

TR-H-302

# 立体ディスプレイにおけるコマ収差 による奥行きひずみ

吉松 浩 (ATR-HIP/東京工業大),  
金子寛彦 (ATR-HIP/東京工業大)

2001.1.29

## ATR人間情報通信研究所

〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台2丁目2-2 TEL: 0774-95-1011

**ATR Human Information Processing Research Laboratories**  
2-2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288, Japan

Telephone: +81-774-95-1011

Fax : +81-774-95-1008

立体ディスプレイにおけるコマ収差による奥行きひずみ  
Depth distortion from coma aberration in stereoscopic display

吉松浩\*\* 金子寛彦\*\*  
Hiroshi Yoshimatsu\*\* and Hirohiko Kaneko\*\*

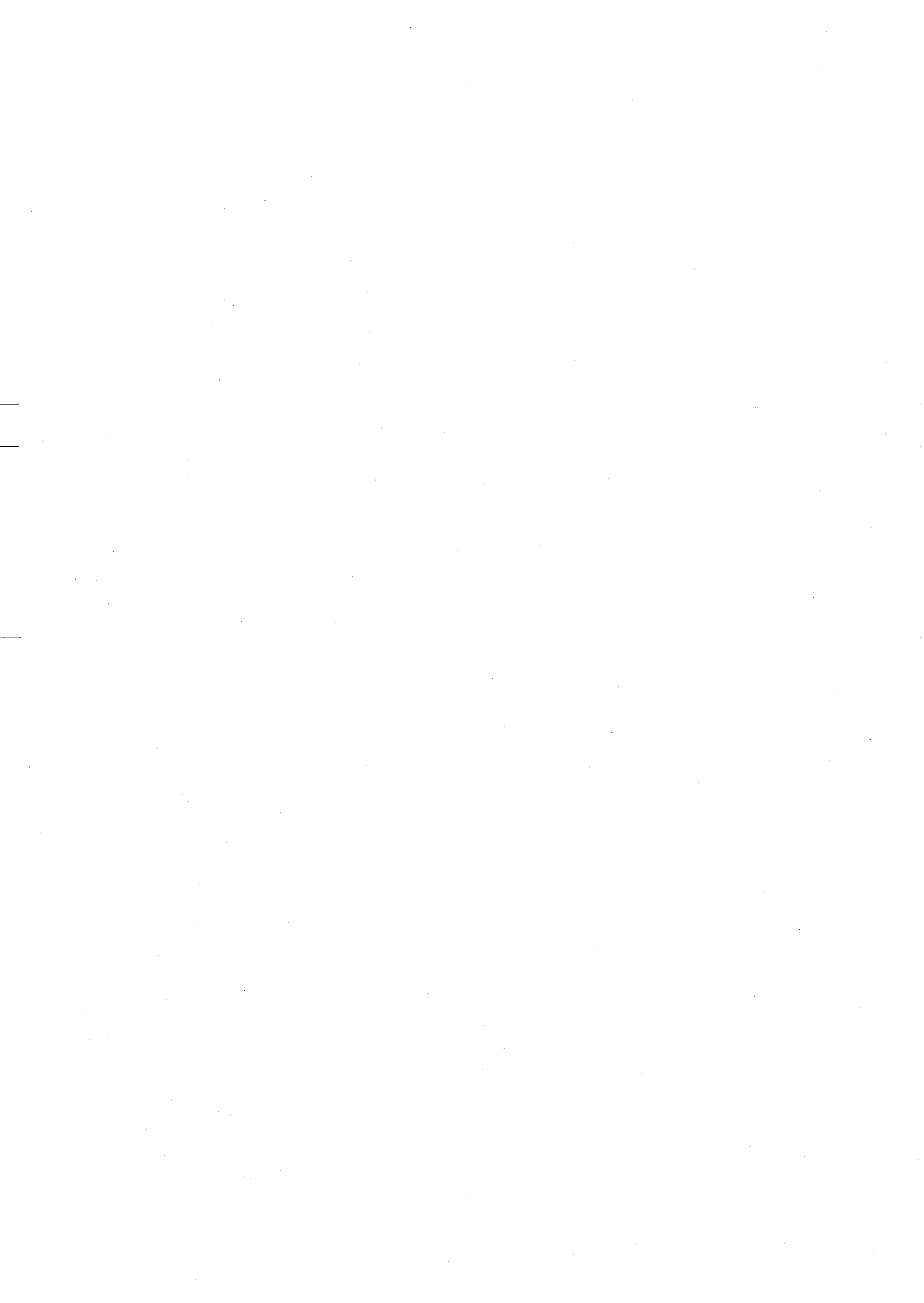
(株) ATR 人間情報通信研究所\*  
東京工業大学大学院理工学研究科像情報工学研究施設\*\*  
ATR Human Information Processing Labs.\*  
Tokyo Institute of Technology\*\*

平成13年1月25日



## 目次

第1章	はじめに	11
第2章	立体カメラにおけるコマ収差像の発生機序	15
第3章	幾何光学的3次コマ収差像の計算	17
第4章	実験装置および方法	19
4.1	実験装置	19
4.2	実験方法	20
4.2.1	テスト刺激に対して融像する場合	21
第5章	実験結果とまとめ	23
5.1	実験結果	23
5.2	まとめ	23
第6章	おわりに	25
6.1	今後の課題	25
6.2	将来の課題	25



## 目 次

1.1	An example of tele-existence by using binocular pan-tilter cameras and a stereoscopic head-mounted display to simulate human eye movements . . . . .	11
1.2	Coma aberration is a function of radius. . . . .	12
1.3	An example of a photograph that includes coma flare. This image is a part of larger photograph. The center of original photograph is upper left direction of this extracted image . . .	13
2.1	Coma aberration is a function of radius. . . . .	15
3.1	An image to simulate geometrical 3-rd order coma aberration.	18
3.2	Coordinates system for the calculation of geometrical optical aberrations. . . . .	18
4.1	Streoscope . . . . .	19
4.2	An example of visual stimulus. In this case, the reference stimulus is located under the test stimulus. . . . .	20
4.3	A front view configurations of test stimuli and references when subjects fuse test stimuli. . . . .	21
4.4	A top view configurations of test stimuli and references when subjects fuse test stimuli. . . . .	21
5.1	Experimental results for three subjects. The ordinate shows the horizontal disparity of the image point having coma aberration at match. . . . .	23
5.2	An example of stereo without zerocrossing image. Left and right eye images and disparity image . . . . .	24



