



# [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200510008494.9

[43] 公开日 2005年9月7日

[11] 公开号 CN 1664649A

[22] 申请日 2005.2.23

[21] 申请号 200510008494.9

[71] 申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

[72] 发明人 王涌天 程雪岷 刘越 郝群

[74] 专利代理机构 北京理工大学专利中心

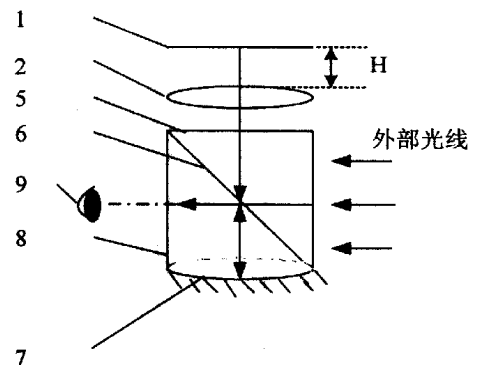
代理人 付雷杰

权利要求书2页 说明书5页 附图4页

[54] 发明名称 一种头盔显示器的新型光学系统

[57] 摘要

本发明为一种头盔显示器的新型光学系统，涉及一种轻型、紧凑和像差校正良好的可调焦光学系统，可以作为透视式头盔显示设备的目视光学系统。该目视光学系统包括一组目镜和一个组合棱镜结构。该目镜中至少包含一个透射元件。该组合棱镜结构中至少有一个面为凹反射面，至少有一个面为半反半透光学面，至少在光学面之间发生两次反射，在光学面之间的空间所充满介质折射率大于1。该目视光学系统以微型液晶显示器为像面显示设备，可以将由内部通道图像源经过该目视光学系统所成的图像和外部世界图景融合，使所述图像成像于观察者观察方向无穷远处，且可调焦到距观察者有限距离处。本发明具有的优点：系统紧凑、像差校正良好、光能利用率高，同时可进行较大范围调焦。



1. 一种头盔显示器的新型光学系统，包括：使用微型液晶显示器 1 作为内部图像源显示设备，使所述图像成像于观察者观察方向无穷远处，且可调焦到距观察者有限距离处；该目视光学系统包括一组目镜 2 和一个组合棱镜结构 5，该目镜 2 中至少包含一个透射元件，该组合棱镜结构 5 中至少有一个面为凹面反射面 7，至少有一个面为半反半透光学面 6，至少在光学面之间发生两次反射，在光学面之间的空间所充满的介质的折射率大于 1，从微型显示器 1 出射的光线首先通过目镜 2 的透射面，并通过组合棱镜结构 5 的第一个透射面 5 进入组合棱镜结构 5，穿过半反半透光学面 6 后由凹面反射面 7 反射，反射的光线再由半反半透光学面 6 反射，并通过第二个透射面 8 进入观察者的瞳孔；观察者看到的为被所述微型显示器 1 经过该光学系统所成的图像所增强的直接通过组合棱镜结构看到的外界环境。
2. 如权利要求 1 所述的一个内部图像源显示装置包括一个微型显示器 1 来显示图像，一个目视光学系统将由微型显示器 1 所显示的图像成像，使观察者能够观察，并保持所述微型显示器 1 和所述目视光学系统位于观察者的头部或脸部，所述目视光学系统包括一组目镜 2，该目镜 2 与内部图像源 1 相邻透镜的光学面为凹面，以有效控制畸变，光学系统中的目镜 2 所产生的像差与组合棱镜结构 5 产生的像差符号相反，以平衡系统像差，所述目视光学系统还包括一个组合棱镜结构 5，该结构的第一个光学面为平面 5，与上面所述目镜 2 的远离微型显示器 1 的光学面相对；其位于所述目镜 2 和所述观察者瞳孔 9 之间，所述组合棱镜结构 5 所产生像差由所述目镜 2 所产生像差来平衡，由上面所述目镜 2 所出射的光线将通过所述组合棱镜结构 5 的第一个光学面 5 进入上面所述组合棱镜结构 5，由上面所述凹面反射面 7 反射，反射的光线再由所述半反半透光学面 6 反射，并通过上面所述第二个透射面 8，进入观察者的瞳孔。
3. 如权利要求 2 所述的内部图像源显示装置，其特征在于在所述第一个透射面 5、第二个透射面 8 和凹面反射面 7 所构成的组合棱镜结构 5 中，所述光学结构的透过介质的折射率大于 1，以减小边缘视场主光线在所述半反半透光学面 6 和凹面反射面 7 上的投射高，进而简化目镜设计，使其结构紧凑。
4. 如权利要求 3 所述的内部图像源显示装置，其特征在于所述组合棱镜结构 5 中，从所述微型显示器 1 所出射的光线经过所述目镜 2，在所述组合棱镜结构 5 的第一个面 5 透射后，在到达所述凹面反射面 7 前被所述半反半透光学面 6 透射。
5. 如权利要求 3 所述的内部图像源显示装置，其特征在于所述组合棱镜结构 5 中，还有第三个透射光学面 10，外界实际光线从所述光学面进入，并从所述半反半透面 6 透射，进入观察者的瞳孔 9，所述光学面 10 与所述第二个透射面 8 平行；由光学面 5、10、6 所组成的光学元件 11 与由光学面 6、7、8 所组成光学元件 12 的材料相同，未在所述半反半透面 6 处引入折射，光学能量损失 1/2。

