



仮想空間におけるユーザの視力の算出方法

木島竜吾¹⁾, 小山凌太²⁾

1) 岐阜大学 工学部 (〒 511-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kijima@gifu-u.ac.jp)

2) 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科 (〒 511-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, w4525033@edu.gifu-u.ac.jp)

概要: VR ディスプレイシステムにおいてどれだけ詳細に仮想空間が見えるかは重要な性能である。仮想空間内での人間の視力を仮想視力と定義することで、標準的な視覚能力をもつユーザの仮想視力値を VR ディスプレイそのものの解像度性能を表す値とみなすことが出来る。解像度特性はシステムの各種パラメータを MTF に換算統一することで求められる。また、人間のコントラスト感度特性と比較することで、仮想視力を算出できる。

キーワード: 仮想視力, VR ディスプレイ, コントラスト感度特性, MTF

1. はじめに

1.1 研究背景

頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display: HMD) を装着したユーザが、仮想空間内で視力検査をしたらどうなるだろうか。仮想空間内で視力検査をすると、現実空間の場合と同様にその視力の値を知ることが出来る。このように仮想空間内でユーザが発揮できる視覚能力を仮想視力と定義する。HMD を仮想空間を視認するためのフィルタと考えると仮想視力は VR ディスプレイシステムの解像性能とユーザの視覚能力の積として求められる。つまり、仮想視力は VR ディスプレイシステムの解像性能を知る手がかりである。実際、研究試作した VR ディスプレイシステムの解像性能を示す目的でランドルト環試験によって分解視力を求めた例 [1][2][3] もある。

しかし、被験者試験は仮想視力を求める上で有意義な方法ではあるが、多くの被験者試験を行わなければならない。また、VR ディスプレイシステムの試作後にしか評価ができない。設計者にとって解像性能は、システム全体の性能を設計中に把握・反映させるための手がかりとなるため、試作後にしか評価ができない被験者試験は設計者には不適である。そこで、仮想視力の理論的な算出方法が必要である。

1.2 目的

本論文の目的は、VR ディスプレイシステムの性能指標として仮想視力を定義すること、定義した仮想視力について理論値を設計変数から算出する方法を示すことである。仮想視力の値を算出するためにはアンチエイリアシングや、表示素子の画素サイズ、レンズなどの光学系など VR ディスプレイシステムの様々な要素を合成する必要がある。また、仮想視力は人間が観察することで初めて生じる値であるため、人間の視覚特性と比較する必要がある。

これまで VR ディスプレイシステムでは解像性能を示す指標として換算視力が用いられてきた [4]。これは、人間の

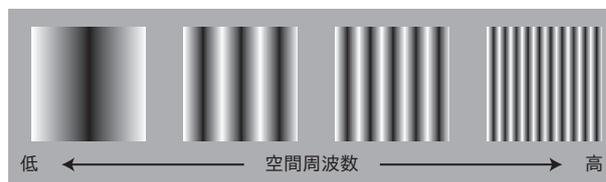


図 1: 空間周波数を変化させた正弦波縞

弁別可能/不可能をディスプレイの表示可能/不可能に置き換えたものであり、ユーザに関する情報を含まない、表示素子のみに関する値である。

本論文では、VR ディスプレイシステムの異なる要素を、空間周波数に対するコントラスト応答 (Modulation Transfer Function: MTF) として換算統一出来ることを示し、コントラスト感度特性として示された人間の視覚能力と比較することで視認上限周波数を求める方法を示す。

1.3 コントラスト感度特性と MTF

輝度が正弦波関数に従って変化する縞パターン (sin-wave grating: 正弦波格子縞, 以下正弦波縞とする, 図 1) を被験者に見せた場合に、その波形を認識できる限界のコントラストを限界コントラストまたはコントラスト閾値と呼び、その逆数をコントラスト感度と呼ぶ。正弦波縞の空間周波数を変化させてコントラスト感度を測定したもの、つまりコントラスト感度を空間周波数の関数として表したものをコントラスト感度特性 (Contrast Sensitivity Function: CSF) と呼ぶ (図 2)。なお、本論文ではコントラストとして Michelson コントラスト [5] を取り扱う。

