

## off-axis 法を用いたステレオ グラフィックスの奥行き感に関する研究

山路 真有\*<sup>1</sup> 林 武文\*<sup>2</sup>

### 要 旨

off-axis 法による投影変換は、2眼式ステレオグラフィックスにおいて、垂直視差を含まないステレオ画像対の生成を可能とするが、投影像の周辺部におけるひずみの増加が問題となる。本研究では、off-axis 法の諸特性を把握するために、実写画像の投影法に近い toe-in 法との比較を行い、視差と投影像のひずみを定量的に評価した。また交差視差条件の融像限界において、知覚される奥行き量と左右投影中心間隔の関係を心理物理実験により調べ、正しい奥行きと物体の大きさが知覚されるための条件を明らかにした。さらに、これらの結果に基づいて自然な立体視を保持しつつ疲労感を低減するためのステレオ投影法について考察した。

## Depth Perception in Stereo Graphics Using Off-Axis Projection

Mayu YAMAJI\*<sup>1</sup> Takefumi HAYASHI\*<sup>2</sup>

### Abstract

The Off-Axis Projection Method produces stereo image pairs without any vertical disparity; however, the projected image is distorted in the peripheral area. The present research compared the Off-Axis Projection Method to the conventional Toe-In Projection Method and clarified the effects of horizontal and vertical disparities quantitatively. Then using the Off-Axis Projection Method, psychophysical experiments were performed to study the human perception of depth and distortions of the objects displayed in stereo. In a crossed disparity situation, perceived depth and distortion of the stereo image were clarified at the critical distance of the stereo matching limit. Finally, an effective stereo graphics projection method was proposed based on these numerical and experimental results.

\*<sup>1</sup>日立ソフトウェアエンジニアリング株式会社

\*<sup>2</sup>関西大学総合情報学部

## 1. はじめに

2眼式立体映像は、観察者の左右眼に視差画像を別々に提示して奥行き感を与える方式であり、近年、アミューズメント施設の映像や医療、教育などの分野でリアリティの高い映像表現として注目を集めている。左右の視差画像を提示する方法は、赤青メガネを用いるアナグリフを始めとして、偏光フィルタやシャッター眼鏡を用いる方法、ステレオスコープやヘッドマウントディスプレイを用いる方法、パララックスバリアやレンチキュラレンズを用いて裸眼立体視を行う方法など様々な方式が実用化されている<sup>[1][2]</sup>。また、視差画像を作成する指針として、人間の立体視に関する心理学分野の研究成果が応用され<sup>[3][4]</sup>、ステレオカメラやコンピュータグラフィックスを利用したステレオ映像の制作が一般ユーザでも可能となった<sup>[5]-[7]</sup>。

ステレオグラフィックスは、視差画像の生成を3次元コンピュータグラフィックスで行う場合を指すが、情報の可視化手段として娯楽以外にも科学技術や産業分野での需要が多く、バーチャルリアリティやヒューマンインタフェースなどの研究においても表示技術として多用されている。ステレオグラフィックスでは、左右の視差画像を生成する投影変換が重要であり、現在では、toe-in法とoff-axis法と呼ばれる2種類が主に用いられている<sup>[8]</sup>。前者は、通常のステレオカメラと同様に左右眼位置を視点とした視軸に対して対称な一点透視投影であるが、画像の周辺部では垂直視差により左右画像の対応付けと立体視が阻害される。それに対して、後者は、非対称なビューボリュームを用いることにより、垂直視差を除外することが可能である。しかし、その反面で画面周辺部や視点に接近した領域での画像のひずみが問題となる。

一方、2眼式立体映像を観察する場合には、両眼の輻輳と調節が不一致を起こすために、飛び出し量の多い映像を長時間観察した場合に観察者の疲労が問題となる。これまでに、視差画像と疲労感に関する心理学・生理学的な評価が多数行われてきた<sup>[9][10]</sup>。また、輻輳と調節の不一致を解消し疲労感を低減するためのハードウェアが提案されている<sup>[11]-[13]</sup>。しかし、特殊なハードウェアを利用しない簡易で適用範囲の広い2眼式ステレオグラフィックスでは、疲労感を低減するには飛び出し量を犠牲にする必要があり、根本的な解決方法は無い。

本研究は、off-axis法を利用したステレオグラフィックスにおける画像の歪みと奥行き感の評価を行い、疲労感が少なく自然な立体視が可能な投影方法を提案することを目的としている。off-axis法の水平視差と画像の歪みの程度を明らかにするために、実写のステレオカメラの投影に近いtoe-in法との比較を行い、両者の差違を定量的に評価した。また、off-axis法で生成したステレオ画像を用いて、知覚される奥行き感と物体形状を心理物理実験により検討し、提示したステレオ画像対から正しい奥行きと形状が知覚される条件を明らかにした。さらに、これらの結果に基づいて、疲労感の少ない効果的なステレオ画像の提示方法について考察した。

## 2. ステレオ投影法の比較

### 2.1 ビューボリュームの定義

toe-in 法と off-axis 法のビューボリュームを図1に示す。前者は、実写映像のステレオカメラと同様に、視軸に関して対称な1点透視投影であるのに対し、後者は非対称のビューボリュームを用いた1点透視投影である。ステレオ投影のビューボリュームと変換式の導出に関しては、文献<sup>[4]</sup>に詳細な説明があるが、ここでは、実際にディスプレイに画像を表示して、後述する

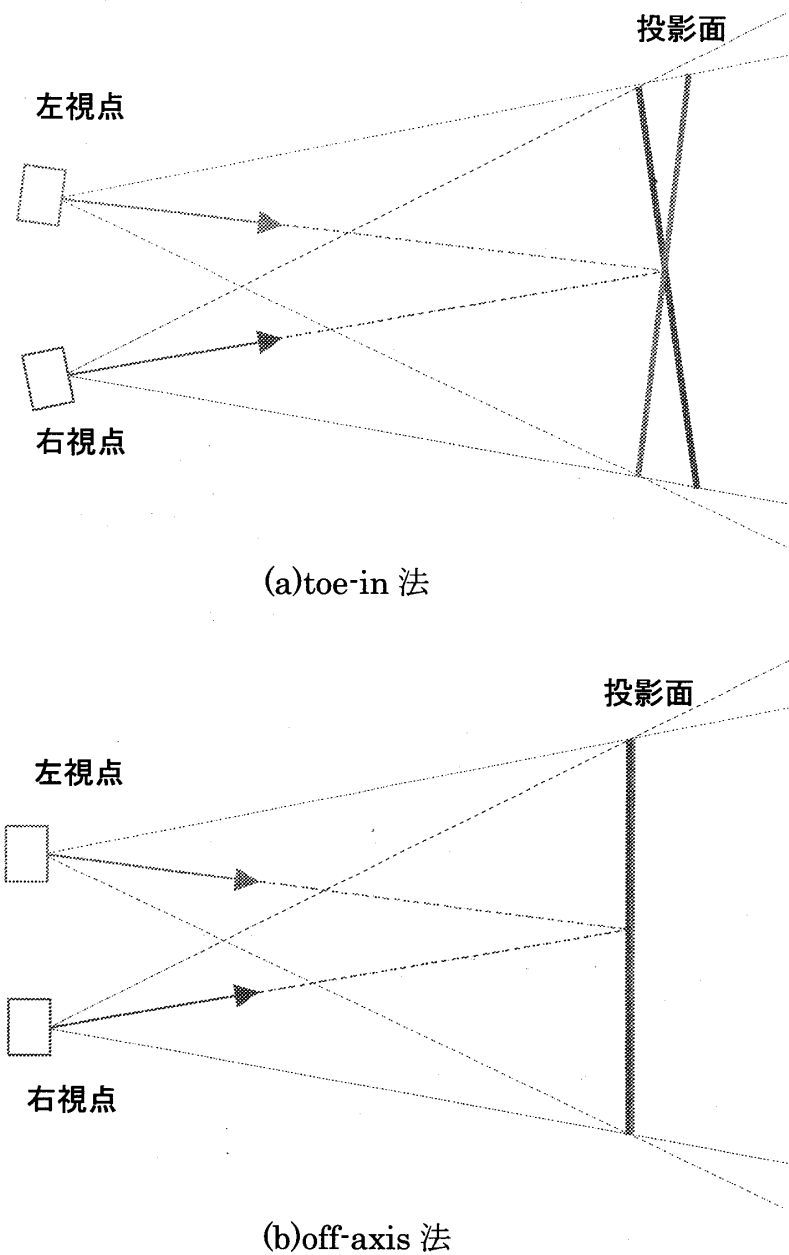


図1 ステレオ投影の方法

心理物理実験に用いることを考慮して、グラフィックス API である OpenGL<sup>[15]</sup> のビューボリュームの定義にあわせて変換式を導く。OpenGL では、非対称なビューボリュームを生成するコマンド `glFrustum()` により、投影変換行列を算出する。図 2 に示すように、四角錐台状のビューボリュームが図中に示すパラメータによって定義される。ここで、 $(x_l, y_b, -n)$  と  $(x_r, y_t, -n)$  は、投影中心を原点とした場合の前方クリッピング面の左下と右上の隅の座標を表す。また、 $n$  と  $f$  はそれぞれ、前方および後方クリッピング面までの距離を表す。このビューボリューム

