

多视角动态图像悬浮式投射系统的设计与验证

黄佳敏 陈恩果 郭太良

福州大学平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福建 福州 350000

摘要 为了采集物体在不同视角的形貌图像信息,并实现同步化输出的显示系统,设计并验证了一种可供多视角同步观察的悬浮式动态图像显示系统。该系统中的投射式图像源融合了物体在不同视角的形貌图像信息,它能够被同步地投射至多视角成像装置内的空气中形成悬浮的虚像。推导了四视角悬浮式显示系统的结构参数;为了避免不同视角图像的错位和重影,定义了动态图像显示的误差容限,并推导了其于图像源空间和介质层厚的函数关系;实现了尺寸为60 mm×60 mm×30 mm的微型化样品原型验证了理论分析。实验结果表明,该设计对各视角的信息能够同步化还原显示,有效抑制了几何像差和色差。这一系统既可实现大面积多视角悬浮式投射显示,也可实现微型化可携带式多角度展示装置,具有广阔的商业应用前景。

关键词 成像系统;多视角悬浮式显示;动态图像投射;误差容限;系统微型化

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.013301

Design and Demonstration of Multiple-Visual-Angle Suspended Display System for Dynamic Images

Huang Jiamin Chen Enguo Guo Tailiang

National & Local United Engineer Laboratory of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University,
Fuzhou, Fujian 350000, China

Abstract In order to capture object image information in different visual angles and realize the synchronous output display system, a kind of suspended display system for dynamic images is designed and demonstrated, which is synchronously observed from multiple visual angles. In this system, image-projecting source combines the morphology information of objects from different angles of view. The source is projected into multiple-visual-angle imaging device to generate an integrated virtual image. The key parameters of four-visual-angle suspended display system are derived. The error margin of dynamic image display is defined to avoid dislocation and double-image from different angles of view. The functional relation between the error margin and source location/layer thickness is also derived and analyzed. A miniaturized prototype with the dimensions of 60 mm×60 mm×30 mm is fabricated for theoretical verification. Experimental results show that the proposed system can offer synchronized display from different angles of view, expand display information content and restrain geometric and chromatic aberration. The proposed system can not only realize large-area multi-visual-angle suspended display, but also achieve miniaturized and portable multi-view display. It has a broad prospect in commercial applications.

Key words imaging systems; multiple-visual-angle suspended display; dynamic image projecting; error margin; system miniaturization

OCIS codes 080.4030; 220.4830; 330.7310

1 引言

视觉是人类获取信息的主要来源,图像显示是视觉获得信息最重要的方式。随着信息量的迅速增长和信息传输的实时化,显示技术越来越受到研究者的重视,显示产业也已经成为光电领域的龙头,在信息产

收稿日期: 2015-04-01; 收到修改稿日期: 2015-08-05; 网络出版日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(61405037)、高等学校科技发展基金(650074)

作者简介: 黄佳敏(1994—),女,硕士研究生,主要从事信息光电显示方面的研究。E-mail: hjm45661@sina.com

导师简介: 陈恩果(1984—),男,博士,讲师,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: ceg@fzu.edu.cn(通信联系人)

业中具有举足轻重的作用。未来显示技术的发展必然趋向于视觉信息量的提升,同时兼顾系统的结构简单和节能环保。如今,显示技术已经完成了由20世纪占主导地位的阴极射线管(CRT)到平板显示技术(FPD)的过渡^[1-2]。其中,主流的平板显示技术包括液晶显示(LCD)、有机发光二极管(OLED)、等离子显示(PDP)。平板显示技术研究领域中,研究者们已运用OLED技术在0.23英寸(0.58 cm)的显示面积内获得超过300 PPI分辨率的显示^[3],应用蓝向液晶可以达到微秒级的响应速度,消除彩色场序列显示中的色彩断裂现象,场序显示模式的效率和分辨率都比以往提高了近三倍^[4],这些研究都意味着在时间和空间能够再现更丰富的显示细节信息。然而,平板显示中的二维图像仅包含长度和宽度信息,信息量最终将受限于人眼分辨率的极限^[5]。为了显示信息的进一步延展,学者们基于视差栅障和柱透镜分光的原理研究了自由立体显示技术^[6-9]。由于扩展了景深信息,观察者能够在获得二维图像信息的同时感受到立体视觉。简而言之,研究者们一直致力于可视化信息量的扩展,那么,在采集信息与信息重构途径多样化的背景下^[10-11],提升视觉效果的有效手段之一就是让显示系统在单位时间内输出更为庞大的可视化信息量^[12]。因此,采集物体在不同视角的形貌图像信息,并实现同步化输出的显示系统,是具有一定的研究价值的。2008年,Simonsen^[13]在美国专利中公开了一种类金字塔结构的悬浮式显示装置,该装置基于反射镜像原理,通过4个反射镜,把反射镜上方或下方的平面图像成像在类金字塔结构中心,该技术具有一定的商用价值。2014年,姜晓鹏等^[14]通过分基于C++与Open GL进行了系统的软件研发,但专利和论文中没有提及装置的详细光学设计验证和系统的容限分析。基于此,本文验证了一种可供多视角观察的悬浮式动态显示系统,详细阐述系统原理及结构参数的推导,定量分析影响视觉效果的因素,最后通过实验进行了验证。

