



# VR 用視覚提示装置の幾何パラメータに関する Web 教材の作成

Educational materials on geometric parameters in visual displays for VRs

柳田康幸<sup>1)</sup>

Yasuyuki YANAGIDA

1) 名城大学 理工学部 (〒468-8502 愛知県名古屋市中白区塩釜口 1-501, yanagida@meijo-u.ac.jp)

**概要** : HMD や CAVE などの VR 用視覚提示装置において、瞳孔間距離や視野角などのパラメータやトラッキング誤差・遅延などの影響がどのような形で現れるかを幾何学的に示す教材を作成した。専門的なソフトウェアを導入せずに学習者自身がパラメータを変化させてその影響を確認できるよう、JavaScript を使った Web ページの形で実装した。

**キーワード** : HMD, IPT, 視野角, 瞳孔間距離, 頭部運動, 世界揺れ, 空間歪み

## 1. はじめに

コロナウイルス感染拡大防止対策のため、筆者の勤務校では 2020 年度前期の講義を遠隔で行うことになった。学生数約 15,000 人という規模の大学で全学一斉に遠隔講義を急遽行うことになったため、ビデオを使った遠隔講義では回線やサーバの容量逼迫が懸念された。また、通信環境が十分でない、あるいは通信量が制限されている学生も考慮する必要があり、リアルタイムビデオ通話やビデオ配信よりも、静的な媒体を使った講義が推奨された。

筆者は学部 4 年次を対象とする講義「バーチャルリアリティ」を担当しており、対面講義においては動画やデモを多用していたが、ビデオなしの遠隔講義ではこれらを提供できない。動画に関しては、学習者の環境が許すならば、YouTube などの動画サイトに掲載されている動画の場所を示すことで視聴可能である。しかし、その場で行うデモ教材の場合、代替手段が必要である。そこで、少ない容量ながら学習者が能動的に操作し結果を確認できる、インタラクティブな Web 教材を作成して提供した。

内容は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) もしくは CAVE などの没入型投影技術 (IPT) において、遅延やステレオ視のパラメータ、頭部位置姿勢の計測誤差が存在すると、どのような形で影響するかを幾何学的に説明するものである。

## 2. デモ教材の実現手段

対面講義では、自作のプログラムをパソコン上で実行し、スクリーンに映して説明していた。OpenGL を使った C++

によるプログラムであり、筆者が約 20 年前に書いて説明に使用してきたものである。このソースコードもしくは実行可能ファイルを配布することも検討したが、学生のコンピュータ利用環境はまちまちであり、実行またはコンパイルのためのソフトウェア的セットアップが必要になることから、得策ではない。

受講者が利用する遠隔講義システムは Web ベースであり、この環境でシームレスにデモを見せることができれば、対面講義時と同等の内容を提供することができる。むしろ、Web ページにテキストを記述することにより、デモのどこに注目して欲しいかを明示的に示すことができる。そこで、HTML5 と JavaScript [1] を利用した Web 教材を作成した。ユーザーの操作に対するレスポンスを重視するため、Web ページで読み込まれる JavaScript プログラムをユーザーの手元の PC もしくはモバイルデバイスで実行する。Web ブラウザがインストールされていない PC やスマートフォンは皆無と言ってよく、モダンブラウザがインストールされていればブラウザ自身でアップデートをチェックするため、古いブラウザの互換性は考慮していない。

## 3. 作成した教材

HMD もしくは IPT で VR 世界を観察する際、遅延やステレオ視パラメータ、頭部運動などが提示される世界に対してどのように影響するかを幾何的に説明する教材を 4 種類作成した。作成した教材は他の担当科目用教材とともに、筆者の研究室 Web サイト [2] で公開している。

