



頭部中心座標系での視野偏心度と空間周波数特性の関係 —理想的な HMD の仕様のための研究—

Spatial frequency characteristics against field-of-view eccentricity in head-centered coordinate system:
A study for requirement specifications of ideal HMD

原澤賢充¹⁾, 宮下山斗¹⁾, 小峯一晃¹⁾
Masamitsu HARASAWA, Yamato MIYASHITA, and Kazuteru KOMINE

1) NHK 放送技術研究所 (〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11, harasawa.m-ii@nhk.or.jp)

概要: 理想的な HMD は人間の視覚系が弁別可能なものをすべて表示できる性能をもつものと定義したときの HMD が備えるべき画素密度について検討している。HMD は頭部に固定されそのなかでユーザは眼球を自由に動かせるため、頭部中心座標系での視野偏心度と空間周波数特性特性の関係を測定した。観察者の頭部を固定し眼球は動かすことのできる環境で周辺視による高空間周波数成分の検出課題を実施したところ、検出可能な視野偏心度閾値は視野中心からの方向によって特性が異なり、特に耳側で空間周波数による偏心度閾値のちがいが顕著であることがわかった。

キーワード: 周辺視野, 空間周波数, 頭部中心座標系, HMD

1. はじめに

理想的なヘッドマウントディスプレイ (HMD) を裸眼での自然な視体験と同様の体験を提供できるものと定義すると、人間が感知可能な全視野に視覚系の分解能を超える密度で画素が充填されていることが望まれる。いっぽう、人間の視覚系では空間解像度は視野中心部で高く、中心から離れて周辺にいくほど低下することが知られている [1-3] ため、HMD の視野周辺部分で必要とされる画素密度は中心部分よりも低いことが期待される。しかし、これまで調べられてきた人間の視野偏心度と空間周波数特性の関係は網膜座標系で測定されたものである。いっぽう、HMD は頭部に固定されており、ユーザは装置内で眼球を自由に動かすことができるため、HMD がどのような画素密度を提供すべきかという問いに答えるためには、頭部中心座標系での空間周波数特性を測定する必要がある。

そこで、頭部を固定し、眼球を自由に動かせる環境下で、ある空間周波数よりも高い周波数成分が除去されたことを検出可能な範囲を測定することで、理想的な HMD の仕様に寄与しうる頭部中心座標系での視野偏心度と空間周波数特性の関係を測定することを試みた。原澤ら[4]は耳側と下側について計測したが、本研究ではこれを鼻側と上側に拡張し、上下左右の 4 方向について視野偏心度と

空間周波数特性の関係を測定した。

2. 方法

実験参加者は、頭を動かさずに 2 枚の画像を比較するよう求められた。1 枚はピンクノイズであり、もう 1 枚はある偏心度より周辺側で特定の空間周波数よりも高い周波数成分が除去されたものであり、これらを弁別可能な最大の偏心度を適応的心理物理学的手法で測定した。この方法は基本的に先行研究[4]を踏襲したものである。

2.1 装置

画像の表示装置として曲率半径 1,000 mm で湾曲した液晶ディスプレイ (Odyssey Neo G9 49", Samsung, 5,120×1,440 画素, 長辺方向の画面長 119.8 cm, 視距離 1,000 mm で視角 68.8 度に相当) を使用した。このディスプレイを観察者の右眼を中心とした半径 1,000 mm の仮想球面に沿って、ディスプレイの長辺が観察者の顔の正面方向から放射状になるように、正面方向の上下左右に設置した。それぞれの表示範囲は頭部正面を原点として上側が偏心度 10.6~79.4 度、それ以外の三方向が 25.6~94.4 度に相当した。

刺激の生成と表示、および応答の記録には PC を使用した。MATLAB と Psychophysics Toolbox [5] を刺激の制御とゲームパッドのボタン押しによる参加者の応答の記録に使用した。

実験は暗室で行ったが、完全暗黒ではなかった。

2.2 実験参加者

実験には、矯正なしで正常な視力を持つ成人 8 名（男性 5 名，女性 3 名， 24.5 ± 4.6 歳）が参加した。左眼はアイパッチで遮蔽し，右眼で実験を行った。右眼で 16 cpd の空間周波数をもつ Gabor パタンの方位弁別が可能であることを確認してから実験を実施した。参加者には実験前に文書によるインフォームドコンセントを行った。この研究は，NHK 放送技術研究所の生理・心理実験倫理審査委員会によって承認された。

2.3 刺激と手続き

実験の課題は，継時的に呈示された 2 枚の画像を比較し，一部がぼかされている（高空間周波数成分が除去されている）ほうをボタンを押して回答するという二肢強制選択課題だった。画像の観察にあたって頭部は動かさないようにし，眼球は自由に動かすことができた。