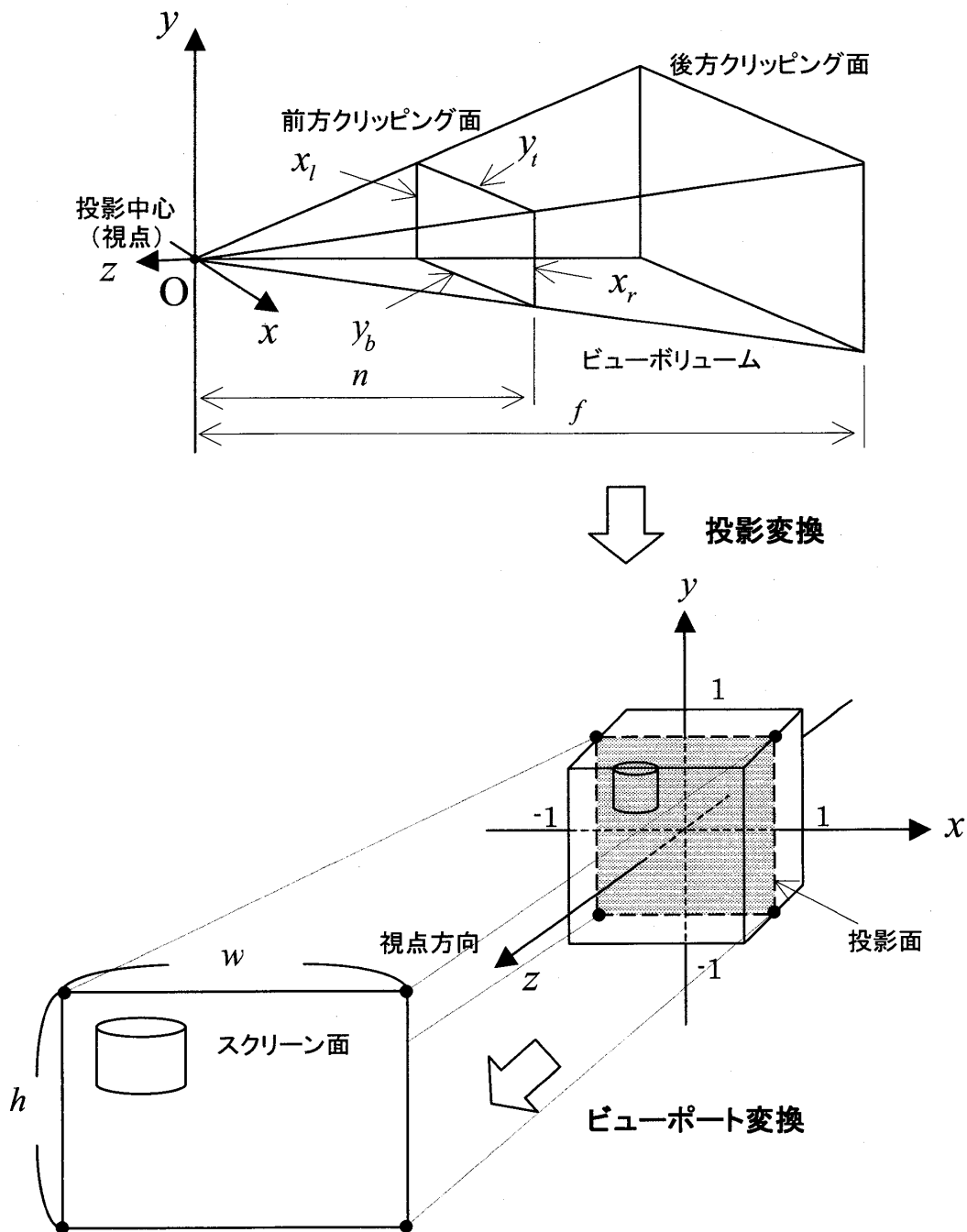


図 2 OpenGL におけるビューボリュームの定義と投影変換・ビューポート変換

の内部が、原点を中心に、 $\pm 1$ の座標で囲まれた1辺2の正規化された立方体領域に投影変換され、ビューポート変換により画面に表示される。

## 2.2 off-axis 法の投影変換式と視差の計算

off-axis 法の投影変換式を導出し、投影像のディスプレイ上の位置を求めるために、ビューボリュームを図3に示すように設定する。

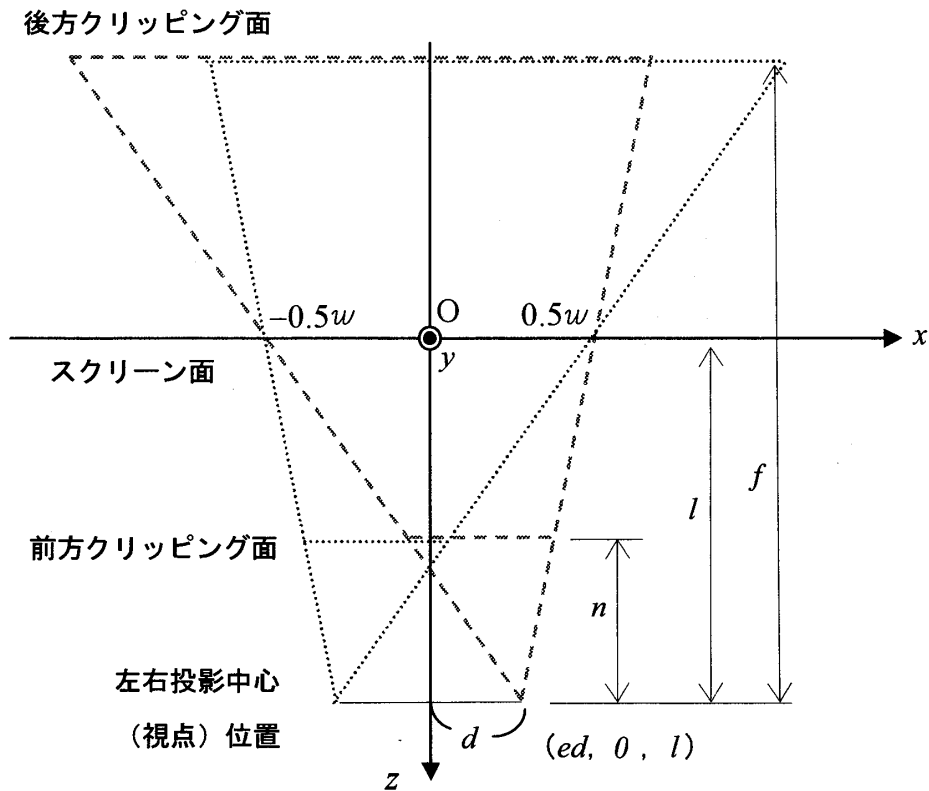


図3 off-axis 法におけるビューボリューム

ここで、各記号の意味は次の通りである。

$e$  : 左右眼の区別 (右眼 = 1.0, 左眼 = -1.0)

$d$  : 視点間距離の1/2の値

$l$  : 視点からスクリーン面 (ディスプレイ面) までの距離

$w$  : スクリーン (ディスプレイ) の横の大きさ

$h$  : スクリーン (ディスプレイ) の縦の大きさ

$n$  : 視点から前方クリッピング面までの距離

$f$  : 視点から後方クリッピング面までの距離

図2と図3より、前方クリッピング面の左右  $x$  座標と上下  $y$  座標は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 x_r &= \frac{n(0.5w-ed)}{l} \\
 x_l &= -\frac{n(0.5w+ed)}{l} \\
 y_t &= \frac{0.5hn}{l} \\
 y_b &= -\frac{0.5hn}{l}
 \end{aligned}$$

投影変換によって、ワールド座標空間上の点  $Q = {}^t(x, y, z)$  が  $Q' = {}^t(x', y', z')$  に移動するとすれば、点  $Q'$  は、投影変換行列  $P$ 、視点移動のための幾何変換行列  $T$  を用いて次のように表される。

$$Q' = PTQ \quad (1)$$

これを同次座標系で表すと次式の通りとなる。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ W' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 & B & 0 \\ 0 & C & D & 0 \\ 0 & 0 & E & F \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -ed \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(x-ed) + B(z-l) \\ Cy + D(Z-l) \\ E(z-l) + F \\ -(zx-l) \end{pmatrix} \quad (2)$$

図2と図3より行列  $P$  の各要素の値は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{2n}{x_r - x_l} = \frac{2n}{\frac{n(0.5w-ed)}{l} + \frac{n(0.5w+ed)}{l}} = \frac{2l}{w} \\
 B &= \frac{x_r + x_l}{x_r - x_l} = \frac{-\frac{nz ed}{l}}{\frac{nw}{l}} = -\frac{zed}{w} \\
 C &= \frac{2n}{y_t - y_b} = \frac{2n}{\frac{0.5hn}{l} + \frac{0.5hn}{l}} = \frac{2l}{h} \\
 D &= \frac{y_t + y_b}{y_t - y_b} = \frac{\frac{0.5hn}{l} - \frac{0.5hn}{l}}{\frac{0.5hn}{l} + \frac{0.5hn}{l}} = 0 \\
 E &= \frac{-(f+n)}{f-n}
 \end{aligned}$$

$$F = \frac{-2fn}{f-n}$$

投影像の  $x$  座標 (実座標) は次のように求められる.

$$x' = \frac{X'}{W} = \frac{A(x-ed) + B(z-l)}{-(z-l)} = -\frac{2l(x-ed)}{w(z-l)} + \frac{2ed}{w} \quad (3)$$

ディスプレイ面上の 1 点の水平視差を求めるには, 式(3)に左右眼の  $e$  の値 (右眼 = 1, 左眼 = -1) を代入し, 左右投影像の  $x$  座標  $x'_L$  と  $x'_R$  の差を求めればよい.

すなわち, off-axis 法における水平視差は, 正規化座標空間では以下のように表される.

$$x'_L - x'_R = \frac{1}{w} \left[ \frac{-2l(x+d) + 2l(x-d)}{z-l} - 2d - 2d \right] = -\frac{1}{w} \cdot \frac{4dz}{z-l}$$

図 2 に示すように, ビューポート変換により,  $\pm 1$  に規格化されたビューボリューム内が横幅  $w$  の画面に投影されるので, 画面上の水平視差  $D_H$  は次の通りとなる.

$$D_H = \frac{w}{2} (x'_L - x'_R) = -\frac{2dz}{z-l} \quad (4)$$

式(4)には,  $x, y$  座標の値が含まれていないため, off-axis 法の水平視差は, 奥行き  $z$  が同じであれば画面のどの位置でも等しくなることがわかる.

