

## ニアアイディスプレイとヘッドアップディスプレイの適格な視聴空間の決定

Richard L. Austin (SID Member)  
Bruce S. Denning  
Brian C. Drews  
Victor B. Fedoriouk  
Robert C. Calpito



概要 - 拡張現実および仮想現実のニアアイディスプレイの再現可能かつ再現性のある輝度測定に基づいて、Qualified viewing space (QVS)の範囲を決定する方法について説明します。このQVSマッピングは、(1)マイケルソンコントラスト、(2)変調伝達率などの他のディスプレイ性能指標を使用することもできます。このQVSマッピングは、境界条件パラメータとして、(1)マイケルソンコントラスト、(2)変調伝達関数、(3)色などの他のディスプレイ性能メトリクスを使用することもできます。直径4mm、視野角1°~2°のレンズ光学系付分光放射計を用いて、仮想画像の輝度と色の均一性を決定する方法について説明します。直径1mmの入射瞳を使用し、仮想画像の中心における輝度に基づいてQVSの境界をマッピングします。両眼拡張現実感ディスプレイメガネによる両眼のQVSの3つのアイレリーフ面における輝度測定結果を示します。データはさらに縮小され、それぞれのアイレリーフ面におけるピーク輝度境界点の50%について、QVSの周辺プロフィールが提供されます。

### 1 はじめに

ヘッドアップディスプレイとニアアイディスプレイ(それぞれHUDとNED)のメーカーは、拡張現実とバーチャルリアリティディスプレイの視野角(FOV)における不可欠な性能評価基準として、輝度、色、均一性の測定に依存しています。最近の研究では、繰り返し再現性のある測光と測色の測定結果を保証するために、測定器の光学系特性の最低限必要なセットを定義しています。これらの知見に基づいて、ディスプレイの品質性能パラメータに基づくQVS(Quali-fied Viewing Space)の境界を定義する方法を示します。例えば、輝度がピークの50%まで劣化する空間上の物理的な位置点の集合を境界条件として定義することができます。いずれの場合も、表示性能パラメータは、測定光学系の入射瞳をQVSの異なる領域に配置することによって決定されます。

これを図1に示します。座標系の3軸の交点はディスプレイの設計アイポイントであり、0°のポインティング方向はNED被試験デバイス(DUT)の光軸に対応します。また、図1にはx-y運動方向の定義も示されています。ディスプレイの性能パラメータを測定するためのジオメトリの重要な考慮点は、球面座標系の視点または中心です。IECが標準的な視点位置として考慮しているのは、眼球の回転中心または虹彩の仮想平面位置のいずれかです(図2)。眼球の入射瞳仮想面と回転中心からのオフセットには、異なる距離が使用されます。現在のIEC規格案では、この値は13.4mmとなっています。

### 2 ニアアイディスプレイの測定ジオメトリ

国際電気標準会議(IEC)技術委員会110アドホックグループ12(TC110 AHG12)は、NEDの標準試験方法の作成に取り組んでいます。NEDを見るときに視線方向を表す幾何学的座標は、垂直軸と水平軸を中心とした回転です。これによって、方位角(水平方向)を表す左または右の長円線と、仰角(垂直方向)を表す緯線からなるおなじみの角度座標系ができあがります。

### 3 レンズ光学系分光放射システム設計

レンズ光学系分光放射システムは、図3に示すシステム全体の一部です。システムコントローラには、DUT上にテストパターンとカラーフィールドを表示するためのグラフィックジェネレータが含まれています。オートコリメーション基準ミラーは、視差および仮想画像距離測定のアライメント基準として使用されます。発光ダイオード(LED)ベースの波長可変光源は、分光放射計とDUTの分光透過率測定に校正に使用できます。物理的にコンパクトなレンズ光学系は、交換可能な5~1mm径の入射瞳、2次元イメージセンサー、交換可能な視野絞り、入射瞳に入射した光を電荷結合素子検出器ベースの回折格子分光放射計に結合するための視野レンズを備えています。このコンパクトなレンズ光学系は、精密な6軸産業用ロボットに取り付けられています。

2017年12月19日受領、18年7月13日受理。

著者らはGamma Scientific, San Diego, CA, USA; e-mail: rlaustin@gamma-sci.com

©2018 Gamma Scientific Inc. Society for Information Displayに代わってWiley Periodicals, Inc.が発行するJournal of the Society for Information Display 1071-0922/18/2609-0729\$1.00

本論文は、クリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスに基づくオープンアクセス論文であり、原著作物を適切に引用し、非営利的な使用であり、改変や翻案が行われないことを条件に、あらゆる媒体での使用と配布を許可します。

SIDジャーナル 26/9, 2018

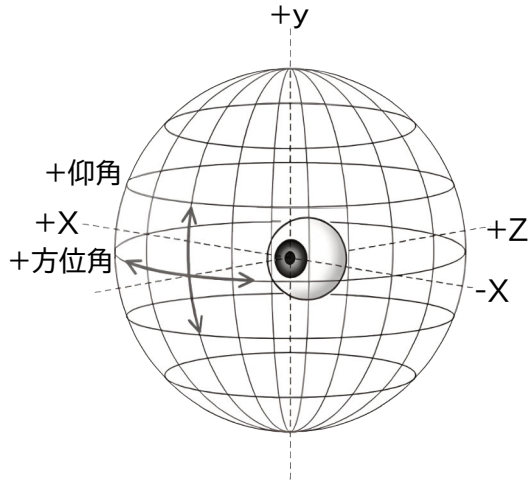


図1 球面座標系は、仮想画像測定フィールド内のさまざまな測定位置への角度指示方向を指定します。

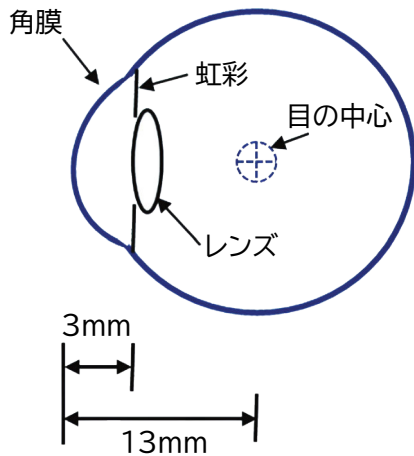


図2 測定球面座標系の中心点を指定する際、虹彩瞳孔面または眼球回転点のいずれかを選択することができますが、表示性能の測定結果は異なります。

システムコントローラーは6軸ロボットにコマンドを送信して、

- (1) X、Y、Z位置、DUTに対する視点の位置を設定
- (2) NEDの射出瞳に対する指向方向。交換可能な入射瞳開口部はレンズ光学系の最前部にあります。システムは3つの異なるデータ収集モードに設定できます。

- (1) 分光放射測定
- (2) 測定領域を表示および定義
- (3) 画像のキャプチャ

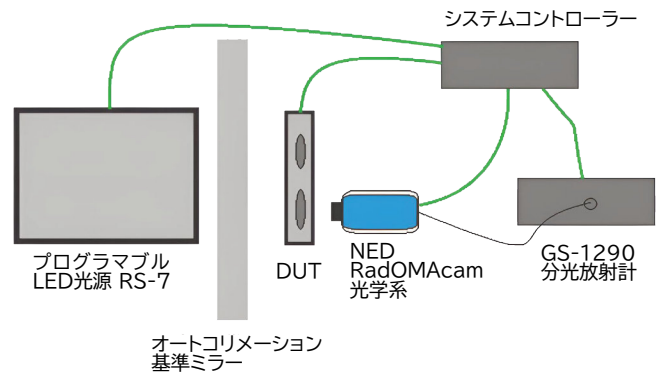


図3 全体的な測定システムは示されていませんが、レンズ光学系の位置と指向方向を制御するシステムです。

## 3 分光放射測定

分光放射測定モードの場合、対物レンズは、虚像を中心とする円形の角度測定領域を定義する5つの選択可能な視野絞り開口(FSA)を含む平面上に、DUTからの虚像の $10^\circ \times 10^\circ$ 測定フィールドの焦点を合わせます。FSAサイズは $5^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $0.33^\circ$ 、 $0.1^\circ$ で、システムコントローラーからのコマンドによって選択されます。DUTからの光はFSAを通過し、光ファイバーケーブルに中継され、次に回折格子分光放射計の入光スリットに中継されます。分光放射計データを取得し、CIE等色関数を適用すると、FSAでサンプリングされたスポット領域の仮想画像の輝度と色が得られます。異なる開口を所定の位置に設定することができ、表示虚像のより小さいまたはより大きい角度領域を測定することができます(図4)。

入射瞳は、光軸に垂直な平面内で移動することができ、表示虚像FOV内のさまざまな領域を測定するためにさまざまな方向を向くことができます。図5は、異なる方向に向けられた望遠鏡の内部光学系を示しており、入射瞳の中心が異なる方向への視点として選択されています。

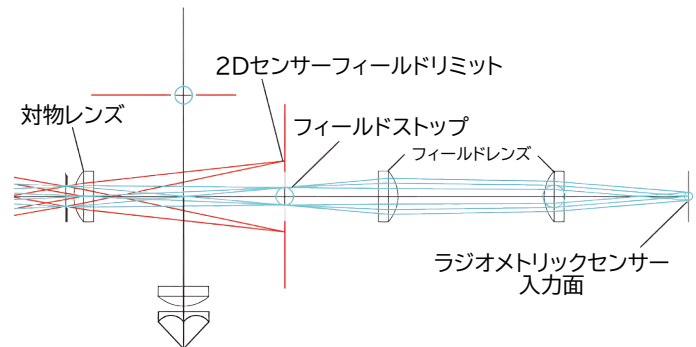
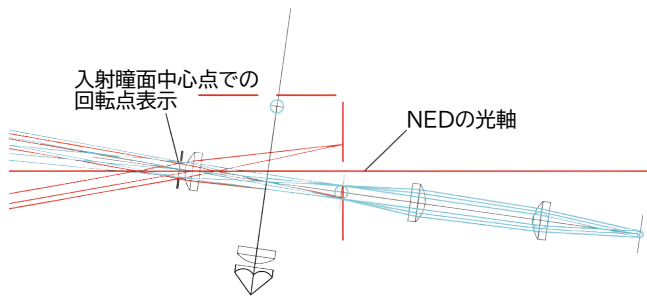


図4 ニアアイディスプレイの虚像からの光は、左から直径1~5mmの入射瞳に入り、視野絞り面に焦点を合わせます。青色の光線は、 $5^\circ$ 視野の開口部を通過して分光放射計の光ファイバーケーブルの端に到達します。赤い光線は、2次元(2D)カメラセンサーの視野限界( $16^\circ$ )を示します。



**図5** 有利な点を望遠鏡の入射瞳の中心または目の回転点として選択すると、6 軸ロボットは測定方向を任意の方位角および仰角に0.001°の分解能で向けることができます。

z軸に沿った有利な点は、6軸ロボット制御の単一パラメータによって変更でき、人間の目がQVSを通じて回転するときデータを取得するための目の回転中心を選択できるようになります。

## 3.2 測定フィールドの表示と定義

ビューモードにコマンドすると、数 $\mu\text{m}$ の厚さのビームスプリッターが測定光路に挿入され、光を分岐してDUTの仮想画像をカメラのセンサー面に集光します。LEDランプもFSAの後ろに配置されており、DUTに向かって光を投影します。この光はまた、ビームスプリッターの背面から再帰反射光学系を通して、スペクトルベースの輝度測定用にサンプリングされた虚像測定フィールドに正確に位置合わせされてカメラセンサー面上に再結像されます。このモードは、レンズ光学系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、NED DUTの左目と右目の位置の間にレンズ光学系を配置するとき、指向方向を正確に維持するために使用できます。