白黒の 2 次元ピンクノイズ画像とそれを加工したものを実験刺激として使用し（図 1），加工された側を標的刺激とした。刺激画像はディスプレイと同じ画素数であり，ディスプレイに全画面表示された。画像の短辺と平行な直線を境界線とし，これよりも視野の中心に近いほうには加工を加えず，周辺側にはある空間周波数で二次元ローパスフィルタを施した。標準偏差 1 度の累積正規分布曲線をプロファイルとするアルファブレンディングで無加工領域と加工領域を接続した。カットオフ周波数は 1 cpd と 8 cpd の 2 条件とした。

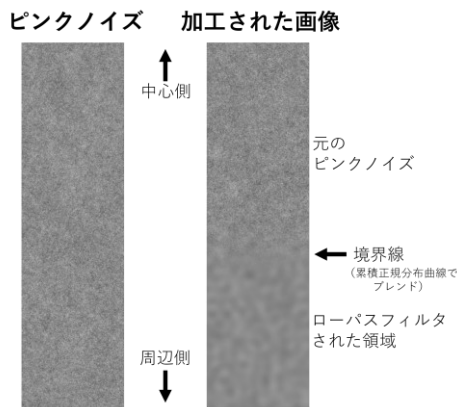


図 1: 実験刺激。ピンクノイズとその一部を加工した画像。

一試行のなかで，境界線の位置を示す手がかり刺激，第 1 刺激，第 2 刺激が 500 ミリ秒ずつ手がかり音とともに順に呈示された（図 2）。参加者は第 1 刺激と第 2 刺激のいずれが標的刺激だったのかをボタン押して回答した。境界線の位置は適応的心理物理学的測定法である QUEST [5] の規則にしたがって操作された。この手続きを 40 試行繰り返して，正答率 82% 閾値となる境界線の位置を求めた。これを 1 セッションとし，カットオフ周波数 2 条件と耳側・鼻側・上側・下側の方向 4 条件合わせて 8 条件を 1 もしくは 2 セッションずつ，合計 8 もしくは 16 セッションを実施した。セッションの順序は参加者間でカウンターバラン

スを取った。

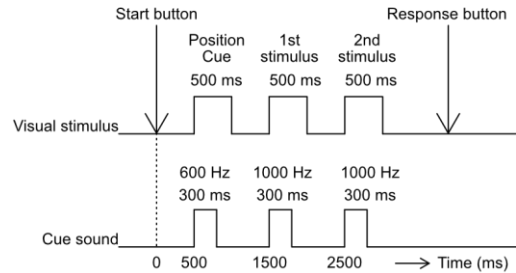


図 2: 一試行の経過。

3. 結果

閾値の中央値は，カットオフ周波数 1 cpd, 8 cpd に対して上側で 50.5, 38.9 度，下側で 63.3, 49.5 度，鼻側で 57.2, 50.5 度，耳側で 82.2, 47.0 度であった（図 3）。いずれの条件でも，カットオフ周波数が高いほど，閾値は中心に近くなることが示された。また，カットオフ周波数による閾値の変化は耳側視野でもっとも顕著だった。これらは下側と耳側の値を測定した先行研究[4]と一致した傾向であり，大きな差は見られなかった。

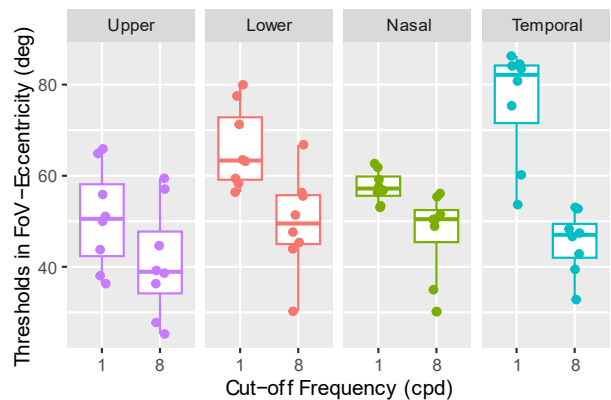


図 3: 実験結果。左から上側，下側，鼻側，耳側での視野偏心度の閾値。

4. 考察

眼球運動を伴う頭部中心座標での視野偏心度と空間周波数特性の関係を耳側と下側について測定した。全体的にカットオフ周波数が高いほど弁別の視野偏心度閾値は中心に近くなった。またその効果は耳側視野で顕著だった。鼻側の 1 cpd と 8 cpd で閾値にほとんど差が見られなかったが，これは顔の眼球周辺の解剖学的構造によって視野の一部が遮蔽される「ケラレ」によって生じたかもしれない。このように眼球を大きく動かすときの周辺側の視野特性は必ずしも，第 1 眼位での特性と同じようになるとは限らないことが示された。このことは，第 1 眼位での特性と眼球可動範囲[7]の線形和で頭部中心座標系の特性を推定することは困難であることを示しており，本研究のように眼球を自由に動かせる条件であらためて測定することの意義を示唆している。

