



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110998412 A

(43)申请公布日 2020.04.10

(21)申请号 201880047690.2

(22)申请日 2018.05.18

(30)优先权数据

62/508,202 2017.05.18 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2020.01.17

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2018/033430 2018.05.18

(87)PCT国际申请的公布数据

W02018/213727 EN 2018.11.22

(71)申请人 代表亚利桑那大学的亚利桑那校董

会

地址 美国亚利桑那州

(72)发明人 华红 徐苗苗

(74)专利代理机构 北京鸿德海业知识产权代理
事务所(普通合伙) 11412

代理人 王再芊

(51)Int.Cl.

G02B 27/01(2006.01)

H04N 13/349(2018.01)

G02B 30/22(2020.01)

H04N 13/218(2018.01)

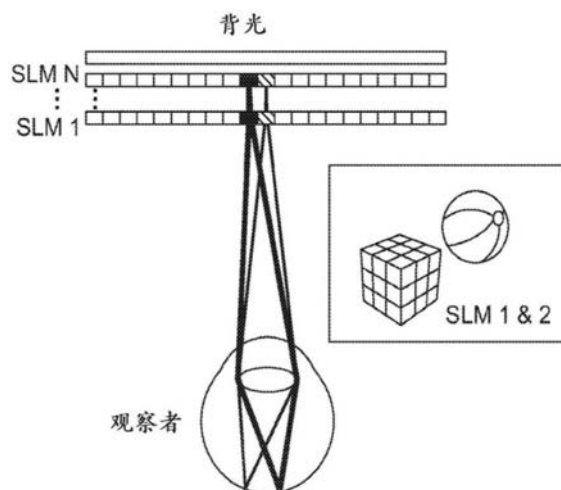
权利要求书2页 说明书22页 附图45页

(54)发明名称

多层高动态范围头戴式显示器

(57)摘要

多层高动态范围头戴式显示器。



1. 一种显示系统,所述显示系统具有轴并且包括:
第一显示层和第二显示层;和
在所述第一显示层和所述第二显示层之间的光学系统,所述光学系统被配置为在所述第二层的第二预定区域上形成所述第一显示层的第一预定区域的光学图像。
2. 根据权利要求1所述的显示系统,其中,所述光学系统被配置为在所述第一区域上形成所述第二区域的光学图像。
3. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第一层和所述第二层彼此光学共轭。
4. 根据权利要求1所述的显示系统,其中,所述第二显示层和与所述第一显示层的平面光学共轭的平面在空间上分离。
5. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述光学系统被配置为在所述第一区域和所述第二区域之间建立唯一的一对一成像对应。
6. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第一显示层和所述第二显示层中的至少一个是像素化显示层。
7. 根据权利要求6所述的显示系统,其中,所述第一区域包括所述第一显示层的第一组像素,所述第二区域包括所述第二显示层的第二组像素,并且所述第一区域和所述第二区域彼此光学共轭。
8. 根据权利要求7所述的显示系统,其中,所述第一像素组和所述第二像素组中的至少之一仅包括一个像素。
9. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第一显示层具有第一动态范围,所述第二显示层具有第二动态范围,并且所述显示系统具有系统动态范围,所述系统动态范围的值为所述第一动态范围和所述第二动态范围的值的乘积。
10. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述光学系统被配置为以单位横向放大率将所述第一区域成像到所述第二区域上。
11. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第二区域的尺寸中的每一个与所述第一区域的相应尺寸之间的比率大致等于 m ,其中, m 是所述光学系统的横向放大率。
12. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述显示系统是头戴式显示器。
13. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,包括设置成与所述第一显示层光学连通的光源,并且其中,所述第一显示层被配置为调制从所述光源接收的光。
14. 根据权利要求13所述的显示系统,其中,所述第二显示层被配置为接收来自所述第一显示层的调制光,并且被配置为调制所接收的光,并且包括用于接收来自所述第二显示层的调制光的目镜。
15. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第一显示层包括LCoS。
16. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第二显示层包括LCoS。
17. 根据权利要求1-15中任一项所述的显示系统,其中,所述第二显示层包括LCD。
18. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述光学系统包括光中继系统。

19. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述光学系统包括分束器。
20. 根据前述权利要求中的任一项所述的显示系统,其中,所述光学系统包括偏振分束器。
21. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述光学系统在所述第一显示层处是远心的。
22. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述光学系统在所述第二显示层处是远心的。
23. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第一显示层和所述第二显示层被配置为在空间上调制光。
24. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第一显示层包括反射性空间光调制层。
25. 根据权利要求1至23中任一项所述的显示系统,其中,所述第一显示层包括透射性空间光调制层。
26. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第二显示层包括反射性空间光调制层。
27. 根据前述权利要求中任一项所述的显示系统,其中,所述第二显示层包括透射性空间光调制层。