6. 如权利要求 5 所述组合棱镜结构 5, 其特征在于所述反射面 7 为凹面, 以减小边缘视场主光线在所述目镜 2 上的投射高。
7. 如权利要求 4 到 6 中的所述内部图像源显示装置, 其特征在于其中所述组合棱镜系统 5 中一个光路的排列如下, 光线从所述组合棱镜系统 5 的第三个透射面 10 入射到所述半反半透光学面 6 上, 被所述半反半透光学面 6 透射; 而另一个光路中, 则光线被所述组合棱镜系统 5 的凹面反射面 7 反射到所述半反半透光学面 6 上, 再被所述半反半透光学面 6 反射到所述组合棱镜系统 5 的第二个透射面 8。
8. 如权利要求 4 所述的组合棱镜结构 5, 其特征在于其中所述第一个透射面 5 与半反半透光学面 6 的夹角为 45 度。
9. 如权利要求 4 所述的组合棱镜结构 5, 其特征在于其中所述半反半透光学面 6 与凹面反射面 7 顶点切线的夹角为 45 度。
10. 如权利要求 2 所述目视光学系统, 其特征在于所述目镜 2 位于微型显示器 1 与组合棱镜系统 5 之间。
11. 如权利要求 10 所述目镜, 其特征在于从所述微型显示器 1 出射的光线, 通过所述目镜 2 的第一个透射光学元件 2, 该元件 2 面向微型显示器 1 的面为凹面, 以校正系统畸变。
12. 如权利要求 11 所述目镜 2, 其特征在于该目镜 2 中光学元件与微型显示器 1 共轴。
13. 如权利要求 2 所述目视光学系统, 其特征在于微型显示器 1 出射的光线从所述目镜 2 透射后, 被所述组合棱镜系统 5 的凹面反射面 7 反射, 并通过所述组合棱镜系统 5 的第二个透射面 8, 进入观察者的瞳孔 9, 其出瞳距离大于 25 毫米。
14. 如权利要求 2 所述目视光学系统, 其特征在于出射的光线从所述目镜 2 透射后, 被所述组合棱镜系统 5 的凹面反射面 7 反射, 透过所述组合棱镜系统 5 的第二个透射面 8, 进入观察者的瞳孔 9; 所述微型显示器 1 与所述目镜 2 的第一个光学元件 2 的轴上距离大于 6 毫米时, 对应于成像于无穷远的图像。
15. 如权利要求 2 所述目视光学系统, 其特征在于微型显示器 1 出射的光线从所述目镜 2 透射后, 被所述组合棱镜系统 5 的凹面反射面 7 反射, 透过所述组合棱镜系统 5 的第二个透射面 8, 进入观察者的瞳孔 9, 所述光学系统可调焦; 所述微型显示器 1 与所述目镜 2 的第一个光学元件 2 的轴上距离 2 毫米时, 对应于成像于 500 毫米的图像。

## 一种头盔显示器的新型光学系统

### 技术领域

本发明为一种头盔显示器的新型光学系统，涉及一种轻型、紧凑和像差校正良好的可调焦光学系统，可以作为透视式头盔显示设备的目视光学系统。

### 背景技术

头盔显示器 (Head-Mounted Display, 简称 HMD) 可以扩展科学三维可视化程度, 增进用户-计算机的交互性能, 近年来在教育培训、交互控制, 系统样机设计、制造与装配, 甚至尖端武器及飞行器的研制开发等领域都受到广泛重视。因其应用领域的不同, 可以分为用于虚拟现实 (Virtual Reality, 简称 VR) 的单通道 (浸没式) 头盔显示器和用于增强现实 (Augmented Reality, 简称 AR) 的双通道 (透视式) 头盔显示器。浸没式头盔显示系统可以完全隔离用户对真实世界的观察, 呈现出一个由计算机所生成的世界, 使其完全身处虚拟世界之中。但其通常的结果是将使用者与在真实环境中的一切景象隔离开来。