コントラスト感度がユーザの視覚能力を表す指標として使われるのに対し、システムの解像性能を表す指標として MTF がよく使われる。これは正弦波縞を入力したときの出力コントラスト応答を空間周波数の関数として表したものである。MTF は一般的に光学分野で使われる概念だが、ディスプレイ分野でもよく使われている。

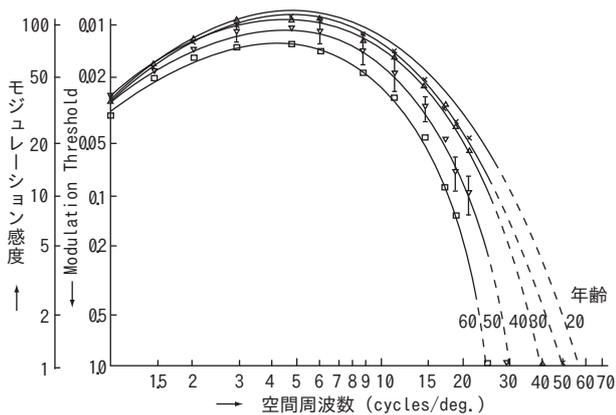


図 2: コントラスト感度曲線の例 ([6] p.609 図 3 より転載, 図中縦軸のモジュレーション感度, Modulation Threshold はそれぞれ本文中でのコントラスト感度, コントラスト閾値と同じ)

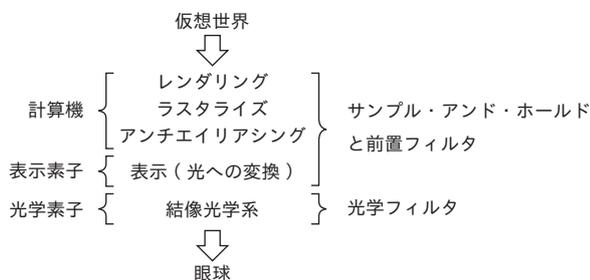


図 3: 仮想世界からの光線束が眼球に入射するまでの処理過程

2. VR ディスプレイシステム

VR ディスプレイシステムの構成を紹介し, それらが MTF を使って換算統一できることを示す。

VR ディスプレイシステムはレンダリングやアンチエイリアシングなどの計算機, 液晶や有機 EL などの表示素子, レンズなどの光学素子から構成されており, それらのフィルタを通して仮想世界からの光線束が眼球に入射する。処理過程を図 3 に示す。換算視力はこの中でも表示素子だけに注目した指標である。

2.1 レンダリングとディスプレイ

詳しくは 3.2 節に記すが, ピンホールカメラモデルでの単純な描画計算と表示は, 前置フィルタなしの等間隔サンプリングと, 輝度一定の 0 次ホールドとみなすことができる。サンプリングによって, ナイキスト周波数を超える周波数は折り返され, 0 次ホールドによって高域が減衰する。この領域は本来表示すべきではなく, ジャギーや偽解像などを引き起こす。

2.2 アンチエイリアシング

ナイキスト周波数での折返しの影響を軽減するためにアンチエイリアシング処理を行うことがある。これをサンプリング前の前置フィルタと考えることができる。本論文で考える視力は, 図 2 にある通り, 0.01~1.0 までの広範囲にわたるため, ナイキスト周波数付近でのみ生じるコントラスト低下については現在細かい問題である。しかし, 今

後換算視力 1 に近い解像度の表示素子を使用するようになると, 折返しによる偽解像やナイキスト周波数付近での肩特性が画質の解像感や先鋭感などの影響があるため, 重要な要素となるだろう。