多层高动态范围头戴式显示器

【相关申请】

[0002] 本申请要求2017年5月18日提交的美国临时申请第62/508,202号的优先权的权益,该临时申请的全部内容通过引用合并于此。

【技术领域】

[0003] 本发明总体上涉及光学系统,特别但非排他地涉及头戴式显示器。

【背景技术】

[0004] 头戴式显示器(“HMD”)是戴在头上或周围的显示设备。HMD通常包含某种近眼光学系统,该系统配置为形成位于观看者前方的虚拟图像。配置为单眼使用的显示器称为单眼HMD,而配置为双眼使用的显示器称为双眼HMD。

[0005] HMD是用于虚拟现实(VR)和增强现实(AR)系统的关键支持技术之一。HMD已开发用于多种应用。例如,轻巧的“光学透视”HMD(OST-HMD)可以将二维(2D)或三维(3D)数字信息光学叠加到用户对物理世界的直接观察中,并保持对现实世界的透视视觉。OST-HMD被视为数字时代的变革性技术,能够实现访问对我们日常生活必不可少的数字信息的新方法。近年来,在高性能HMD产品的开发方面已取得重大进步,并且几种HMD产品已在商业上部署。

[0006] 尽管HMD技术取得了进步,但现有技术的主要限制之一是HMD的低动态范围(LDR)。显示器或显示单元的动态范围通常被定义为显示器可以产生的最亮和最暗亮度之间的比率,或者显示单元可以产生的亮度范围。

[0007] 大多数现有彩色显示器(包括HMD)仅能渲染每个颜色通道8位深度或最多256个离散强度级别的图像。这样低的动态范围远远低于真实场景的宽泛的动态范围,后者可以达到14个数量级。同时,已知人类视觉系统的可感知亮度变化范围在不适应的情况下高于5个数量级。对于沉浸式VR应用,由LDR HMD生成或与LDR HMD关联的图像无法提供对比度变化较大的渲染场景。当然,就用户/观看者而言,这可能导致丢失精细的结构细节,和/或丢失高图像保真度,和/或丢失沉浸感。对于“光学透视”AR应用,当与可能包含更宽的动态范围,可能超过LDR HMD数个数量级的真实场景融合时,LDR HMD所显示的虚拟图像看起来会被高度妥协的空间细节冲洗。

[0008] 在常规LDR显示器上显示高动态范围(HDR)图像的最常见方法是采用色调映射技术,该技术会压缩HDR图像以适合LDR设备的动态范围,同时保持图像完整性。尽管色调映射技术可以通过标称动态范围的常规显示器使HDR图像可访问,但是这种可访问性是以降低图像对比度为代价的(这受设备动态范围的限制),并且它不会防止显示图像在AR显示器中被冲洗掉。

[0009] 因此,开发用于HDR-HMD技术的硬件解决方案变得非常重要,尤其是对于AR应用而言。

【发明内容】

[0010] 因此,在本发明的一个方面中,本发明可以提供一种显示系统,所述显示系统具有轴并且包括第一显示层和第二显示层以及设置在所述第一显示层和所述第二显示层之间的光学系统,所述光学系统被配置为在所述第二层的第二预定区域上形成所述第一显示层的第一预定区域的光学图像。如在这个背景下,“在第二层的第二预定区域上”,可以包括:所述光学系统被配置为在所述第一区域上形成所述第二区域的光学图像,或者所述第二显示层和与所述第一显示层的平面光学共轭的平面在空间上分离。所述光学系统可以被配置为在所述第一区域和所述第二区域之间建立唯一的一对一成像对应。

[0011] 所述第一显示层和所述第二显示层中至少之一是像素化显示层,并且所述第一区域可以包括所述第一显示层的第一组像素,所述第二区域可以包括所述第二显示层的第二组像素,其中所述第一区域和所述第二区域彼此光学共轭。所述第一显示层可以具有第一动态范围,所述第二显示层可以具有第二动态范围。所述显示系统可以具有系统动态范围,所述系统动态范围的值为所述第一动态范围和所述第二动态范围的值的乘积。此外,所述光学系统可以被配置为以单位横向放大率将所述第一区域成像到所述第二区域上。