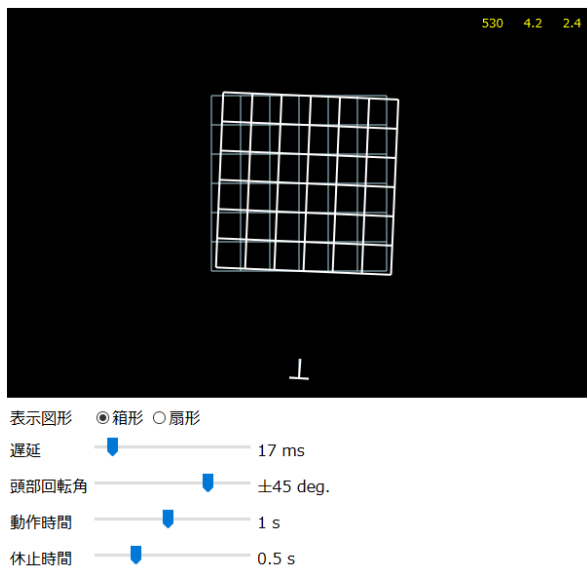


図 1: HMD 使用時の遅延による世界揺れ

### 3.1 HMD 使用時の遅延による世界揺れ

HMD 使用時の遅延は、非常にクリティカルな問題である。VR の黎明期より問題が指摘されており、頭部運動から映像提示までの遅延 (end-to-end delay) が存在する状況で頭部を動かすと、世界全体が揺れて見える。この現象は、VR 酔いの主要因の一つであった。その後、頭部運動の予測値を用いたレンダリングおよび表示直前の画像補正[3]などの手法が提案・開発され、コンシューマー向け製品の実用化に大きく貢献した。

作成した教材ページの表示部および操作インタフェースを図 1 に示す。この図は上面図で、画面上側が正面方向を示し、ユーザーの頭部方向を逆 T 字印で表している。HMD ユーザーが頭部を左右に振る動作を行っており、左から右へ頭を振る途中、正面付近を通過した瞬間をキャプチャしたものである。60 fps (frames per second) で表示しているとき、1 フレーム分の遅れが無視できない世界揺れにつながるため、徹底した遅延補償が重要であることがわかる。学習者は、遅延時間、頭部回転の振幅、半周期の動作時間、右端もしくは左端での休止時間を指定できる。

### 3.2 HMD の画角不整合による世界変形

HMD に広角画像や望遠画像を提示したいと思うこともあるだろう。しかし、このような映像提示を行うと、HMD を通して知覚される世界は、奥行き方向にのみ圧縮または拡大される[6]。非等方的な拡大縮小であり、その軸が頭部回転運動に従って変化するため、観察される世界は頭部運動に従って動的に変形する。

表示部と操作インタフェースを図 2 に示す。GUI の左側ブロックで、HMD とカメラの水平視野角を設定する。右側ブロックの頭部運動ラベル横のチェックボックスをオンにすると、頭部が左右に回転する。図 1 の場合と同様、頭部回転角振幅、半周期にかかる時間、左右端での休止時間を設定できる。また、頭部運動に伴う動的変形において、各点の移動速度ベクトルが黄色い線で示される。文献[6]で

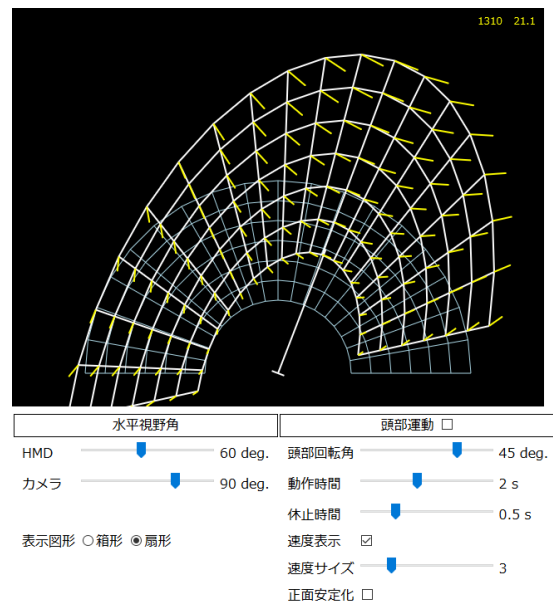


図 2: HMD の画角不整合による世界変形

示した、回転角スケーリングによる頭部正面方向の安定化をオンにすると、正面方向の物体が左右に流れず静止する様子が確認できる (ただしその場合も、周辺の動的変形は避けられない)。