对于双通道 HMD 而言, 用户可以同时看到外部世界和计算机产生的虚拟图像, 因而不易产生眩晕, 在该类光学双通道头盔显示器中, 需要将外部世界的图像和图像源传来的图像信号融合, 这部分功能由光学组合器完成。

由于头盔显示器佩戴在用户头部, 所以在设计时不仅要满足一般光学显示仪器的要求, 还要更多地考虑人体因素。人的裸眼可见水平视场为  $200^\circ$ 、垂直视场为  $100^\circ$ 。由于人眼主要对中心为  $20^\circ$  的视场敏感, 所以在设计目视光学系统时应保证中心  $20^\circ$  的像质。现有的军用和商用头盔显示器 (VR 类) 中, 用于美军 AH-64A Apache 直升机用头盔显示器的水平视场为  $\pm 20^\circ$ , 垂直视场为  $\pm 15^\circ$ ; i-O Display Systems 生产的 i-glasses 头盔显示器的水平视场为  $\pm 12^\circ$ , 垂直视场为  $\pm 9^\circ$ 。目前商品化的可用于增强现实 (AR) 的头盔显示器为 i-O Display Systems 公司生产的 i-glasses。

对于头盔显示器而言, 光能利用率将影响系统的整体性能。光能利用率为到达人眼的光能与入射光能量的比值。它反映了头盔显示器的光学系统对光的吸收或反射, 也就是光在到达人眼前的损耗部分。设计时应考虑尽可能增大光能利用率以减少光能的损耗。对于传统的 VR 用的头盔显示器来说, 只需要考虑图像源发出的光在通过光学系统时的光能损失。而对于增强现实用的透视式双通道 HMD 来说, 设计时要同时照顾到两个通道的光能利用率, 即图像源发出的光通过光学系统后的光能损失与外界光经过光学系统透射后的光能损失。

目前 i-O Display Systems 公司生产的商品化的可用于增强现实(AR)的头盔显示器为 i-glasses, 其光学系统结构如图 1 所示, 其中的光学组合器 16 含有 2 个半反半透光学面 14、15。它们使图像源与外界的光信号都能进入人眼, 起到了组合器的作用, 实现了双通道的合成。但该类系统的外部光线要通过 2 个半反半透光学面 14、15 才能进入人眼, 在通过每一个半反半透光学面后, 光能都要减少 1/2。在忽略其它的光能损失的前提下, 最后到达人眼的光能利用率最大只能是  $(1/2) \times (1/2) = 1/4$ 。同时由图像源发出的光要 3 次经过半反半透光学面, 即两次经过半反半透光学面 15, 一次经过半反半透光学面 14, 使得内部通道的光能利用率下降到  $(1/2) \times (1/2) \times (1/2) = 1/8$ 。由于需要双通道同时成像, 所以光能利用率的问题不能通过调整半反半透光学面的反射与透射比来实现, 增大其中一个通道的光能利用率, 势必影响另一通道。

在真实环境中, 眼睛可以自动调焦以观察不同距离的物体。如要实现外部世界与内部通道中图像源所传来的图像的融合, 应使头盔显示器中的光学系统可将虚拟场景中的物体成像于不同距离, 能够适度调焦, 进而实现真实模拟, 可以增强用户的沉浸感。

## 发明内容

本发明的目的是克服上述技术上的不足, 提供一种包含一组目镜 13 和一个光学组合器 16 的可调焦光学系统。本发明所说明的光学系统为一种轻型、紧凑、像差校正良好和光能利用率高的可调焦头盔显示器光学系统。

为获得上面所描述的光学系统, 本发明中的光学组合器 16 包含一个半反半透光学面 6 和一个凹面反射面 7, 其中透过介质的折射率大于 1; 目镜 13 中与内部通道图像源 1 相邻的光学面为凹面。

本发明通过改变光学组合器 16 中组合棱镜的结构来解决双通道头盔显示器光能利用率的问题。该组合棱镜的光学结构如图 2 中所示光学组合器 16, 其只含有 1 个半反半透的光学面 6, 图 2 中位于最底部的面为一反射面 7, 这样外部光线只经过一次半反半透光学面 6, 其光能利用率为 1/2。内部通道由图像源 1 发出的光线只经过 2 次半反半透光学面 6, 其光能利用率为  $(1/2) \times (1/2) = 1/4$ 。同时内部通道光路在光学组合器 16 处有折叠, 而该结构中的反射面 7 为凹面, 减小了边缘视场主光线在光学平面 5 和目镜 13 上的投射高; 为减小边缘视场主光线在半反半透光学面 6 和光学面 7 (凹面) 上的投射高, 该光学组合器 16 的透过介质折射率大于 1, 保证了设计结构紧凑、重量轻等优点。