アンチエイリアシングの技法は複数考えられているが, 最も単純な Super-Sampling Anti-Aliasing(SSAA) は, 表示解像度よりも高解像度に描画しておき, 描画終了時にダウンサンプリングする手法であるため, 畳み込みによって MTF の理論値が計算できる。その他の Multi-Sample Anti-Aliasing(MSAA) や Fast Approximate Anti-Aliasing(FXAA) なども複雑さはあるものの, 生成された画像を計測するなどすれば MTF を求めることが可能である。

2.3 光学素子

研究分野では, 再帰透過材を用いた虚像プロジェクタ [7] や再帰反射スクリーンを用いた頭部搭載プロジェクタ [2] など複雑な光学系をもつ VR ディスプレイシステムも開発されている。これらは研究時点ではまだ解像度は不十分であるため, 大まかな全体性能を示す必要が高く, そのためにも仮想視力は分かりやすい説明指標となるだろう。

光学系における解像性能を表す量にはボケの大きさや形状を表す Point Spread Function(PSF) や, Line Spread Function(LSF) などがある。これらが MTF に換算できることはよく知られている [8]。

2.4 換算統一

以上のように, システムの各要素は MTF に換算できる。各要素は線形系であるため, 要素ごとに理論値か実測値として MTF を求めることで, 全体性能を MTF の積で算出することができる。

3. 仮想視力の算出

3.1 算出方法

2 章で議論したように, VR ディスプレイシステムの各要素は MTF として求めることができ, 被験者試験を行わずに仮想視力を算出するためには, 人間の CSF と比較すれば良い。横軸に空間周波数を, 縦軸にコントラストの逆数を取ることで, CSF と MTF の逆数を同一グラフ内に描画する。CSF 曲線以下は人間が視認可能な領域で, MTF 曲線の逆数以上がディスプレイの表示可能な領域になるため, この 2 つのグラフの間が, 人間が VR ディスプレイシステムを通して視認可能な領域を表す。また, このとき両者の交点 $F_{max}[cpd]$ が視認可能な正弦波縞の上限周波数である (図 4)。

視力 1.0 の人間がコントラスト 1 の正弦波縞を見たときの視認上限周波数を $F_{max}(1.0)[cpd]$ とする。このとき, 視力 V の人が同様の正弦波縞を見たときの視認上限周波数 $F_{max}(V)$ は, 視力 V に比例する。つまり, $F_{max}(V) = V \times F_{max}(1.0)$ と表すことができる。

まず, 正弦波の代わりに矩形波について考える。波長を λ とし, ギャップ幅視角 $\tilde{\beta} = \lambda/2$ の逆数を仮想視力 \tilde{V} と考える。

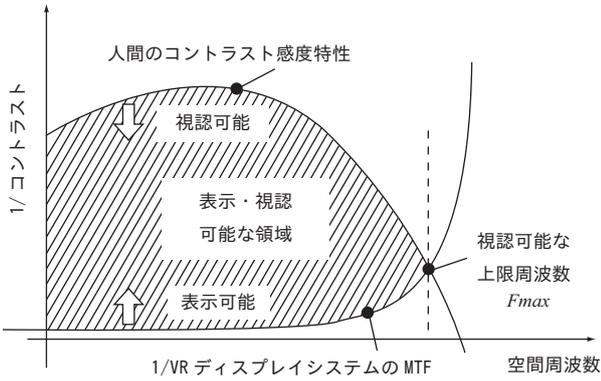


図 4: 人間のコントラスト感度特性と VR ディスプレイシステムの解像特性の比較による仮想視力の算出

$$\tilde{\lambda}[\text{min}] = \frac{60}{F_{\text{max}}[\text{cpd}]} \quad (1)$$

$$\tilde{V}[1/\text{min}] = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\lambda/2} = \frac{F_{\text{max}}[\text{cpd}]}{30} \quad (2)$$

この視力換算式は従来の換算視力の考え方と同じである。ここで、式 (2) は 30[cpd] の波形が視認限界である場合に仮想視力が 1.0 であると定義している。つまり視力 1.0 の人間の視認上限周波数が 30[cpd] であると定義している。