2 多视角悬浮式显示系统的原理及结构参数计算

可供全视角观察的悬浮式动态显示系统由上方的投射式图像源和下方的多视角成像装置两部分组成。投射式图像源是一个由中心向外分割成 N 个对称空间的显示屏或投射系统,每一个空间分别投射一个物体在各个视角同步采集到的静态图像或动态视频。成像装置则是一个与图像源空间投射尺寸一一对应的立体结构,该结构是一个介质体或是具有一定厚度的介质膜层,在 30° 到 60° 的角度窗口具有透射率和反射率相当的光学特质。图1是多视角和四视角悬浮式同步投射显示系统,被采集的三维物体各视角的图像悬浮成像于装置中可供观察,观察者可以同时获取物体在不同视角的信息,且空间呈现方式与原物体一致,能够反映物体的原貌。

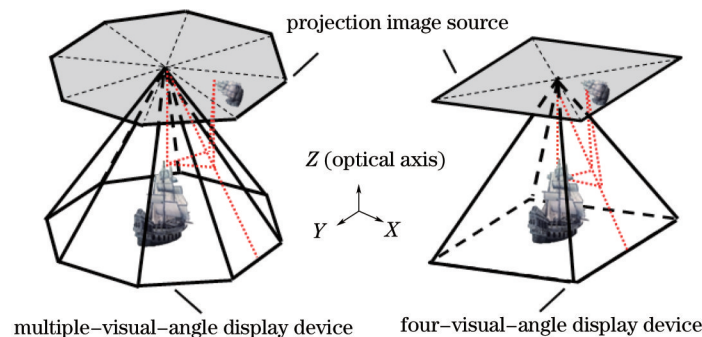


图1 多视角/四视角悬浮式投射显示系统

Fig.1 Multiple/four-visual-angle suspended display system

悬浮式动态显示系统理论上对同步输出的视角数没有限制,然而在实际应用中,视角数越多,每一视角对应的视区宽度就越窄,视区宽度过窄将影响观察效果的舒适度,多视角软件部分的实现较四视角系统更困难,这就需要在视角数与视觉效果中取得平衡,考虑系统微型化的便携式结构,因此采用四视角作为典型模型,通过设计和实验验证多视角悬浮式系统的原理和结构。

图2为四视角悬浮式显示系统的成像原理图。由于投射图像源的空间对称性,成像装置的正视图中的斜面都将与底面成 45° 夹角,其主视图是一个等腰直角三角形。不同视角的图像源的投射光线入射至介质与空气的分界面时,将发生部分反射和部分透射,透射光将被底面吸收,反射光则被观察者的眼睛所接收。这里,入射至人眼的是发散光束,人眼感受到的是发散光线反向延长线交点所确定的像点,显然,该像点是

虚像点,且虚像点的位置在成像装置中心的光轴方向上。根据平面镜成像的原理,像和物的大小总是相等的,并且物与像成镜像关系,因此整个虚像与图像源是正立等大的关系。系统的各视场范围内垂轴放大率 $\beta = 1$,不会产生畸变,且系统膜厚很小可以忽略厚度对像质的影响,即该系统能够抑制几何像差与色差^[5]。在实际系统实现过程中,可通过控制介质层厚度,或者通过镀膜增加表面反射率降低二次反射光光强的方式,来达到改善成像质量的目的。投射图像源上四个视角的图像都同时在装置内的光轴上成像,观察者A和B可观察到物体在相应视角的图像,这个图像就是悬浮在成像装置内的虚像。图2中以投射源上的左右对称的两物点成像,这两点将成像在装置光轴上的同一点,所以环绕一周观察到的四个虚像点的位置都在同一高度,真实还原了物体在不同视角的图像信息。

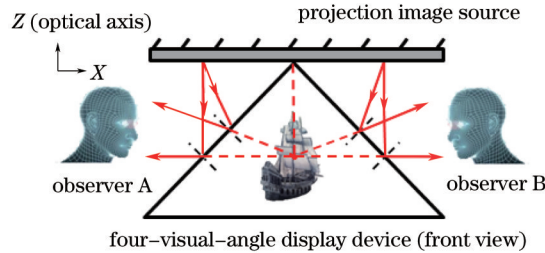


图2 四视角悬浮式显示系统的成像原理图

Fig.2 Schematic diagram of four-visual-angle suspended display system

针对四视角悬浮式显示系统的结构参数进行具体推导和计算,如图3所示,决定成像装置结构参数的三个关键参数为:反射面的顶角 β 、反射面的斜边 l_2 和反射面的底边 l_3 ,其中,底边长 l_3 由投射式图像源的尺寸确定。