同様に, 投影像の  $y$  座標 (実座標) を求める.

$$y' = \frac{Y'}{W} = \frac{Cy + D(z-l)}{-(z-l)} = \frac{2ly}{h(z-l)} \quad (5)$$

式(5)の右辺には左右眼像を区別する  $e$  の値が含まれていないため, 左右眼への投影像の  $y$  座標は同じ値になる. 従って off-axis 法では, 垂直視差  $D_V$  が含まれていないことがわかる.

$$D_V = 0 \quad (6)$$

なお, off-axis 法によるステレオ投影を OpenGL により実現するには, 次のプログラムリストによる描画を右目画像 ( $e = 1.0$ ), 左目画像 ( $e = -1.0$ ) についてそれぞれ 1 回ずつ実行すればよい.

```

glMatrixMode(GL_PROJECTION); // 投影変換行列スタックへの切り替え
glFrustum(xl, xr, yb, yt, n, f); // 投影変換の設定
glMatrixMode(GL_MODELVIEW); // 幾何変換行列スタックへの切り替え
glTranslatef(-e*d, 0.0, -1); // 視点位置への移動
DrawObject(); // 物体の描画
    
```

2.3 toe-in 法の投影変換式と視差の計算

次に, toe-in 法における投影変換の変換式を導出し, 視差の計算方法を示す. 図4に示すようにビューボリュームを定義する.

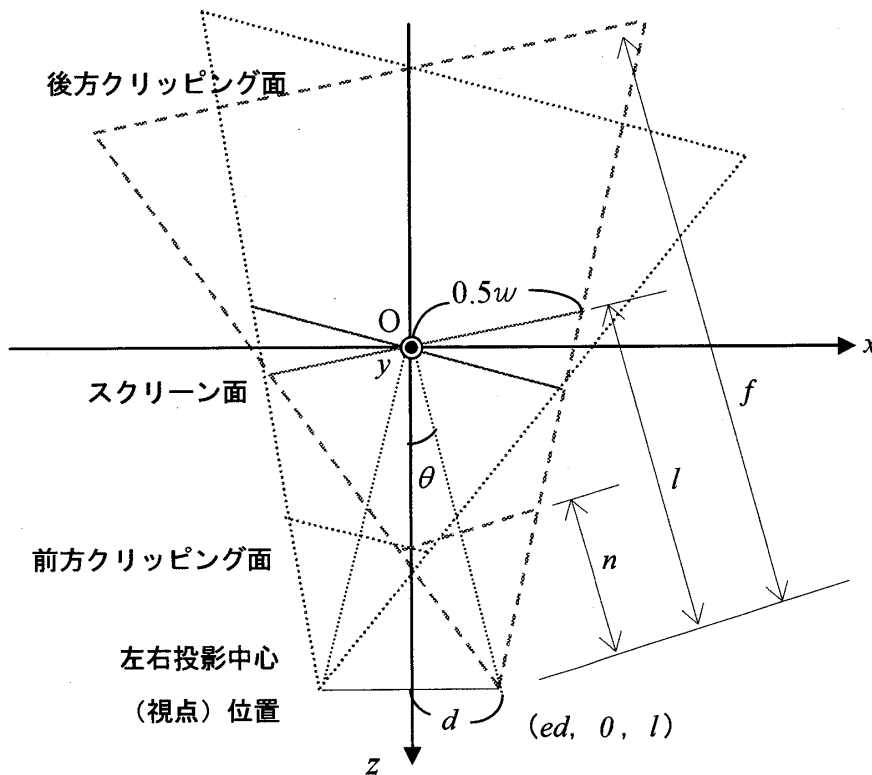


図4 toe-in 法におけるビューボリューム

図2に示した前方クリッピング面の左右  $x$  座標と上下  $y$  座標は次のように表される.

$$\begin{aligned}
 x_r &= \frac{0.5wn}{l} \\
 x_l &= -\frac{0.5wn}{l} \\
 y_t &= \frac{0.5hn}{l}
 \end{aligned}$$



$$y_b = -\frac{0.5hn}{l}$$

式(1)と同様に投影変換式を求めると以下のようなになる。

$$\mathbf{Q}' = \mathbf{PRTQ} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{R}$  は  $y$  軸まわりの回転行列であり、回転角  $\theta$  は図 4 に示す通り輻輳角の  $1/2$  に相当する。

式(7)を同次座標系で表すと次の通りとなる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ W' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A & 0 & B & 0 \\ 0 & C & D & 0 \\ 0 & 0 & E & F \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -ed \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} A\{(x-ed)\cos\theta - (z-l)\sin\theta\} + B\{(x-ed)\sin\theta + (z-l)\cos\theta\} \\ Cy + D\{(x-ed)\sin\theta + (z-l)\cos\theta\} \\ E\{(x-ed)\sin\theta + (z-l)\cos\theta\} + F \\ -(x-ed)\sin\theta + (z-l)\cos\theta \end{pmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

投影変換行列  $\mathbf{P}$  の各要素の値は次のように求められる。

$$A = \frac{2n}{x_r - x_l} = \frac{2n}{\frac{nw}{l}} = \frac{2l}{w}$$

$$B = \frac{x_r + x_l}{x_r - x_l} = 0$$

$$C = \frac{2n}{y_t - y_b} = \frac{2l}{h}$$

$$D = \frac{y_t + y_b}{y_t - y_b} = 0$$

$$E = \frac{-(f+n)}{f-n}$$

$$F = \frac{-2fn}{f-n}$$

また、図 4 より、 $\sin \theta$ 、 $\cos \theta$  の値は以下の通りである。

$$\sin \theta = \frac{ed}{\sqrt{(ed)^2 + l^2}}, \quad \cos \theta = \frac{l}{\sqrt{(ed)^2 + l^2}}$$

投影像の  $x$  座標を求める.

$$x' = \frac{X'}{W} = \frac{A \{(x-ed)\cos\theta - (z-l)\sin\theta\}}{-\sin\theta(x-ed) - \cos(z-l)} = \frac{1}{w} \cdot \frac{2l\{l(x-ed) - ed(z-l)\}}{-ed(x-ed) - l(z-l)} \quad (9)$$

$x'$  に左右視点それぞれの  $e$  の値 (右眼 = 1, 左眼 = -1) を代入し, 水平視差を求める.

$$x'_L - x'_R = \frac{1}{w} \cdot \left[ \frac{2l(lx+zd)}{xd+d^2-lz+l^2} - \frac{2l(lx-zd)}{-xd+d^2-lz+l^2} \right]$$

図2に示した投影変換によって  $\pm 1$  の領域に投影されたビューボリューム内が横幅  $w$  の画面にビューポート変換されるので, 画面上の水平視差  $D_H$  は次の通りとなる.

$$D_H = \frac{w}{2}(x'_L - x'_R) = \frac{l(lx+zd)}{xd+d^2-lz+l^2} - \frac{l(lx-zd)}{-xd+d^2-lz+l^2} \quad (10)$$

次に, 投影像の  $y$  座標を求める.

$$y' = \frac{Y'}{W} = \frac{Cy+D\{(x-ed)\sin\theta - (z-l)\cos\theta\}}{-\sin\theta(x-ed) - \cos(z-l)} = \frac{1}{h} \cdot \frac{2ly\sqrt{(ed)^2 + l^2}}{-ed(x-ed) - l(z-l)} \quad (11)$$

$y'$  の式に  $e = (\pm 1)$  の値をそれぞれ代入し, 引き算して垂直視差を求める.

$$y'_L - y'_R = \frac{1}{h} \cdot \left[ \frac{2ly\sqrt{d^2 + l^2}}{d(x+d) - l(z-l)} - \frac{2ly\sqrt{d^2 + l^2}}{-d(x-d) - l(z-l)} \right] \quad (11)$$

ビューボリューム内の  $y$  座標が  $\pm 1$  の領域が画面の縦の大きさ  $h$  に投影されるので, 画面上の垂直視差  $D_V$  は, 次の通りとなる.

$$D_V = \frac{h}{2}(y'_L - y'_R) = \frac{ly\sqrt{d^2 + l^2}}{dx+d^2-lz+l^2} - \frac{ly\sqrt{d^2 + l^2}}{-dx+d^2-lz+l^2} \quad (12)$$

なお, toe-in 法によるステレオ投影を OpenGL により実現するには, 次のプログラムリストによる描画を右目画像 ( $e = 1.0$ ), 左目画像 ( $e = -1.0$ ) についてそれぞれ実行すればよい.

```

glMatrixMode(GL_PROJECTION);          // 投影変換行列スタックへの切り替え
glFrustum(xl, xr, yb, yt, n, f);      // 投影変換の設定
glMatrixMode(GL_MODELVIEW);          // 幾何変換行列スタックの切り替え
gluLookAt(e*d, 0.0, l, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0); // 視点位置への移動
DrawObject();                          // 物体の描画

```

## 2.4 off-axis 法と toe-in 法の比較

式(4)と(6)および式(10)と(12)を用いて、off-axis 法と toe-in 法における水平視差と垂直視差を比較した。投影変換のパラメータは、後述する心理物理実験と同じものを用いた。すなわち、画面と被験者の視点の間の距離  $l = 50\text{cm}$ 、ディスプレイの横・縦の大きさ  $w = 30.4\text{cm}$ 、 $h = 27.2\text{cm}$ 、前方および後方クリッピング面までの距離  $n = 1.0\text{cm}$ 、 $f = 150.0\text{cm}$ である。また、視点間距離  $2d$  は、人間の両眼間距離の平均値の  $6.5\text{cm}$ を用いた。

図5に左右の投影像間の視差を座標点毎に示す。水平視差を  $x$  成分、垂直視差を  $y$  成分としたベクトルで表示している。図5(a)(b)に示す通り、off-axis 法では  $z = 0$  のスクリーン面では、画面上の全ての点において水平視差・垂直視差ともに0であるのに対し、toe-in 法においては、画面の周辺部で、水平視差・垂直視差ともに値が増加する。また、図5(c)(d)に示す  $z = 15$  の位置（スクリーン面から視点に向かって  $15\text{cm}$  の位置）では、off-axis 法では全ての点に対して一定の水平視差のみが生じるのに対し、toe-in 法では周辺部で垂直視差の増加が著しいことが分かる。

