口部を含む平面上で、NEDからの虚像の直径7度の サンプル領域の焦点を合わせます。

LEDランプもFOV開口部の後ろに配置され、NEDに向かって光を投影 します。この光はまた、分光放射分析ベースの輝度測定のためにサンプリング された仮想画像測定領域に正確に位置合わせされて、内部カメラ センサー面上に再結像されます。このモードは、望遠鏡の光軸を参照 ミラーに対して垂直に設定するオートコリメーション光源としても使用 できます。これは、視差測定のために NED DUTの左目と右目の位置の 間に望遠鏡を配置するときに、指向方向を正確に維持するために使用 できます。

分光放射測定: 図4に示すように、LED照明源が分光放射計の測定 経路から削除され、高スペクトル純度のスペクトル データ セットが 取得され、輝度が分析されます。

仮想画像輝度均一性プロファイル



■ 200-220 ■ 220-240 ■ 240-260 ■ 260-280 ■ 280-300 ■ 300-320 ■ 320-340

図4 Epson BT-200スマートグラスで表示される測定フィールドの 輝度プロファイルマップ

画像キャプチャと分析: 画像キャプチャモードでは、カメラは測定フィールド 領域の分光放射色と輝度に相関する画像を取得します。キャプチャされた 画像の均一性は、イメージフィールド平坦化2Dイメージセンサーで判断 されます。キャプチャされた単色画像は、表示色の均一性、再現忠実度、 マイケルソン コントラスト、MTF の予測モデルを作成するために使用 できます。





図3に示すDUTは、図5に示すように、射出瞳の均一性と射出瞳内の 関数位置としての仮想画質についても評価できます。この測定結果では、 測定フィールドの中心に表示される1.5 度の白色照明の正方形パターンの 中心を指しながら、QVSを通る単一の XY平面がサンプリングされました。 LMD入射瞳は10mm x 18mmの領域にわたって1 mmずつ移動し、 各位置でスペクトル スキャンが取得されの上、輝度の結果が記録されました。 図半分は、QVSのこの平面からサンプリングされた輝度プロファイルを 示しています。

BT2000 右側 (アイリリーフ18mm)



BT2000 右側 (アイリリーフ18mm)



図5 18mmアイレリーフ距離におけるEpson BT-200スマートグラス ARディスプレイの片方の目の位置のQVSを通るXY平面内および XY平面の輝度プロファイル

図の下半分は、QVSの周囲をオレンジ色と青色の領域の境界として 示しています。周囲基準は、輝度がQVSのピーク輝度の50%に低下する 場所として定義されます。

#### 4. 測定データと結果

<sup>日本総代理店</sup> 旭光通商株式会社

www.kyokko.com

LMDの2Dイメージキャプチャ分解能の評価は、高コントラストの電子 テストターゲットを用いて行われます。テストターゲットは、3.45ミクロン ピクセルサイズのLMD12メガピクセルセンサの解像度を超える十分な 解像度で、1度あたりのラインスペーシングを広範囲に設定できます。 LMDの理論的な分解能は15秒角(0.004度)以下です。 1度あたり最低5ピクセルと仮定すると、理論的な測定分解能は 1分角強、つまり瞳孔径が2~5mmの範囲における人間の目の 視力に相当します[5]。

異なるポインティング方向とデザインアイボックス内の異なる 位置でマイケルソンコントラストデータを取得するために、6軸 ロボットは0.001度の分解能で±25μmの精度とポインティング 方向にコンパクトなレンズ光学系の位置を制御します。コンパクトな サイズにより、望遠鏡の入射瞳をニアアイディスプレイのイヤーピース 間のディスプレイ基準アイポイントに配置することができます。 15種類のポインティング方向で、コントラスト伝達関数(CTF)の ために、1つのアイレリーフ距離で全視野データを取得しました。 これらのポインティング方向のそれぞれで、10×10度の画像が 15秒角(0.07ミリラジアン)未満のピクセル分解能で取得されます。

入射瞳、PRPおよびERPの2つの有利な点に基づいて、2つの異なる 測定構成が調査されました。結果は、ディスプレイ測定フィールド上に 生成される水平線と垂直線のラインペア間隔が異なる両方の構成で得られ ます。図6は、PRP側から撮影したEpson BT-300の20 x 12度FOV 全体のマイケルソン コントラスト値を示しています。