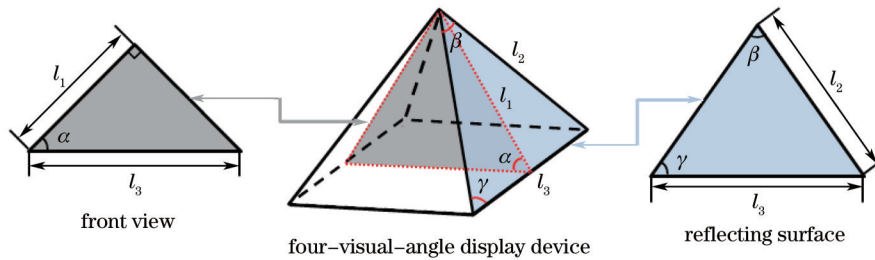


图3 四视角悬浮式显示系统结构参数计算示意图

Fig.3 Schematic diagram for calculating system parameters of four-visual-angle suspended display system

由主视图截面可知,主视图是一个等腰直角三角形,底角 α 为 45° ,其与底边 l_3 的几何关系为

$$l_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}l_3\right)^2 + \left(\frac{1}{2}l_3 \times \tan \alpha\right)^2}, \quad (1)$$

进一步,由反射面形成的三角形可知, l_1 是垂直于底边 l_3 的高,由此可得到 l_2 的表达式为

$$l_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}l_3\right)^2 + l_1^2}, \quad (2)$$

由(1)式和(2)式联立可得 l_1 、 l_2 和 l_3 之间的关系式,

$$\begin{cases} l_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}l_3 \\ l_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}l_3 \end{cases}, \quad (3)$$

式中定义的 l_2 和 l_3 与顶角 β 的计算可在反射面三角形中通过求反三角函数关系得到:

$$\beta = 2 \times \arccos\left(\frac{l_1}{l_2}\right) = 2 \times \arcsin\left(\frac{1/2 l_3}{l_2}\right), \quad (4)$$

将 $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sqrt{6}}{3}$ 代入(4)式,可解得 $\beta = 70.52^\circ$ 。进一步,在反射面三角形中由 $\gamma = \frac{180^\circ - \beta}{2}$ 进一步得到 $\gamma = 54.74^\circ$ 。

综上,四视角悬浮式显示系统的结构参数如表1所示,只要投射式图像源的尺寸确定,成像装置的结构参数就可以逐一计算得到,由此可构建出整个系统。

表1 四视角悬浮式显示系统的结构参数

Table 1 Parameters of four-visual-angle suspended display system

Parameter of four-visual-angle suspended display system	
Foot of reflector l_3	size of image source
Hypotenuse of reflector l_2	$l_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} l_3$
Vertex angle of reflector β	$\beta = 70.52^\circ$
Base angle of reflector γ	$\gamma = 54.74^\circ$

3 误差容限及其分析推导

前文计算了成像装置的结构,理论上成像装置的顶点在图像源对角线的交点上,且图像源对角线的投影要与成像装置的四条棱分别重合,若实际上二者的相对位置发生变化,则有可能造成多视角的图像错位和重影,产生不连续像和令人不满意的成像效果。这里将悬浮式投射系统动态图像显示的误差容限定义为位移误差容限、角度误差容限和介质层厚误差容限三个指标,用以分析影响像质的因素、约束定位和指导装配。

3.1 位移误差容限

如图4(a)所示,若投射图像源对角线交点恰好与四棱锥的顶点重合,虚像恰好在光轴上,但是当图像源沿Z轴正方向平移了距离 d_1 时,即等效于物点远离了反射面,根据平面镜成像的原理,右侧(左侧)物点所成虚像点将向X轴的负方向(正方向)平移 d_1 的距离,两侧的虚像皆偏离光轴,即

$$\Delta x_1 = 2d_1. \quad (5)$$

根据线性透视为人眼提供深度感知的原理^[16],即物体随着距离的增加而线性地减小,在距离光轴 d_1 的位置所成的像应小于在光轴上所成的像,此时人眼在各视角上观察到的图像都不符合线性透视的规律,将影响显示效果。

同理,如图4(b)所示,当图像源在X方向错位了一定距离 d_2 时,左右两侧依然成像于光轴上,但是产生了Z方向的位置移动,左侧物点所成虚像点向Z轴正方向平移了 d_2 的距离,而右侧物点所成虚像点向Z轴负方向平移了 d_2 的距离,两侧的虚像点之间的距离为 $2d_2$,即

$$\Delta z_2 = 2d_2, \quad (6)$$

由以上分析可知,当发生位移误差时,各个视角的图像将发生错位,不再成像于装置中心,影响了显示效果。(5)式和(6)式定义了位移偏移量与误差容限的关系,由此可求解误差容限的取值,设计实例中将作详细说明。