次に、画面中央部 ( $x = 0, y = 0$ ) および周辺部 ( $x = 6, y = 6$ ) における両投影法の垂直視差・水平視差を、奥行き量（スクリーン面から観察者までの距離） $z = 0 \sim 40\text{cm}$  に対して計算した。結果を図6に示す。

図6(a)に示す通り、画面中央部では、toe-in 法、off-axis 法ともに大きな違いはない。また垂直視差については、ともに0である。一方、図6(b)に示す画面周辺部では、 $z$  が  $20 \sim 25\text{cm}$  より大きな領域で両投影法間の差異が顕在化する。toe-in 法は、水平視差が off-axis 法よりも小さな値を取る。また垂直視差については、off-axis 法は常に0であるのに対して toe-in 法ではこの付近の領域から急増する。

図7に奥行き距離  $z = 15\text{cm}$ 、画面中央  $(x, y) = (0, 0)$  と上下左右8カ所  $x = 0, \pm 10, y = 0, \pm 8$  に直径  $4\text{cm}$  のワイヤフレーム球を設定した時の(a) off-axis 法および(b) toe-in 法による投影図を示す。ここで、球の最も視点に近い点、すなわち、球の中心より半径  $2\text{cm}$  手前の場所に、目安としてドットを表示した。図7では、球がスクリーンよりも前方に位置する交差視差条件となっており、2重に見える投影像の左側が右目像、右側が左目像に相当する。

図7(a)(b)を比べると、画面中央部  $(0, 0)$  とその上下の位置  $(0, 8), (0, -8)$  では、両投影法による投影図の間にはほとんど差異が無いことが分かる。これは、図5と図6(a)に示した通り、画面中心部の  $y$  軸近辺では、両投影法とも垂直視差がなく、水平視差が一致するためである。

球の位置が  $x$  軸上の周辺位置  $(10, 0)$  および  $(-10, 0)$  においては, 図 7 (b) に示すの toe-in 法の左右投影像の大きさが異なっている. 周辺部では左右眼から球までの距離が異なるためである. これは, 図 5 (b) に示した通り, toe-in 法の垂直視差の効果が  $x$  軸を境に反対方向に増加することに対応している. さらに, 画面の斜め上と下の 4 カ所  $(10, 8)$ ,  $(10, -8)$ ,  $(-10, 8)$ ,  $(-10, -8)$  においては, 左右投影像の上下方向の位置関係も大幅に異なってしまう, ステレオ画像対を融合して立体視を行うことが困難であった.

一方, 図 7 (a) に示した off-axis 法では, 左右投影像の大きさや位置の違いが画像のひずみとして吸収されてしまうことが分かる. ひずみの大きさがステレオペアの融合に及ぼす影響に

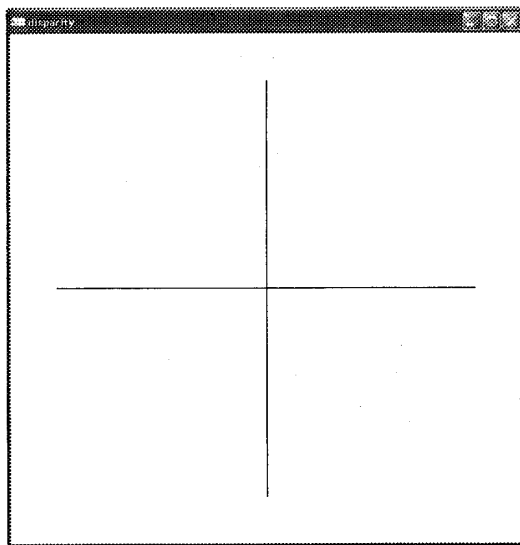
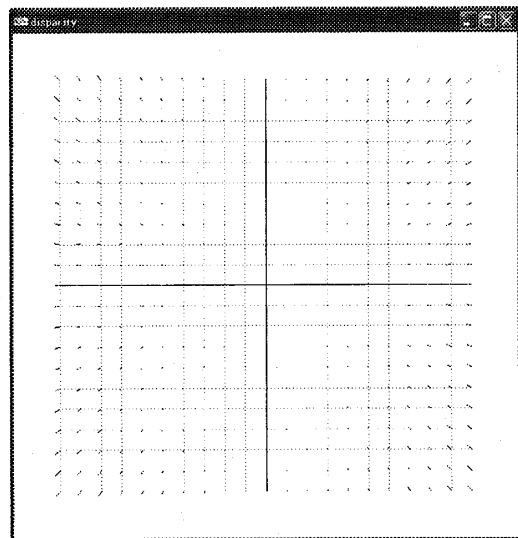
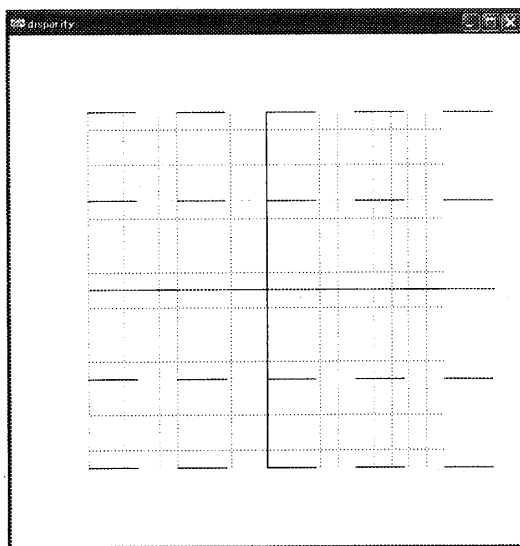
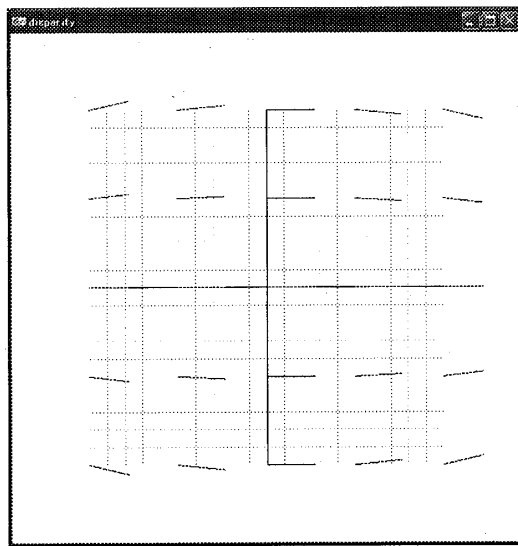
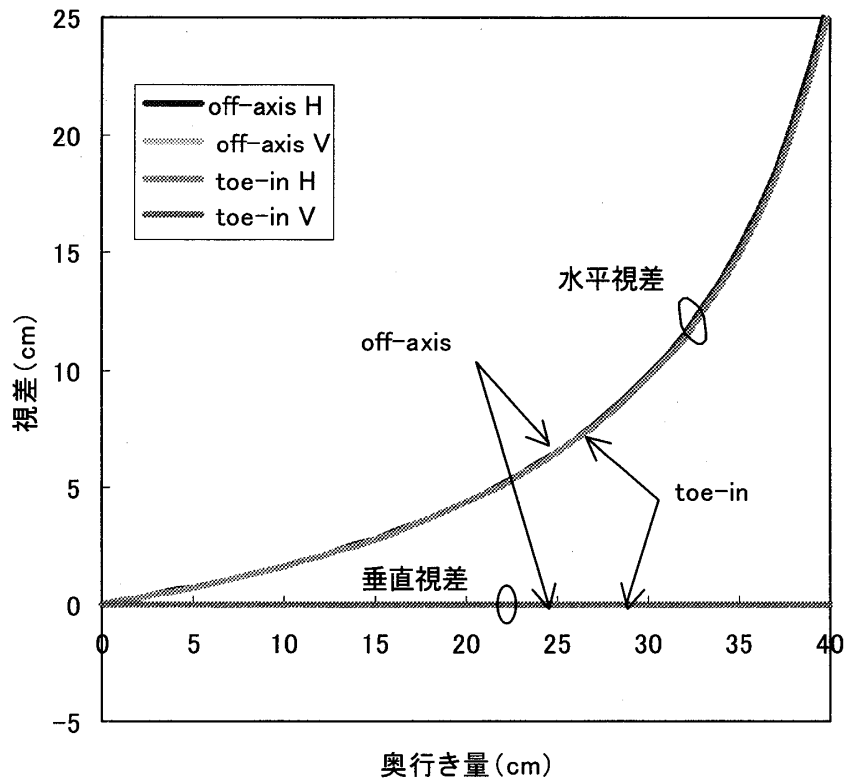
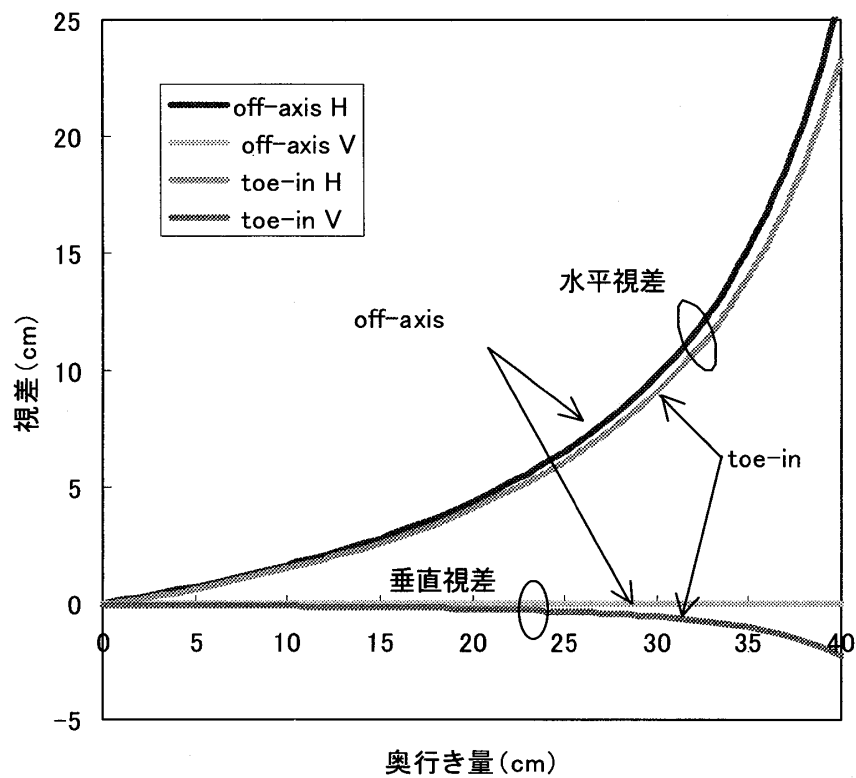
(a) off-axis 法 ( $z = 0$ )(b) toe-in 法 ( $z = 0$ )(c) off-axis 法 ( $z = 15$ )(d) toe-in 法 ( $z = 15$ )