しかし、正弦波縞を用いて視力検査をすると、視認上限周波数は 40-50[cpd] と言われている [9]。矩形波の場合、正弦波縞に比べて視認上限周波数はやや高くなることを考えると、視力 1.0 の人間の視認上限周波数は 30[cpd] よりも実際はもう少し高くなる。

そこで、式 (2) によって定義された仮想視力を単純仮想視力 $\tilde{V}[1/\text{min}]$ と呼ぶことにし、実際の視認上限周波数 40-50[cpd] を採用した際に算出される仮想視力を実効仮想視力 $\tilde{V}_e[1/\text{min}]$ とする。単純仮想視力から実効仮想視力への修正係数を K とすると、 $\tilde{V}_e[1/\text{min}]$ は以下の式で表せる。

$$\tilde{V}_e = K\tilde{V} (K = 0.6 - 0.75) \quad (3)$$

以上の定義から、実効仮想視力は、正弦波縞をかううじて視認できる限界視力だと言える。

3.2 コントラスト応答の考え方による換算視力の評価

正方形画素からなる表示素子を考えたとき、画素長さの視角を $\bar{\beta}[\text{min}]$ 、空間周波数を $f[\text{cpd}]$ とする。このとき表示素子への入力画像はアンチエイリアシングによってサンプリング周波数 $F_s[\text{cpd}]$ の半分のナイキスト周波数 $F_n[\text{cpd}]$ 以下に抑えられる。

正弦波縞を表示する場合、1 画素の幅 $\bar{\beta}$ の間でコントラストは一定であり、このような 0 次ホールドの周波数応答ゲイン $\bar{G}(f)$ は、sinc 関数として表せる。図 5 に人間の CSF と $F_n=15, 30[\text{cpd}]$ (換算視力 0.5, 1.0) の場合の $1/|\bar{G}|$ を示す。一般にコントラスト振幅を考える場合には絶対値を用いる。 $|\bar{G}|$ はローパスフィルタの特性をもつため、高周波領域ではコントラストが低下する。また、 F_n より右側は本来表示すべきでない部分のため、ここでは議論しない。

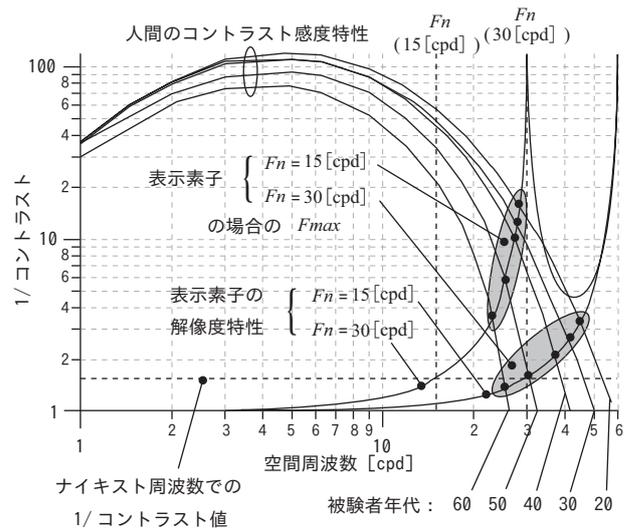


図 5: 0 次ホールドによるコントラスト劣化とその仮想視力への影響

人間の視認できるコントラストは CSF 曲線が $1/G \approx 1.57$ より上にある場合で、換算視力 $0.5(\bar{\beta}=2.0[\text{min}], F_n=15)$ のような低解像度の表示素子ならば、各世代のコントラスト感度はこのラインよりもはるかに上にある。つまり、15[cpd] の正弦波は十分に視認できる。このとき、視認上限周波数 F_{max} は表示上限周波数 F_n を超えているため、表示素子が視認上限周波数を支配している。