### 3.3 HMD の瞳孔間距離不整合による世界変形

HMD は左右の目の前にディスプレイ像を提示する構造のため、装着者の瞳孔間距離 (IPD) 設定がしばしば問題になる。ユーザーの IPD が HMD に適合しないとき、適切な立体視ができなくなるというものである。しかしながら、この点について定量的に説明している資料は少ない。そこで、あらためてこの影響について整理した。

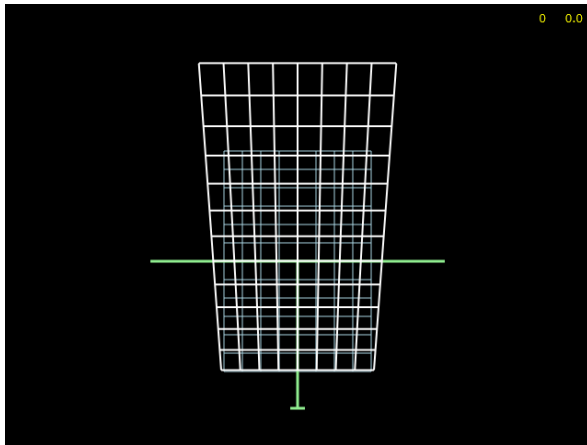
言葉としては IPD ばかりが言及されるが、HMD のステレオ視に関係するパラメータは、3 種類存在する。

- IPD (Inter-Pupillary Distance): ユーザーの瞳孔間距離。
- IAD (Inter-Axial Distance): HMD の光軸間距離。
- ICD (Inter-Camera Distance): ステレオ画像生成時のカメラ間距離。

IPD 以外は定着した用語ではなく、ICD はむしろステレオカメラのベースラインと呼んだ方が一般的である。しかしながら、ここでは 3 種類の距離パラメータを明確に対比させるため、これらの用語を用いる。

画面例を図 3 に示す。学習者が IPD, IAD, ICD およびスクリーン像面までの距離を調整し、変形の様子を確認する。理想条件はもちろん IPD, IAD, ICD がすべて一致することである。IPD と IAD が等しいときに ICD を異なる値に設定すると、VR 世界における自己のアバター頭部が拡大縮小することに相当するので、世界は相対的に逆のスケールで観察される (ICD が大きいと世界は小さく見える)。この状態で頭部を動かしても、等方的な拡大縮小なので、動的な変形は発生しない[4]。

一方、IPD が IAD と異なる場合、世界は眉間を中心に、物体までの距離に応じた拡大率で拡大・縮小される。IPD <



表示図形		ステレオ視パラメータ		頭部運動	
●箱形	○扇形	Reset	Reset	●手動	○自動
IPD: 瞳孔間距離	55 mm	頭部方向(手動)	0.0 deg.		
IAD: HMD軸間距離	63 mm	頭部回転範囲	45 deg.		
ICD: カメラ間距離	55 mm	動作時間	1 s		
●独立 ○IPD=IAD ○ICD=IPD ○ICD=IAD		休止時間	0 s		
スクリーン距離	2 m				

図 3: HMD の瞳孔間距離不整合による世界変形

IAD の場合は遠方ほど大きく拡大され、遠くなる。IPD > IAD の場合は遠方ほど縮小され、近くなる。拡大・縮小率は物体までの距離によって変化する。物体までの奥行きを  $z_o$ 、スクリーン像面までの距離を  $z_s$  とすると、ICD = IPD とした場合は、 $z_o/z_s$  に応じた拡大・縮小率が適用される。一方、ICD = IAD に設定した場合は、拡大縮小率は  $z_o/z_s - 1$  に応じて決まり、スクリーン像と同じ距離にある物体は動かない。このことから、IPD が IAD と異なる場合、カメラ間距離はむしろ IPD を無視して IAD に合わせた方が変形の影響は小さくなることかわかる (4.1 節参照)。