図 5 画面上の各点における水平視差と垂直視差

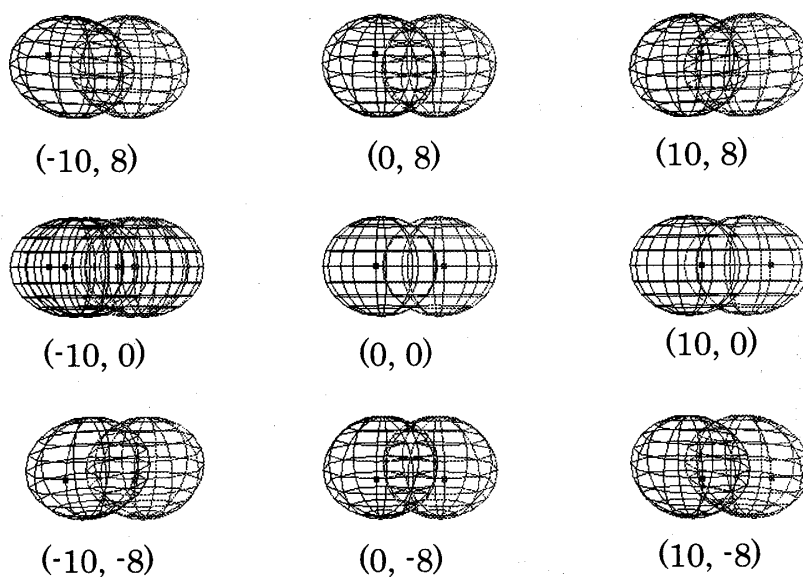


(a) 画面中央部 ( $x = 0, y = 0$ )

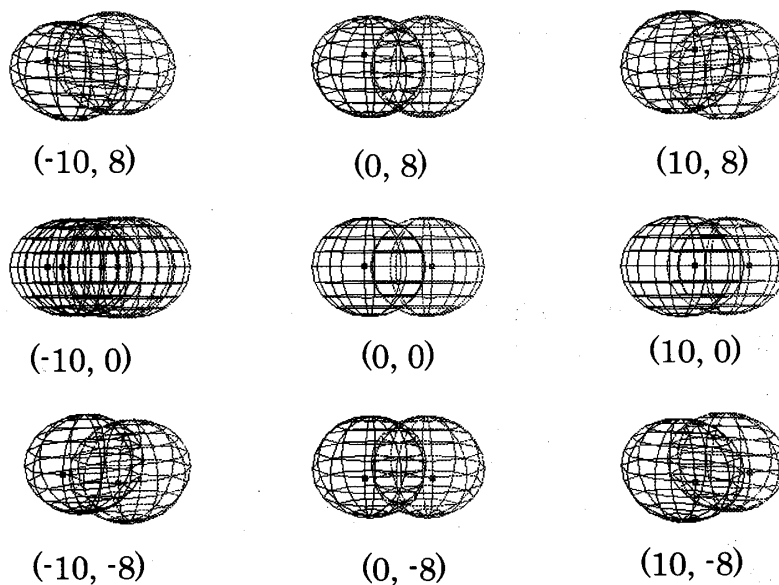


(b) 画面周辺部 ( $x = 6, y = 6$ )

図6 toe-in 法と off-axis 法における水平視差 (H), 垂直視差 (V) の比較



(a) off-axis 法によるステレオ投影像



(b) toe-in 法によるステレオ投影像

図7 位置  $(x, y)$  における球のステレオ投影像 ( $z = 15\text{cm}$ )

関しては、物体の形状や提示条件に依存するためにさらなる検討が必要であるが、図7に示した例では、off-axis法の画像は立体視が可能であった。

以上の結果、画面中央部とその上下の空間では、奥行き距離 $z$ のほぼ全ての領域においてoff-axis法とtoe-in法は生成されるステレオ画像にほとんど差が無いこと、画面水平軸上の周辺部では、奥行き距離 $z$ の増加に伴ってtoe-in法では左右投影像の大きさの差異が増大すること、画像斜め上下の領域ではさらに位置関係にも大きな差異が生じ立体視が著しく阻害さ

れることが明らかになった。またこの傾向は、奥行き距離 $z$ がある特定の値より大きくなると急増することも分かった。

off-axis法では、画面の周辺部で画像のゆがみが観測されたが、立体視の観点からは、左右投影像の大きさや垂直方向の位置の違いの方が悪影響を及ぼすことを考えると、off-axis法はステレオグラフィックスにおける投影法としてtoe-in法よりも有効であると考えられる。

### 3. 奥行き感の心理物理学的検討

off-axis法を用いたステレオ画像における奥行きと物体形状の知覚特性について心理物理実験による検討を行った。ここでは、投影中心の間の距離すなわち視点間距離 $2d$ に注目し、画面から物体が飛び出して見える交差視差条件の融合限界における知覚特性を調べた。実写用のステレオカメラやtoe-in法によるステレオ画像では、画像上の視差を決める要因は、左右視点間距離と輻輳角があるが、off-axis法では視点間距離に輻輳角が連動して変化する。従って、視点間距離のみが投影像の性質に影響を与えるパラメータとなる。

知覚される奥行きと物体の大きさについて2種類の実験を行った。実験1は、融合限界における奥行き知覚特性を評価する実験であり、実験2は物体形状の知覚特性を評価するための実験である。

#### 3.1 実験1

刺激を提示するディスプレイ面を視差ゼロのスクリーン面に一致させ、奥行き方向（画面から被験者に向かう方向）における交差視差画像の融合限界を測定した。次に、その融合限界において知覚される奥行き量を測定した。

##### 3.1.1 実験方法

###### [刺激]

赤青アナグリフ方式によるワイヤフレーム球のステレオ画像を液晶ディスプレイ（1280×1024ピクセル）にて提示した。球の直径は4cm（ピンポン玉大）、縦・横方向の分割数10×10である。投影法はoff-axis法を用い、ディスプレイの画面を視差ゼロのスクリーン面とした場合に、被験者の視点とディスプレイの位置関係が、CGの世界座標空間と一致するように投影変換のパラメータを決定した。被験者とディスプレイの間の距離 $l = 50\text{cm}$ 、画面の大きさ $w = 34.0\text{cm}$ 、 $h = 27.2\text{cm}$ である。また、視点間距離 $2d = 6.5, 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0\text{cm}$ （可変）とした。

###### [被験者]

被験者は大学生5名で、裸眼もしくは矯正視力が1.0以上であった。

### [提示条件]

刺激の移動速度を変えた4条件について実験を行った。

条件A：静止刺激を被験者自身がキー操作で奥行き方向に前後に動かす

条件B：刺激がスクリーン面から被験者に向かって毎秒3.125cmで移動する

条件C：刺激がスクリーン面から被験者に向かって毎秒6.25cmで移動する

条件D：刺激がスクリーン面から被験者に向かって毎秒12.5cmで移動する

それぞれの条件毎に、視点間距離の値を6.5, 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0 (単位cm) とした7種類の見え方のパターンを生成させた。

### [実験の手続き]

#### (1) 融合限界の測定

上記の4条件で、7種類の視点間距離のパターンをスクリーン面にランダムな順番で提示した。被験者が融合限界と感じた時に提示されていた球の奥行き量 $z$ を物理的奥行き量として記録した。なお、条件Aでは、静止刺激を被験者自身がキーボード上のキー操作により奥行き方向に動かして融合限界を決めた。被験者の顔の位置は顎台により固定した。全ての条件で、各視点間距離について10回ずつ試行を行い、被験者ごとにデータを分析した。

#### (2) 融合限界で知覚される奥行き量の測定

(1)で明らかとなった融合限界の物理的奥行き量に対して、実際に知覚される奥行き量を測定した。条件A～Dそれぞれにおいて、融合限界で刺激が見えている位置を被験者が指差して示し、画面からの距離を測定した。また、動きを伴う条件B～Dでは、被験者は指先を刺激に追従させて動かしながら刺激の見えている位置を示し、融合限界と感じた時に手を止めて指先位置を測定した。被験者の顔の位置は顎台により固定した。全ての条件で、各視点間距離について5回ずつの試行を行い、被験者ごとにデータを分析した。

### 3.1.2 結果および考察

図8に各視点間距離における融合限界の物理的奥行き量を示す。被験者毎のデータは、個人差はあるものの、傾向がほぼ同じであるため、ここでは全被験者の平均値を表示した。視点間距離が小さくなるほど融合限界の物理的奥行き量は増加する。すなわち、被験者はより近距離まで立体視が可能であったことを示している。刺激の移動速度の影響に関しては、全ての視点間距離に対して、速度が大きくなるほど物理的奥行き量は大きくなる傾向がある。ただし、条件Dでは刺激の移動速度が大きいために被験者の反応時間が融合限界の奥行き量を増加させている可能性もあり、詳細な分析を行うには評定方法の見直しも含めて再検討する必要がある。

図9に図8のデータを第2章の式(4)に代入して求めた融合限界における刺激の最大視差(刺激上の視点に最も近い点で計算した水平視差)の値を示す。融合限界における最大視差は、提示条件や被験者間の個人差はあるものの、視点間距離の値には依存せずほぼ一定の値をとった。