[0012] 所述显示系统可以是头戴式显示器,并且可以包括设置成与所述第一显示层光学连通的光源。所述第一显示层可以被配置为调制从所述光源接收的光,所述第二显示层可被配置为接收来自所述第一显示层的调制光,所述第二显示层被配置为进一步调制所接收的光。所述显示系统还可以包括用于接收来自所述第二显示层的调制光的目镜。所述第一显示层和所述第二显示层中的一个或两个可以包括反射性空间光调制器,例如LCoS。替代地或另外地,所述第一显示层和所述第二显示层中的一个或两个可以包括透射型空间光调制器,例如LCD。此外,所述光学系统可以在所述第一显示层和所述第二显示层中的一个或两个处是远心的。通常,所述第一显示层和所述第二显示层之间的光学系统可以是光中继系统。

【附图说明】

[0013] 当结合附图阅读时,可以进一步理解本发明的示例性实施例的前述发明内容和以下详细描述,在附图中,相同的元件始终用相同的标号表示:

[0014] 图1A、图1B示意性地例示在空间光调制器(SLM)的层之间具有不同间隙距离的直视型台式显示器;

[0015] 图2A、图2B示意性地例示根据本发明的HDR-HMD(高动态范围,头戴式显示器)系统的示例性配置;

[0016] 图3示意性地例示根据本发明的具有两个或更多个SLM层的HDR显示引擎的示例性配置;

[0017] 图4A-4C示意性地例示根据本发明的LCoS-LCD HDR-HMD实施例的示例性布局,其中图4C示出了图4A、图4B的展开的光路;

[0018] 图5A-5C示意性地例示根据本发明的基于双LCoS层的HDR-HMD实施例的示例性布局,其中图5C示出了图5A、图5B的展开的光路;

[0019] 图6A-6C示意性地例示根据本发明的在引入中继系统之前(图6A)和之后(图6B、图6C)的光路的示例性配置;

- [0020] 图7A、图7B示意性地例示根据本发明的具有光中继器的LCoS-LCDHDR HMD的示例性配置；
- [0021] 图8、图9示意性地例示根据本发明的具有图像中继的双LCoS调制的示例性配置，其中图8示出了其中光两次通过中继系统的配置，图9示出了具有单程中继器的配置；
- [0022] 图10示意性地例示根据本发明的另一紧凑型HDR显示引擎，其中在两个微型显示器之间使用了反射镜和物镜；
- [0023] 图11示意性地例示根据本发明的一个示例性提出的HDR HMD系统；
- [0024] 图12示意性地例示LCoS的WGF (线栅膜) 盖的俯视图；
- [0025] 图13示意性地例示立方PBS；
- [0026] 图14A-14E示意性地例示针对图11的所提议的布局的优化结果，其中图14A示出了光学布局，而图14B-14E示出了全局优化之后的光学系统性能；
- [0027] 图15A-15G示意性地例示图14A的系统的优化结果，其中所有透镜都与成品 (off-the-shelf) 组件匹配，其中图15A示出了光学布局，并且图15B-15G示出了光学系统性能；
- [0028] 图16例示为图15A的HDR显示引擎构建的原型；
- [0029] 图17示意性地例示根据本发明的HDR-HMD校准和渲染算法；
- [0030] 图18示意性地例示所形成的每个LCoS图像的光路；
- [0031] 图19示意性地例示根据本发明的HMD几何校准的过程；
- [0032] 图20示意性地例示根据本发明的图像对准算法的流程图；
- [0033] 图21示意性地例示根据图20的算法的LCoS1图像L1和LCoS2图像L2的投影。
- [0034] 图22示意性地例示图20的算法如何针对每个LCoS图像工作的示例；
- [0035] 图23示意性地例示将后处理的LCoS图像同时显示在两个显示器上时的网格图像对准结果；
- [0036] 图24A-24C示意性地例示残留对准误差，其中图24A、图24B示出了示例性测试图案，并且图24C示出了针对图24B所示的圆形采样位置的残留误差的曲线图；
- [0037] 图25示出了使用分段三次多项式插值的色调响应曲线；
- [0038] 图26示出了根据本发明的用于HDR HMD辐射校准的过程；
- [0039] 图27A-27D显示了图26程序的其他方面，其中图27A示出了捕获的HMD图像的绝对亮度值，图27B示出了相机的本征辐射度，图27C示出了HMD的本征辐射度，图27D示出了校正后的均匀性；
- [0040] 图28A、图28B示出了在处理对准和辐射渲染算法之后在LCoS1和LCoS2上显示的一对渲染图像；
- [0041] 图28C示出了背景均匀性校正的结果；
- [0042] 图29示出了根据本发明的HDR图像辐射渲染算法；
- [0043] 图30示出了根据本发明的使用HDR图像辐射渲染算法计算的色调响应曲线；
- [0044] 图31示出了通过不同的低通滤波器进行下采样之后的目标图像及其频域；和
- [0045] 图32A-32D示出了色调映射 (图32A) 以及显示HDR和LDR图像之后的原始目标HDR图像。