## 3.3 画像のキャプチャと解析

画像キャプチャモードでは、カメラは、FSA測定フィールドでレンズ光学系分光放射計によって測定された色と輝度に相関する画像を取得します。キャプチャされた仮想画像測定フィールドの均一性は、システムコントローラーで決定されます。内部グラフィックジェネレーターによって生成されたDUT上に表示された複数の画像をキャプチャして分析し、表示色の均一性、画像の歪み、マイケルソンコントラストまたはMTFのモデルを生成できます。DUTは、QVSの均一性と、QVS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。設計アイボックス内の異なる指向方向および異なる位置でデータを収集するために、6 軸ロボットはレンズ光学系の位置を $\pm 25 \mu\text{m}$ の精度で制御し、指向方向を0.001°の分解能で制御します。コンパクトなサイズにより、NEDのイヤホン間のディスプレイ基準アイポイントにレンズ光学系の入射瞳を配置できます。完全なFOVデータは、輝度、色の均一性、および35の異なる指向方向におけるマイケルソンコントラストについて4つの異なるアイレリーフ距離で取得されます。これらのポインティング方向の各々で、 $10^\circ \times 10^\circ$ の画像が、20秒角(0.1 mrad)未満のピクセル分解能でキャプチャされ、仮想画像の輝度と色の均一性のために、35個のキャプチャされた各フィールドの中心で、分光放射計データのために1°の角度スポットサイズキャプチャされます。

## 4 システムパフォーマンスの検証

このNED分光放射計システムの性能の検証は、各チャンネルの強度設定が16ビットの解像度を持つ30の可視スペクトルチャンネルを備えたGamma Scientific SpectralLED®LED標準光源(TSL)を使用して実行されました。この標準光源で使用されているLEDは、温度が安定化されており、温度安定化されたシリコンフォトダイオードとリニアトランスインピーダンスアンプセンサーによって放射測定出力が監視およびアクティブに制御されます。

**表1** ITU-R Rec.2020の主要な波長に近い3つのLEDスペクトルパワー分布を対象に、FOVアパーチャーの関数としての輝度とx-y色度の変動。

D $\lambda$ (nm, x,y)	FSA アパーチャーサイズ						$\sigma$	% $\sigma$
	0.1°	0.3°	0.5°	1°	2°	5°		
466.1	1263	1257	1258	1262	1276	1273	8	0.63
x チャンネル	0.1394	0.1394	0.1394	0.1393	0.1392	0.1392	1e-4	
y チャンネル	0.051	0.051	0.051	0.051	0.0513	0.0513	2e-4	
536.5	7980	7971	7977	7892	7892	7992	46	0.58
x チャンネル	0.2219	0.2217	0.2218	0.2217	0.2217	0.222	1e-4	
y チャンネル	0.712	0.712	0.712	0.712	0.712	0.7116	2e-4	
622.2	1368	1367	1351	1357	1351	1358	7	0.53
x チャンネル	0.6937	0.6937	0.694	0.694	0.694	0.6941	2e-4	
y チャンネル	0.3045	0.3046	0.3041	0.3044	0.3041	0.304	2e-4	

D $\lambda$ 主波長、 $\sigma$ 標準偏差、% $\sigma$ 測定結果の分散パーセント、FOV視野、FSA視野絞り、LED発光ダイオード



TSLsの校正は、NIST(米国 国立標準技術研究所)から入手し、校正された標準に基づいています。校正の場所は、Gamma Scientific ISO/IEC17025認定校正研究所(国家自主研究所認定プログラム 研究所コード 200823-0)です。米国国立標準技術研究所の国家自主研究所認定プログラムのWebサイトにある認定の範囲では、輝度、分光放射輝度、色度座標の校正値の不確かさの値が報告されています。輝度と色の変化は、各チャンネルの1つの輝度値を測定することによって、5つのFOVアパーチャーすべてについて決定されました。TSLsは、すべてのチャンネルに対して70%のパワー レベルを生成するようにプログラムされ、分光放射測定は0.1° ~ 5° の各FOVアパーチャー設定で行われました。3つのTSLsチャンネルについて報告された輝度の変動を、ITU-R BT.2020の3つの主単色波長である 467、532、および 630nmに最も近い3つの重心波長について表1にまとめます。

## 5 測定結果

図6に示すように、エプソンBT-200 Augmented Reality グラスを用い、直径4mmの瞳孔を仮想画像FOV内の35の異なるポインティング方向で測定しました。それぞれのポインティング方向で、FSA LED照明をオフにした状態で、内蔵の相補型金属酸化膜半導体ビューファインダーカメラで画像をキャプチャしました。図7は、仮想画像の左下隅を右目ディスプレイを通して撮影した画像です。

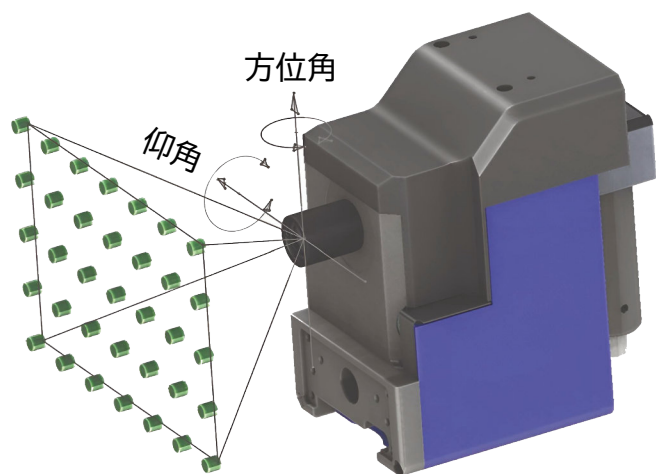


図6 スペクトルベースの輝度と色の結果に対する35の異なるポインティング方向の説明図

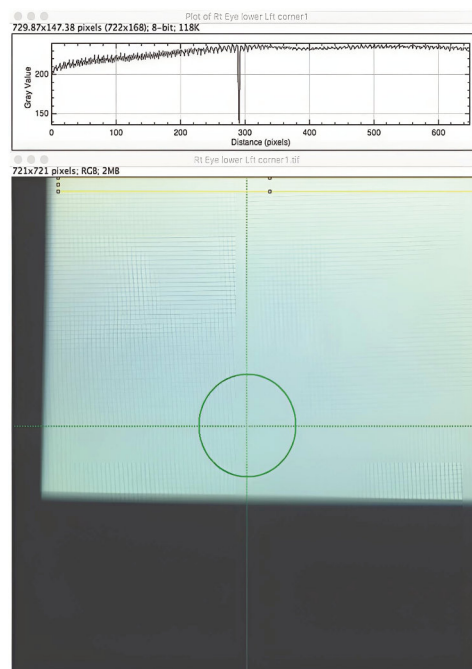


図7 BT200メガネの仮想イメージの左下隅のキャプチャ画像と、仮想イメージの左側への輝度低下の分析

仮想画像輝度均一プロファイル、cd/m2

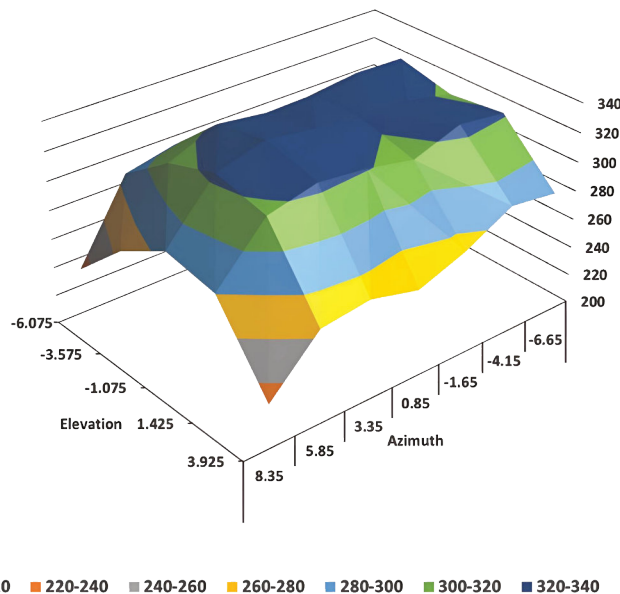


図8 1°の視野絞り開口測定フィールドを使用した35個の分光放射指向性測定の輝度表面プロファイルプロット

仮想画像相関色温度均一性プロファイル、ケルビン

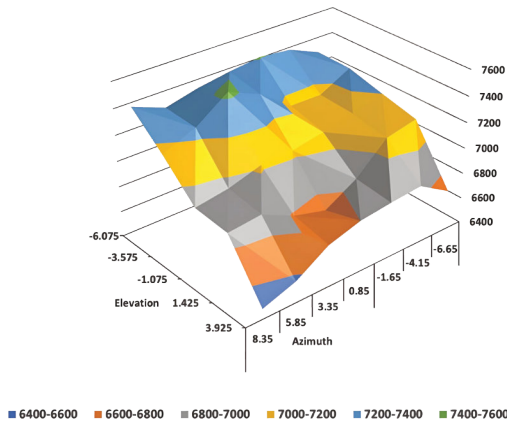


図9 1°アパーチャー開口測定フィールドを使用した 35 方向の測定の相関色温度表面プロファイルプロット

中央の緑色の円形領域は、1°FSA分光放射測定フィールドの位置を示します。図7に示すように、追加の分析を画像に適用することができます。ここでは、20 × 650ピクセルの関心領域が選択されており、仮想画像の左端に向かって20%の輝度の低下が示されています。

輝度測定は、1°のアパーチャー開口測定フィールドを使用して35の指向方向で行われ（図7）、1つのアイレリーフ距離でBT200ガラスの仮想画像全体をサンプリングしました。この輝度プロファイルの結果として得られる3次元データプロットを図8に示します。輝度マップの表面上の各点は、裏面が薄く、熱電冷却された科学グレードの電荷結合素子センサーを使用した分光放射スキャンに対応し、高いスペクトル純度および16ビットのS/N比でスペクトルデータを取得します。相関色温度に関する図9の同様のデータは、DUTの光軸を中心とした入射端面の視点での角度指向方向の関数として画像の白色点の変化を示しています。