本发明利用一个微型显示器 1 来显示内部通道的图像, 采用含有一组目镜 13 和一个光学组合器 16 的可调焦光学系统将图像成像于观察者前的适当距离处。该光学系统中的目镜 13 所产生的像差与光学组合器 16 产生的像差符号相反, 以平衡系统像差, 且其与微型显示器 1 所表示的内部通道图像源相邻的透

镜的光学面为凹面，有效控制了畸变。由微型显示器 1 所射出的光线经过目镜 13，在光学组合器 16 的第一个光学平面 5 透射，光线被凹面反射面 7 会聚到半反半透光学面 6 上，并被该半反半透光学面 6 反射经过光学平面 8，进入位于光学系统出瞳 9 处的观察者瞳孔处。凹面反射面 7 面向目镜 13，其顶点切面与观察者视线平行，而其球面中心与微型显示器 1 中心同轴；半反半透光学面 6 面向观察者瞳孔 9，与观察者视线有一个夹角。

本发明中的微型显示器 1 与目镜 13 之间的距离可以调节，图 2 所示 H 为本发明内部通道的调焦位置。使图像源中的图像成像于 500 毫米到无穷远的距离处，与外部世界中距观察者为不同距离的物体进行适度匹配，进而实现图像融合。

本发明采用一个微型显示器 1 来显示内部通道的图像，由于头盔显示器在使用中会长时间地佩戴在用户头部，所以要求头盔的光学与机械结构紧凑、重量轻，为此本发明中的图像源采用液晶显示器，其输出图像宽高比为 4:3，即水平视场与垂直视场的比值都约为 4:3，则其水平视场  $FOV_H$  与垂直视场  $FOV_V$  的数值分别需满足下面公式 (1)：

$$\begin{aligned}\tan(FOV_H/2) &= \frac{h}{2f} \\ \tan(FOV_V/2) &= \frac{3h/4}{2f}\end{aligned}\quad (1)$$

$h$  表示微型显示器 1 水平方向的尺寸，垂直方向的尺寸为  $3h/4$ ， $f$  表示本发明所提供的光学系统的焦距。

人眼最小分辨率为  $10''$ ，大约为  $0.5\text{mrad}$ 。本发明中光学系统的理想角分辨率受设计视场大小的图像源尺寸和像素数的限制，当内部通道所采用图像源为分辨率为  $(640 \times 3) \times 480$  像素的微型显示器且当像面位于无穷远时，头盔显示器的角分辨率  $\theta$  可由公式 (2) 决定：

$$\theta \approx \frac{2 \tan(FOV_H/2)}{640} = \frac{2 \tan(FOV_V/2)}{480} \text{ (rad)} \quad (2)$$

本发明中所给出的光学系统的出瞳距离为组合棱镜结构的边缘与人眼瞳孔的最小距离。为保证使用者佩戴方便，出瞳距离不应过小，应大于 15mm，如果允许用户在使用时佩戴眼镜的话，则要求出瞳距离大于 25mm。本发明所采用的出瞳距离为大于 25mm。

本发明中所给出的光学系统的出瞳直径为 10mm。人眼瞳孔在正常状态下的直径为 2mm 左右，在黑暗环境下会适当放大。为了允许人眼眼球有一定范围的移动，一般要求头盔显示器光学系统的出瞳直径大小在 8mm 以上。为进一步满足军用系统中人眼移动的要求，本发明中的出瞳直径给定为 10mm。

本发明中的光学系统的瞳距采用 62mm。大多数双目显示头盔由两个对称

的光学系统组成，它们各自出瞳主光线的距离为此头盔显示系统的瞳距。人眼的瞳距一般在 54~70mm 之间，双目头盔的瞳距应能良好地配合使用者的双目瞳距。为了使系统结构简单，设计时使用平均值为 62mm。

本发明具有的优点是：该光学系统可以应用于增强现实的头盔显示器，其可以实现的视场角为  $36^\circ(H) \times 27^\circ(V)$ ，最小角分辨率为 1.015 毫弧度，成像质量优良，畸变不大于 1%，可以同时清晰观察外部世界的图景和内部通道中微型显示器 1 所表示的图像源的图像。