## 表 目 次

4.1	Experimental setup . . . . .	19
4.2	Experimental Conditions . . . . .	20





## Abstract

Recent stereoscopic displays, such as Head-Mounted Displays, are designed to have a wide viewing angle and large magnifications, although its weight and size are required to be light and small. These structural requirements must cause larger optical aberrations than traditional stereoscopic displays, such as mirror stereoscope. The large optical aberrations in recent stereoscopic displays might distort perceived depth. We have to know the relation between the magnitude of aberrations and depth distortions produced by the aberrations for improving stereoscopic displays. In this study, we investigated the effects of the third-order coma aberration in a binocular stereoscopic display on depth perception. Coma aberrations were simulated to make using a computer and presented on displays in a mirror stereoscope. The magnitude of depth distortion was measured using a psychophysical technique. Subjects matched the perceived depth of a prove image having no aberration to that of a test image having coma aberration by controlling the binocular disparity of the prove. The results showed that the third-order coma aberration produces depth distortion.



## 第1章 はじめに

ヘッドマウントディスプレイ（以下HMD）は、仮想現実等の重要な要素技術として既に広く応用されている。

本研究の背景には、ひとの眼球を模したカメラ系を通して、より自然な立体映像を呈示するために、カメラおよびHMD等のディスプレイ光学系の収差が立体視、特に奥行き知覚へ与える影響を評価し、収差の許容値、評価基準を確立することを目指すことにある。

本研究の将来の応用の一例を図1.1に示す。この例では、遠隔地にある眼球運動を模した2台の輻輳運動可能なパンティルタ・カメラが、HMDを装着したユーザの頭部運動および眼球運動にリンクして動作し、より自然な立体映像をユーザに呈示する。

このような自然な立体視を実現するために小型軽量、高視野角、高倍率を要求されるHMDの光学系は顕微鏡、双眼鏡等の光学系と比較して、大きな収差を有する。

本研究では、コマ収差に着目し、収差が立体HMDの奥行き知覚に与える影響を視覚実験により評価した。コマ収差が光学系の中心から放射線状に発生する様子を模式図1.2で示す [1]。

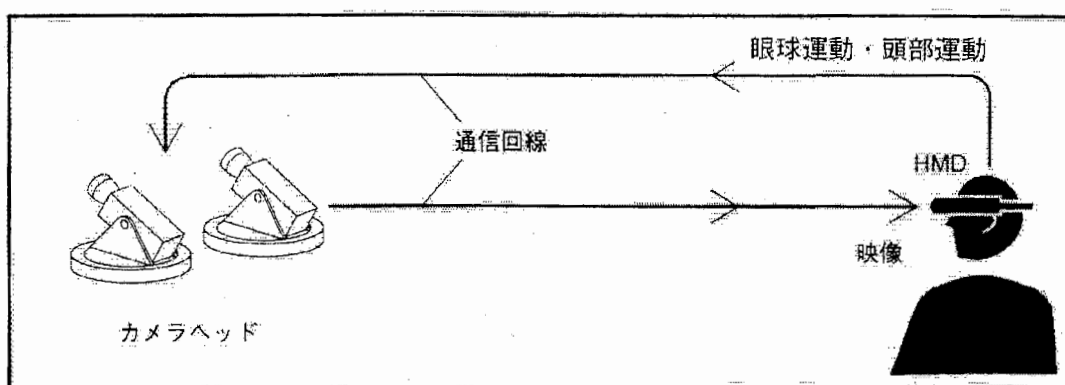


図 1.1: An example of tele-existence by using binocular pan-tilter cameras and a stereoscopic head-mounted display to simulate human eye movements

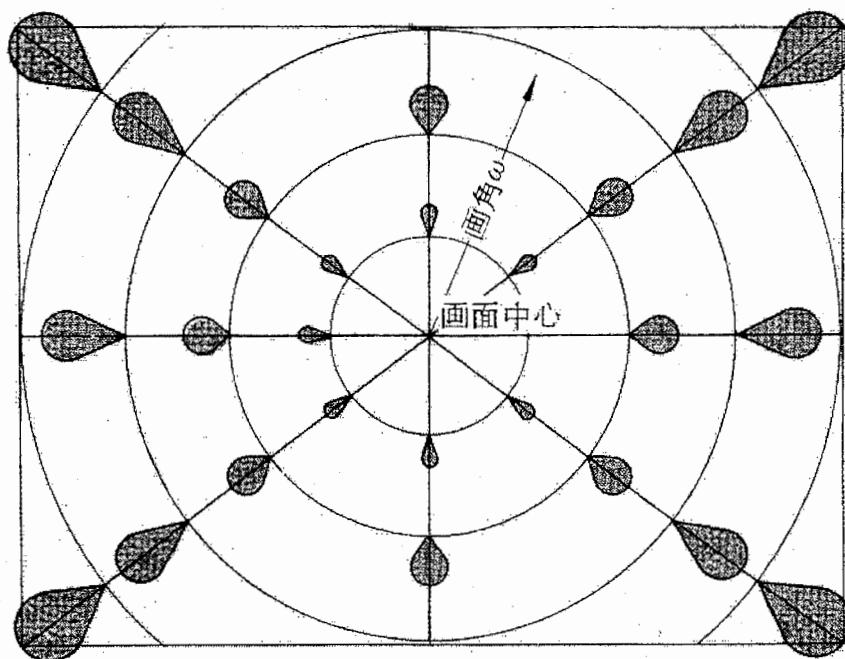
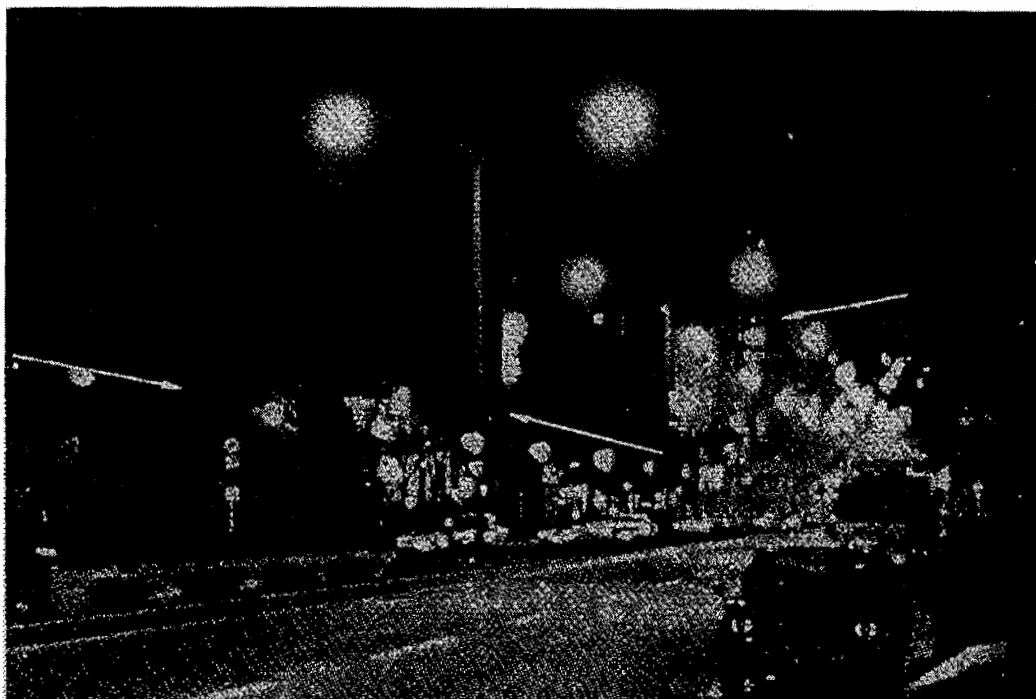