【具体实施方式】

[0046] 本发明人认识到,用于直视型台式机应用的高动态范围(HDR)显示器领域中的技术已经在讨论一些硬件解决方案,并且实现HDR显示器的最直接方法也许是尝试增加最大的实际可显示的亮度水平并增加显示像素的每个颜色通道的可寻址位深度。然而,本发明人认识到该方法需要高振幅,高分辨率的驱动电子电路以及具有高亮度的光源,这两者都不容易以实际合理的成本实现。根据本发明,可以采用另一种方法-组合两个或多个设备层-例如空间光调制器(SLM)层-以能够同时控制像素产生的光输出。本发明人本着这种方法的精神,构想了与基于双层空间光调制方案的用于直视台式显示器的HDR显示示意图有关的技术的使用。与采用均匀背光的常规液晶显示器(LCD)有所不同,此解决方案采用投影仪为透射型LCD提供空间调制的光源,以利用两个8位SLM实现双层调制和16位动态范围。该解决方案还展示了双层调制方案的另一种实现方式,其中使用由空间变化的电信号驱动的LED阵列来代替投影仪单元,并为LCD提供空间变化的光源。图1A和图1B提供了所展示的配置的示意图。最近,尝试将多层乘法调制和压缩光场分解方法用于HDR显示器。

[0047] 虽然人们可能会认为,专为直视型台式显示器开发的上述多层调制方案可以用于HDR-HMD系统的设计中-例如,通过直接堆叠两个或多个微型SLM层(以及背光源和目镜),但本发明人已经发现,这样做的实际尝试令人信服地证明,这种“多层SLM的直接堆叠”表现出几个关键的结构和操作缺陷,严重限制了HDR-HMD系统,使得这种结构的HDR-HMD系统实际上毫无意义。

[0048] 为了说明在相关技术中仍然存在的实际问题,在回顾本专利申请的教导后,本领域技术人员将理解(参考图1A、图1B)用于HDR渲染的各个SLM层需要将它们彼此靠近放置,由两个SLM依次对光源BACKLIGHT相继进行调制。首先,由于典型的整体SLM面板或单元(例如,包括诸如LCD的多层)的物理结构,SLM面板的调制层不可避免地要相隔大至几毫米的间隙,这取决于面板的物理厚度。对于如图1A所示的直视型台式显示器,两个SLM层之间的几毫米间隙不一定会对动态范围的调制产生很大影响。另一方面,在HMD系统中,每个SLM层都以(HMD目镜组件的)大放大系数被光学放大,即使SLM堆叠中的间隙只有1毫米,也会导致观察空间的大分离,如果可能的话,使得精确的动态范围调制极其复杂。例如,当使用横向放大倍数为50的目镜时,SLM堆叠中的1毫米间隙会导致大约2.5米的轴向分离。其次,透射型SLM趋于具有低动态范围和低透射率。因此,堆叠的双层调制导致非常低的光效率和有限的动态范围增强。第三,透射型SLM倾向于具有相对较低的填充因子,并且HMD中使用的微型显示器通常具有小至几微米的像素(其远小于直视型显示器的约200~500微米的像素大小)。结果,在透射通过目镜时的放大之后,通过两层SLM堆叠的光透射不可避免地遭受严重的衍射效应并且产生差的图像分辨率。不仅由于层之间的空间分离,而且由于LED阵列的分辨率有限,LED阵列方法也很容易理解为基本不切实际。用于HMD的普通微型显示器的对角线间距小于1英寸(有时只有几毫米),像素密度很高,因此只有几个LED可以容纳此尺寸,这使得空间变化的光源调制不切实际。

[0049] 本发明的思想的实现解决了这些缺点,并且与现有技术相反,使得HDR-HMD系统的多层配置不仅可能而且在功能上是有利的。具体而言,例如,在本发明的各个方面,本发明可以解决以下问题:

[0050] -通过在多层显示器中包括光学成像系统,该光学成像系统配置为使得显示层(在

其间安装了这种光学成像系统)彼此隔开基本为零的光学距离,使得观看者认为从这些层之一的给定点发出的光是从另一层的唯一对应点发出的,现有的多层HMD无法实现由组成显示层的动态范围的乘积定义并等于辐照度或亮度的动态范围的问题得以解决。

[0051] -通过使用设置在多层HMD的各层之间的光学成像系统来在像平面中形成这些层中的一层的图像,并通过将这些层的另一层或者设置在像平面本身处或远离像平面一谨慎确定的距离来使得多层HMD的动态范围相对于动态范围的理论最大值减小一个选定量,无法设置、选择和/或控制现有多层HMD的动态范围值的问题得以解决。结果,本发明的实施例被配置为展现出动态范围值,该动态范围值被选择为等于(针对给定的多层HMD系统可用的)动态范围的理论最大值或小于该理论范围的预定值。