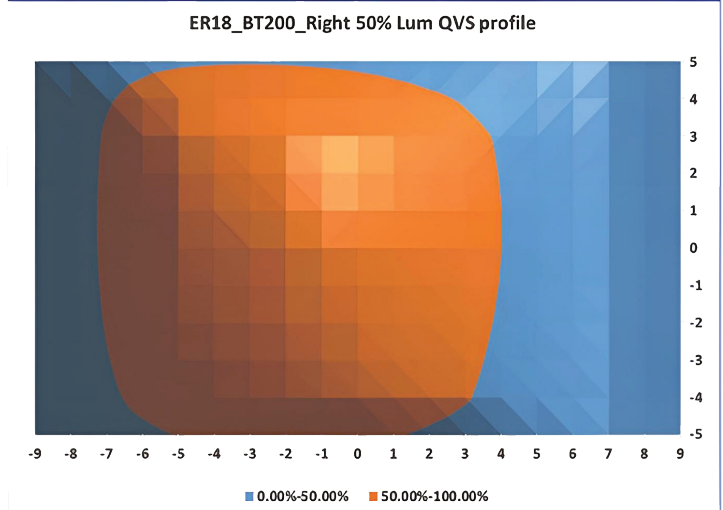
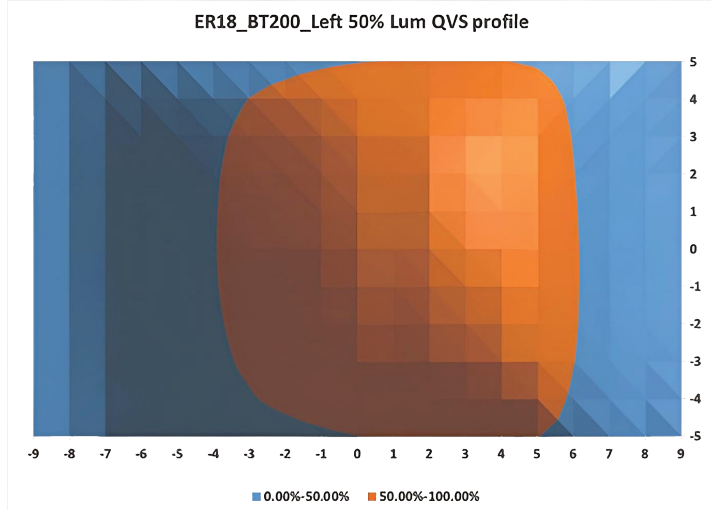
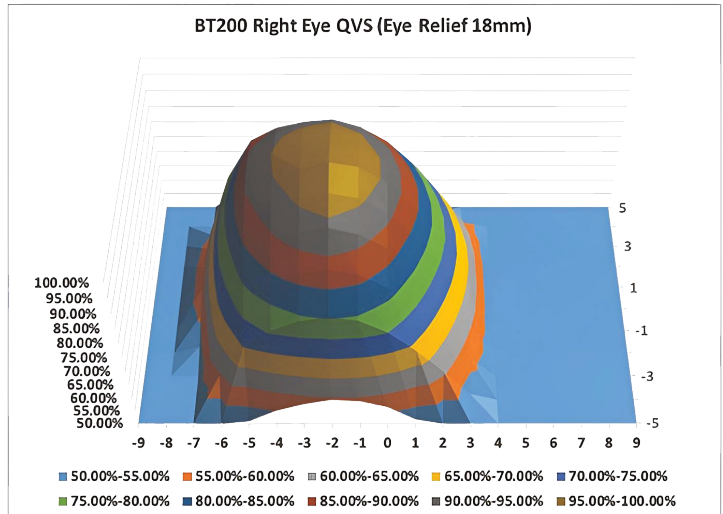
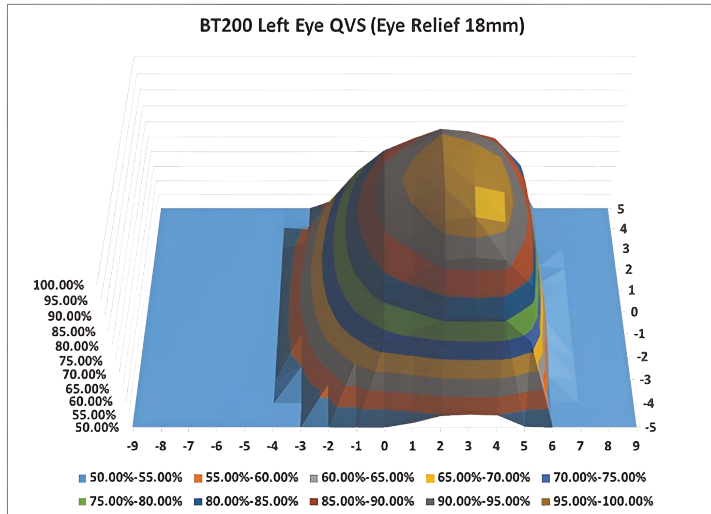


図10 左側、アイレリーフ18mmのQVS(Qualified Viewing Space)輝度プロファイル

図11 右側、アイレリーフ18mmの適格表示空間 (QVS) 輝度プロファイル

QVSをマッピングする測定では、DUTの左目の光軸上の設計アイポイントに直径1mmの入射瞳を配置しました。DUTの光軸は、システムコントローラーの内部パターンジェネレーターによって仮想画像内に生成される位置合わせグリッドパターンを使用して位置が特定されます。次に、グリッドパターンの位置に角度のずれがなくなるまで、18mmと28mmのアイレリーフ距離の間を移動する反復プロセスを使用して、レンズ光学系の光軸をDUTの光軸と同一線上にしました。この方位角と仰角方向をロボットコントローラーの左目の座標系の原点方向として設定しました。原点を指す方向が確立されると、ロボットのx軸とy軸の動作は原点軸に垂直な平面内で行われ、輝度が1である点の位置に基づいてx軸とy軸に沿ったスキャンの反復プロセスが行われます。ピーク値の%が処理され、輝度に基づいてQVSの中心が決定されます。例：24mmのアイレリーフ距離で、入射瞳がx軸方向に沿ってスキャンされ、輝度がピーク値の1%に低下する2つの点が特定されます。QVSのほぼ中心は、これら2つの点間のx軸に沿った点です。次に、このx軸位置から開始して、入射瞳がy軸方向に沿って走査され、輝度がピーク値の1%に低下する2つの

点が特定されます。この新しいy軸開始点でx軸スキャンが繰り返され、最初のx軸の中心と最後に決定された点の間の差が求められます。差が1mm未満の場合は、このxyz位置を使用してロボットコントローラーの左目の原点を設定しました。同じプロセスがDUTの右目の射出瞳に対して繰り返されました。

DUTに表示されるパターンは、FOVの中央にある白い1.5°の正方形と0、上下左右の4つの端すべてから伸びる1.5°の幅のバンドで構成されるパターンに変更されました。これは、DUT FOVの中央に1.5°の白い正方形を持つ、幅1.5°の白い枠として表示されます。1°FSA測定フィールドが選択され、入射瞳はディスプレイに向かってz軸に沿って18mmのアイレリーフポイントまで移動されました。中央の正方形の分光放射輝度測定が行われ、輝度と色度座標が計算されて保存されました。次に、ロボットでプログラムされた測定シーケンスを使用して、この18 mmアイレリーフ距離のxy平面内でx方向に±9mm、y方向に±5 mmを1mmデータ間隔でスキャンしました。

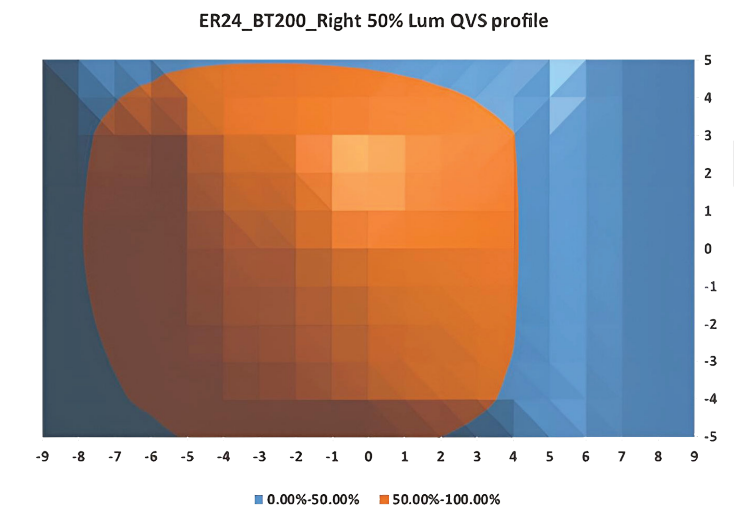
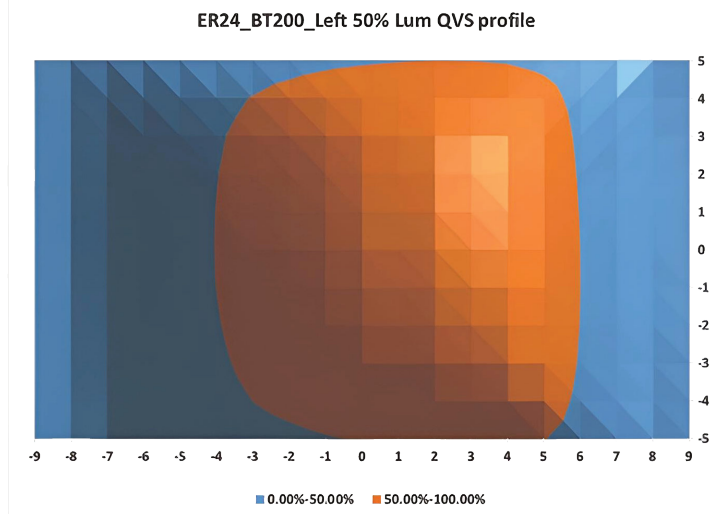
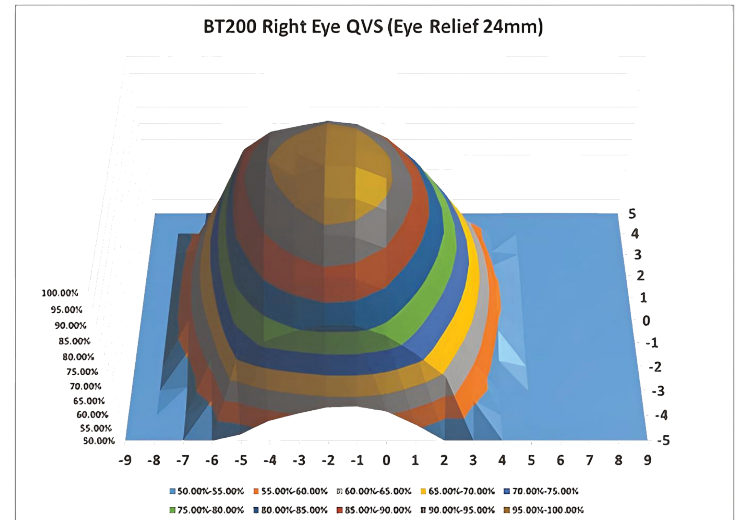
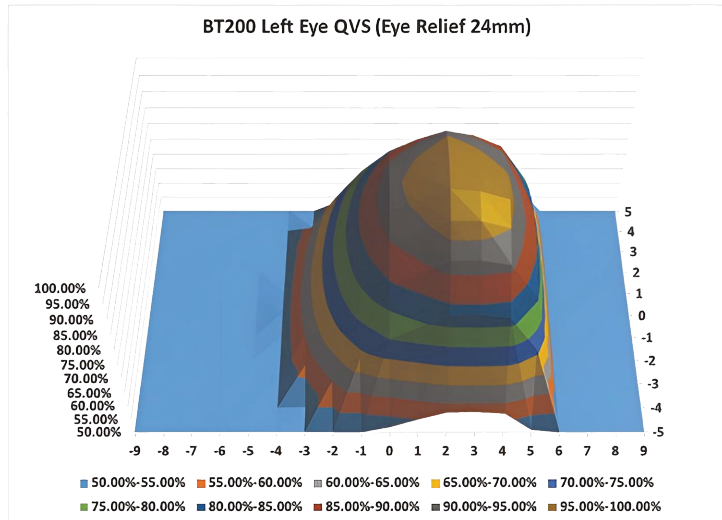


図12 左側、アイレリーフ24mmのQVS(Qualified Viewing Space) 輝度プロフィール

図11 右側、アイレリーフ24mmの適格表示空間 (QVS) 輝度プロフィール



次にロボットは、記録された左目の空間方向および指向方向のゼロ点位置に送られ、入射瞳が18mmのアイレリーフポイントに移動し、±9mmおよび±5mmの点がスキャンされました。結果のデータは、図10および11に、18mmアイレリーフ面内の位置の関数としてのQVS輝度の3次元プロットとして示されています。データセットの別の分析が図の下半分に示されており、50%輝度のQVSの周囲が青からオレンジ色の変化によって作成された線で示されています。

追加のアイレリーフ距離24および28mmでこれらのラスタ測定を繰り返すと、50%の輝度周囲プロットから得られた適切な形式のQVSが示されます。この測定シーケンスを繰り返して、方位角を回転させ、1°のスペクトル測定アパーチャーを仮想画像のエッジにポイントし、センタリングすることにより、仮想画像FOVの水平エッジの50%輝度で定義されるQVSを決定することができます。これは、輝度測定ターゲットとして、DUT FOVのエッジに同じ1.5°幅の帯域または「ピクチャ フレーム」を使用することによって容易に