図 1.2: Coma aberration is a function of radius.

実際の写真におけるコマ収差像 [1] を図 1.3 に示す. この写真は通りの夜景を撮影した大きな写真の一部を切り出したもので, この図が切り出される前の写真全体の中心は, 図 1.3 の左上方にあり, 街灯のフレアがコマ収差により円形状から三角形状に変形している.

一般的に光学的収差は「像のゆがみ」と「像のぼけ」に大別される. これまで, 「像のゆがみ」を生じる収差の両眼視差への寄与が調べられている [2]. 一方, 「像のぼけ」を生じる収差の両眼視差への寄与はほとんど調べられていないが, エッジがなく輝度分布のみの視覚刺激の対応点モデルを心理実験により検証した例がある [3].

これにより, 「像のぼけ」を生じる収差が奥行き知覚へ寄与する可能性がある. そこで, 本研究では「像のぼけ」を生じる収差が像の輝度分布に基づく両眼視差への寄与を通して, 奥行き知覚に影響を与える可能性を心理物理実験を用いて検討した.



⊠ 1.3: An example of a photograph that includes coma flare. This image is a part of larger photograph. The center of original photograph is upper left direction of this extracted image



## 第2章 立体カメラにおけるコマ収差像の発生機序

平行光軸の2台の広画角立体カメラにおいて発生するコマ収差像を図2.1に示す。これらのコマ収差像は、正面にある対象物が、各カメラの光軸上に位置しないために生じ、それらのコマ収差像はスクリーンの役割を果たす撮像素子に投影され、それらをディスプレイ光学系で拡大し、観視するものとする。左右眼は各々、正中面に対して鏡映対称のコマ収差像を見ることになる。