[0052] -通过在本发明的多层显示器中使用具有高像素填充因子和高反射率的反射型SLM,相关技术的多层HMD典型的低透射率和存在高衍射伪影的问题得以解决。本发明的实施例的相邻SLM层是反射性的,并且被配置为当这些层中的一个层与另一层(通过放置在相邻的SLM层之间的光学系统)基本上光学共轭时,以基本上光学共轭的几何形状空间连续地调制来自光源的光。结果,相邻的SLM层就像它们彼此隔开基本为零的光学距离一样工作。如此配置对来自光源的光的连续调制产生高动态范围调制,同时保持高光效率和低水平的衍射伪影。

[0053] 为了以下公开的目的,除非另有明确说明:

[0054] -在当一种显示设备或系统包括彼此按照光学顺序排列的多个显示单元并被配置为使得从这些显示单元中的一个发出或产生的光被传输或中继到另一个显示单元(使得所述另一个显示单元为用户定义观察平面)的情况下,形成观察平面的功能显示单元在本文中称为“显示层”。显示设备的其余组成功能显示单元(按照单元序列可以在显示层之前)被称为调制层,并且整个显示系统应理解为多层显示系统。

[0055] -当第二平面使得第一平面上的第一点被成像(使用选定的光学系统)到第二平面的第二点上时,第一平面和第二平面被理解为并被称为光学共轭平面,反之亦然,换句话说,如果物的点和该物的像的点在光学上是可互换的。因此,光学共轭平面中的跨越物和像的区域的点被称为光学共轭点。在一个示例中,如果第一阵列的给定像素通过光学系统被精确地成像并且仅成像到第二阵列的给定像素上,则由光学成像系统(例如,诸如透镜)隔开的像素的第一2D阵列和第二2D阵列被认为彼此光学共轭,反之亦然,以在这些阵列的每两个“物”和“像”像素之间建立唯一的光学对应关系。在相关示例中,由光学成像系统分离的像素的第一2D阵列和第二2D阵列彼此光学共轭,该光学成像系统配置成将第一阵列的给定像素成像到第二阵列的识别的像素组上,例如为了在这两个阵列的这两个“物”和“像”像素组之间建立唯一的光学对应关系。

[0056] 通常,根据本发明的思想的HMD光学系统10、15的实现包括两个子系统或部分:HDR显示引擎12和(可选的)HMD观察光学器件14、16(例如目镜或光学组合器),参见图2A、2B。HDR显示引擎12是被配置为生成并提供具有扩展的对比度的场景或图像的子系统。在实践中,HDR显示引擎12最终将在HDR显示系统10、15内部或外部的标称图像平面上生成HDR图像。当系统10、15与其他光学器件(例如,图2A、图2B中的目镜14、16)耦合时,标称图像位置被称为“中间图像”,因为该图像随后将被目镜14、16放大并显示在观看者的面前。

[0057] HDR显示引擎12可以与不同类型和配置的观察光学器件14、16光学耦合。继普通头

戴式显示器的分类之后,HDR-HMD系统10、15通常可以分为两种类型,即沉浸型(图2A)和透视型(图2B)。沉浸型阻挡了来自现实世界场景的光的光路,而透视型光学系统将合成图像与现实世界的场景结合在一起。图2A、图2B示出了系统的总体布局的两个示意性示例。图2A是其中传统目镜14作为观察光学器件的沉浸型HDR-HMD,而图2B例示透视型HDR-HMD(具有特定的自由形式的目镜棱镜16)。应该理解,HDR-HMD10、15当然不限于这些特定的布置。

[0058] 在整个本公开中,为了图示和讨论的方便和简单起见,下面将HDR-HMD的(可选的)观察光学子系统示为单个透镜元件,但是当然预期并意识到。可以使用观察光学器件的各种复杂的配置。在HDR显示引擎的构造中实现的基本原理是使用一个空间光调制器(SLM)或对另一个SLM或层进行调制的层。

[0059] 示例1:HDR显示引擎:堆叠透射型SLM

[0060] 同时实现多层调制的最直接的想法是将多个透射型SLM 11(或LCD1/LCD2)堆叠在照明光(例如背光13)的前面,如图3所示。堆叠的SLM HDR引擎17、19的背光应提供高亮度的照明。它可以是单色的也可以是多色的,或者利用(用于SLM1的)透射型显示器的背面的阵列,或者利用位于显示器边缘处放置单件照明光源(LED,灯泡等)。第一SLM面板LCD1可以位于第二SLM面板LCD2的前面(即,更靠近背光13),并且可以用于在光到达第二SLM面板LCD2之前调制来自背光13的光。中间图像平面将位于LCD1的位置,在该位置首先对图像进行调制。