### 3.4 固定スクリーン型システムで頭部運動非対応の場合の世界変形

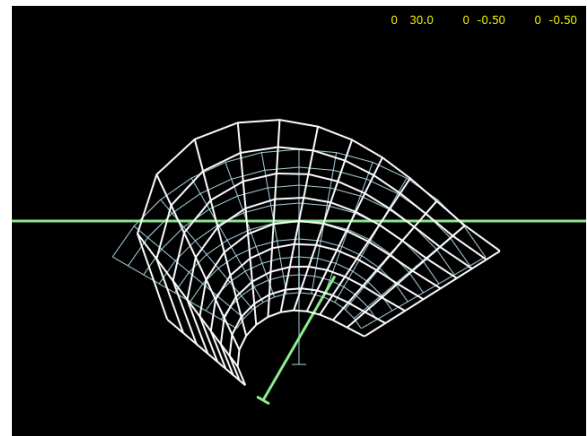
CAVE などの固定スクリーンを利用したシステムで、頭部運動がトラッキングされていない、もしくはトラッカーの出力する値に誤差が存在した場合に世界がどう見えるかという問題である。

頭部位置がカメラ位置に対して前後に動くとき、世界がスクリーンを中心に縮小・拡大して見える。頭部位置が左右に動くとき、世界はスクリーン位置を中心に剪断変形する。文献[5]では、頭部回転による変形を導出したが、並進を伴わない回転に限定していた。今回さらに、並進と回転が同時に発生したときの変形について計算式を導出した (4.2 節参照)。式があまりに複雑になるため陽な形式では導いておらず、横方向の点の位置ずれをまず計算し、それを代入して点の奥行き位置を求める形としている。

画面例を図 4 に示す。頭部回転による奥行き方向 (特に視野周辺部) の変形と、並進による剪断変形が組み合わさった様子が見られる。

## 4. 世界変形の導出

3.3 節、3.4 節の世界変形を幾何的に導出する。



表示図形		ステレオ視パラメータ		頭部運動	
○箱形	●扇形	Reset	Reset	●手動	○回転 ○前後 ○左右
IPD: 瞳孔間距離	63 mm	頭部角度	±30 deg.		30.0 deg.
IAD: 左右軸間距離	63 mm	前後位置	±1 m		-0.50 m
ICD: カメラ間距離	63 mm	左右位置	±1 m		-0.50 m
○独立 ○IPD=IAD ○ICD=IPD ●ICD=IAD		動作時間	1 s		
スクリーン距離	2 m	休止時間	0 s		

図 4: IPT 利用時に頭部運動非対応の場合の世界変形

### 4.1 HMD の瞳孔間距離不整合による世界変形

図 5 のように、IPD, IAD, ICD をそれぞれ  $d_p, d_a, d_c$  とする。原点をユーザーの眉間とし、 $x$  軸を右方向、 $z$  軸を奥行き方向にとる。また、スクリーン像面までの奥行きを  $z_s$  とする。文献[4]により、IPD と IAD が等しい状況で、異なる ICD のステレオカメラにより生成した映像を観察したとき、VR 世界の点  $P_o(x_o, z_o)$  は

$$(x_d, z_d) = \frac{d_a}{d_c} (x_o, z_o) \quad (1)$$

なる点  $P_d$  にマッピングされる。この点を IAD と異なるユーザーが観察したときにどの位置に知覚されるかを求める。なお、レンズを通して見るスクリーン虚像の位置は、視点がずれても動かないと仮定する。