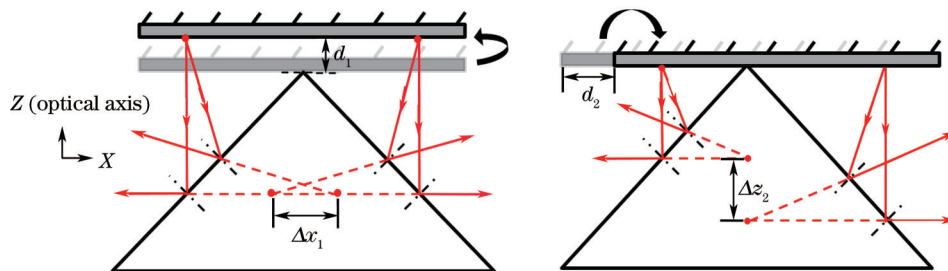


图4 位移误差容限计算示意图。(a) Z方向;(b) X方向

Fig.4 Schematic diagram for calculating displacement error margin. (a) Direction Z; (b) direction X

3.2 角度误差容限

如图5所示,当图像源与成像装置产生一定夹角,则图像源物点位置将沿圆弧发生相对位移,即在Z轴和X轴方向均发生相对位移。考虑图像源中心向左距离为 d_3 处的物点,其向Z轴方向移动了 Δz_{31} ,向X轴方向移动了 Δx_{31} 。令该夹角为 δ ,根据图5放大图中的几何关系可得:

$$\begin{cases} \Delta z_{31} = d_3 \sin \delta \\ \Delta x_{31} = d_3 \times (1 - \cos \delta) \end{cases}, \quad (7)$$

(7)式求解的是原物点相对于夹角 δ 的偏移量,该式的意义在于可由此推导出虚像点的偏移量从而得到角度误差容限的定义式。由此,分别考虑该物点在Z轴和X轴正方向上发生位移,结合(5)式和(6)式,可得到:

$$\begin{cases} \Delta z_{32} = \Delta z_{31} = d_3 \sin \delta \\ \Delta x_{32} = \Delta x_{31} = d_3 \times (1 - \cos \delta) \end{cases}, \quad (8)$$

式中 Δz_{32} 和 Δx_{32} 分别代表虚像点在 Z 轴和 X 轴发生的相对位移量,同理可得右侧物点对应物点的偏移量。因此,当图像源对成像装置产生一定倾斜时,虚像将在横纵向均产生偏移,且二者并不相等,偏移量与夹角具有一定的函数关系,在不同视角将观察到一定程度的成像变形现象。角度误差容限的取值由(8)式定义。

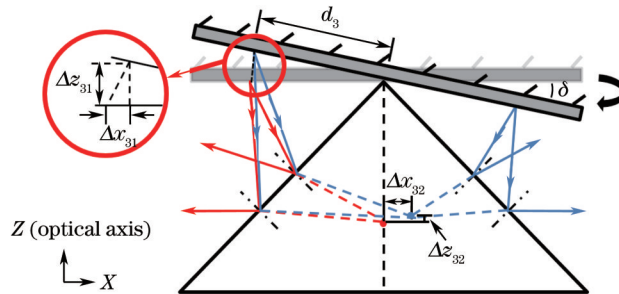


图5 系统的角度误差容限计算示意图(zox 平面)

Fig.5 Schematic diagram for calculating angle error margin (surface zox)

如图6所示,当图像源绕锥体光轴方向旋转一定角度,则图像源物点位置将以显示屏中点为圆心沿旋转方向做圆周运动。考虑图像源绕锥体光轴方向旋转一定角度 θ ,四个视角显示屏上的图像源将同时发生相对运动。由于图像源与虚像点之间遵循平面镜成像原理,物与像成镜像关系,且大小相等,所以当图像源发生绕轴旋转时,所成虚像也将与图像源同步运动,以锥体顶点为圆心, θ 为旋转角度在与视角同一平面内与图像源做同向圆周运动。若显示屏旋转 90° 时,图像源将在锥体中轴上成像,不会产生偏斜,仅仅只是在同一视角观察到不同的视角信息,不会对显示效果产生影响。如图6所示。

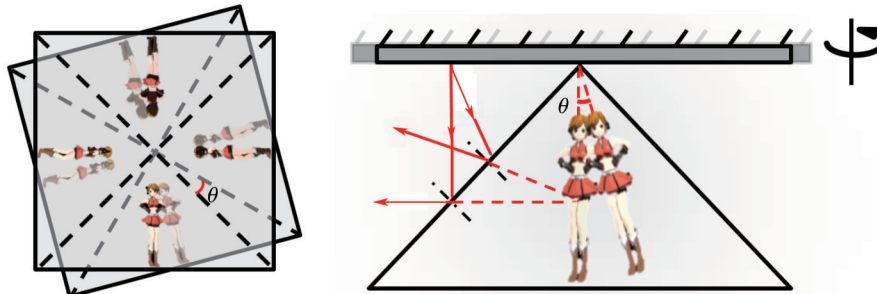


图6 视角图像错位对显示效果的影响(xoy 平面)