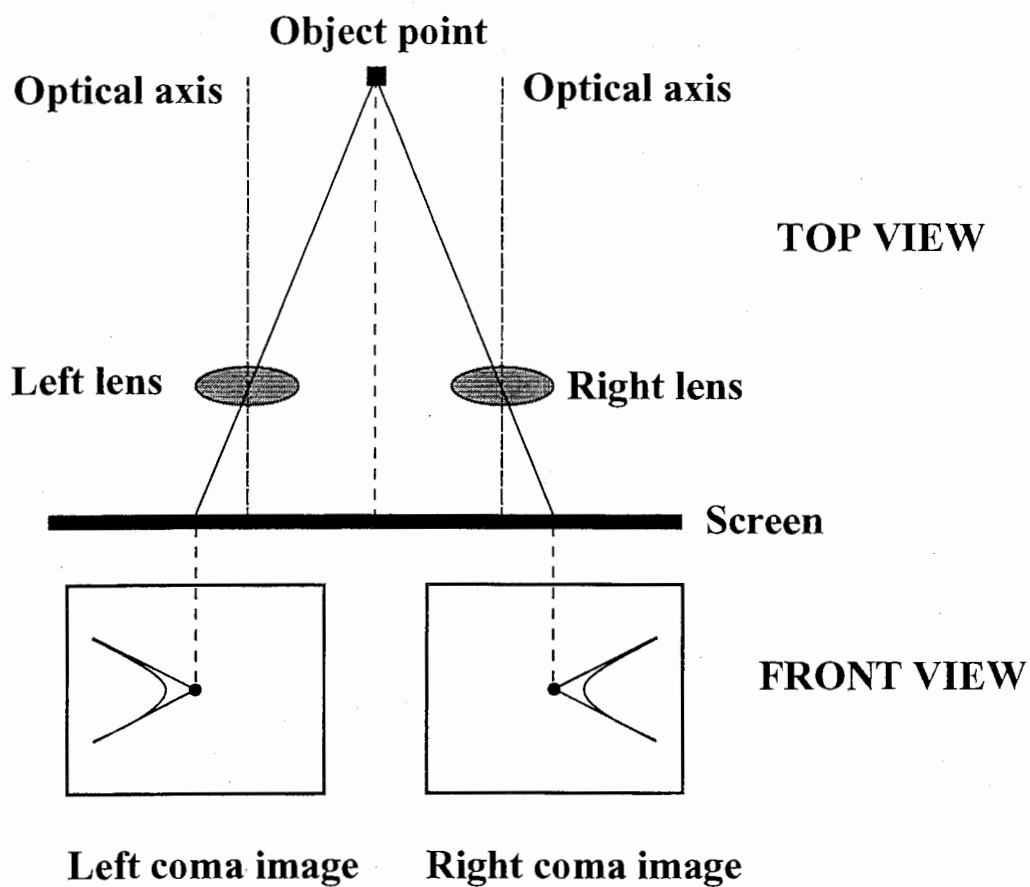
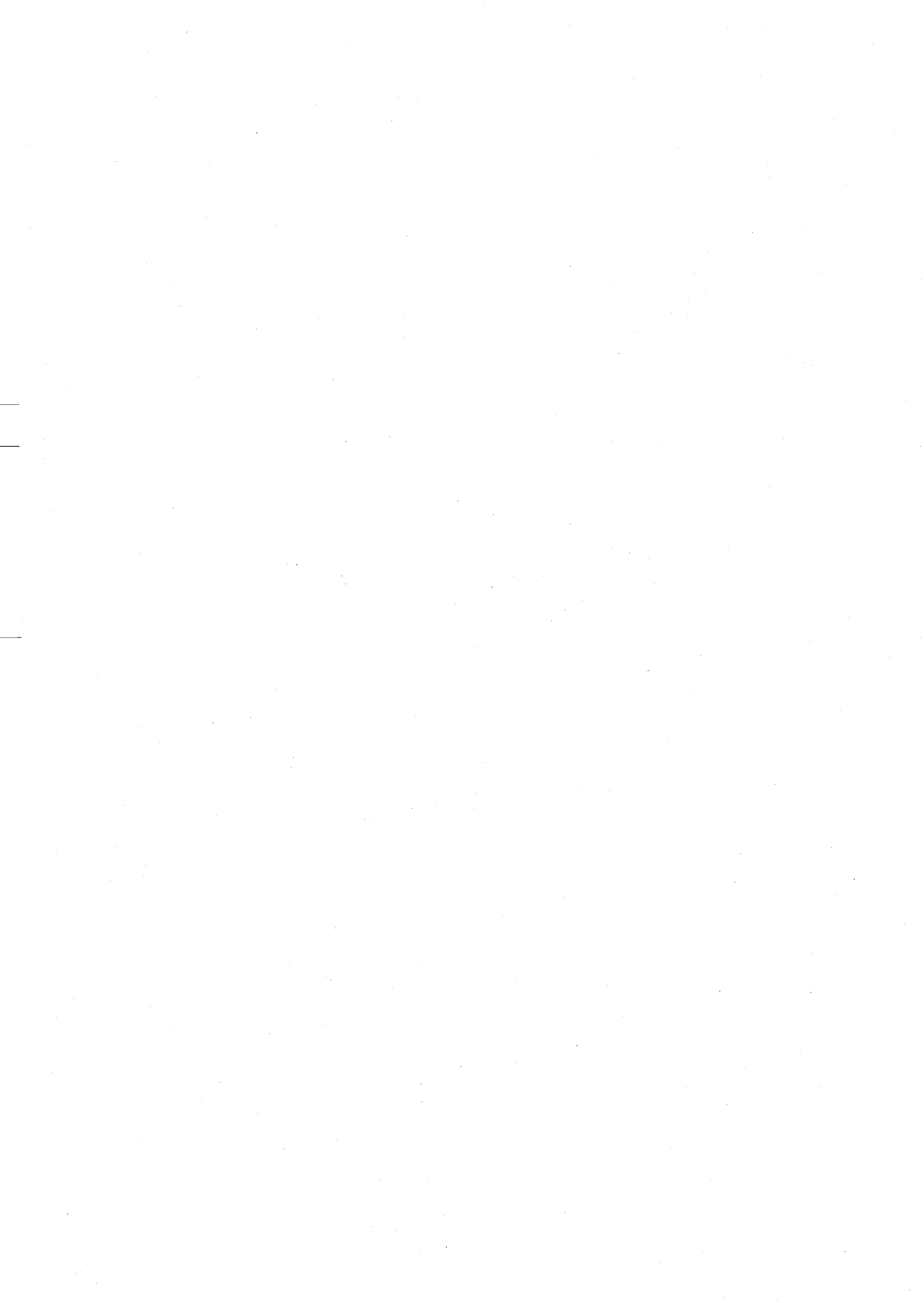


図 2.1: Coma aberration is a function of radius.





### 第3章 幾何光学的3次コマ収差像の計算

図3.1に示す収差像は、3次のコマ収差の幾何光学的スポットダイアグラムを計算し、そのスポットダイアグラムから2次元ヒストグラムを計算し、そのヒストグラムを256階調に正規化したものである。

スポットダイアグラムの計算は図3.2に示す物点および像点の座標系  $(z, y, x)$ ,  $(z', y', x')$  と単位円に正規化された光学系の瞳の極座標系  $(s, \theta)$  に基づき、物点  $(0, 0.1)$  から、 $2.5 \times 10^5$  本の光線が瞳面内を一様の重みで通過するとし、コマ収差係数  $B_2$  を含む式 (3.1)(3.2) に従い、像点  $(z', y')$  を計算した [4].

$$\Delta^{(3)}y' = B_1s^3 \cos \theta + B_2s^2h(2 + \cos 2\theta) + (3B_3 + B_4)sh^2 \cos \theta + B_5h^3 \quad (3.1)$$

$$\Delta^{(3)}z' = B_1s^3 \sin \theta - B_2s^2h \sin 2\theta + (B_3 + B_4)sh^2 \sin \theta \quad (3.2)$$

但し、 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$  は以下に列挙する3次収差係数である。ここではコマ収差のみに着目するため  $B_2$  以外の係数を全てゼロとした。

- $B_1$  : 3次の球面収差係数
- $B_2$  : 3次のコマ収差係数
- $B_3$  : 3次の非点収差係数
- $B_4$  : 3次の像面弯曲収差係数
- $B_5$  : 3次の歪曲収差係数