一方で、換算視力 $1.0(\bar{\beta}=1.0[\text{min}], F_n=30)$ のように、表示素子が高解像度の場合には 60 代の CSF 曲線を見ると正弦波縞の周波数を 26[cpd] 程度まで下げなければ視認できない。このとき、単純仮想視力の値は約 0.87 となり、換算視力より悪くなってしまふ。つまり、表示素子が視認上限周波数を支配していない場合には表示素子と人間の両方の性能を考える必要がある。

コントラスト低下に最も弱い 60 代でも、 $F_n < 25[\text{cpd}]$ の領域では、CSF は 1.56 を上回っており、表示上限周波数まで視認することができる。つまり、 $F_n < 25[\text{cps}]$ までは単純仮想視力の代わりに換算視力を使うことができる。

3.3 光学系のボケ幅から仮想視力を求める

3.2 節では換算視力、つまり表示素子の解像性能について議論した。ここでは、VR ディスプレイの解像性能を決めるもう一つの重要な要素である光学系の性能について議論する。光学系の性能はボケの大きさや形状から算出することができ、ここではランドルト環にボケを与えた例を用いて説明する。

図 6 にギャップ幅 1[min] のランドルト環の原画と、これに直径 1-3[min] の一様ボケを加えた画像を示す。ボケ直径が 1[min] の場合、間隙はハッキリと視認できるが、3[min] の場合には間隙というより、左右の非対称性として視認できる。このことから、換算視力同様に視力=1/ボケ幅とするのは不適であり、何らかの客観的な視認限界の基準が必要であると言える。

正弦波縞にボケを加えたときの MTF を計算によって求

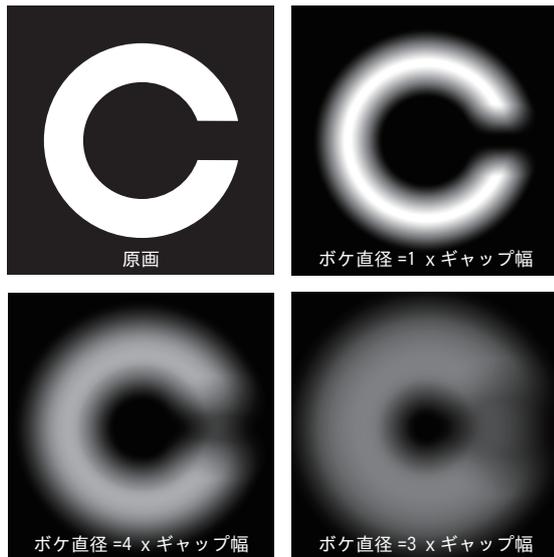


図 6: 一様ボケを加えたランドルト環

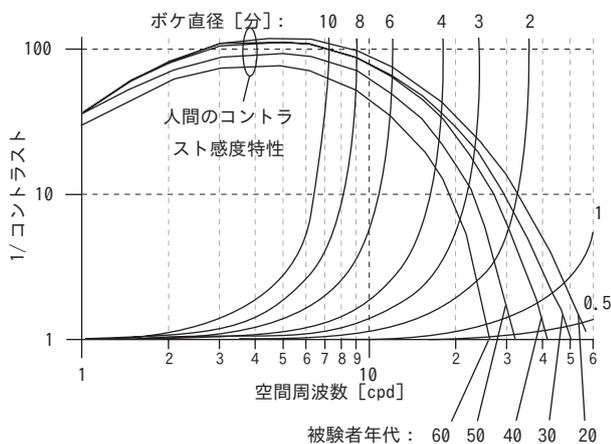


図 7: 一様ボケによるコントラスト劣化が仮想視力に及ぼす影響

め、その逆数と CSF 曲線を比較したグラフを図 7 に示す。ボケ直径が 2[mm] までは仮想視力は、図 6 に示した画像による直感に近いように思われる。しかし、ボケが大きくなるにつれ、視認上限周波数は低下していく。一様ボケの大きさを変化させた場合の単純仮想視力をプロットしたグラフを図 8 に示す。ボケ直径 > 2[mm] の領域で、単純仮想視力 \tilde{V} は、ボケ半径の逆数で近似できる。