空間内の点  $P_d(x_d, z_d)$  を表現するスクリーン上の点と、左右画像それぞれの中心との距離をそれぞれ  $x_{cL}, x_{cR}$  とすると、

$$z_s : (x_{cL} + x_{cR}) = z_d : d_a \quad (2)$$

よって

$$x_{cL} + x_{cR} = \frac{z_s d_a}{z_d} \quad (3)$$

この映像を、IPD が  $d_p$  であるユーザーが観察したとき、点  $P_d(x_d, z_d)$  を表現するスクリーン上の点と、両眼それぞれの正面方向がスクリーンと交わる点との距離をそれぞれ  $x_{dL}, x_{dR}$  とすると、

$$x_{dL} + x_{dR} = x_{cL} + x_{cR} + d_p - d_a = \frac{z_s d_a}{z_d} + d_p - d_a \quad (4)$$

知覚される点の座標を  $P_v(x_v, z_v)$  とすると、その奥行き  $z_v$  は、

$$z_s : (x_{dL} + x_{dR}) = z_v : d_p \quad (5)$$

$$\begin{aligned} z_v &= \frac{z_s d_p}{x_{dL} + x_{dR}} = \frac{z_s d_p}{\frac{z_s d_a}{z_d} + (d_p - d_a)} \\ &= \frac{z_s d_p}{1 + (1 - d_a/d_p)(z_d/z_s - 1)} \end{aligned} \quad (6)$$

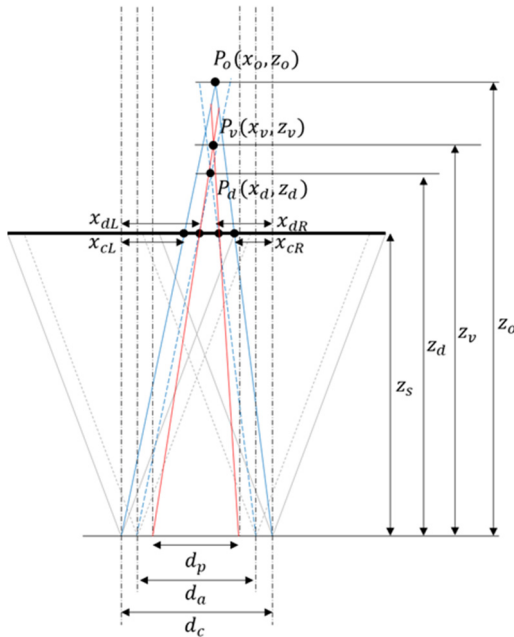


図 5: HMD ステレオ視パラメータ相違による点の変位

これより  $x$  座標を計算すると

$$x_v = -\frac{d_p}{2} + x_{dL} \cdot \frac{z_v}{z_s} = \frac{x_o}{1 + (1 - d_a/d_p)(z_d/z_s - 1)} \quad (7)$$

よって

$$(x_v, z_v) = \frac{1}{1 + (1 - d_a/d_p)(z_d/z_s - 1)} (x_d, z_d) \quad (8)$$

これと(1)式を組み合わせると

$$(x_v, z_v) = \frac{d_a}{d_c} \cdot \frac{1}{1 + (1 - \frac{d_a}{d_p})(\frac{d_a}{d_c} \cdot \frac{z_o}{z_s} - 1)} (x_o, z_o) \quad (9)$$

が得られる。特に  $ICD = IPD$  としたときは

$$(x_v, z_v) = \frac{1}{1 + (1 - \frac{d_a}{d_p})\frac{z_o}{z_s}} (x_o, z_o) \quad (10)$$