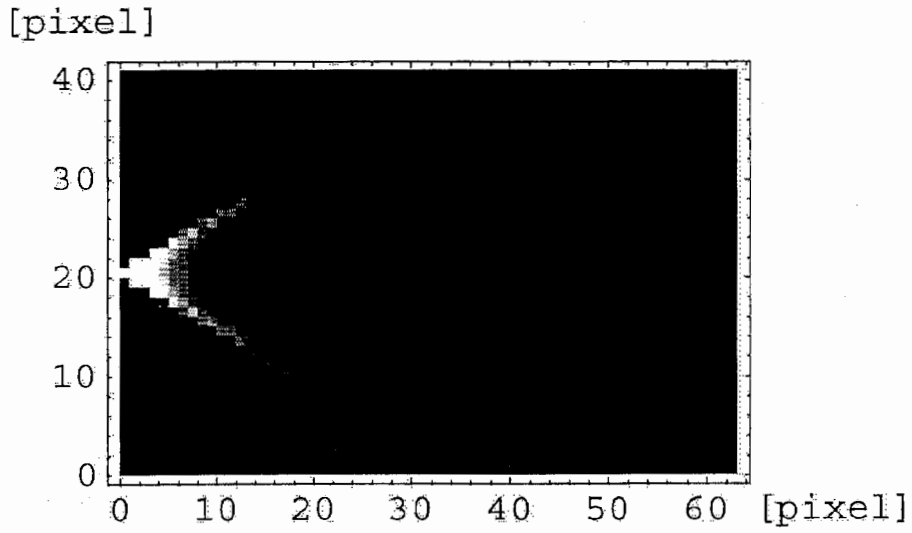


図 3.1: An image to simulate geometrical 3-rd order coma aberration.

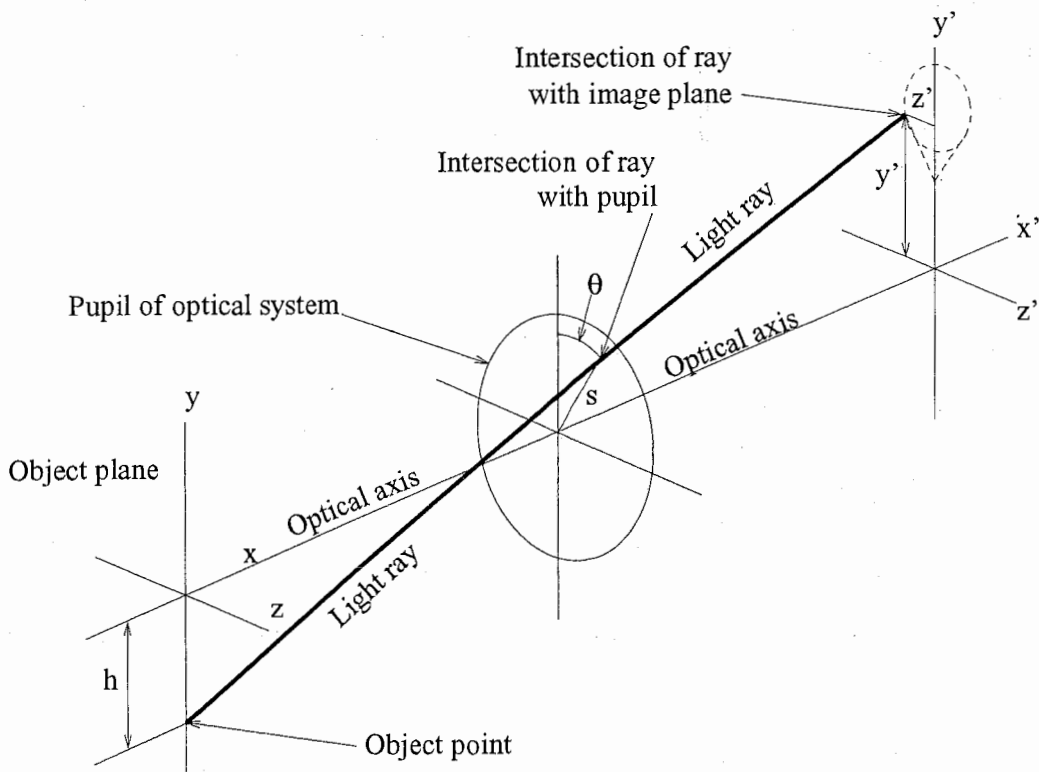


図 3.2: Coordinates system for the calculation of geometrical optical aberrations.

## 第4章 実験装置および方法

### 4.1 実験装置

刺激呈示装置は、その仕様の概略を表 4.1 に示すミラー式ステレオスコープである。また、その外観を図 4.1 に示す。左右眼の像は、輝度が較正された 2 台の液晶ディスプレイ (1024 × 768pixel, 以下 LCD) に各々呈示された。このステレオスコープは左右眼用の 2 本の光軸が平行で、接眼レンズおよび対物レンズを有し、視距離、眼幅および視度が調節可能であった。視距離は 40 cm に固定された。

項目	内容
実験装置	ミラー式ステレオスコープ
ディスプレイ	左右独立 液晶パネル: 1024 × 768 pixel
光学系	平行光軸, 接眼レンズと対物レンズを有する
調節距離	40cm に固定
頭部の固定方法	あご台

表 4.1: Experimental setup

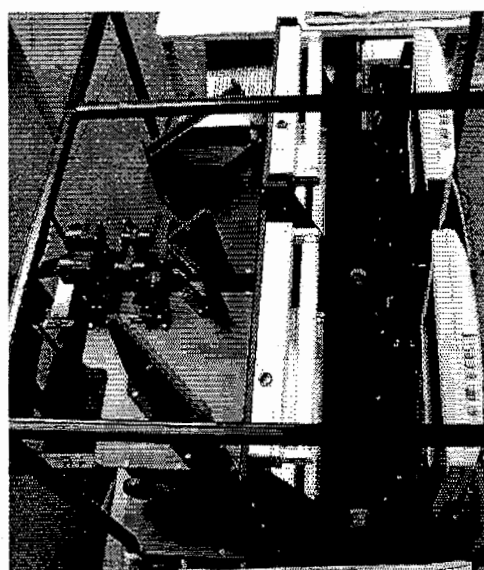


図 4.1: Stereoscope

## 4.2 実験方法

視覚刺激は、ステレオペアであり、上下に配置されたテスト刺激と参照刺激からなっていた（図4.2）各々、横に並んだ3点の点像からなり、テスト刺激では中央の点像がコマ収差を有し、左右の点は無収差、参照刺激では全ての点は無収差であった。

図4.2のように、左右眼の像において、コマ収差の向きを反対方向とした。実験条件をまとめて表4.2に示す。

テスト刺激の3点（左右の2点とコマ収差画像の収差を加える前の点）、および参照刺激の左右の2点の間の相対視差はゼロに固定された。

被験者は、参照刺激の中央の点の視差をマウスで調節し、コマ収差画像を含むテスト刺激の3点と、参照刺激の3点とで、各々知覚される奥行き形状をマッチングした。この時、テスト刺激と参照刺激の奥行き形状が一致しない場合は、1 pixel の1/10の精度で内挿して奥行きを応答した。