図10に融合限界で知覚される奥行き量の測定結果をA～Dの提示条件ごとに示す。図中には



物理的な奥行き量と上述した最大視差の値も示している。全てのグラフは傾向が一致しており、知覚される奥行きは視点間距離によらずほぼ一定値を取り、最大視差と同じ傾向を示している。物理的な奥行きは、視点間距離の増加に伴って減少するが、人間の両眼間距離と同じ6.5cm付近で知覚される奥行きと物理的な奥行きがほぼ一致しており、ステレオ投影のパラメータが実世界のパラメータと一致する場合には正しい奥行き感が得られていることも分かる。

これらの結果から、交差視差条件での融合限界は、提示される刺激の最大視差によって決まり、その時に知覚される奥行き量はほぼ一定であることが明らかになった。最大視差と知覚される奥行きの平均値を求めると、条件A～Dでそれぞれ5.2, 4.2, 5.2, 6.2° および20.9, 18.2, 20.1, 22.6cmであった。融合限界の視差としてはパヌムの融合域(約1°)<sup>[3][4]</sup>が知られているが、眼球運動の無い状態での計測が前提となる。本研究の結果は、融像性眼球運動を含めた融合限界を示すものであり、江本ら<sup>[16]</sup>が301名の被験者に対してランドルト環を用いて測定した融像性輻湊限界(交差視差条件で5.04度)とほぼ一致している。

一般に、人間の両眼間距離は6.5cm程度なので、投影上の視点間距離を通常の6.5cmより小さい値に設定すると、視差と輻湊角による左右投影像の回転が大きく変化する。つまり、画像自体の見え方としては、視差や回転が実際よりも小さい変化で画像の物理的な奥行き量が増加するため、画像の見えている奥行き量が増加するより膨張しているように見える傾向がある。また、視点間距離の値が極端に小さい場合には、輻湊の情報を実物体を見る場合と比較して大きく異なり画像の立体感が損なわれてしまう。実写のステレオ画像で問題となる書き割り効果<sup>[17][18]</sup>に相当する現象である。今回の実験結果では、両眼間距離が短い場合には、刺激の見え方は大きく異なるが、最大視差と知覚された奥行き量はほぼ一定の値となることが示された。

さらに、図10の視点間距離5.0～6.5cmの部分に注目すると、視点間距離が実際の6.5cmに近

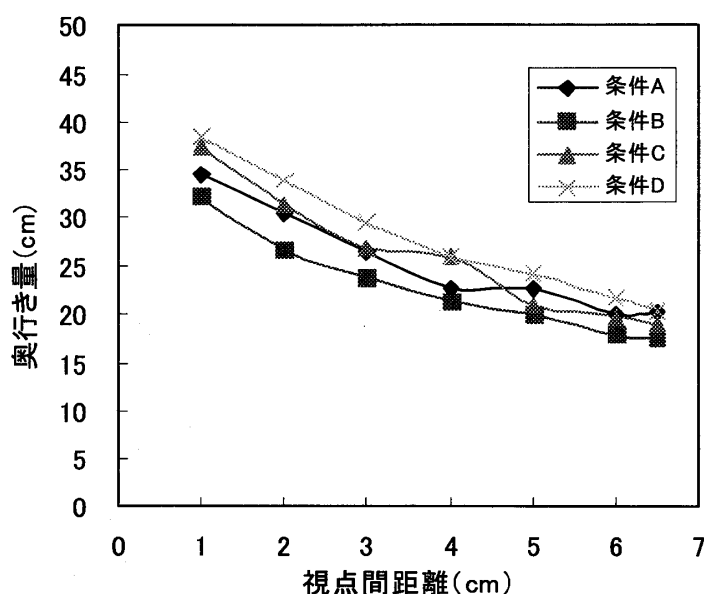


図8 視点間距離と物理的奥行き量の関係

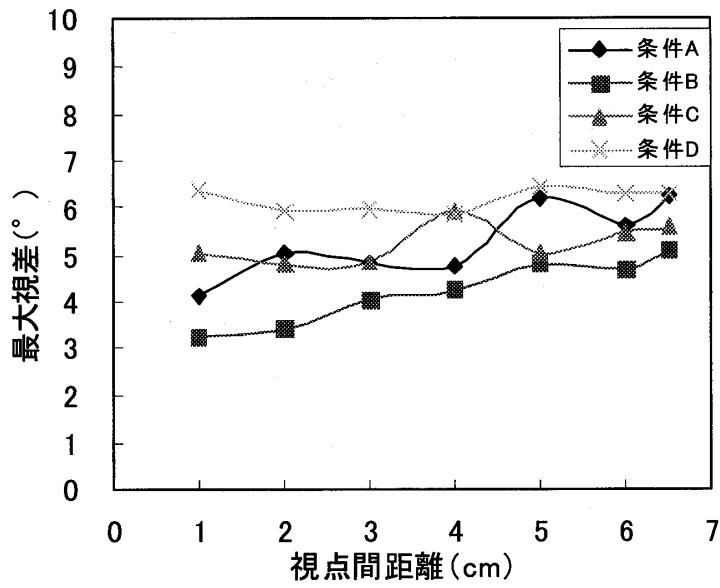


図9 物理的奥行き量に対する刺激の最大視差

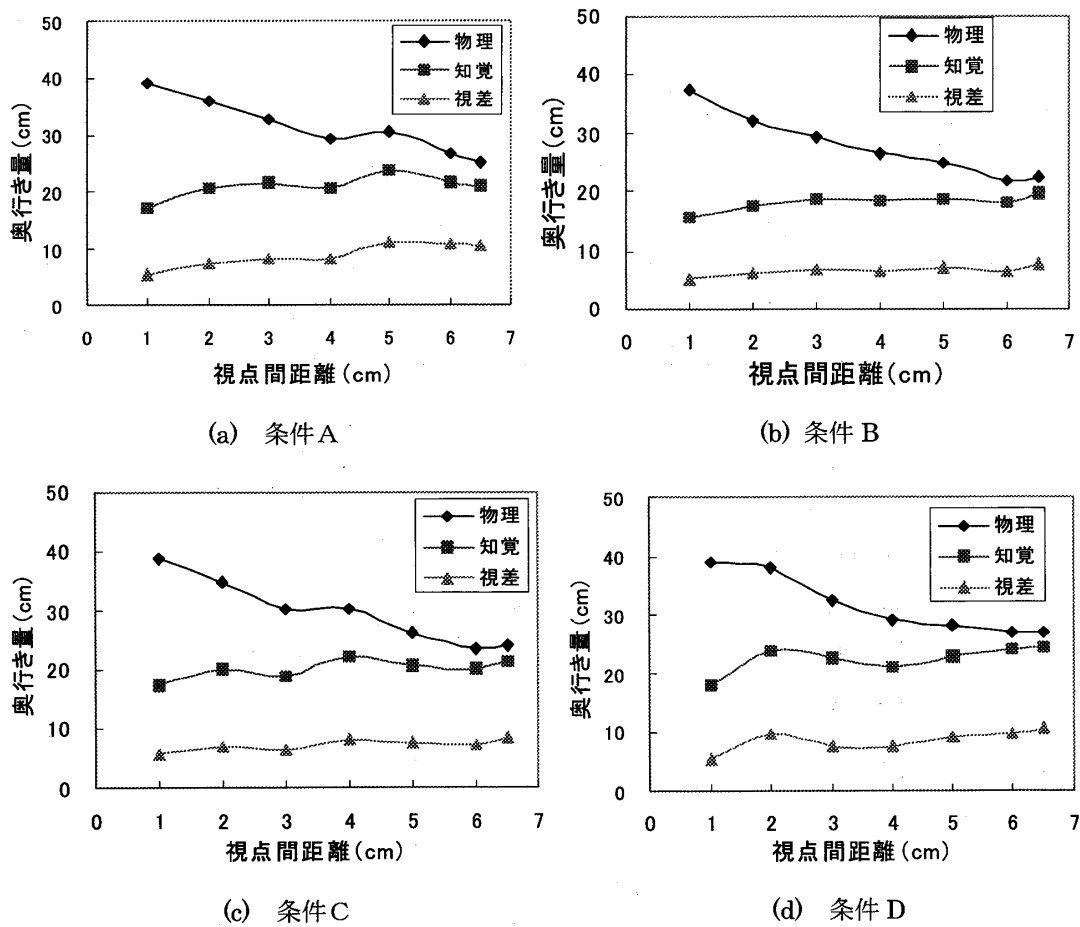


図10 各条件において融合限界で知覚された奥行き量

づく程、物理的奥行き量と知覚された奥行き量の値が接近し、同じ傾きに沿って奥行き量が増加する傾向にあることがわかる。この傾向は、個人差があるが、被験者によってはさらに顕著に認められた。これは、ステレオ投影の視点間距離を5 cmまで減少させても、人間の視覚系は刺激の質的な立体感や奥行き感を損なわずにより自然に近い立体視が可能であることを示していると考えられる。

## 3.2 実験2

実験1において、視点間距離を極端に小さくした場合には、融合限界の奥行き量が大きくなるとともに、実験刺激の球が平面的に見え、奥行き量の増加に伴い膨張するという現象が起きた。そこで、実験2では、それぞれの視点間距離での融合限界において知覚される球の直径を測定した。

### 3.2.1 実験方法

#### [刺激]

実験1と同じ刺激を同じ方法で提示した。

#### [被験者]

成人男女2名（平均年齢33歳）が実験に参加した。両者とも裸眼もしくは矯正視力が1.0以上である。

#### [提示条件]

静止した刺激を視点間距離と奥行き量を変えて提示した。視点間距離は、実験1と同様に6.5, 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0cmの7種類とした。刺激を提示した奥行き量は、各視点間距離において、実験1で示された融合限界付近の視差 $5^\circ$ とその半分 $2.5^\circ$ に相当する距離とした。図11に示す各視点間距離に対する奥行き量の計算結果から、視差 $5^\circ$ の場合には、各視点間距離に対する奥行き量は、それぞれ21.7, 22.7, 25.0, 27.8, 31.3, 35.7, 41.7 (cm)となり、視差 $2.5^\circ$ の場合には、13.9, 14.7, 16.7, 19.2, 22.7, 27.8, 35.7 (cm)となった。