行うことができます (図12 ~ 15)。

3つのアイレリーフ距離における左右の目の位置のオレンジ/青境界領域を比較すると、輝度ベースQVSの最大外周は24mmのアイレリーフ面であることがわかります。各アイレリーフ距離において、外周は右側の位置の方が大きいです。三次元輝度プロットプロフィールは、0°仰角面を横切る輝度の非対称性を示しています。これは、ピーク輝度プロフィールが左右のQVSの鼻側に偏っていることを示しています。これは、瞳孔間距離の大きいARデバイスの使用者は、1°FSA視域内の仮想画像から得られるピーク輝度が低くなることを示しています。より小さなFSA測定でもデータが取得され、ほぼ同じ結果が得られました。人間の目の中心窩領域の角度範囲に対応する2°FSAによる測定が計画されています。

水平および垂直コントラスト解像度などの他のディスプレイパフォーマンスパラメータを使用して、おそらく非常に異なるQVS形状を決定できます。

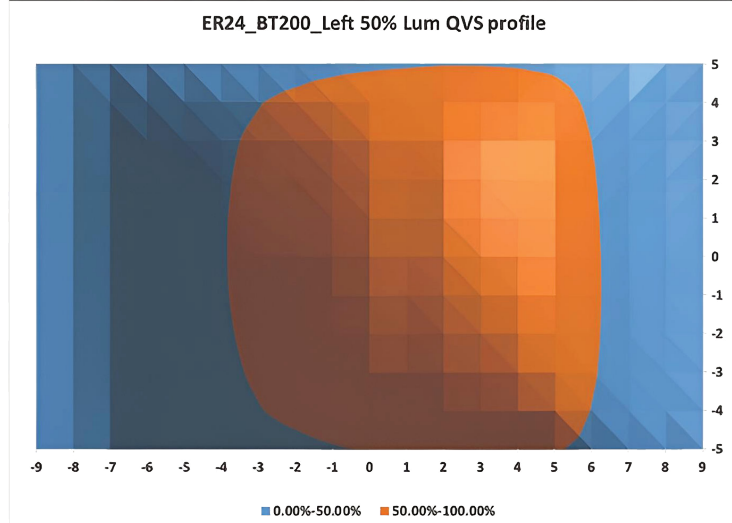
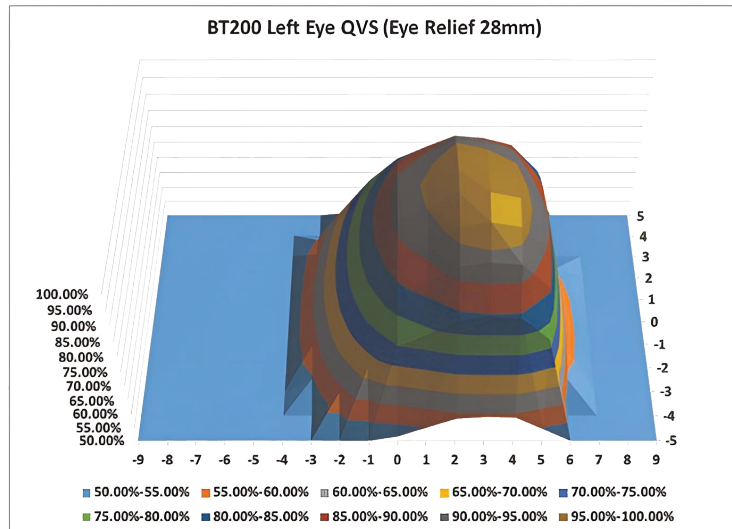


図14 左側、アイレリーフ28mmのQVS(Qualified Viewing Space)輝度プロフィール

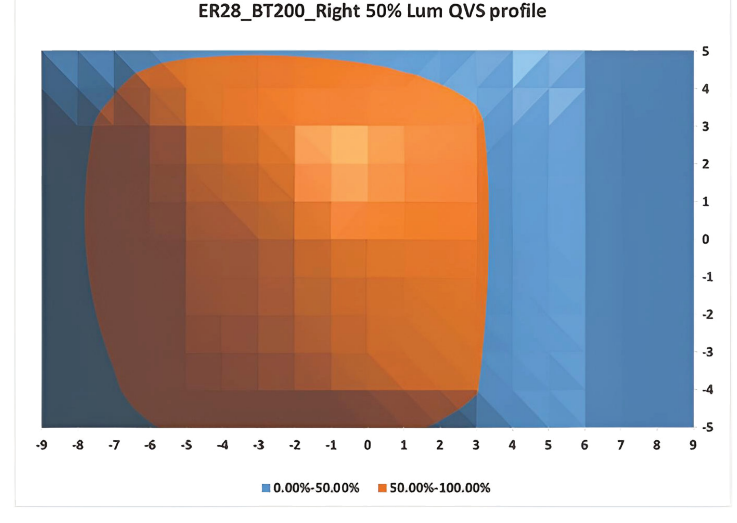
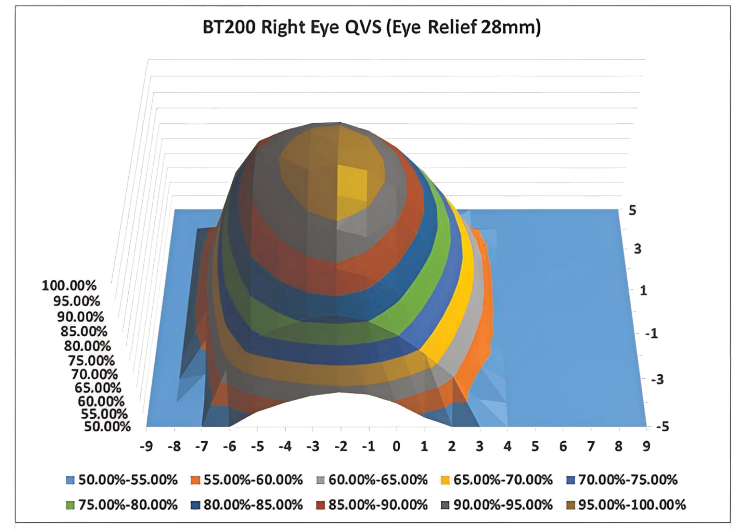


図15 右側、アイレリーフ28mmの適格表示空間 (QVS) 輝度プロフィール

## 6 結論

NEDの分光放射計をベースとした輝度特性評価の結果はこれまで報告されておらず、この測定システムは、ディスプレイ性能パラメータに対する高速かつ精密な測定の可能性を開くものです。この方法は、すべてのHUD、拡張現実およびVRヘッドセットに適用可能であり、入口瞳孔周辺の光学アセンブリの物理的サイズによってのみ制限されます。

## 謝辞

共著者とGamma Scientific NEDロボット測定システムチームメンバーに感謝します。

## 参考文献

- 1 D. Fellowes et al, "Near-to-eye Display Test Station," Proceedings of SPIE Vol.5079, (2003)
- 2 R. Draper 他, "off-the-visor wide-field-of-view HMDの技術デモのための設計考察と予備性能評価," Proceedings of SPIE Vol.5079, (2003)
- 3 J. Penczek 他, "Absolute radiometric and photometric measurements of near-eye displays," J. Soc. Info. Display, 25, No.4, 215-221 (2017).
- 4 大島和彦ほか, "アイウェアディスプレイ測定法:測定器における入射瞳サイズ依存性," SID Symp. Digest, book 2: session, 79, 1064-1067 (2016).
- 5 R. L. Austin 他, "Spectroradiometric measurements of near-eye and head up displays," SID Symp. Digest, book 2 session, 65, 958-960 (2017).



リチャード・L・オースティンはGamma Scientificの現社長兼最高技術責任者(CTO)です。CTOとして、40年以上にわたる光放射計測機器およびシステムの設計・開発の経験を持ちます。F-16、F-18、C-17、F-117、F-35軍用機のヘッドアップディスプレイや直視型ディスプレイの特性評価、防眩コーティングやその他の薄膜コーティングの品質保証や工程管理、LED、フラッシュランプ、ランプの光度や光束、再帰性反射材料の光度と色の特性評価など、幅広い用途をカバー。これらのシステムで使用される装置には、NIST準拠のタングステンランプとLEDベースの標準光源、コンピュータ制御の走査型回折格子分光放射計とダイオードアレイ分光放射計、

スポットテレスポット分光放射計、世界クラスの測光器、ディスプレイとレンズMTF、特許取得済みの三刺激CRTスポットプロフィールとコンバージェンス測定法、ポータブルラボ用の再帰性反射特性測定装置などがあります。再帰性反射測定器をカバーする特許の共同発明者であり、現在、総売上高の15%以上を占めます。過去19年間、社長として、インターネットを利用した顧客志向のマーケティング、既存製品への新技術の適用、新製品ラインの開発、製品品質とそれゆえの利益率の改善など、会社を再編成し、収益性に焦点を当てました。年間戦略計画を策定・実施し、新たな海外顧客と市場を特定するとともに、効果的な販売チャネルを計画・実施し、海外事業を総売上の5%未満から35%以上にまで拡大させました。社長とCTOを兼務し、自ら新規顧客に会社とその製品を紹介することに成功し、売上と市場シェアを伸ばしました。



ブルース・S・デニングはGamma Scientificに所属するコンサルタントです。ソフトウェア開発およびハードウェア/ソフトウェア統合システム設計において40年以上の経験を持ちます：過去30年間は主にディスプレイ測定システムに携わっています。Microvision社のエンジニアリングディレクターとして、自動化されたISO9241-3および13406-2コンプライアンス測定を含む様々なディスプレイ測定を行うSS100システムの主要なソフトウェア設計者およびプログラマーを務めます。現在、Gamma Scientificのロボットディスプレイ測定システム用のシステムソフトウェアと

ディスプレイ測定アルゴリズムを研究しています。MicrovisionとGamma Scientificでは、ISO、VESA、SID/ICDM規格の開発に携わっています。



ブライアン・C・ドリューズP.E.はGamma Scientificのシニアオプトメカニカルエンジニアです。エンジニアとして、カスタムプロセス装置や計測器の設計・製作に20年の経験を持ちます。OLEDディスプレイ、半導体、太陽電池、レーザー、光源、計器など、幅広い業界向けのカスタム機器の製作に携わっています。柔軟なOLEDディスプレイ測定システムを開発し、最近ではヘッドアップディスプレイとニアアイディスプレイの両方に対応する新しいロボットシステムでディスプレイ測定の仕事を続けています。エンジニアとして、薄膜の開発と特性評価、高真空システムとプラズマ源の開発、

ロボット/自動化装置の設計、オプトメカニカル設計の分野で活躍しています。



ビクター・B・フェドリウクはGamma Scientificのシニア光学エンジニアです。30年のキャリアの中で、防衛、航空宇宙、電気通信、バイオ計測業界向けの光学機器やシステム、製造装置、技術プロセスの設計、開発、テストに携わっています。これには以下を含みます。Nd: YAGレーザー、Ndドープガラスレーザー、液体レーザー、大口径望遠鏡、光学照準モジュール、レーザー、光学機器、システムの組み立てとテスト、光学テストと品質管理装置、ディスプレイ測定用三刺激比色計(CRTとフラットパネルディスプレイ)、フラットパネルディスプレイ特性評価用ロボット装置、交通安全/反射測定用光学機器;MEMSベースの2D光スイッチの組み立て


とテスト用の製造装置、高スループット製造用のコンピュータ化されたUVレーザー彫刻機、独自のポリマーレンズ製造用のコンピュータ化されたコンベアベースのUV露光および硬化装置、LED特性評価用の光学テスト装置(環境、電気、光学、速度/立ち上がり/落下時間など)。装置とプロセス開発に関連する職務は、ISO認証された製造環境におけるプロセス文書と装置仕様書の作成、FMEAと統計的ジックスシグマプロセスコントロールの実施、組立工具と治具の設計、人材育成にも及びます。ビクターは、光学、機械、電気設計、PCBレイアウト、マイクロコントローラーベースの電子モジュール用ファームウェアの開発、WindowsベースのPCシステム用アプリケーションソフトウェアの作成、光学試験(測光、放射、分光放射、ゴニオメトリックなど)にも精通しています。彼は常に技術的な完成度と高い顧客満足度を目指しています。ビクターは、ウクライナのチェルノブイリ国立大学で6年間の工学研究コースを修了し、光学エンジニア/研究者の学位を取得しました。1986年、優秀な成績で卒業しました。