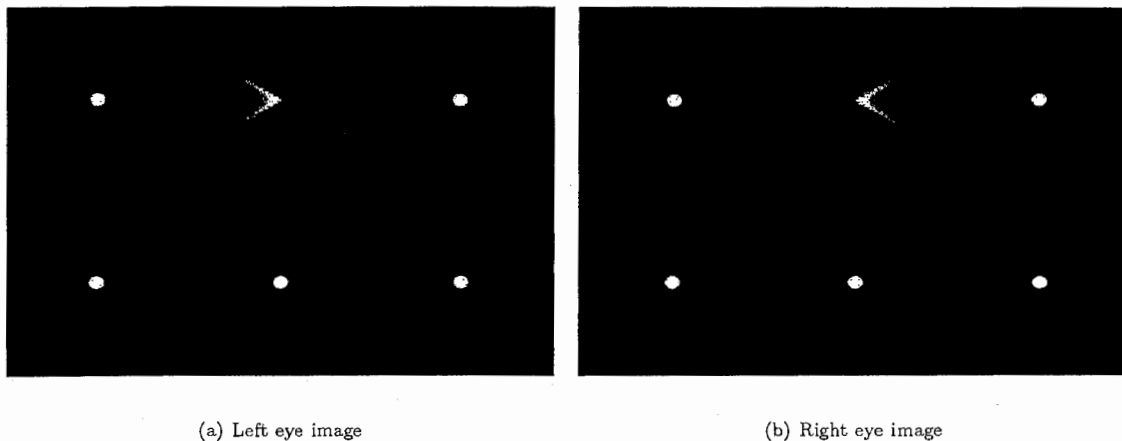


図 4.2: An example of visual stimulus. In this case, the reference stimulus is located under the test stimulus.

項目	内容
実験方法	調整法によるマッチング
実験装置の調整	各被験者毎に視度、眼幅、融像可能な最小輻輳角、あご台位置
実験回数	各試行4回
被験者	成人3名.

表 4.2: Experimental Conditions

各被験者は、実験前に眼幅、視度と輻輳を調整した。また実験中は、頭部はあ

ご台に固定された。試行回数は各被験者について4回行った。被験者は3名であった。

#### 4.2.1 テスト刺激に対して融像する場合

被験者が、テスト刺激に応答し、融像する場合の各刺激の位置を図 4.3 に示す。また、被験者の眼球位置、各刺激位置に加えて、融像された刺激の仮想的な形状、位置を図 4.4 に示す。

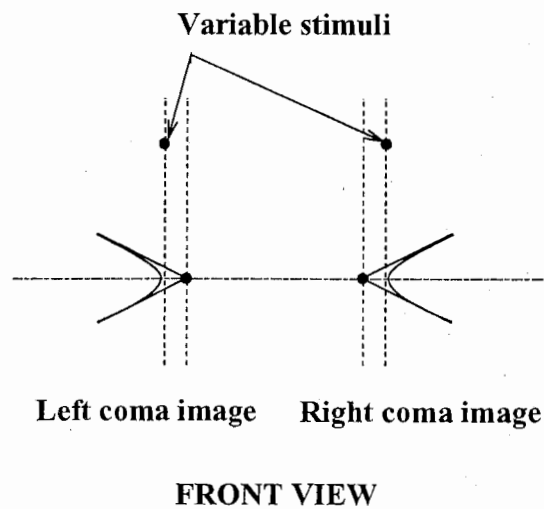


図 4.3: A front view configurations of test stimuli and references when subjects fuse test stimuli.

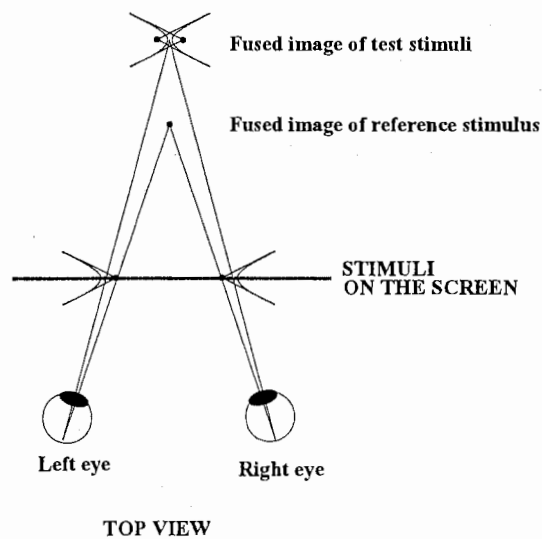
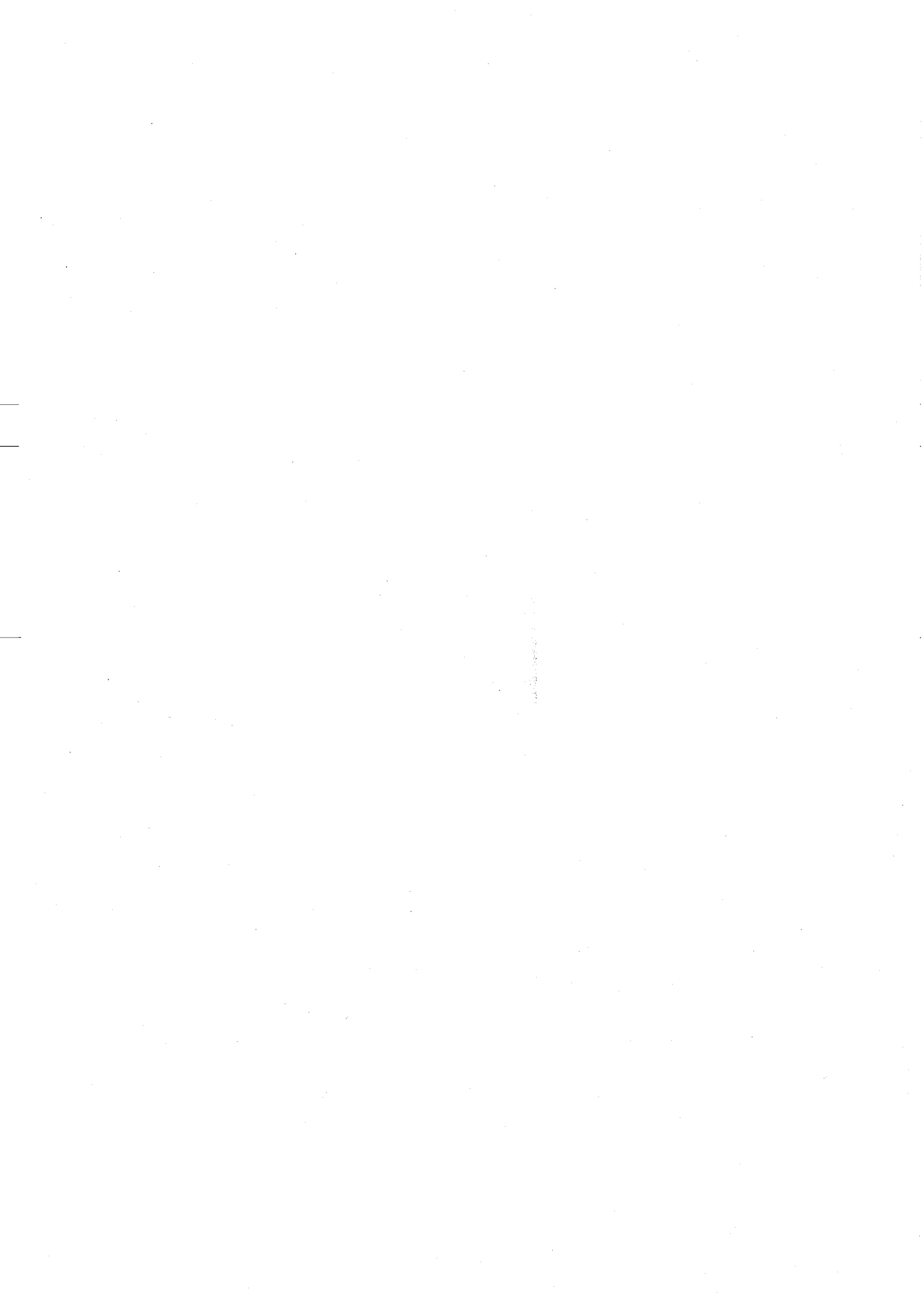