Fig.6 Impact on misplacement of different visual-view images (surface xoy)

3.3 介质层厚误差容限

如前文所述,成像装置是由一定折射率的介质体或者介质层构成,假定介质层有一定的厚度且折射率不为1,则入射光线将在介质层的上下表面各发生一次反射,具体情况分析如下:如图7所示,介质层上表面发生的一次反射,出射光线的反向延长线的交点位于光轴上;介质层下表面发生的二次反射,出射光线的反向延长线的交点将与一次反射的像点产生位移;这意味着介质层厚的存在将导致双像的产生,那么,介

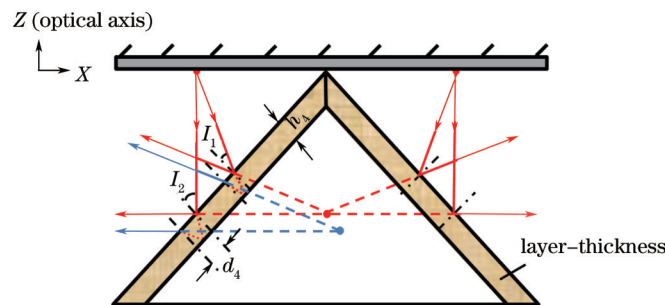


图7 系统的介质层厚误差容限计算示意图

Fig.7 Schematic diagram for calculating layer-thickness error margin

质层厚与双像位置存在着一定的函数关系。

设介质层厚度为 h_4 , 上表面出射光线与下表面出射光线之间沿介质层表面产生的位移为 d_4 。介质层的广义折射角 I' 和广义入射角 I 满足的折射定律 $n' \sin I' = n \sin I$, 其中 $n=1$, 且折射角 I' 用其所满足的几何关系代入得:

$$\frac{\sin I}{n'} = \frac{d_4}{\sqrt{d_4^2 + 4h_4^2}}, \quad (9)$$

等式两边平方移项, 整理可得,

$$d_4 = \frac{2h_4 \sin I}{\sqrt{n'^2 - (\sin I)^2}}, \quad (10)$$

式中当 $n=n'=1$ 时, 介质层即空气层, 成像不成立; 当 $n \neq n'$, h_4 和 n' 都为定值时, 对函数 d_4 求一阶导数可得:

$$d_4' = \frac{n'^2 h_4 \cos I + h_4 \cos I \sin^2 I}{(n'^2 - \sin^2 I)^{\frac{3}{2}}}, \quad (11)$$

式中 $|I| \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, 即 d_4 在定义域内大于零, 则 d_4 是以 I 为自变量的单调递增函数, d_4 随 I 的增加而增大, 即入射角越大, d_4 的值越大。如图 7 所示, 考虑两条入射角不相等的入射光线, 入射角为 I_1 的光线, d_4 的值较小; 而入射角为 I_2 的光线, d_4 的值较大。(11) 式的结果表明: d_4 的值与入射角非线性变化关系, 虚像点将会产生 X 和 Z 轴方向上的位移。该组位移定义了介质层厚误差容限, 图 8 为系统的介质层厚误差容限计算示意图。

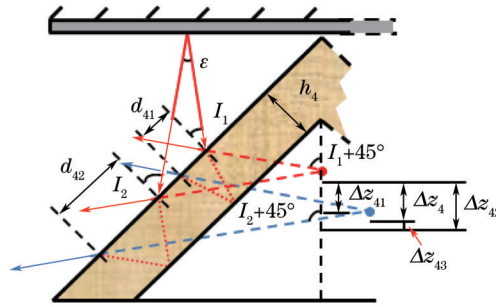


图 8 系统的介质层厚误差容限计算示意图

Fig.8 Schematic diagram for calculating layer-thickness error margin

如图 8 所示, 两束光线的入射角分别为 I_1 和 I_2 , 令 $\alpha = I_2 - I_1$, 根据正弦定理可以得到两束光线二次折射后光线的反向延长线上在 Z 轴方向的偏移量 Δz_{41} 和 Δz_{42} :

$$\begin{cases} \Delta z_{41} = \frac{d_{41} \sin I_1}{\sin(45^\circ + I_1)} \\ \Delta z_{42} = \frac{d_{42} \sin I_2}{\sin(45^\circ + I_2)} \end{cases}, \quad (12)$$