#### [実験の手続き]

被験者は、最初に刺激の見える位置を指差し、実験者がディスプレイ面からの距離（知覚される奥行き量）を測定した。続いて、ノギスの副尺の開きを調節して知覚される球の直径を評定した。被験者の顔は顎台により固定した。視差の $5^\circ$ と $2.5^\circ$ の各条件において、7種類の視点間距離に対して5回ずつ測定を行った。

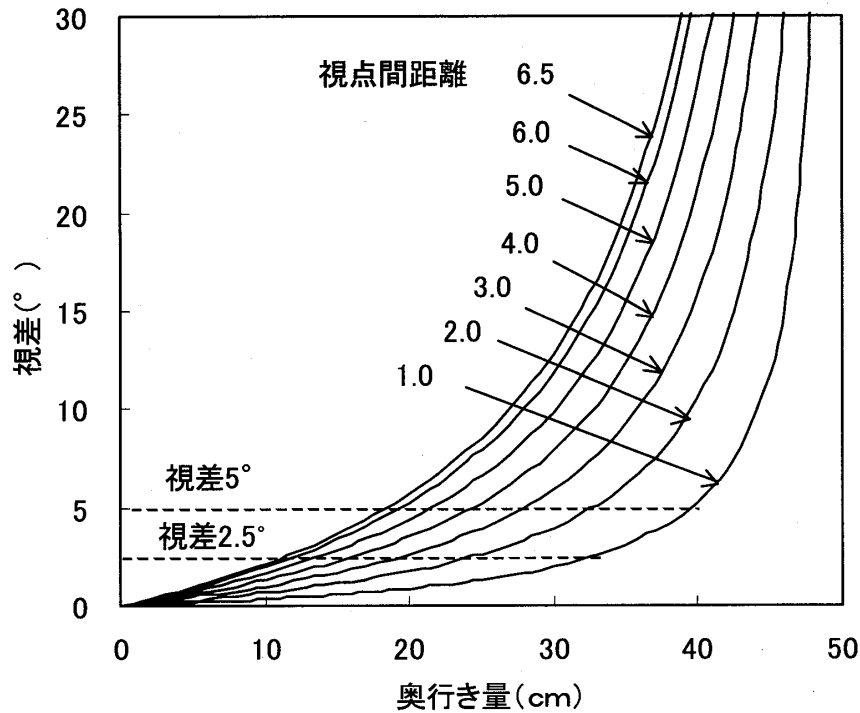


図11 各視点間距離における奥行き量と視差の関係

3.2.2 結果および考察

視差2.5° および視差5° の条件において、各視点間距離に対して知覚される球の直径の計測結果をそれぞれ図12と図13に示す。エラーバーは、5回の計測の標準偏差を示している。2名の被験者では個人差はあるものの傾向はほぼ一致しており、知覚される球の直径は、視点間

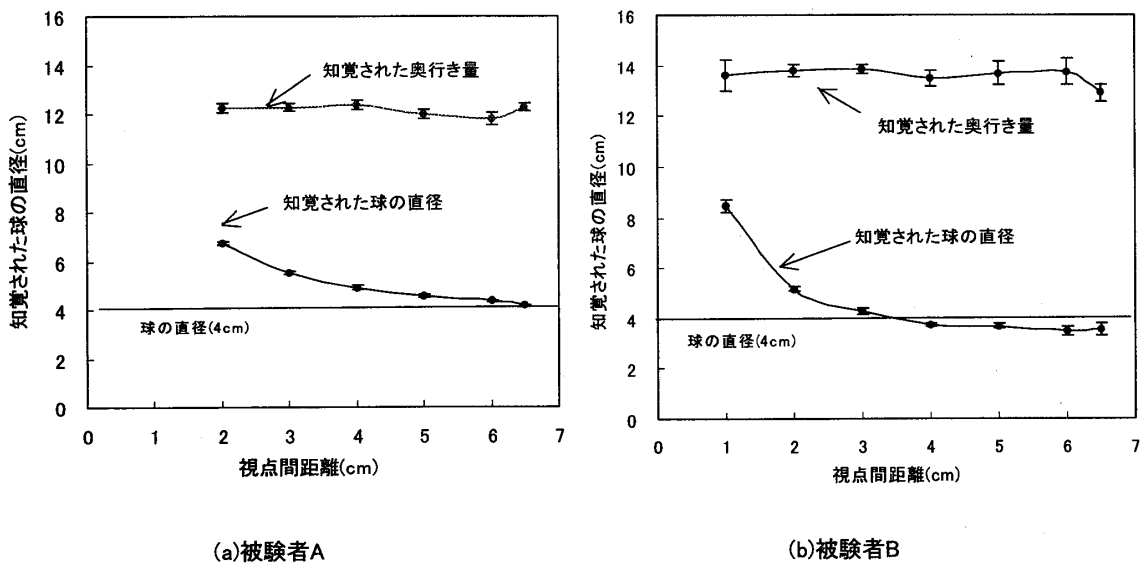


図12 視差2.5度の条件で知覚された球の直径と奥行き量

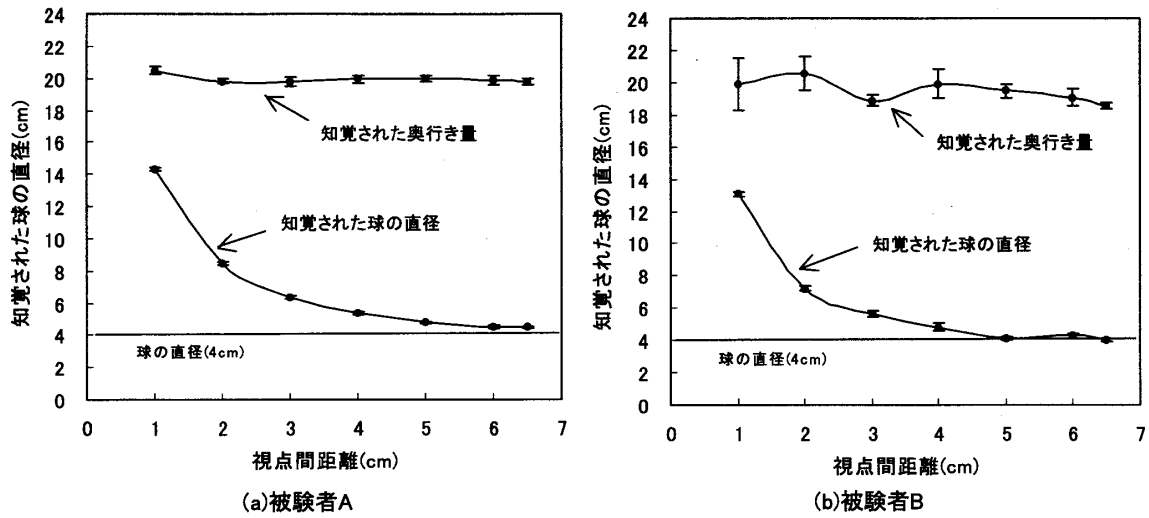


図13 視差5度の条件で知覚された球の直径と奥行き量

距離の増加とともに減少し、5 cm前後の値より大きい場合にはほぼ一定の値（本来知覚されるべき大きさである4 cm付近の値）となった。図中には、知覚された奥行き量も同時に示してあるが、視差の値が一定であるため、知覚された奥行き量は実験1と同様にほぼ一定の値をとった。視差 $2.5^\circ$ と $5^\circ$ 間の差異は、視点間距離が小さい領域での球の直径に現れるが、いずれの条件においても視点間距離が5 cmより大きくなるとほぼ実物の球の大きさ（直径4 cm）が知覚されている。

図14と図15には、視差 $2.5^\circ$ と $5^\circ$ の条件における刺激の奥行き量に対する球の画面上での直径の計算値に2名の被験者の評定結果を重ねて示した。奥行き量の増加に伴って画面上の球の大きさが増大するが、視点間距離が6.5~5 cm程度までは、大きさの恒常性が保たれており、知覚される直径が球の真の大きさである4 cm付近の値を取る。また、視点間距離がそれより小さくなると球が膨張して見えることが分かる。

実験2の結果は、知覚される球の直径に関して、実験1で調べた奥行きと同様に、視点間距離が5~6.5 cmの範囲においては正確な形状が知覚されることを示している。

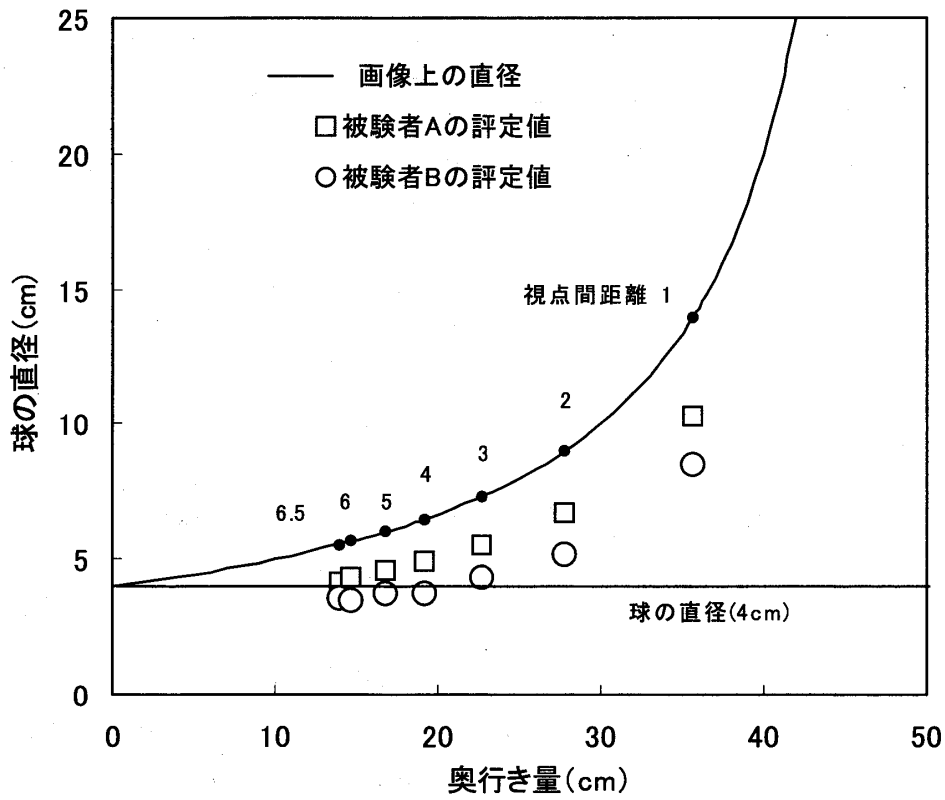


図14 異なる視点間距離での融合限界において知覚された球の直径 (視差2.5度)