本研究で得られた値は，この偏心度より周辺側では該当する高空間周波数成分の存否を知覚することができな

いことを示している。したがって、それよりも外側では、より高い空間周波数成分を表示しなくても視覚体験は損なわれないことを意味しており、HMDのハードウェアとしての画素配置やレンダリングのための計算資源をどれだけ節約できるのかを示す手がかりになると考えられる。このような考え方は固定中心窩レンダリング（fixed foveated rendering）と呼ばれ従来から知られているものだったが、視覚体験を損なわずに実施するための定量的な知見はこれまでにほとんど見当たらなかった。本研究の成果はこのような観点から、今後のハードウェア・ソフトウェア開発の指針とすることができると考えられる。

本研究は、可能な限り眼球を周辺方向に移動させて課題に取り組むことで最大限の眼球可動範囲での視野の特性を測定したものである。しかし、日常生活においては最大限まで眼球を動かす場面はまれである。典型的に生じる眼球運動のうちもっとも変位が大きいのは、視野外へ視線を移動するとき生じる頭部運動と協応して生じるサッカードである[8]。したがって、日常的に生じる眼球運動に限定して頭部中心座標系での視野偏心度と空間周波数特性の関係を調べた場合、本研究で示した値よりも狭い範囲が示される可能性は高い。実際、頭部中心座標系の有効視野を測定した先行研究のうち、本研究と同様に最大限に眼球を動かさせた例[9]と、視野外の標的刺激に対して頭部運動と眼球運動を協応させて視線を向けさせた例[10]では、後者でより狭い値が導出されている。したがって、視野偏心度と空間周波数特性の関係においても、頭部の運動に制限のない日常的な眼球運動のみを前提とした場合にはより狭い値ができることが予想される。ただし、HMDの設計にあたっていずれの値を採用するのが妥当であるかは設計思想に依存すると考えられる。

本研究では、1 cpd と 8 cpd という 2 つのカットオフ周波数条件で実験を行ったが、HMDの設計にあたって必ずしもこの値がとくに重要であるという知見はなく、測定値の可用性を高めるために他の値についても検討する必要があると考えられる。また、本研究では呈示時間 500 ミリ秒の固定パタンを刺激として使用したが、周辺視では時間的な変調に対する感度が高いことが知られているため、時間変調のある刺激を用いた場合には異なった傾向が観察さ

れる可能性もある。この点についても検討の余地があると思われる。

参考文献

- [1] S. M. Anstis, "A chart demonstrating variations in acuity with retinal position," *Vision Research*, vol. 36, pp. 589–592 (1974)
- [2] J. Rovamo, V. Virsu, and R. Näsänen, "Cortical magnification factor predicts the photopic contrast sensitivity of peripheral vision," *Nature*, vol. 271, pp. 54–56 (1978)
- [3] D. Regan, and K. I. Beverley, "Visual fields described by contrast sensitivity, by acuity, and by relative sensitivity to different orientations," *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, vol. 24, pp. 754–759 (1983)
- [4] 原澤賢充・宮下山斗・小峯一晃, "頭部中心座標系での視野偏心度と空間周波数特性の関係 — 耳側と下側での予備的検討 —," *映情学技報*, vol. 47, no. 12, pp. 29-31 (2023)
- [5] D. H. Brainard, "The Psychophysics Toolbox," *Spat Vis*, vol. 10, pp. 433–436 (1997)
- [6] A. B. Watson, and D. G. Pelli, "QUEST: A Bayesian adaptive psychometric method," *Perception & Psychophysics*, vol. 33, pp. 113–120 (1983)
- [7] S. Hanif, F. J. Rowe, and A. R. O'connor, "A comparative review of methods to record ocular rotations," *British and Irish Orthoptic Journal*, vol. 6, pp. 47–51 (Aug. 2009)
- [8] A. L. Cecala, and E. G. Freeman, "Amplitude changes in response to target displacements during human eye-head movements," *Vision Research*, vol. 48, pp. 149-166 (2008)
- [9] M. Harasawa, Y. Miyashita, and K. Komine, "Perimetry on head-centered coordinate system for requirements of head-mounted display," *Proc. International Display Workshops 28, VHF5-4L*, pp. 587-589 (Dec. 2021)
- [10] Y. Miyashita, M. Harasawa, and K. Komine, "Estimation of required horizontal FoV for ideal HMD utilizing vignetting under practical range of eye displacement," *IEEE VR 2023*, (Mar. 2023)