又根据图 8 中的几何关系可得:

$$\Delta z_{43} = \frac{(\Delta z_{42} - \Delta z_{41}) \sin(45^\circ + I_1)}{\sin(I_2 - I_1)} \cos(45^\circ + I_2), \quad (13)$$

由此可写出 Δz_4 的数学表达式, 并将 Δz_{43} 代入:

$$\Delta z_4 = \Delta z_{42} + \frac{(\Delta z_{42} - \Delta z_{41}) \sin(45^\circ + I_1)}{\sin(I_2 - I_1)} \cos(45^\circ + I_2), \quad (14)$$

$$\Delta z_4 = \Delta z_{42} + \Delta z_{43} = \frac{1}{2} (\Delta z_{42} + \Delta z_{41}) + \frac{(\Delta z_{42} - \Delta z_{41}) \cos(I_1 + I_2)}{2 \sin(I_2 - I_1)}, \quad (15)$$

求解公式可得到虚像点在 Z 轴方向上的偏移量 Δz_4 。

同理, 根据图 8 可计算出虚像点在 X 轴方向上的误差容限

$$\Delta x_4 = \frac{\Delta z_{42} - \Delta z_{41}}{2 \tan(I_2 - I_1)} + \frac{(\Delta z_{42} - \Delta z_{41}) \sin(I_1 + I_2)}{2 \sin(I_2 - I_1)}. \quad (16)$$

综上所述,虚像点在X轴与Z轴方向上的误差容限 Δx_4 和 Δz_4 可计算为

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta x_4 = 2h_4 \frac{(\sin I_2)^2 \sin(45^\circ + I_1) \sqrt{n^2 - (\sin I_1)^2} - (\sin I_1)^2 \sin(45^\circ + I_2) \sqrt{n^2 - (\sin I_2)^2}}{\sin(I_2 - I_1) \sqrt{n^2 - (\sin I_1)^2} \sqrt{n^2 - (\sin I_2)^2}} \\ \Delta z_4 = 2h_4 \frac{\left[(\sin I_2)^2 \sin(45^\circ + I_1) \sqrt{n^2 - (\sin I_1)^2} - (\sin I_1)^2 \sin(45^\circ + I_2) \sqrt{n^2 - (\sin I_2)^2} \right] [\sin(I_2 - I_1) + \cos(I_1 + I_2)]}{\left[\sin(I_1 + I_2) + \cos(I_2 - I_1) \right] \sin(I_2 - I_1) \sqrt{n^2 - (\sin I_1)^2} \sqrt{n^2 - (\sin I_2)^2}} + \frac{2h_4 (\sin I_1)^2}{\sin(45^\circ + I_1) \sqrt{n^2 - (\sin I_1)^2}} \end{array} \right., \quad (17)$$

(17)式定义了介质层厚误差容限,阐明了虚像的偏移量与介质层厚的函数关系。当介质层的折射率和厚度确定,同一个物点会在装置中出现两个固定位置的虚像点,且下表面的虚像点将偏离光轴位置。进一步,对(17)式求偏导 $\frac{\partial x_4}{\partial I_1}$ 和 $\frac{\partial x_4}{\partial I_2}$ 可知其均不是常数值,这表明了上下表面的像偏移量不仅是介质层厚的函数,也是入射角的函数,上下表面产生的两个虚像不仅存在一定的位移,而且发生了形变。

4 理论验证及设计实例

前文计算了成像装置的结构参数,并定义了构成四视角悬浮式显示系统的误差容限及其函数关系,下文将以实例来验证设计,并进一步确定误差容限的取值。

图9(a)是经过处理后的四视角的投射式图像源,它由红色虚线切分成四个相等空间大小的视区,分别对应成像系统结构中的四个反射面,四个视角图像分别在同一时刻采集,因此反映了同一物体在不同视角的形貌特征。四视角的投射系统对图像源显示区域的划分会缩小固有的显示有效面积,使得有效显示区域变为原来的1/4,但是可以同步还原四个视角的图像信息,使得显示区域得到更充分的利用。图9(b)是根据计算得到的结构参数加工的成像装置的实物图,根据前文所述,装置参数可由投射源尺寸计算得到。基于前文推导的误差容限的函数关系式,运用聚对苯二甲酸乙二酯(PET)光学膜作为系统材料,介质层参数如下:总厚度 $0.24 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$,透光率97%,硬度4H,工作温度 $-10^\circ \text{C} \sim 80^\circ \text{C}$,由表1参数裁剪系统,将四片全等三角形膜片根据顶角关系拼接胶合成成像系统,定量讨论其取值范围以及极值。投射图像源中人物在各个视角中的长宽高为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$,成像装置的长宽高为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,观察者观察到的悬浮显示的人物应位于装置中间,图10中的方形区域即为主视图中动态人物的活动范围。对于本系统而言,系统俯视图中用于显示的有效底面积取决于显示图像的最大像高,设像高为 h ,底边边长为 a ,则可以得到图像显示的有效底面积 $S = (a - 2h)^2$,占锥体底面积的 $\left(1 - \frac{2h}{a}\right)^2$,在有效显示面积内图像得到了充分的利用。