ロバート・カルビトは2014年からGamma Scientificの電気光学エンジニアとして勤務しています。当初は校正部門で分光放射輝度計の校正とナイトビジョン測定に従事していました。その後、校正部門からシステムエンジニアに異動し、ニアアイディスプレイ(NED)測定技術や様々なコックピットディスプレイの特性評価に注力しています。Gamma Scientificに勤務している間、ロバートはGammaが新たに発表したニアアイディスプレイテストシステムのデモンストレーションで世界中を飛び回る機会に恵まれました。



# Qualified viewing space determination of near-eye and head-up displays

**Richard L. Austin** (SID Member)   
**Bruce S. Denning**  
**Brian C. Drews**  
**Victor B. Fedoriouk**  
**Robert C. Calpito**

**Abstract** — A method for determining the extents of a qualified viewing space (QVS) based on repeatable and reproducible luminance measurements of augmented and virtual reality near-eye displays is described. This QVS mapping can also use other display performance metrics such as (1) Michelson contrast, (2) modulation transfer function, or (3) color as boundary condition parameters. We describe the use of a 4-mm-diameter entrance pupil, 1° to 2° field of view tele-spectroradiometer, to determine the luminance and color uniformity of the virtual image. A 1-mm-diameter entrance pupil is used to map the QVS boundaries based on luminance at the center of the virtual image. The luminance measurement results from a pair of binocular augmented reality display glasses in three separate eye relief planes of the QVS of both eyes are presented. The data are further reduced to provide a perimeter profile of the QVS for the 50% of peak luminance boundary points in each eye relief plane.

DOI # 10.1002/jsid.729

## 1 Introduction

Head-up and near-eye display (HUD and NED, respectively) manufacturers rely on luminance, color, and uniformity measurements as essential performance evaluation criteria in the augmented reality and virtual reality display visual field of view (FOV). Recent work has been performed that defines a minimum essential set of measurement instrument optical system characteristics to assure repeatable and reproducible photometric and colorimetric measurement results.<sup>1–5</sup> Building upon these findings, we give a method of defining the boundaries of the qualified viewing space (QVS) based on a display quality performance parameter. For example, the set of physical location points in space, where the luminance degrades to 50% of the peak, could be a defined boundary condition. In all cases, the display performance parameters are determined by positioning the measurement optical system entrance pupil in different areas of the QVS.

## 2 Near-eye display measurement geometry

The International Electrotechnical Commission (IEC) Technical Committee 110 Ad Hoc Group 12 (TC110 AHG12) is working to create a standard test method for NEDs. The geometric coordinate for describing the eye pointing direction while viewing the NED is a rotation about a vertical axis and a horizontal axis. This creates the familiar angular coordinate system of longitudinal great circle lines for the azimuth (horizontal) pointing direction angles left or positive right and latitude lines slicing through the spherical volume to describe the positive elevation (vertical) pointing

direction angles. This is illustrated in Fig. 1. The intersection of the three axes of the coordinate system is the design eye point of the display, and the 0° pointing direction corresponds to the optical axis of the NED device under test (DUT).

Also shown in Fig. 1 is the  $x$ - $y$  motion direction definitions.

A critical consideration of the geometry for measurement of display performance parameters is the vantage point or center of the spherical coordinate system. Choices being considered by the IEC as the standard vantage point are either the center of rotation of the eye or virtual plane position of the iris, which is shown in Fig. 2.

Different distances are used for the offset from the eye entrance pupil virtual image plane and the center of rotation. The current IEC draft standard has this value as 13.4 mm.

## 3 Tele-spectroradiometer system design

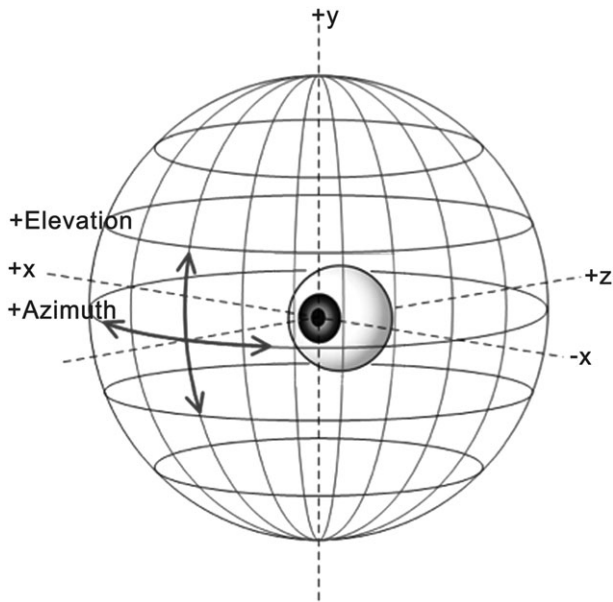
The tele-spectroradiometer is part of the overall system shown in Fig. 3. The system controller contains a graphics generator to present testing patterns and color fields on the DUT. An autocollimation reference mirror is used as an alignment reference for parallax and virtual image distance measurements. The light-emitting diode (LED)-based tunable light standard can be used to calibrate the spectroradiometer and DUT spectral transmittance measurements. The physically compact telescope has an interchangeable 5- to 1-mm-diameter entrance pupil, a two-dimensional image sensor, interchangeable field stops, and a field lens system to couple the light entering the entrance pupil into a charge-coupled device detector-based grating spectroradiometer. The compact telescope is mounted to a precision six-axis industrial robot. The system controller

Received 12/19/17; accepted 07/13/18.

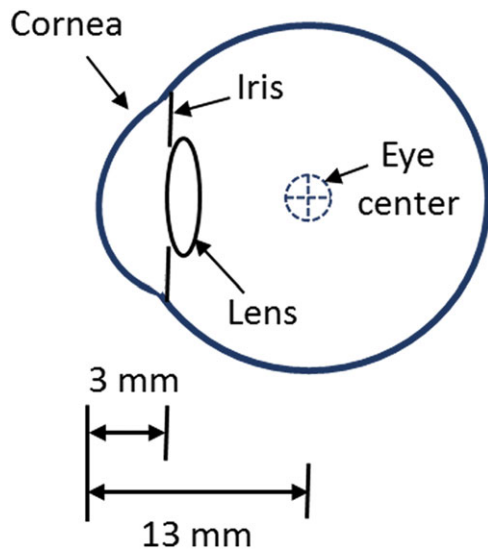
The authors are with the Gamma Scientific, San Diego, CA, USA; e-mail: rlaustin@gamma-sci.com.

© 2018 Gamma Scientific Inc. *Journal of the Society for Information Display* published by Wiley Periodicals, Inc. on behalf of Society for Information Display 1071-0922/18/2609-0729\$1.00.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.



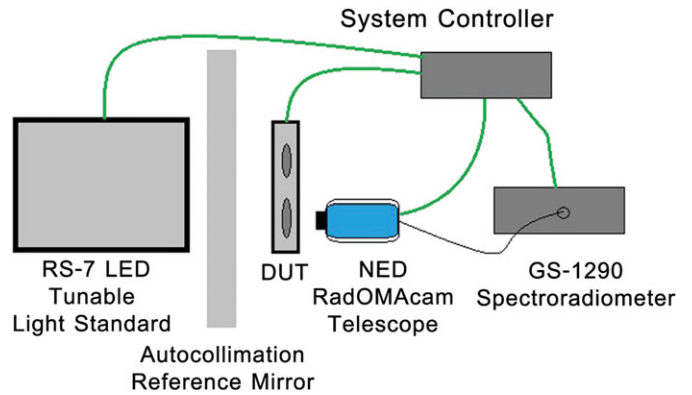
**FIGURE 1** — Spherical coordinate system to specify the angular pointing directions to different measurement locations within the display virtual image field of view.



**FIGURE 2** — In specifying vantage point for the center of the measurement spherical coordinate system, either the iris pupil plane or the eye rotation point can be selected but give different measurement results of display performance.

sends commands to the six-axis robot to set (1)  $x$ ,  $y$ , and  $z$  positions, position of the vantage point relative to the DUT (2) pointing direction relative to the exit pupil of the NED. The interchangeable entrance pupil apertures are located at the very front of the telescope. The system can be configured into three different modes of data acquisition:

- (1) spectroradiometric measurement,
- (2) view and define measurement area, and
- (3) image capture.

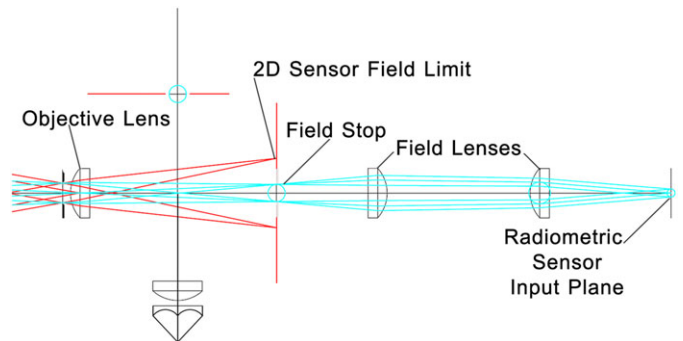


**FIGURE 3** — Overall measurement system design not shown is the telescope position system that controls the position and pointing direction of the telescope. DUT, device under test; LED, light-emitting diode; NED, near-eye display.

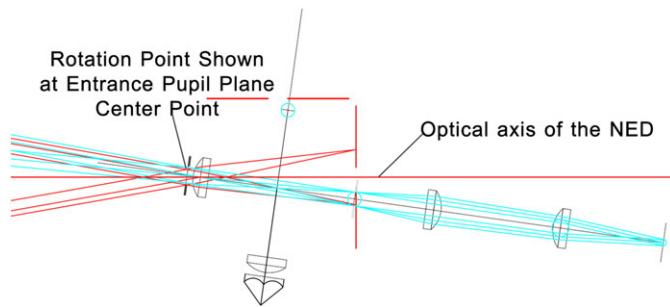
### 3.1 Spectroradiometric measurement

For the spectroradiometric measurement mode, the objective lens focuses a  $10^\circ \times 10^\circ$  measurement field of the virtual image from the DUT on a plane that contains five selectable field stop apertures (FSAs) that define circular angular measurement areas centered on the virtual image. The FSA sizes are  $5^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $0.5^\circ$ ,  $0.33^\circ$ , and  $0.1^\circ$  and are selected with commands from the system controller. Light from the DUT passes through the FSA and is relayed to a fiber optic cable and then to the entrance slit of the grating spectroradiometer. Acquiring the spectroradiometer data and applying the CIE color matching functions yield luminance and color of the virtual image for the FSA sampled spot area. A different aperture can be commanded into place, and a smaller or larger angular area of the display virtual images can be measured (Fig. 4).

The entrance pupil can be moved in a plane perpendicular to the optical axis as well as point in different directions to measure different areas in the display virtual image FOV. Figure 5 shows the internal optical system of the telescope pointed in a different direction with the entrance pupil



**FIGURE 4** — Light from the virtual image of the near-eye display enters the 1- to 5-mm-diameter entrance pupil from the left and is focused on the field of view aperture plane. The blue rays trace the  $5^\circ$  field of view aperture into the end of the spectroradiometer fiber optic cable. The red rays show the two-dimensional (2D) camera sensor field limit ( $16^\circ$ ).



**FIGURE 5** — With the vantage point selected to be either the center of the telescope entrance pupil or the eye rotation point, the six-axis robot can point the measurement direction to any azimuth and elevation to 0.001° resolution. NED, near-eye display.

center selected as the vantage point for the different pointing directions. The vantage point along the  $z$  axis can be changed by a single parameter in the six-axis robot controls to enable selection of an eye rotation center to acquire data as the human eye would rotate through the QVS.