[0061] 图3的构造的优点在于其紧凑性。典型的TFT LCD面板的液晶层为约1微米至约7微米厚。即使考虑电极和保护玻璃的厚度,LCD的总厚度也只有几毫米。因为图3的示例性HDR显示引擎17、19采用简单堆叠的多个(至少两个)LCD,所以HDR引擎的总轨迹长度会非常紧凑。此外,LCD的使用在节电以及发热方面具有优势。

[0062] 然而,采用简单堆叠的LCD的HDR显示引擎17、19具有明显的局限性。已知LCD的基本结构包括在两个带有偏振滤光片的玻璃板之间的液晶层。LCD的光调制机制是通过电驱动液晶分子的定向来诱导入射光的偏振矢量的旋转,然后使用线性和/或圆形偏振器来过滤具有特定偏振状态的光。当通过LCD传输时,入射光将不可避免地被过滤和吸收。即使在设备的“开启”状态(以最大透光率为特征)下,偏振滤光片在传输过程中也吸收至少一半的入射光,从而导致光通量显著下降。有源矩阵LCD的典型光学效率甚至更小,小于15%。此外,透射型LCD难以产生暗和非常暗的“灰度级”,这导致透射型LCD可以显示的对比度范围相对狭窄。尽管图3的设置可以实现比单独的单层LCD更高的动态范围,但是扩展对比度和整个显示引擎的亮度的尝试受到LC面板透射特性的限制。

[0063] 示例2:HDR显示引擎:反射型SLM-透射型SLM

[0064] 为了提高根据本发明的多层HDR显示引擎的光效率和对对比度,可以将反射型SLM(例如,硅上液晶(LCoS)面板或数字反射镜阵列(DMP)面板)与透射型SLM(例如,LCD)结合使用。LCoS是一种反射型LC显示器,它使用硅晶片作为驱动背板并调制反射光强度。具体地,可以使用液晶材料在硅CMOS芯片上形成涂层,在这种情况下,CMOS芯片充当反射面,偏振器和液晶在其顶盖上。与基于透射型LCD的显示器相比,基于LCoS的显示器具有多个优势。首先,与透射型(基于LCD的)相比,反射型微显示器具有更高的调制效率和更高的对比度,透射型在光透射期间损失了大部分效率。其次,由于基板背面的电子电路密度较高,因此LCoS往往具有相对较高的填充因子,并且通常具有较小的像素大小(可以小至几微米)。此外,与

LCD相比, LCoS的制造更容易且成本更低。

[0065] 由于LCoS的反射特性, 基于LCoS的堆叠在一起的SLM的结构不再可行。实际上, LCoS不是自发射微显示元件, 因此, 该元件需要高效率 and 照明才能操作。此外, 通过在切换液晶的定向来控制光的延迟, 然后通过偏振器对光进行滤波, 从而实现使用LCoS进行光调制。为了获得更高的光效率 and 对比度, 应在光源之后立即使用偏振器以获得偏振照明。分开入射光和反射光是另一个实际问题。在该实施例中, 可以使用偏振分束器(PBS)来分离输入光和调制光, 并沿着不同的路径重定向它们。

[0066] 图4A、图4B示出了根据本发明的LCoS-LCD HDR-HMD实施例的布局。取决于光源偏振矢量的方向, 显示引擎110、120的两种不同配置是可能的(图4A的和图4B的)。光引擎112通过偏振分束器(PBS)向LCoS 114提供均匀的偏振照明, 该偏振分束器可以是立方PBS113。来自光源112的光可以被LCoS 114调制并反射回去, 然后透射通过LCD 116。

[0067] 尽管图4A, 图4B的实施方式由于光源的偏振方向具有细微的不同, 但是展开的光路大致相同, 如图4C所示。假设光引擎110、120在LCoS 114的位置处提供均匀的照明(与图3的背光13一样均匀), 则展开的光路将与图3的光路非常相似, 但是引擎110、120的特征在于, 两个SLM层114、116之间的间隔 d 大得多, 图4C。该距离 d 取决于PBS 113的尺寸以及射线束的尺寸。由于较大的间隔, 从LCoS 114出射的射线束将以圆形图案投射到LCD 116上。在这种情况下, LCoS 114负责由引擎110、120传递的精细结构和/或高空间频率信息, 而LCD 116显示低空间频率信息。尽管此设置既提高了光效率, 又提高了固有的对比度, 但衍射效果成为降低整体图像性能的主要原因之一。