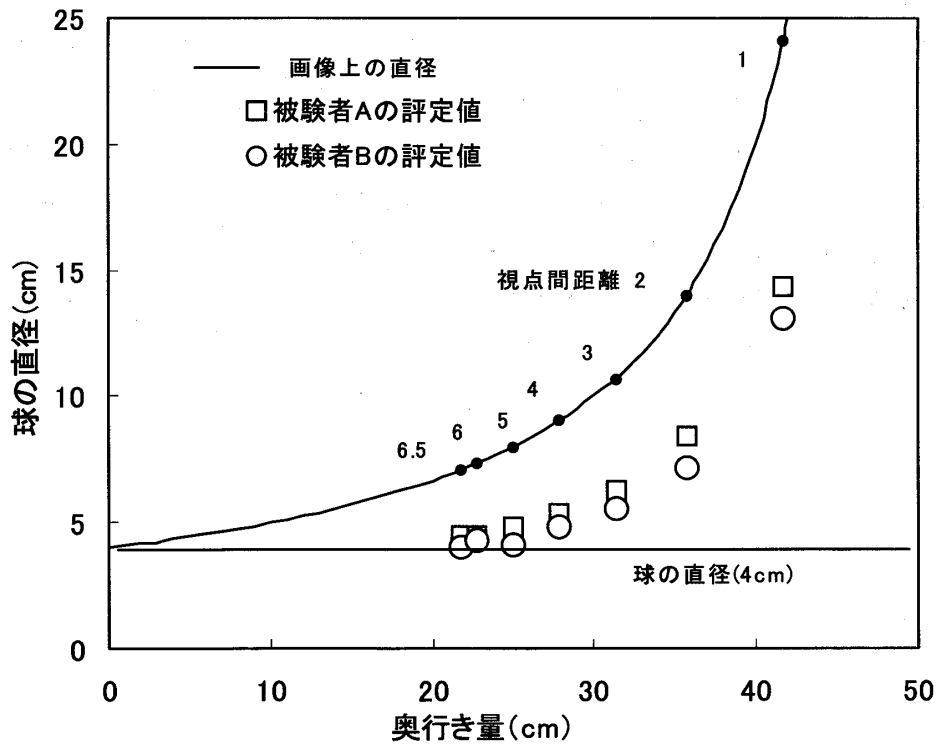


図15 異なる視点間距離での融合限界において知覚した画像の直径 (視差5度)

#### 4. 総合考察

本論文の前半では、off-axis法とtoe-in法の比較を行い、画面中央部の投影像には両者の間に差がほとんど生じないこと、周辺部ではtoe-in法は垂直視差の影響で左右投影像の大きさや垂直方向の位置関係のずれが生じて立体視が阻害されることを明らかにし、off-axis法の有効性を示した。ここでは、後半の心理物理実験の結果を踏まえて、off-axis法に基づく有効なステレオ投影法について考察する。

ステレオ画像の観察時に生ずる疲労感は、焦点調節と輻輳の不整合が原因であるが<sup>[1]</sup>、2眼式ステレオグラフィックスでこれを解消するには、輻輳角を小さくして表示画面が焦点深度内に収まるようにする必要がある。ただし、輻輳角を小さくするとステレオ画像の奥行き感も損なわれることになる。本研究の実験1と2により、視点間距離が5~6.5cmの範囲であれば、知覚される物体の奥行きと大きさは物理的な奥行きと大きさにほぼ一致することを示した。off-axis法ではスクリーン位置が固定された非対称なビューボリュームを利用しているため、視点間距離を小さくすることは輻輳角を減少させる効果がある。すなわち、知覚される奥行き量や画像の見え方の正確さにこだわらない場合には、off-axis法の視点間距離を実際より小さい5~6cm程度にすることにより、奥行き感と立体感を損なわずに、疲労感を低減することが可能であると考えられる。

さらに有効なステレオ投影法を検討するため、左右投影像の性質について検討した。off-axis法において左右投影像を立体視せずに観察すると、視点間距離を連続的に変化させた時の投影像の変化は、物体位置の水平方向の平行移動と物体の中心軸まわりの回転の組み合わせとして表されていることが分かった。これは、視点位置が左右に変化すると、異なる角度から物体が観察されることに対応している。今回の実験では、視点間距離の設定値が極端に小さい場合には、投影像の回転成分がほとんどなくなるため、物体が平面的に見えてしまい、扁平な球が空間上に浮かんでいるように知覚された。すなわち、投影像の水平方向の平行移動は立体視が成立した時の奥行き位置の知覚に、また回転は物体自体の立体感の知覚に関与するものと考えられる。また、回転に関しては、投影像の回転角が大きい場合には、左右ステレオ画像間の対応がとれず立体視を阻害する要因でもあると考えられる。今回の実験でも、視点間距離の設定を最大の6.5cmとして物体を接近させた場合には、物体の回転角が大きくなり、奥行き量が多い場合に立体視が困難となった。またこの時立体視による疲労感を強く感じた。

これらの検討結果を基に、さらに効果的な立体映像を生成するには、左右投影像の水平方向の平行移動量を大きく、また物体の回転量を小さく表現することが有効であると考えられる。具体的には、左右投影像の回転は、投影上での視点間距離を人間の視点間距離の6.5cmより小さい値である5cm程度に設定した時の状態にし、投影像の平行移動量のみを6.5cmと同様かそれより大きく変化させると、立体視における疲労感を低減し、融合限界で知覚される奥行き量を増加させることができると考えられる。

このような方法は、ステレオグラフィックスの応用分野において、医療や教育など正確な提示が求められる分野では不適當であるが、エンターテインメントの分野では画像の正確さより観察時の疲労感を低減することが重要な課題であるため効果的であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、off-axis法を利用したステレオ投影法の有効性について示し、心理物理実験により奥行きと形状知覚の特性について明らかにした。この結果は、2眼式ステレオグラフィックスにおいて、奥行き感や立体感を損なわず疲労感を低減したステレオ画像の表示に有効な知見を与えるものである。本研究で提案した新しい投影法に関しては、具体的な投影変換式を導いて実際の効果を確認する必要がある。また、今回は机上に設置したディスプレイ上での交差視差条件に限定して実験を行っているが、遠方の奥行き感を与える平行視差条件や大画面表示にした場合の効果、さらにはtoe-in法に見られた垂直視差が立体視に及ぼす影響の定量的な評価など心理物理実験を通して明らかにすべき点が残されていると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費（基盤研究（B）, 課題番号 14350086）によって行われたことを付記する。心理実験にご協力頂いた関西大学総合情報学部林武文ゼミ第8期生の皆様に感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] 泉武博 監修, NHK 放送技術研究所編, “3次元映像の基礎”, オーム社 (1995).
- [2] 谷千束 責任編集, “高臨場感ディスプレイ”, 共立出版 (2001).
- [3] I. P. Howerd and B. J. Rogers, “Binocular Vision and Stereopsis”, OXFORD UNIVERSITY PRESS (1995).
- [4] 原島博 監修, 元木紀雄・矢野澄男 共編, “3次元画像と人間の科学”, オーム社 (2000).
- [5] L. Lipton, “A guide to creating stereoscopic images for StereoGraphics Stereo3D displays”, Stereo Graphics, <http://www.stereographics.com/> (1997).
- [6] 河合隆史, “立体映像表現”, カットシステム (2003).
- [7] 村田治彦, “3次元映像の合成技術: 2D/3D変換技術”, 映像情報メディア学会誌, 54,3, pp.332-337 (2000).
- [8] Paul Bourke, “Calculating Stereo Pairs”, (1999).  
<http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/stereographics/stereorender/>
- [9] 矢野澄男, 井出真司, ハル スワイテス, “立体画像のみやすさと調節応答からみた視覚疲労”, 映像情報メディア学会誌, 55, 5, pp.711-717 (2001).
- [10] 江本昌喜, 矢野澄男, “立体画像観視における両眼の輻湊と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係”, 映像情報メディア学会誌, 56, 3, pp.447-454 (2002).



- [11] 梶木, “自然な立体視を目指した立体表示技術の動向”, 映像情報メディア学会誌, 53, 7, pp.43-48 (1999).
- [12] 高木康博, “変形 2 次元配置した多重テレセントリック光学系を用いた 3 次元ディスプレイ”, 映像情報メディア学会誌, 57, 2, pp.293-300 (2002).
- [13] 高嶋樹, 中西義孝, 日垣秀彦, “二重焦点可変レンズを用いた焦点補償方式立体映像システムの有用性”, 日本機械学会論文誌 (C編), 70, 692, pp.1155-1160 (2004).
- [14] 加納裕, “立体視による CG 表現”, カラー表現による可視化技術, 第 II 編 (第 1 章), pp.429-433 (1996).
- [15] OpenGL ARB M. Woo, J. Neider and T. Davis, “OpenGL Programming Guide Fourth Edition”, Addison-Wesley (2004).
- [16] 江本正喜・矢野澄男・長田昌次郎, “立体画像システム観察時の融像性輻湊限界の分布”, 映像情報メディア学会誌, 55, 5, pp.703-710 (2001).
- [17] 繁樹博昭, 新館俊輔, 佐藤隆夫, “書き割り効果のメカニズム”, 信学技法, 98, 47, pp.153-160 (1998).
- [18] 大森朝子・山之上裕一・奥井誠人・湯山一郎, “立体画像における撮像条件と書き割り効果”, 映像情報メディア学会誌, 53, 3, pp.437-441 (1999).