### 3.2 View and define measurement field

When commanded into the view mode, a few micrometers thick beam splitter is inserted into the measurement optical path, which diverts light to focus the DUT virtual image on a camera sensor plane. An LED lamp is also positioned behind the FSA and projects light out toward the DUT. This light is also reimaged off of the back of the beam splitter, through the retroreflector optical system and onto the camera sensor plane in exact registration to the virtual image measurement field sampled for spectral-based luminance measurement. This mode can also be used as an autocollimation source to set the optical axis of the telescope perpendicular to the reference mirror. This can be used to precisely maintain pointing direction when positioning the telescope between the left and right eye positions of the NED DUT.

### 3.3 Image capture and analysis

In image capture mode, the camera acquires an image that is correlated to the color and luminance measured by the tele-spectroradiometer in the FSA measurement field. The uniformity of the captured virtual image measurement field is determined in the system controller. Multiple images displayed on the DUT produced by the internal graphics generator can be captured and analyzed to produce a model of the display color uniformity, image distortion, and Michelson contrast or modulation transfer function. The DUT can also be evaluated for uniformity of the QVS and virtual image quality as a function position in the QVS.

For data acquisition in different pointing directions and different locations within the design eye box, the six-axis robot controls the position of the compact telescope to  $\pm 25$ - $\mu\text{m}$  precision and pointing direction with  $0.001^\circ$  resolution. The compact size allows positioning of the telescope entrance pupil at the display reference eye point between the earpieces of NEDs. Full FOV data were acquired at four different eye relief distances for luminance and color uniformity and Michelson contrast in 35 different pointing directions. At each of these pointing directions, a  $10^\circ \times 10^\circ$  image is captured with a pixel resolution of less than 20 arc seconds (0.1 mrad) and  $1^\circ$  angular spot size capture for the spectroradiometric data at the center of each of the 35 captured fields for the luminance and color uniformity of the virtual image.

## 4 System performance validation

Validation of the performance of this NED spectroradiometer system was performed using a Gamma Scientific SpectralLED<sup>®</sup> tunable standard light source (TSLs) with 30 visible spectral channels with each channel having 16-bit

**TABLE 1** — Luminance and  $x$ - $y$  chromaticity variation as a function FOV aperture for three LED spectral power distributions with centroid wavelengths near the ITU-R Rec.2020 primaries.

$D\lambda$ (nm, $x,y$ )	FSA aperture sizes						$\sigma$	% $\sigma$
	0.1°	0.3°	0.5°	1°	2°	5°		
	Reported luminance values ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )							
466.1	1263	1257	1258	1262	1276	1273	8	0.63
x-ch	0.1394	0.1394	0.1394	0.1393	0.1392	0.1392	$1\text{e} - 4$	
y-ch	0.051	0.051	0.051	0.051	0.0513	0.0513	$2\text{e} - 4$	
536.5	7980	7971	7977	7892	7892	7992	46	0.58
x-ch	0.2219	0.2217	0.2218	0.2217	0.2217	0.222	$1\text{e} - 4$	
y-ch	0.712	0.7121	0.712	0.712	0.712	0.7116	$2\text{e} - 4$	
622.2	1368	1367	1351	1357	1351	1358	7	0.53
x-ch	0.6937	0.6937	0.694	0.694	0.694	0.6941	$2\text{e} - 4$	
y-ch	0.3045	0.3046	0.3041	0.3044	0.3041	0.304	$2\text{e} - 4$	

$D\lambda$ , dominant wavelength;  $\sigma$ , standard deviation; % $\sigma$ , percent variance of the measurement results; FOV, field of view; FSA, field stop aperture; LED, light-emitting diode.



resolution in intensity setting. The LEDs used in this standard source are actively thermoelectrically temperature stabilized, and the radiometric output is monitored and actively controlled with an integral, thermoelectrically temperature-stabilized silicon photodiode and linear transimpedance amplifier sensor. Calibration of the TSLS is based on standards obtained from and calibrated by National Institute of Standards and Technology. The location of the calibration is the Gamma Scientific ISO/IEC 17025 accredited calibration laboratory (National Voluntary Laboratory Accreditation Program Lab code 200823-0). The scope of accreditation on the National Institute of Standards and Technology National Voluntary Laboratory Accreditation Program website reports the uncertainty values for the calibrated values of luminance, spectral radiance, and chromaticity coordinates. Variation in luminance and color was determined for all five FOV apertures by measuring 1 luminance value for each channel.

The TSLS was programmed to produce 70% power level for all the channels, and spectroradiometric measurements were taken at each FOV aperture setting from 0.1° to 5°. The variation in the luminance reported for three of the TSLS channels is summarized in Table 1 for three centroid wavelengths that are closest to the ITU-R BT.2020 three primary monochromatic wavelengths of 467, 532, and 630 nm.

## 5 Measurement results

Measurements were taken on the Epson BT-200 Augmented Reality glasses with a 4-mm-diameter entrance pupil in 35 different pointing directions within the virtual image FOV as shown in Fig. 6. At each pointing direction, an image was captured with the internal complementary metal-oxide semiconductor view finder camera with the FSA LED illumination turned OFF. Figure 7 shows an image capture of the lower left corner of the virtual image through the

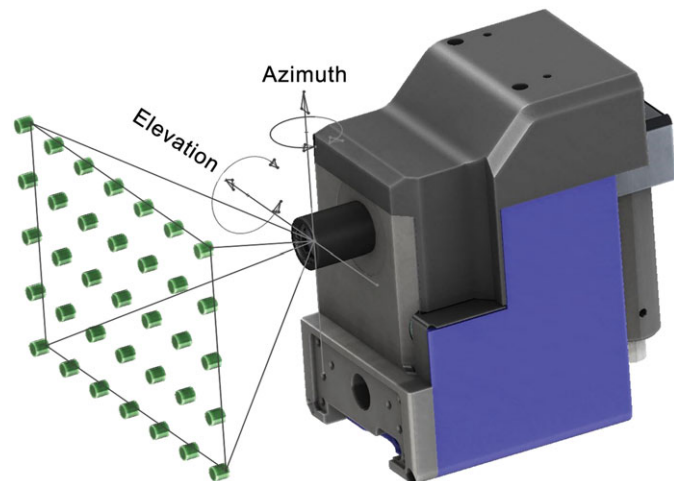


FIGURE 6 — Illustration of the 35 different pointing directions for the spectral-based luminance and color results.

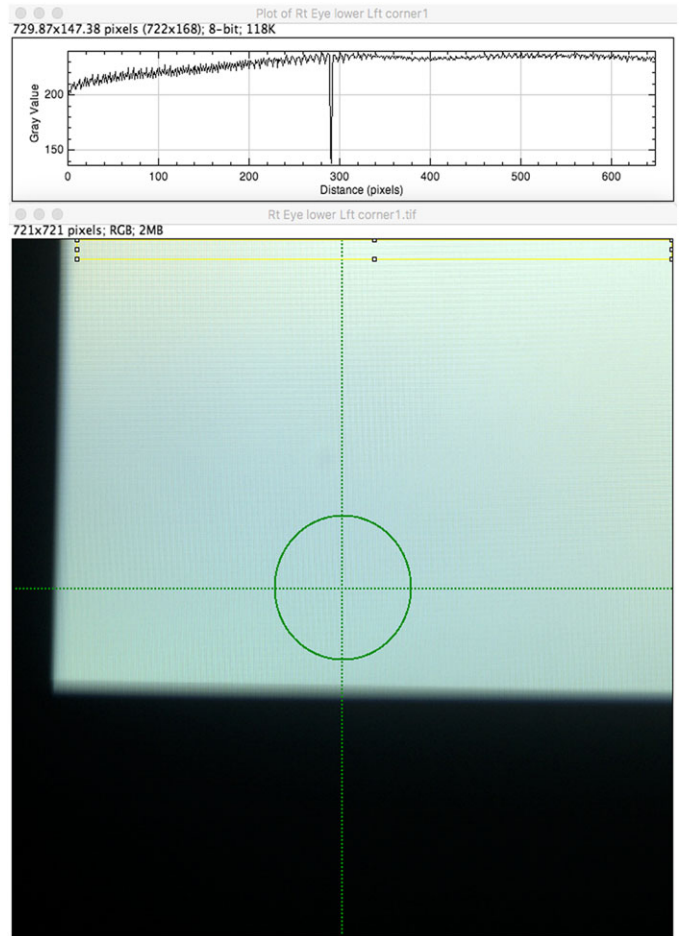


FIGURE 7 — Captured image of the lower left corner of the virtual image of the BT200 glasses along with an analysis of the luminance drop-off to the left of the virtual image.

Virtual Image Luminance Uniformity Profile, cd/m<sup>2</sup>

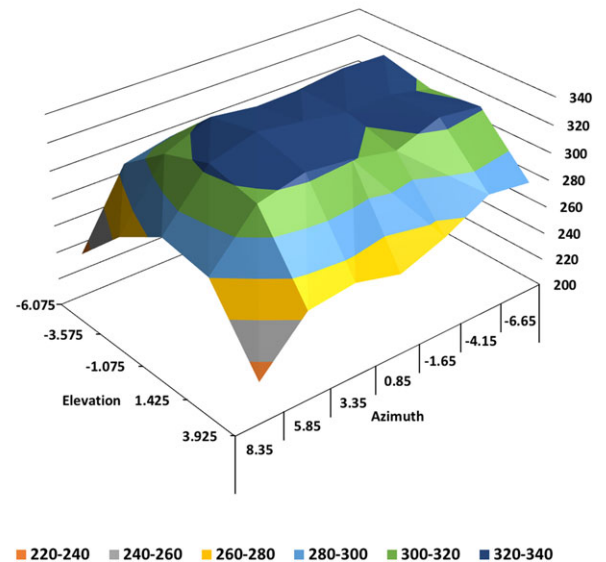


FIGURE 8 — Luminance surface profile plot of 35 spectroradiometric directional measurements using a 1° field stop aperture measurement field.

Virtual Image Correlated Color Temperature Uniformity Profile, "Kelvin

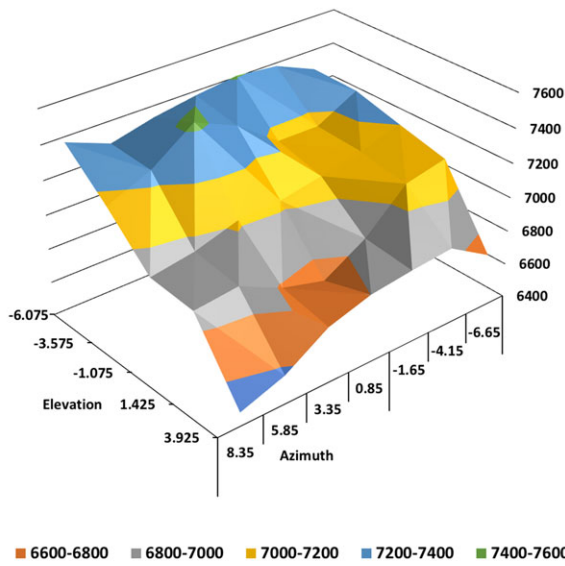


FIGURE 9 — Correlated color temperature surface profile plot of 35 directional measurements using a 1° field stop aperture measurement field.

right eye display. The green circular area in the center indicates the position of the 1° FSA spectroradiometric measurement field. Additional analysis can be applied to the image as shown in Fig. 7 where a 20 × 650 pixel region of interest is selected and shows a 20% luminance fall off toward the left edge of the virtual image.

Luminance measurements were taken at the 35 pointing directions with the 1° field stop aperture measurement field (Fig. 7), sampling the whole virtual image of the BT200 glasses at one eye relief distance.