## 附图说明

图 1 现有的用于 AR 的头盔显示器的光学结构图

图 2 发明中用于 AR 的头盔显示器的光学结构图

图 3 发明所给出实施例子中用于 AR 的头盔显示器的光学系统图

其中 (a) 为成像于 500mm 时的光学系统图，(b) 为成像于 2000mm 时的光学系统图，(c) 为成像于无穷远时的光学系统图。

图 4 发明所给出实施例子中光学系统的 MTF 曲线

图 5 发明所给出实施例子中光学系统的畸变曲线

图 6 发明所给出实施例子中光学系统的畸变栅格图

1-微型显示器，2-目镜中靠近微型显示器的正透镜，3-双胶合透镜中的正透镜，4-双胶合透镜中的负透镜，5-光学组合器中靠近微型显示器的入射光学平面，6-光学组合器中的半反半透光学面，7-光学组合器中的凹面反射面，8-光学组合器中靠近观察者的出射平面，9-光学系统的出瞳，10-光学组合器中外部光线的入射面，11-由 5、6、10 面组成的直角棱镜，12 由 6、8、12 面组成的含凹面反射面的光学元件，13-目镜，14-现有头盔显示器中光学组合器的一个半反半透光学面，15-现有头盔显示器中光学组合器的第二个半反半透光学面，16-光学组合器。

## 具体实施方式

下面结合附图对本发明所给出的可调焦光学系统对微型显示器 1 成像的内部通道与观察外部世界的外部通道的光路和光学系统成像质量详细说明：

本发明中实施例子的光学系统及其光路图如图 2 和图 3 所示，图 3 (a) 为成像到 500mm 的光学系统图、图 3 (b) 为成像到 2000mm 的光学系统图和图 3 (c) 为成像到无穷远时的光学系统图，通过调节图 3 中微型显示器 1 与正透镜 2 之间的距离（从 2 毫米到 6 毫米），即可实现将内部通道中的图像源成像于

不同位置的目。如图3中微型显示器1的光线被光学系统中正透镜2会聚，由正透镜3和负透镜4组成的双胶合透镜将会聚光线透射到光学组合器16中光学平面5；进入光学组合器16的光线首先透射经过半反半透光学面6，光学能量损失1/2，此时的光线被光学组合器16中的凹面反射面7反射到半反半透光学面6，光学能量再次损失1/2；被光学面6所反射的光线经过光学平面8，进入图中位于光学系统出瞳9处的观察者瞳孔。图3中外部世界的光线则通过光学平面10进入光学组合器16，并经过半反半透光学面6和光学平面8进入观察者的瞳孔，此时由光学面5、10、6所组成的光学元件11与由光学面6、7、8所组成光学元件12的材料相同，未在光学面6处引入折射，但因光学面6为半反半透光学面，光学能量损失1/2。内部通道图像源发出的光在通过光学系统后的光能利用率为 $(1/2) \times (1/2) = 1/4$ ，外界光线经过光学系统透射后的光能利用率为1/2。

本实施例子中微型显示器1对角线长为4/3英寸，光学系统在成像于无穷远时，水平视场为 $\pm 18^\circ$ ，垂直视场为 $\pm 13.5^\circ$ ，此时的光学系统焦距为41.2365mm。该光学系统的最小角分辨率为： $\theta \approx 2 \tan(FOV_H / 2) / 640 = 2 \times \tan(18) / 640 = 1.015 \times 10^{-3} = 1.015 \text{ mrad}$ ，即其为1.015毫弧度。

本实施例子中微型显示器1与光学组合器16之间的直线距离为28.45mm，光学组合器16到出瞳9之间的直线距离即光学系统的出瞳距离为25mm。为实现外部世界与内部通道之间水平视场和垂直视场的匹配，光学组合器的设计尺寸为 $36 \times 36 \times 40 \text{ mm}^3$ 。

本发明中光学系统用于AR中的头盔显示器，需要实现外部世界的图景与内部通道的图像的真实融合，因此应对内部通道的光学系统的畸变进行控制，本实施例子中的光学系统的畸变不大于1%。

本实施例子中的光学系统的光学传递函数曲线(MTF)如图4所示，其中图4(a)、图4(b)和图4(c)分别表示图3(a)、图3(b)和图3(c)所示光学系统的MTF曲线。而对应不同成像位置的畸变曲线如图5所示，图6则给出了各自所对应的畸变栅格。