図 4.4: A top view configurations of test stimuli and references when subjects fuse test stimuli.



## 第5章 実験結果とまとめ

### 5.1 実験結果

融像されたコマ収差像について、各被験者が知覚した奥行きに相当する視差を図5.1に示す。そのずれ量は、3人の被験者を平均して、2.63 arcminとなった。被験者3人の平均眼幅：64.7 mmを用いて、このずれ量を奥行き量に換算すると約3.3 mmとなる。この結果は、コマ収差像の対応点が、コマ収差像の最大輝度の位置から裾野方向にずれ、そのずれに応じた奥行き知覚が生じることを示す。

### 5.2 まとめ

Mallot [3]等は、エッジのない場合に生じる視差の例を図5.2の場合について示した。本研究におけるテスト刺激は、部分的にエッジを有し、視覚刺激としてはMallot [3]等の刺激よりも複雑な形状である。

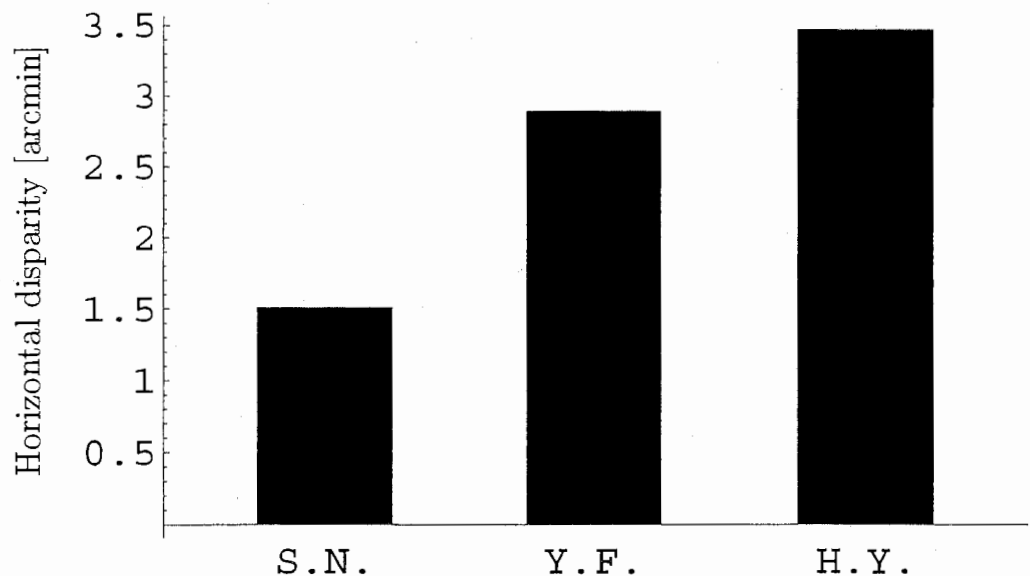


図 5.1: Experimental results for three subjects. The ordinate shows the horizontal disparity of the image point having coma aberration at match.



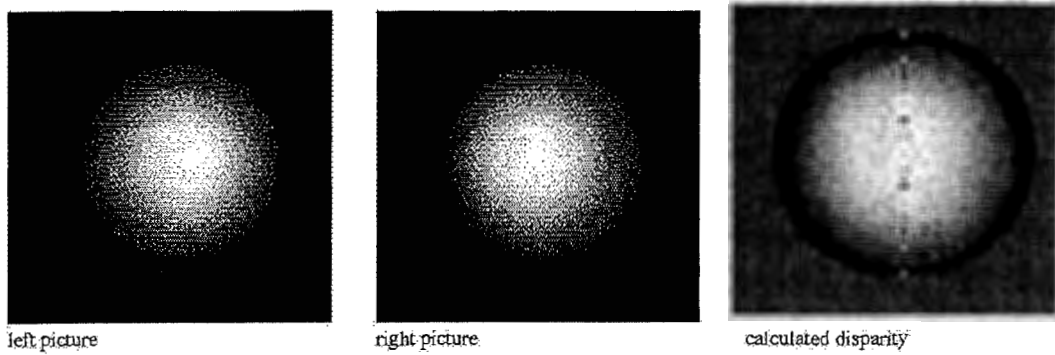


図 5.2: An example of stereo without zerocrossing image. Left and right eye images and disparity image