The resulting three-dimensional data plot representation of this luminance profile is shown in Fig. 8. Each point on the surface of the luminance map corresponds to a spectroradiometric scan using a backside thinned, thermoelectrically cooled scientific grade charge-coupled device sensor to acquire the spectral data with high spectral purity and 16-bit signal to noise. Similar data in Fig. 9 for the correlated color temperature show the variation of image white point as a function of the angular pointing direction with the vantage point at the entrance pupil plane centered on the optical axis of the DUT.

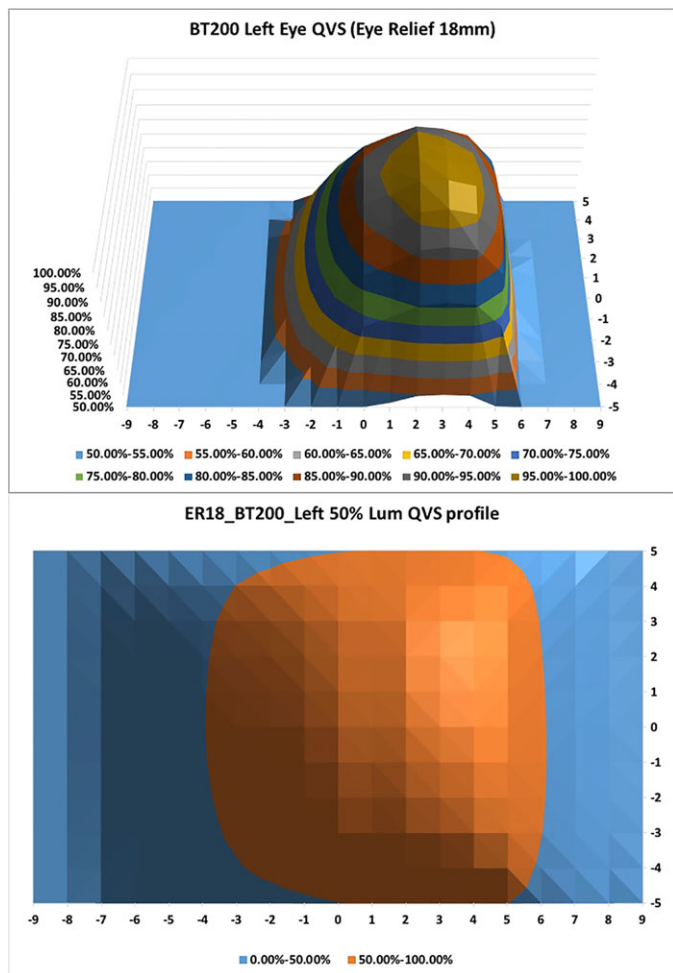


FIGURE 10 — Qualified viewing space (QVS) luminance profiles of left side, 18-mm eye relief.

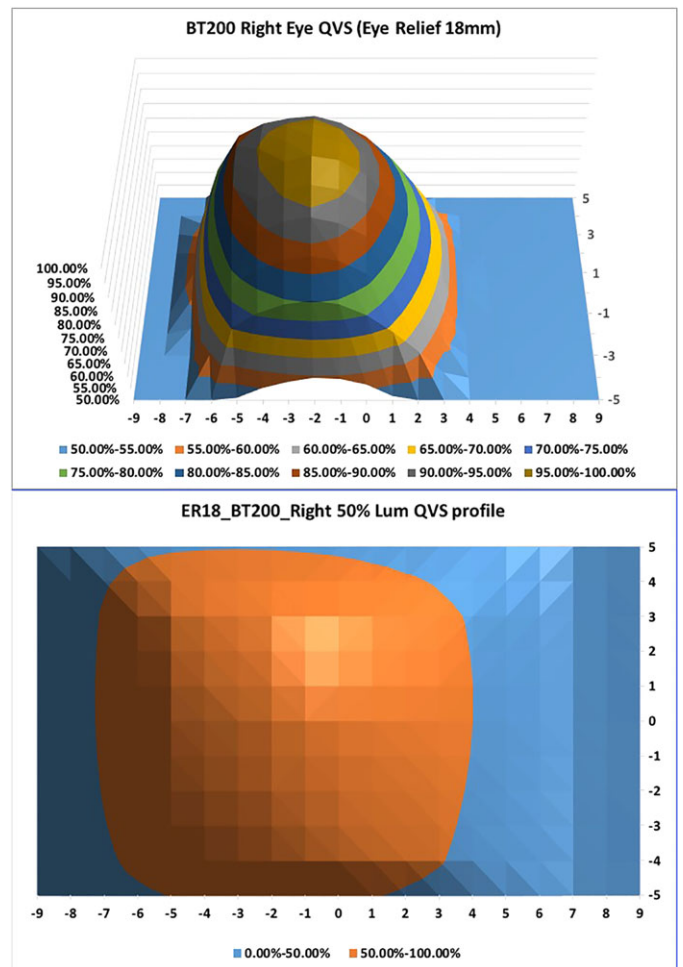


FIGURE 11 — Qualified viewing space (QVS) luminance profiles of right side, 18-mm eye relief.

For measurements mapping the QVS, a 1-mm-diameter entrance pupil was placed at the design eye point on the optical axis of the left eye of the DUT. The DUT optical axis is located using an alignment grid pattern produced in the virtual image by the system controller internal pattern generator. The optical axis of the telescope was then made collinear with the DUT optical axis using an iterative process of moving between the 18- and 28-mm eye relief distances until there is no angular shift in the grid pattern location. This azimuth and elevation direction was set as the origin direction of the coordinate system for the left eye in the robot controller. Once the origin pointing direction is established, the  $x$  and  $y$  axes motions of the robot are in a plane perpendicular to the origin axis, an iterative process of scans along the  $x$  and  $y$  axes based on the locations of the points where the luminance is 1% of the peak value is processed to determine the center of the QVS based on luminance. For example: At a 24-mm eye relief distance, the entrance pupil is scanned along the  $x$ -axis direction to locate the two points where the luminance drops to 1% of the peak value. The near center of the QVS is the point along the  $x$  axis halfway between

these two points. Then starting from this  $x$ -axis position, the entrance pupil is scanned along the  $y$ -axis direction to locate the two points where the luminance drops to 1% of the peak value. The  $x$ -axis scan is repeated at this new  $y$ -axis starting point to determine the difference between the first  $x$ -axis midpoint and the newest determined point. When the difference was less than 1 mm, this  $xyz$  location was used to set the origin for the left eye in the robot controller. The same process was repeated for the DUT right eye exit pupil.

The pattern displayed on the DUT was changed to a pattern consisting of a white  $1.5^\circ$  square in the middle of the FOV and a  $1.5^\circ$  wide band extending in from all four extreme edges, top, bottom, left, and right. This appears as a white picture frame  $1.5^\circ$  wide with a  $1.5^\circ$  white square in the middle of the DUT FOV. The  $1^\circ$  FSA measurement field was selected, and the entrance pupil was moved toward the display along the  $z$  axis to an 18-mm eye relief point. A spectral radiance measurement of the central square was made, and the luminance and color coordinates were computed and stored. A robot-programmed measurement sequence was used to then scan  $\pm 9$  mm in  $x$  direction and

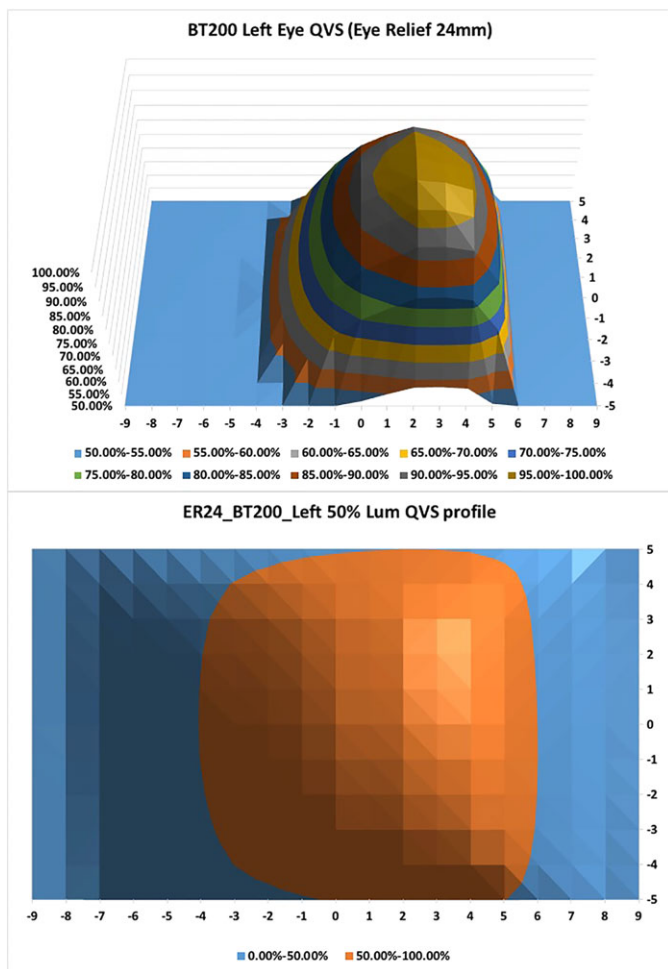


FIGURE 12 — Qualified viewing space (QVS) luminance profiles of left side, 24-mm eye relief.

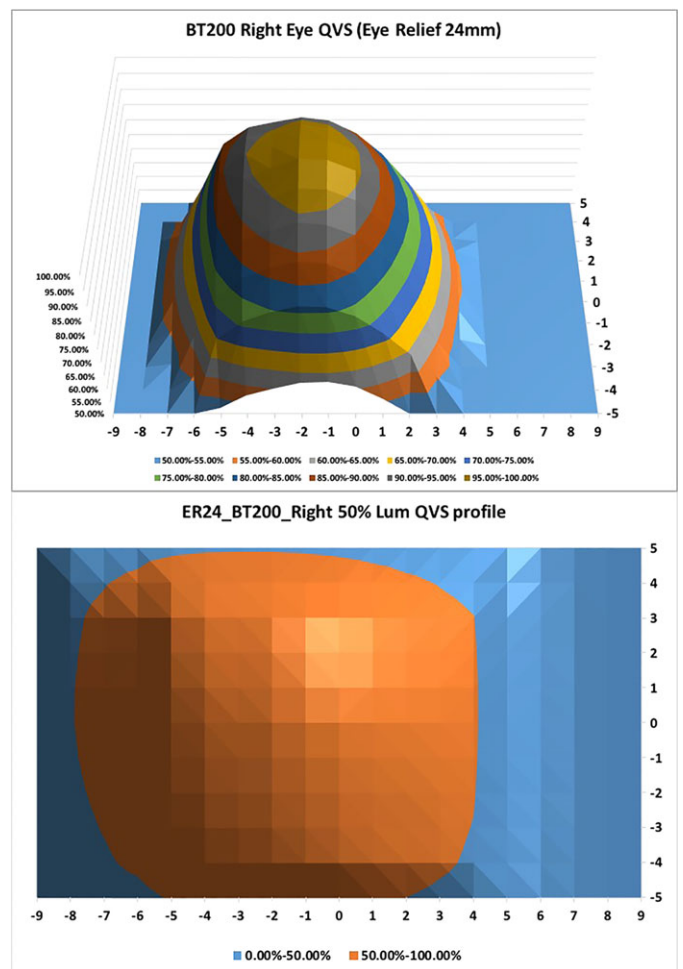


FIGURE 13 — Qualified viewing space (QVS) luminance profiles of right side, 24-mm eye relief.



$\pm 5$  mm in  $y$  direction in the  $xy$  plane of this 18-mm eye relief distance at 1-mm data spacing.

The robot was then sent to the recorded spatial and pointing direction zero point location for the left eye, the entrance pupil moved to the 18-mm eye relief point and the  $\pm 9$  and  $\pm 5$  mm points scanned. The resulting data are shown as a three-dimensional plot of QVS luminance as a function of location in the 18-mm eye relief plane in Figs 10 and 11. Another analysis of the data set is shown in the lower half of the figures where the perimeter of the QVS for 50% luminance is shown by the line created by the transition from blue to orange color.