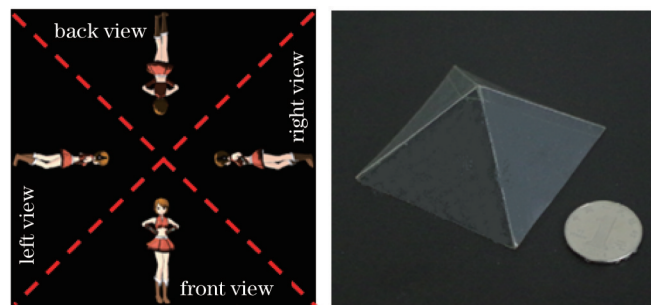


图9 四视角悬浮式投射系统设计验证。(a) 投射式图像源; (b) 加工的样品原型

Fig.9 Design verification of four-view-angle suspended display system. (a) Image-projecting source; (b) prototype of the sample processing

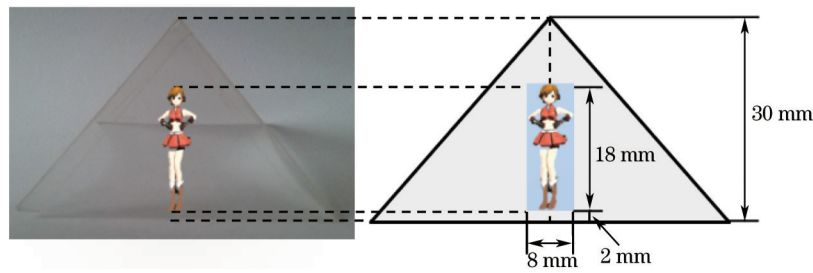


图10 四视角悬浮式投射系统的误差容限分析

Fig.10 Error margin analysis of four-visual-angle suspended display system

当投射图像源产生上移的位移误差时,左侧物点的虚像向 X 轴的正方向发生偏移,右侧物点的虚像向 X 轴负方向发生偏移,人物可在 X 轴方向发生位移的误差容限为 $\Delta x_1 \in (0,12)$,根据(5)式可计算得到 $d_1 \in (0,6)$,则图像源应被控制在成像装置上方6 mm的垂直空间内。当图像源向右侧错位时,左侧物点的虚像向 Z 轴的正方向发生偏移,右侧物点的虚像向 Z 轴负方向发生偏移,人物在 Z 轴方向的误差容限的取值为 $\Delta z_2 \in (0,4)$,根据(6)式可计算得到 $d_2 \in (0,2)$,则图像源的装配空间允许侧向平移2 mm。

当投射图像源发生倾斜时,左侧物点向 Z 轴的正方向发生偏移,右侧物点向 Z 轴的负方向发生偏移,若人物不能超出装置模型的范围,即当 $d_3=10$ mm时, $\Delta x_{32} \leq 6$ mm, $\Delta z_{32} \leq 0.6$ cm,则人物与 X 轴和 Z 轴方向的角度误差容限的取值为 $\Delta x_{32} \in (0,6)$ 和 $\Delta z_{32} \in (0,0.6)$,根据(8)式可得 $\delta \leq 36.87^\circ$,分析可知,倾斜将主要造成成像的变形,因此角度误差容限将结合位移误差容限作为取值依据。

当考虑介质层具有一定厚度时,悬浮物体的虚像将在 X 轴和 Z 轴方向上产生相对位移。根据(11)式与(12)式的分析可知,虚像不仅发生形变,而且产生双像,但由于人眼分辨能力的限制,成像效果仍然在可接受范围之内。

以上述分析作为依据,可确定图像源与成像装置的相对定位,由此构建四视角图像悬浮式显示系统,该系统的实际显示效果如图11所示,成像装置同步显示了正视角、背视角、左视角和右视角四个方位的图像信息,可以分别在成像装置相应的角度观察到。与图像源相比,悬浮式显示基本真实地还原了四个视角的信息,抑制了几何像差或色差,并且对静态图像和动态视频都能呈现较好的视觉效果。成像装置的尺寸可以由图像源的大小确定,既可实现大面积多视角悬浮式投射显示,又可实现微型化可携带式多角度展示装置。