[0068] 示例3: HDR显示引擎: 基于两个反射型SLM的调制

[0069] 为了进一步提高根据本发明的多层显示单元提供的光效率 and 对比度, 可以在单个HDR显示器中采用两个反射型SLM层, 例如LCoS或DMD面板。双LCoS配置的示意性布局如图5A和图5B所示。

[0070] 以图5A的HDR显示引擎130为例, p 偏振照明光由光引擎112发射, 然后由LCoS1层114调制。由于LCoS1层114的LC的操纵, 偏振的方向旋转为 s 偏振向量。 s 偏振与PBS 113的最大反射轴匹配。由PBS 113从LCoS1层114反射的射线束然后由LCoS2层115调制, 并最终透射通过观察光学器件131。图5B中的HDR显示引擎140是相似的, 并且差异包括光引擎112和LCoS2层115的位置的变化以适应由光引擎112提供 s 偏振照明的情况。图5C示出了图5A和图5B的光学系统的展开光路。与图4A-4C的LCoS-LCD HDR显示引擎110、120(其仅延长了两个SLM层之间的分离距离)相比, 观察光学器件131与LCoS2层115之间的距离增加。图5A-5C的HDR显示引擎130、140内的光路长度为LCoS-LCD型(图4A-4C)的两倍, 因此需要观察光学器件131具有更长的后焦距, 图5C。类似地, 就像在图4A-4C的LCoS-LCD设置的情况下一样, 该实施例的LCoS1层114能够显示具有高空间频率的图像, 而LCoS2层115被配置为仅调制具有较低空间分辨率的光(这是由通过点光源在其上所产生的照明的空间扩展图案引起的; 空间扩展的点扩展函数响应)。

[0071] HDR显示引擎: 两个调制层, 中间具有一个中继系统

[0072] 虽然上面讨论的设置可能能够以超出与8位对应的动态范围的动态范围显示图像, 但是通过这些设置可以实现的最大动态范围值的限制是由两个SLM层(例如, LCoS 114/LCD 116, LCoS1 114/LCoS2 115)之间的有限距离强加。参考图6A, 其示出了两个SLM层之间

的物理和光学间隔 d ,观察图6A的本领域技术人员将意识到,从第一SLM层(SLM1)的像素发出的光以空间发散的圆锥体的光(圆锥形射线束)的形式打到第二SLM层(SLM2)上,该圆锥体的顶点位于第一层的发光像素处。在这样的两层显示系统中,假设系统标称(中间)图像平面位于SLM1处,则来自SLM1上一个像素的圆锥形射线束在SLM2处形成一个圆形区域(所讨论的圆锥形射线束的“足迹”),该区域可以包括SLM2层的多个(例如,几个或几十个)像素。在灰度调制的情况下,包含在这种圆形“足迹”中的SLM2上的所有像素(可选地,同时)调制(操作)从SLM1的同一像素输出的光。对于起源于相邻SLM1像素的相邻射线束,SLM2层上的各个投影区域不可避免地彼此重叠,从而在SLM2处形成的最终(调制)图像中引起串扰、边缘阴影和/或光晕。

[0073] 根据本发明的思想,并且为了解决上面讨论示例的实施例所伴随的问题,例如图4A-5C的实施例,在HDR显示引擎200的两个相邻的SLM层SLM1,SLM2之间引入了光中继系统210。谨慎地选择这种光中继器210的横向放大率以提供一对一的光学成像以及相邻的第一显示层SLM1的像素与第二显示层SLM2的像素之间的对应关系。例如,并且参考图6B,当显示层SLM1和SLM2基本上相同之处在于两者均由相同尺寸的相等维度的像素阵列表示时,中继系统210的放大倍数被选择为基本统一,以将SLM1,SLM2之一的像素成像(一对一对应)到这两个SLM层中的另一个的像素上。在另一示例中,如果SLM2阵列的每个像素的每个尺寸是SLM2阵列的对应像素的尺寸的两倍,则光中继系统210被选择为放大率基本上等于2。图6B所示的中继器布局可以扩展到多个调制层。如图6C所示,两个调制层SLM1和SLM2可以由共享中继系统210成像,以创建位于显示层或邻近显示层(例如SLM3)的SLM1和SLM2的两个共轭图像。结果,这些调制器层SLM1,SLM2连续地调制显示层SLM3,并进一步扩展了显示引擎201的动态范围。