Repeating these raster measurements at additional eye relief distances of 24 and 28 mm shows the well-formed QVS derived from the 50% luminance perimeter plots.

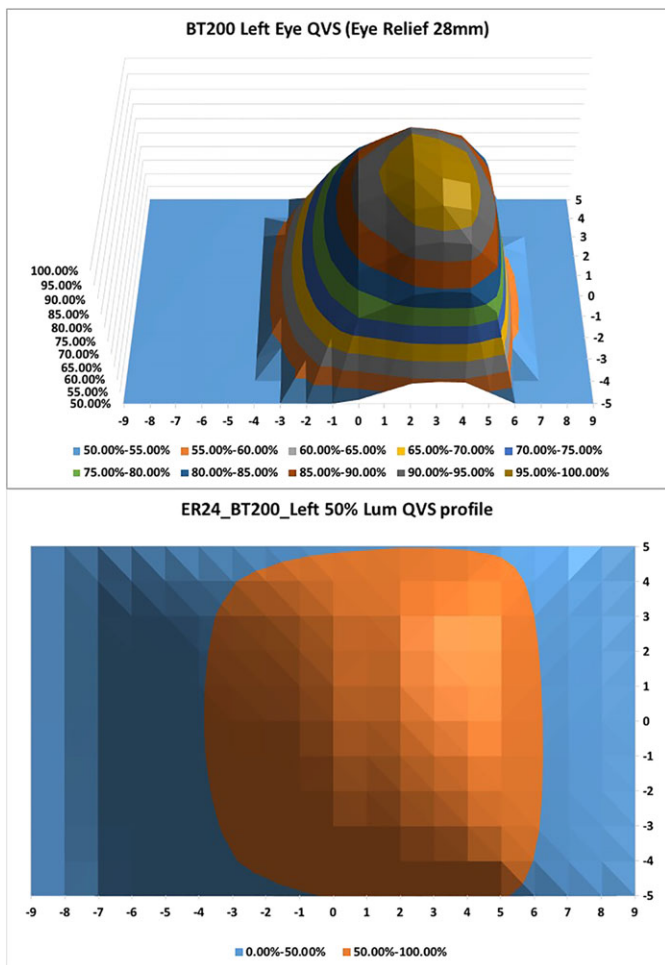
The measurement sequence can be repeated to determine the QVS defined by the 50% luminance of the horizontal edge of the virtual image FOV by rotating the azimuth angle to point and center the  $1^\circ$  spectral measurement aperture on the edge of the virtual image. This can be facilitated by using the same  $1.5^\circ$  wide band or “picture frame” at the

edges for the DUT FOV as the luminance measurement target (Figs 12–15).

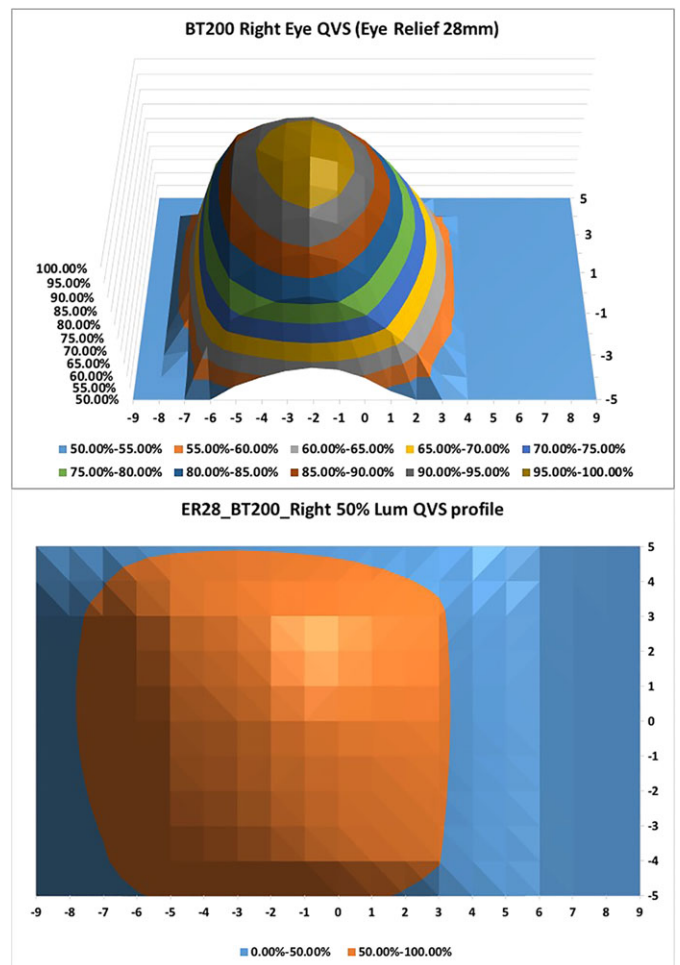
Comparing the orange/blue border regions for the left and right eye positions at the three eye relief distances shows the largest perimeter of the luminance-based QVS is at the 24-mm eye relief plane. At each eye relief distance, the perimeter is larger for the right side position. The three-dimensional luminance plot profiles show an asymmetry of the luminance traversing across the  $0^\circ$  elevation plane. This shows the peak luminance profile biased toward the nasal side of the left and right QVS. This would indicate that users of the AR device with larger interpupillary distance will have a lower peak luminance available from the virtual image within a  $1^\circ$  FSA viewing field.

Data were also taken with smaller FSA measurements with nearly identical results. Measurements with a  $2^\circ$  FSA to correspond to the angular subtense of the human eye foveal region are planned.

Other display performance parameters such as horizontal and vertical contrast resolution can be used to determine the, most likely very different, QVS shape.



**FIGURE 14** — Qualified viewing space (QVS) luminance profiles of left side, 28-mm eye relief.



**FIGURE 15** — Qualified viewing space (QVS) luminance profiles of right side, 28-mm eye relief.

---

## 6 Conclusion

Results of spectral-based luminance characterization of NEDs have not been reported before, and this metrology equipment opens up possibilities for other fast and precise measurement of display performance parameters. The method is applicable to all HUDs and augmented reality and virtual reality headsets limited only by the physical size of the optical assembly around the entrance pupil.

---

### Acknowledgments

I would like to thank my co-authors and the rest of the Gamma Scientific NED robot measurement system team.

---

### References

- 1 D. Fellowes *et al.*, "Near-to-eye display test station," Proceedings of SPIE Vol. **5079**, (2003)
- 2 R. Draper *et al.*, "Design considerations and preliminary performance evaluation for a technology demonstration of off-the-visor wide-field-of-view HMD," Proceedings of SPIE Vol. **5079**, (2003)
- 3 J. Penczek *et al.*, "Absolute radiometric and photometric measurements of near-eye displays," *J. Soc. Info. Display*, **25**, No. 4, 215–221 (2017).
- 4 K. Oshima *et al.*, "Eyewear display measurement method: entrance pupil size dependence in measurement equipment," *SID Symp. Digest*, book 2: session, **79**, 1064–1067 (2016).
- 5 R. L. Austin *et al.*, "Spectroradiometric measurements of near-eye and head up displays," *SID Symp. Digest*, book 2 session, **65**, 958–960 (2017).



**Richard L. Austin** is the current President and Chief Technology Officer of Gamma Scientific. As CTO, he has over 40 years of experience in designing and developing optical radiation measurement instruments and systems. These cover a broad range of applications including head-up display and direct view display characterization for the F-16, F-18 and C-17, F-117, and F-35 military aircraft, quality assurance and process control for antireflection and other thin-film coatings, LED, flash lamp and lamp luminous intensity and flux, and characterization of retroreflective materials for

both intensity and color. The instrumentation used in these systems includes standard light sources, both tungsten lamp and LED-based traceable to NIST, computer-controlled scanning grating and diode array spectroradiometers and spot telespectroradiometer, world class photometers, display and lens modulation transfer function, patented tristimulus CRT spot profile and convergence measurement method, and portable and laboratory retroreflectance characterization instruments. He is a co-inventor on a patent that covers retroreflectance instruments, which currently account for over 15% of total sales. In his role as the President for the last 19 years, he reorganized and refocused the company on profitability by shifting to internet-based customer-oriented marketing, applying new technology to existing products, developing new product lines, and improving product quality and hence margins. He developed and implemented annual strategic plans and identified new international customers and markets and also planned and implemented effective sales channels that increased international business from less than 5% to over 35% of total revenue. In the combined role of president and CTO, he was successful in personally introducing the company and its products to new customers, which increased sales and market share.



**Bruce S. Denning** is a consultant currently working with Gamma Scientific. He has over 40 years of experience in software development and hardware/software integrated systems design: His last 30 years of experience have primarily involved display measurement systems. As Director of Engineering at Microvision, he was the primary software designer and programmer for the SS100 system, which performs a range of display measurements including automated ISO 9241-3 and 13406-2 compliance measurements. He is currently working on system software and display metrology algorithms for the Gamma Scientific Robotic Display Measurement System. At Microvision and Gamma Scientific, he has been involved in ISO, VESA, and SID/ICDM standards development.



**Brian C. Drews P.E.** is the current Sr. Opto-mechanical Engineer at Gamma Scientific. As an engineer, he has 20 years of experience in designing and building custom process equipment and instrumentation. He has been involved in the creation of custom equipment that has been made for a broad range of industries, including flexible OLED displays, semiconductor, solar cell, laser, light sources, and instruments. He created a flexible OLED display measurement system and has continued display measurement work recently with a novel robotic system for both head-up displays and near-eye displays. In his role as an engineer, he has worked in the areas of thin-film development and characterization, high vacuum systems and plasma source development, robotics/automated equipment design, and opto-mechanical design.



**Victor B. Fedoriouk** is a senior optical engineer at Gamma Scientific Inc. During his 30-year career, he has been involved in design, development, and testing of optical instruments and systems, manufacturing equipment, and technological processes for the defense, aerospace, telecommunications, and bio-instrumentation industries. This included, but was not limited to, design, development, and implementation of laser-based systems with Nd:YAG, Nd-doped glass, and liquid lasers; large aperture telescopes and optical targeting modules; assembly and test of lasers, optical instruments, and systems; optical test and quality control equipment; tristimulus colorimeters for display measurements (CRT and flat panel displays); robotic equipment for flat panel display characterization; optical instruments for road safety/retroreflection measurements; manufacturing equipment for assembly and test of MEMS-based 2D optical switches; computerized UV laser engravers for high-throughput manufacturing; computerized conveyor-based UV exposure and curing equipment for manufacture of proprietary polymer lenses; optical test equipment for LED characterization (environmental, electrical, optical, speed/rise/fall time, etc.). The job functions related to equipment and process development also involved composition of process documentation and instrument specifications in ISO-certified manufacturing environment, performing FMEA and statistical Six Sigma process control, design of assembly tools and fixtures, and personnel training. Always maintaining an emphasis on strengthening his professional skills, Victor is also proficient in optical, mechanical, electrical design, and PCB layout, development of firmware for microcontroller-based electronic modules, writing application software for Windows-based PC systems, and performing optical testing (photometric, radiometric, spectroradiometric, goniometric, etc.). He is always striving for technical perfection and high customer satisfaction. Victor holds a Diploma of Optical Engineer/Researcher after completing a 6-year engineering studies course at Chernivtsi State University in Ukraine. He graduated with distinction (summa cum laude, saluatorian) in 1986.



**Robert Calpito** has been serving as an electro-optical engineer at Gamma Scientific since 2014. He started out in the Calibration Laboratory focusing on spectroradiometric calibrations and night vision measurements. He has since moved from the lab to a systems engineer position, focusing on near-eye display (NED) measurement techniques and characterization of various cockpit displays. During his employment at Gamma Scientific, Robert has had the opportunity to travel around the world demonstrating Gamma's newly unveiled near-eye display test system.