4. 結論

VR ディスプレイシステムを介して仮想空間内でユーザが発揮できる視覚能力を仮想視力として定義した。VR ディスプレイシステムの各要素を MTF に換算統一し、人間のコントラスト感度特性と比較することで、視認上限周波数を求め、仮想視力を被験者試験を行うことなく理論的に算出できることを示した。

ここで定義した仮想視力を単純仮想視力とし、実際に被験者試験を行った場合の結果と比較することで、単純仮想視力の 60-75% 程度である実効仮想視力を定義した。

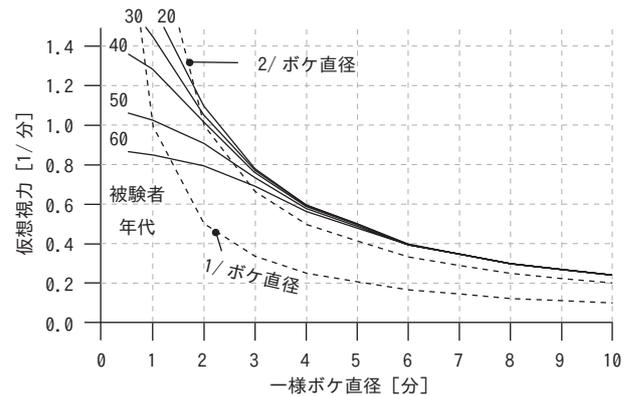


図 8: 一様ボケのボケ量による単純仮想視力の変化の計算例

表示素子については表示上限周波数が 25[cpd] 以下であれば、単純仮想視力の代わりに換算視力を使うことができるが、それを超えると人間の視覚能力についても考慮する必要がある。一方、光学系について考えると、正弦波縞にボケを加えたとき、ボケ直径 > 2[mm] では単純仮想視力をボケ半径の逆数で近似できることを示した。

参考文献

- [1] 安藤 英由樹, 雨宮 智浩, 前田 太郎: AR における注釈表示のためのウェアラブル・スキャニング・レーザー・プロジェクター, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 10(2):191-199, VRSJ, 2005.
- [2] ゲン ヴァンドウック, 清川 清, 問下 以大, 竹村 治雄: 再帰性半透過スクリーンを用いた広視野頭部搭載プロジェクタの実装と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 19(2):163-172, VRSJ, 2014.
- [3] Satoshi Hasegawa, Akira Hasegawa, Masako Omori, Hiromu Ishio, Hiroki Takada, Masaru Miyao: Stereoscopic Vision Induced by Parallax Images on HMD and Its Influence on Visual Functions, Lecture Notes in Computer Science, 6773, Procs. of Intl. Conf. on Virtual and Mixed Reality 2011, pp.297-305, Springer, 2011.
- [4] 岩本 和世, 前田 太郎, 谷江 和雄: 視線追従型映像提示系への応用を目的とした注視点近傍における視覚特性の検討, 人間工学, 30(2):99-109, 1994.
- [5] A. A. Michelson: Studies in Optics, University of Chicago Press 1927.
- [6] 行田 尚義, 大頭 仁: 視覚神経系と視覚特性の年齢による変化, 照明学会誌, 72(10):20-24, 1988.
- [7] 木島 竜吾, 渡邊 純哉, 近藤 大祐: 再帰透過性素材を用いた虚像投影式頭部搭載型プロジェクタ, ヒューマンインターフェース学会研究報告集, 10(2):7-12, 2008. (信学技法, MVE2008-2:7-12, 電子情報通信学会).
- [8] 氏原 真代, 波田 野浩, 福田 賢一, 福田 覚: 画像数学入門 [3 訂版], 医療科学社, 2016.
- [9] F. W. Campbell and J. G. Robson: Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. Journal of Physiology, 197:551-566, 1968.