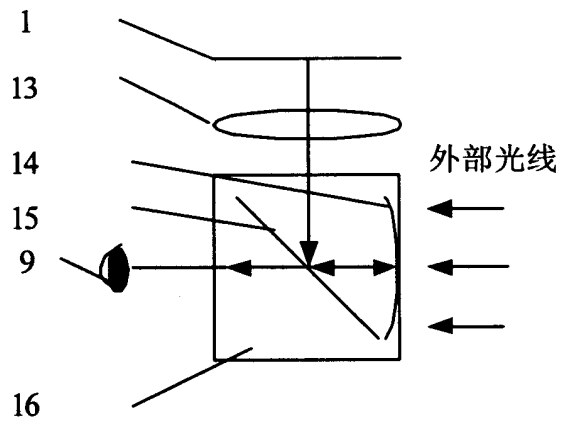


图1

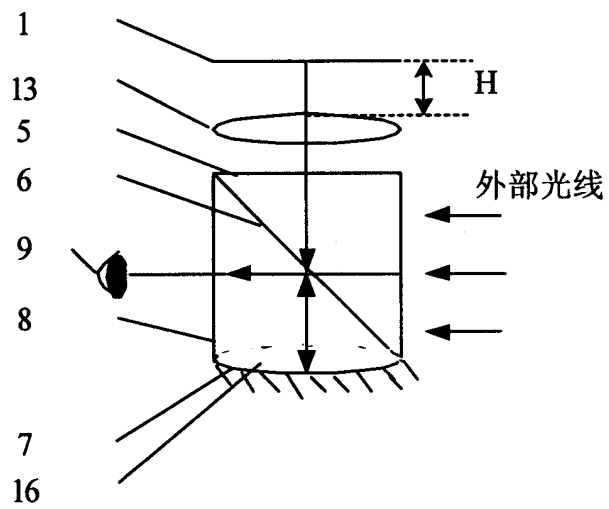


图2