PRP バーティカルバー 8、7,6 ON: 8,7,6 OFF



図6 Epson BT-300のマイケルソンコントラストは、瞳面 (PPR)内でLMD瞳を回転させてQVSの中心から測定しました。 下部の凡例は、各色に対応するマイケルソンコントラスト パーセンテージ値を示します。縦軸と横軸の単位は度です。

# **Contrast Resolution Parallax**



これは、端から端までかなり良好なマイケルソン コントラストを示して います。3つのグラフはすべて、異なるピクセル間隔が上から下に 積み重なった垂直線パターンのものです。3つのグラフのうち一番上の グラフは、8つの表示ピクセルラインがオン/8つの表示ピクセルラインが オフの場合です。中央は7 on 7 offのテストパターン、下は6 on 6 offのテストパターンです。しかし、QVSを通して瞳孔を回転させて ユーザーが見るERPデータと比較すると、結果は劇的に異なります。 データは、水平FOVが左の-10度から-8度まで2度減少し、マイケルソン コントラストが-8度のデータ収集方向で20%未満に低下することを 示しています。また、注目すべき興味深い点は、PRPデータの仰角 4~6度、方位角2~4度の方向領域にコントラストの低いスポットが あることです。ERPデータを見ると、マイケルソンコントラストの悪い スポットは方位角で6~8度の方位角を指す方向領域にシフトして います。

PRP バーティカルバー 8、7,6 ON: 8,7,6 OFF



図7 エプソンBT-300スマートグラスの12度×20度のFOVを カバーする眼球瞳孔回転マイケルソンコントラストデータを、 それぞれ上から8オン/8オフ、7オン/7オフ、6オン/6オフの異なる 白色縦線パターンの間隔の関数として示します。このデータは、眼が ディスプレイ上のコントラスト差をどのように見るかを表しています。 下部の凡例は、各色に対応するマイケルソンコントラストのパーセンテージ 値を示しています。 縦軸と横軸の単位は度です。その他のデータとして、左右の眼球の光軸 ポインティング方向の視差を取得しました。これは、LMDの入射瞳をある アイポイントから別のアイポイントに移動させる際に、移動の過程で ポインティング方向を変えることなく取得したものです。データ収集に 使用されたLMDには、NEDから両目の視線方向に十分な大きさの平面 ミラーに対してポインティング方向を確認できるオートコリメータが内蔵 されています。これは図3にオートコリメーション基準ミラーとして示されて います。

視差の測定方法は簡単です。まず、表示されたクロスへアパターンに焦点を 合わせ、ポインティング方向を変えて、デザインアイポイントの近くから 右目の位置を通してクロスへアパターンの中心にLMD軸を合わせます。 ポインティング方向は方位角と仰角のゼロ度基準に設定します。LMDを X軸方向に水平方向に距離Dだけ移動させ、左側のアイポイントまで移動 させます。測定された方位角偏差αと仰角角偏差βを用いて、式により 一次的に輻輳を計算します。

$$Vd = D / tan \alpha$$

視差はまた、距離Dを単眼位置QVSを横切る距離に変更した同じ式を 使用して焦点距離を決定するために使用することができます。

同様に、DUTの2つの瞳孔間の垂直面における画像の位置ずれは、仰角 βの差によって与えられます。

#### 結論

エプソンモデルBT200とBT300の2組のARグラスについて、基準測定器 といくつかの試験測定結果を説明しました。瞳孔回転点から測定した ディスプレイ測定性能と眼球回転点から測定したディスプレイ測定性能の 大きな差が、最も重要な発見です。

### 5. 参考文献

[1] J. Penczek, et al, "Absolute radiometric and photometric measurements of near-eye displays", J. Soc.Info. Display, Volume 25, Issue 4 215-221 (2017)

[2]大島和彦他、"アイウェアディスプレイ測定法:測定における入射瞳サイズ 依存性"、SID Symp. ダイジェスト, 第2集: セッション 79, 1064-1067 (2016)

[3] R. L. Austin 他, "Spectroradiometric Measurements of Near-Eye and Head Up Displays", SID Symp. ダイジェスト, ブック2セッション65, 958-960 (2017)

[4] X. Mu, et al, "A Novel Method for Measuring Optical Performance of AR/VR Displays," SID Symp. ダイジェスト 48(1), 1579-1580 (2017)

[5] D. Fellows, et al, "Near to Eye Display Test Station", Proceedings of SPIE, Volume 5079 (2003)