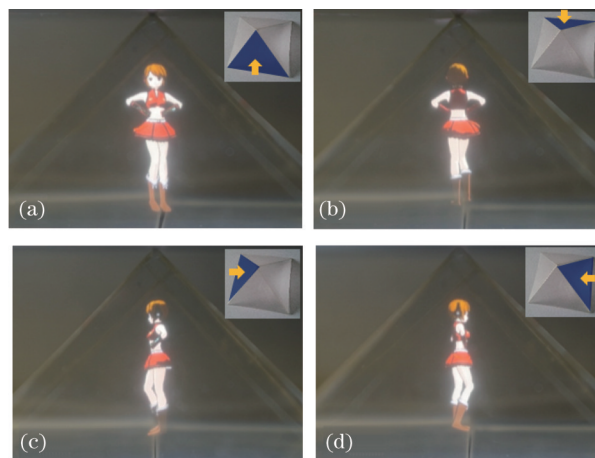


图11 四视角图像的悬浮式显示效果。(a) 正视角;(b) 背视角;(c) 左视角;(d) 右视角

Fig.11 Visual effect of four-visual angle suspended display. (a) Front view; (b) back view; (c) left view; (d) right view

5 结 论

从结构计算、误差容限分析、设计验证三个方面详细阐述了一种悬浮式投射显示系统,该系统真实还原了物体在各个视角采集的图像信息,对静态和动态的图像都有同步化的显示效果,观察者可得到系统投射的多视角信息。该四视角悬浮式显示系统不仅成像效果佳、色彩饱满,而且实现了可携带式的微型化结构。可以预见,该显示系统将具有广阔的商业应用前景。

参考文献

- 1 Tannas Jr L E, Glenn W E, Doane J W, *et al.*. Flat panel display technologies[J]. MRS Bulletin–Materials Research Society, 1997, 22(9): 51.
- 2 Chen Xiangzhen. The current stage and development trend of FPD technology[J]. Optoelectronic Technology, 2008, 28(1): 1–6.
陈向真. 平板显示技术现状和发展趋势[J]. 光电子技术, 2008, 28(1): 1–6.
- 3 Asaki R, Yokoyama S, Kitagawa H, *et al.*. 18.1: A 0.23-in. High-resolution OLED microdisplay for wearable displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2014, 45(1): 219–222.
- 4 Chen Y, Yan J, Sun J, *et al.*. A microsecond-response polymer-stabilized blue phase liquid crystal[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(20): 201105.
- 5 Sang Xinzhu, Yu Xunbo, Zhao Tianqi, *et al.*. Three-dimensional display with smooth motion parallax[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209011.
桑新柱, 于迅博, 赵天奇, 等. 具有平滑运动视差的三维显示技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209011.
- 6 Zhou Lei, Wang Qionghua, Tao Yuhong, *et al.*. Optimum design of lenticular lens for auto-stereoscopic display[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3506–3510.
周磊, 王琼华, 陶宇虹, 等. 自由立体显示用柱面透镜光栅的优化设计[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3506–3510.
- 7 Chen E, Guo T. Autostereoscopic 3D flat panel display using an LCD-pixel-associated parallax barrier[J]. Optoelectronics Letters, 2014, 10: 191–193.
- 8 Liu Yao, Deng Huan, Luo Chenggao, *et al.*. An integral imaging three dimensional display method based on aperture stop array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0910004.
刘尧, 邓欢, 罗成高, 等. 基于光孔阵列的集成成像三维显示方法[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0910004.
- 9 Huang Bingle, Guo Tailiang, Yao Jianmin, *et al.*. Design of slanted zigzag staggered barrier for autostereoscopic display[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(10): 202–206.
黄炳乐, 郭太良, 姚剑敏, 等. 自由立体显示器倾斜锯齿交错狭缝光栅的设计[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 202–206.
- 10 Liu K, Zhou C, Wei S, *et al.*. Optimized stereo matching in binocular three-dimensional measurement system using structured light[J]. Appl Opt, 2014, 53(26): 6083–6090.
- 11 Jia Songmin, Wang Ke, Li Xiuzhi, *et al.*. Monocular camera three dimensional reconstruction based on variation model[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0415002.
贾松敏, 王可, 李秀智, 等. 基于变分模型的单目视觉三维重建方法[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0415002.
- 12 Yang Lei, Xia Jun, Zhang Xiaobing, *et al.*. Three-dimensional display by holographic imaging on multiple focal planes[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209017.
杨磊, 夏军, 张晓兵, 等. 基于多平面全息成像的三维显示[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209017.
- 13 Simonsen P A. Display Device for Producing Related Quasi_Three_Dimensional Images: US, US2008/014417 A1[P]. 2008–06–19.
- 14 Jiang Xiaopeng, Ma Chunyong, Chen Lu, *et al.*. Design and implementation of 360° holographic phantom system[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(12): 4268–4272.
姜晓鹏, 马纯永, 陈璐, 等. 360°全息幻影系统的开发与实现[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(12): 4268–4272.
- 15 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- 16 Wang Shulu, Ming Hai, Wang Anting, *et al.*. Three-dimensional display based on human visual perception[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209007.
王书路, 明海, 王安廷, 等. 基于人眼视觉特性的三维显示技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209007.

栏目编辑: 苏岑