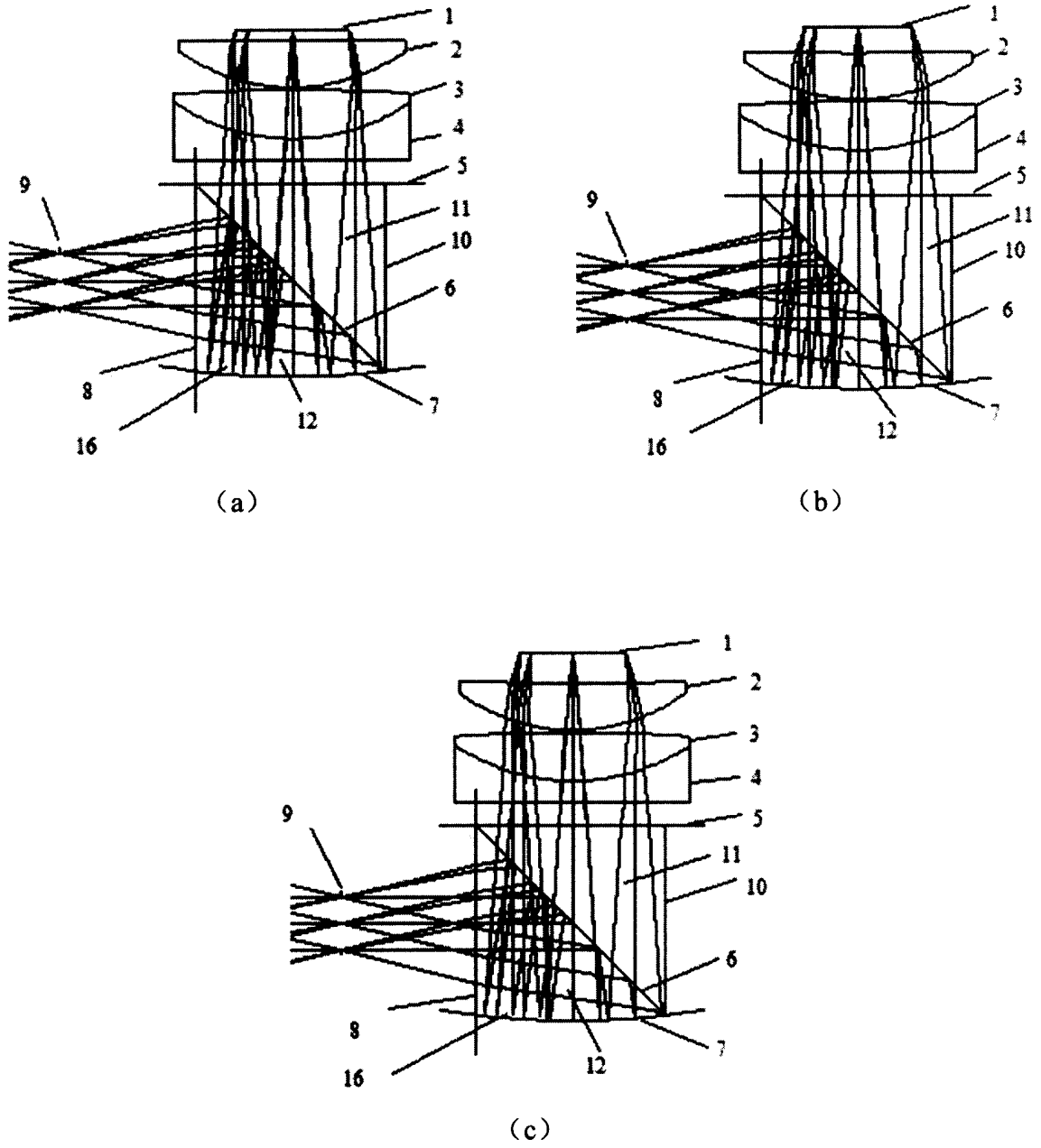


图 3

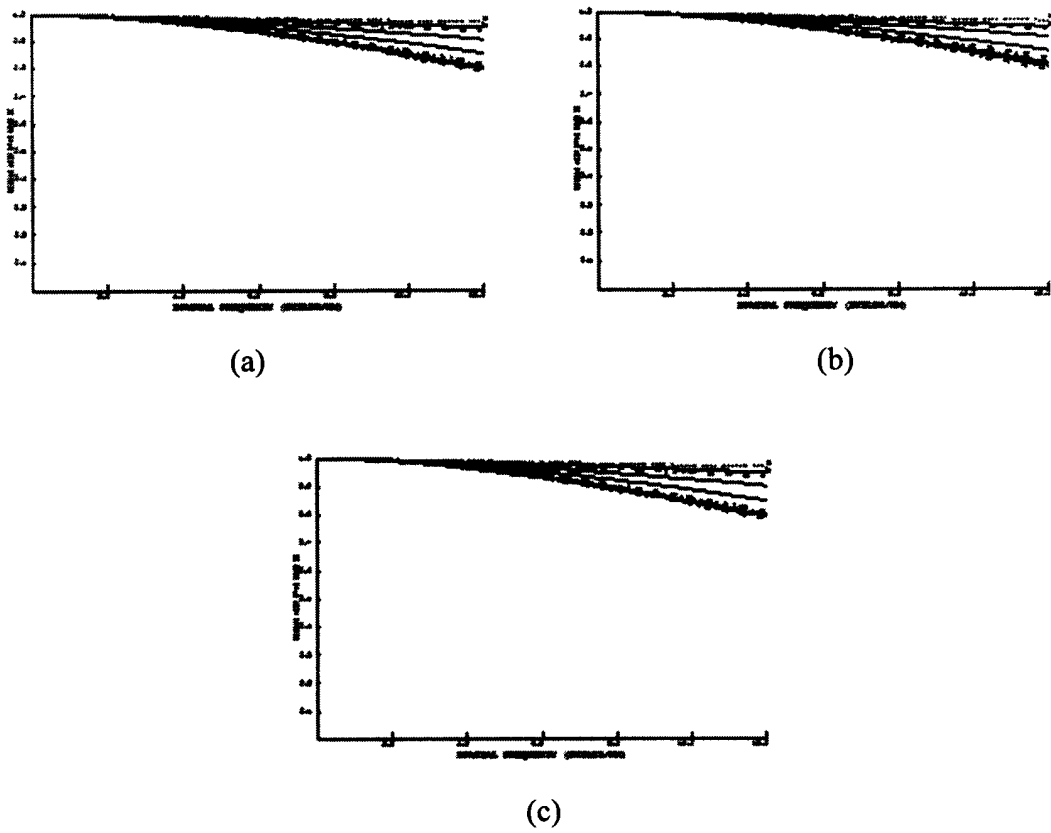


图 4