となる。

#### 4.2 固定スクリーンシステム

原点  $O$  のステレオカメラで撮影された点  $P_o(x_o, z_o)$  を、頭部位置  $H(x_h, z_h)$ 、回転角  $\theta$  で観察したとき知覚される点  $P_v(x_v, z_v)$  の位置を計算する。瞳孔間距離を  $d$ 、スクリーンまでの距離  $D$ 、撮影時の視点を  $C_R, C_L$ 、スクリーン上に表示される点の座標を  $S_R(x_{SR}, D), S_L(x_{SL}, D)$  とする。 $S_R, S_L$  はそれぞれ  $C_R, C_L$  と  $P_o$  を  $D:(z_o - D)$  で内分する点だから、

$$x_{SR} = \frac{Dx_o + (z_o - D)d/2}{z_o} = \frac{D}{z_o} \left( x_o - \frac{d}{2} \right) + \frac{d}{2} \quad (11)$$

$$x_{SL} = \frac{Dx_o - (z_o - D)(-d/2)}{z_o} = \frac{D}{z_o} \left( x_o + \frac{d}{2} \right) - \frac{d}{2} \quad (12)$$

一方、移動後の視点は、

$$E_R(x_{ER}, z_{ER}) = \left( x_h + \frac{d}{2} \cos \theta, z_h + \frac{d}{2} \sin \theta \right) \quad (13)$$

$$E_L(x_{EL}, z_{EL}) = \left( x_h - \frac{d}{2} \cos \theta, z_h - \frac{d}{2} \sin \theta \right) \quad (14)$$

$E_R, E_L$  それぞれから  $P_v$  へ向かう視線の条件から

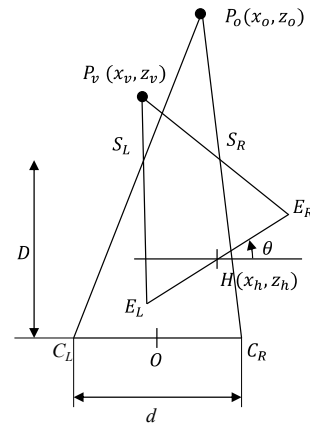


図 6: 固定スクリーンシステムにおける頭部移動および回転による点の変位

$$(x_{ER} - x_{SR}) : (x_{SR} - x_v) = (D - z_{ER}) : (z_v - D) \quad (15)$$

$$(x_{EL} - x_{SL}) : (x_{SL} - x_v) = (D - z_{EL}) : (z_v - D) \quad (16)$$

$z_v - D$  が共通なので連立させて

$$\frac{z_v - D}{x_{ER} - x_{SR}} = \frac{(x_{SR} - x_v)(D - z_{ER})}{(D - z_{EL})(x_{EL} - x_{SL})} = \frac{(x_{SL} - x_v)(D - z_{EL})}{x_{EL} - x_{SL}} \quad (17)$$

これを  $x_v$  について整理すると

$$\frac{x_v}{z_v - D} = \frac{x_{SR}(D - z_{ER})(x_{EL} - x_{SL}) - x_{SL}(D - z_{EL})(x_{ER} - x_{SR})}{(D - z_{ER})(x_{EL} - x_{SL}) - (D - z_{EL})(x_{ER} - x_{SR})} \quad (18)$$

が導出される。 $z_v$  の値は、(17)式から求める。

#### 5. まとめ

VR で利用される HMD と固定スクリーン利用システムについて、ステレオ視に関係するパラメータが理想条件からずれたとき生じる影響を幾何学的に説明する Web 教材を制作した。人間の知覚上で揺れや変形に気づくかどうかの問題とは別に、パラメータの設定と知覚との間に幾何学的な説明を挟むことで影響を明確化できる。

#### 参考文献

- [1] Mozilla and individual contributors: MDN Web Docs, <https://developer.mozilla.org/>, 2020.8.7 参照。
- [2] 柳田康幸：自作教材など制作物 <http://vrlab.meijo-u.ac.jp/~yanagida/edu/>, 2020.
- [3] 宮島健人, 木島竜吾：Oculus Rift DK2 の回転方向動特性評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 1, pp. 131-140, 2016.
- [4] 柳田康幸, 舘 暉：HMD 型トレイグジスタンスシステムにおける 視野角不整合の影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 69-78, 2002.
- [5] 柳田康幸, 前田太郎, 舘 暉：固定スクリーン型視覚提示装置を用いたトレイグジスタンス視覚系の構築手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 539-547, 1999.