- 反対符号の3次コマ収差像を左右眼に呈示した場合、収差がない場合と比較して、その像の知覚される奥行きが変化する。
- 3次コマ収差像の融像時の融像図形はX字状となり、無収差像と比較して不安定な融像条件である。
- 3次コマ収差像はの輪郭はエッジ部とエッジなしの部分からなり、Mallot等のモデルの適用範囲を超えている。

## 第6章 おわりに

実験結果から、反対符号の3次のコマ収差像を左右眼に呈示した場合、収差がない場合と比較して、その像の知覚される奥行きが変化することが確認された。

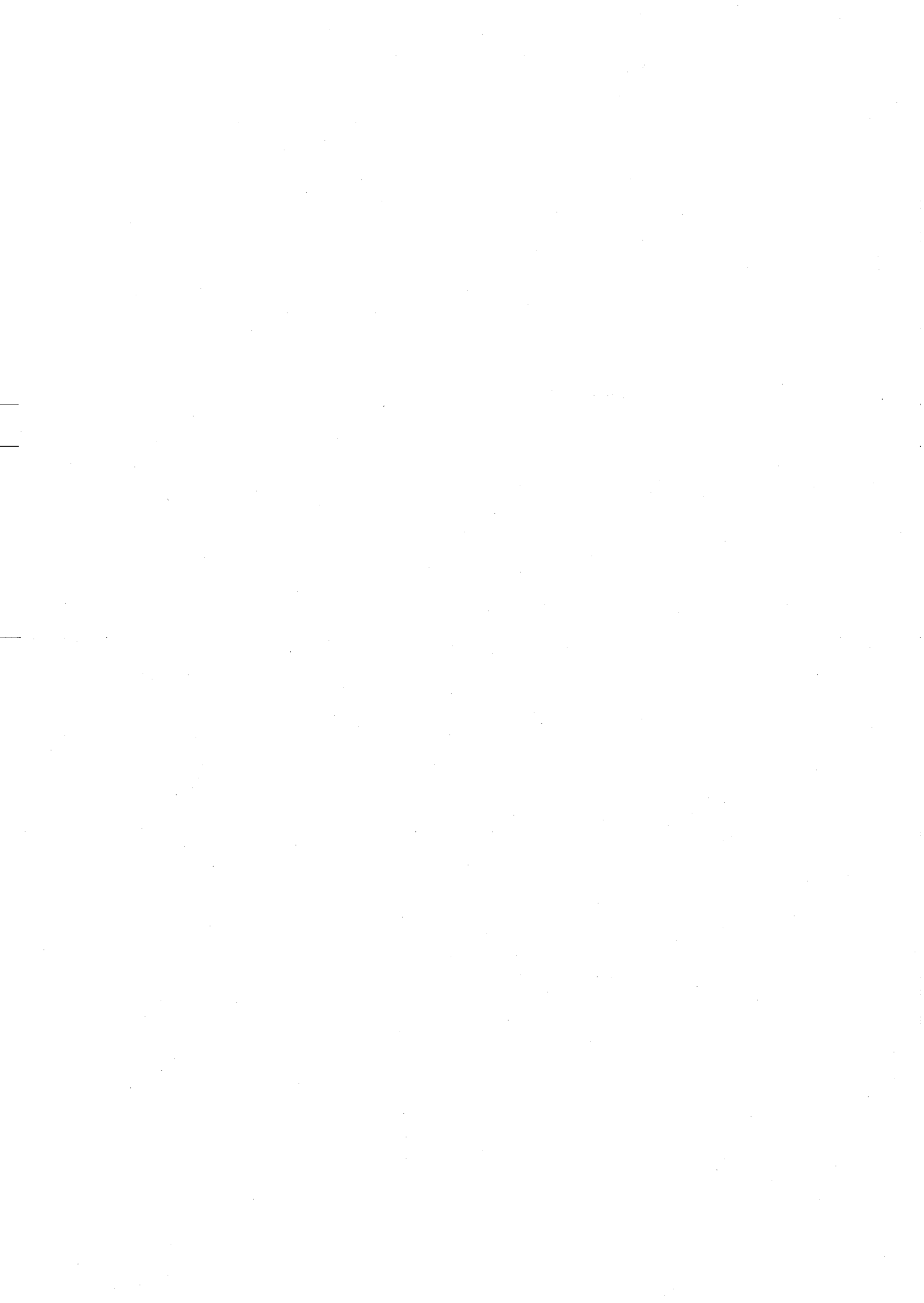
この結果は、従来は考慮されていなかった「ボケを伴う収差」 [2] も両眼立体視の奥行き知覚に影響を与える可能性を示唆する。

### 6.1 今後の課題

- コマ収差像の融像条件は Mallot 等 [3] の条件よりも複雑であり、このような場合の詳細な検討が必要となる。
- コマ収差像の輝度分布の、物点の像高、即ち、偏心度にどのように依存するかについての検討を要する。
- 同様に球面収差、焦点ずれ、非点収差のぼけを伴う収差についても実験とモデルによる説明を試みる。

### 6.2 将来の課題

将来はコマ収差を伴う複数の点像がパターンを形成する場合、他の収差の場合、さらに各収差を同時に含む場合、カメラ配置を考慮する場合等の基礎的な検討、および実画像での同様な検討を進める。



## 参考文献

- [1] 小倉馨夫：現代カメラとレンズ技術, 写真工業出版 (1995).
- [2] Grinberg, V. S. and Siegel, M. W.: Geometry of Binocular Imaging III: Wide-Angle and Fish-Eye Lenses, *Proc. SPIE: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III*, Vol. 2653, pp. 146–153 (1996).
- [3] Arndt, P. A., Mallot, H. A. and Bühlhoff, H. H.: Human stereovision without localized image features, *Biological Cybernetics*, Vol. 72, pp. 279–293 (1995).
- [4] Smith, W. J.: *Modern Optical Engineering*, MacGraw-Hill, Inc., 2-nd edition (1990).