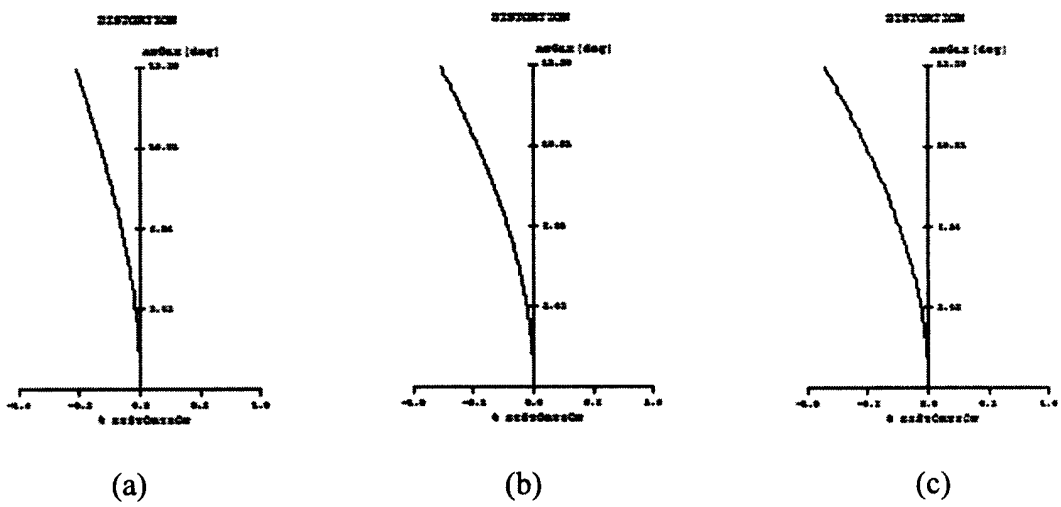


图 5

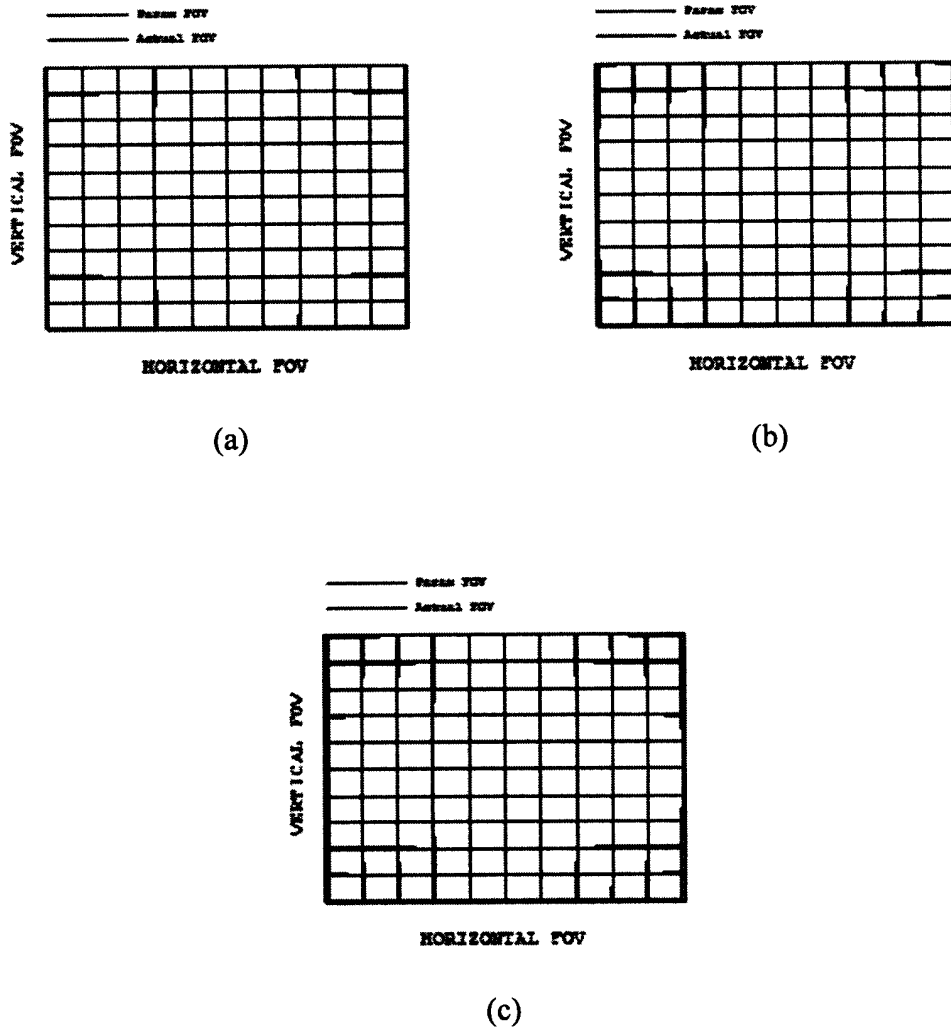


图 6