[0074] 为了使显示层的LC的操作效率最高,可首选使所选的光中继系统在像空间和物空间中都处于远心状态,以便一考虑到几何逼近—SLM1上的一个点发出的光锥收敛到SLM2上的一个点,反之亦然,以实现SLM1,SLM2在整个中继系统上彼此成像。结果,实现了显示层的像素之间的一对一空间映射,以避免调制串扰。作为这种远心配置的操作的结果,当形成为SLM1的“中间图像”的图像光学中继到与SLM1的平面光学共轭的平面时,这也导致“中间图像”平面朝向并靠近观察光学器件的有效重新定位,这减少了观察光学器件所需的后焦距(BFD)。

[0075] 当选择SLM2显示层的物理位置为处于与SLM1层光学共轭的平面时,则在上面讨论的一对一像素成像条件下,包含被光中继系统分离的这些SLM1、SLM2层的显示引擎的整体动态范围达到最大,并等于在这种情况下可达到的最大值动态范围,即,各个SLM1,SLM2层的动态范围的乘积。

[0076] 进一步参考图6B,可以理解的是,当使SLM2显示层的物理位置和与SLM1层光学共轭的平面(SLM1 IMAGE)的位置偏离(分离)时,从SLM1的给定源像素发出的光的一部分,不仅被中继到与SLM1的源像素相对应的SLM2的像素,而且还中继到一些相邻的像素(即,与图6A所示的情况类似,在第二显示层SLM2上由中继系统210形成的第一显示层SLM1的给定像素的图像的足迹大于第二显示层SLM2的对应像素。相对于最大可达到范围,这导致系统的总体总计动态范围减小。因此,图6B中示意性描绘的设备的用户可以选择总计动态范围的决定值与可实现的最大值之间相差多少,并选择层SLM1、SLM2的位置是否相对于彼此平面

光学共轭。应当理解,通常,可以将相邻的显示层彼此分离和/或成像的光中继系统不仅可以被选择为折光的,而且可以被选择为反射折射的或反射的。

[0077] 示例4:带有中继的LCoS-LCD显示引擎

[0078] 图6B、图6C的上述构思(利用光中继系统210将中间图像从第一显示层光学中继到第二显示层上)可以在围绕LCoS-LCD系统的使用而构造的HDR显示引擎中实现。图7A、图7B例示两个相关的实施方式。

[0079] 就像在结合示例1中提到的光引擎一样,示例4的光引擎可以包括一个复杂的照明单元以提供均匀的照明,或者仅带偏振器的单个LED,以实现系统容量,简单性,低能耗,小尺寸和长寿命。对于根据本发明的LCoS-LCD HDR引擎150,可以操纵LED发射光112a以S偏振,从而照明光将被PBS113反射并入射到LCoS 114上,图7A。由于LCoS 114充当四分之一波长延迟器和反射镜的组合,因此它会将S偏振入射光转换为P偏振反射光,然后P偏振光透射通过PBS 113。为了将LCoS 114调制图像与LCD 116耦合,射线束可以被诸如反射镜111的后向反射器准直和后向反射。四分之一波片(QWP)可以被插入到准直器117和反射镜111之间,从而通过两次通过四分之一波片QWP,P偏振光被转换回S偏振,该偏振与PBS 113高反射轴相对应。最终,将调制的LCoS 114图像中继到LCD 116的位置并由LCD 116进行调制。图7B中的LCoS-LCD HDR引擎160与图7A中的配置相似,区别在于传输过程中光的偏振方向。在图7A和图7B之间的偏振方向完全相反。因此,LED发射光112b在图7B中是P偏振的,而图7B中入射在LCD 116上的最终射线束是S偏振的。图7A或7B哪个配置更可行取决于特定实施例中每个组件的特性,例如LED发光,LCD偏振滤光器的方向等。

[0080] 通过将光路折叠两次,根据本发明提供了具有作为SLM的反射型LCoS114和透射型LCD 116的紧凑型HDR显示引擎150、160。与堆叠式LCD HDR引擎相比,诸如图3所示的,发光效率、最高图像分辨率和系统对比度得到了显著改善。此外,在图7A和图7B的配置中,LCoS图像被中继到LCD 116的位置。与在两个SLM之间不可避免地具有小的间隙的堆叠式LCD相比,图7A和图7B的配置可以在两个SLM(LCoS 114和LCD 116)之间实现光学零间隙。从理论上讲,在相同空间位置调制图像可以逐像素实现更精确的灰度处理,从而可以获得没有阴影、光晕或高光伪影的HDR图像。

[0081] 附加示例:具有图像中继的双LCoS调制

[0082] 为了进一步提高系统光效率,根据本发明提供了具有双程中继架构的两个LCoS面板,图8、图9示出了不同的系统设置。在图8中,光可以两次通过中继系统210。LCoS1 114首先对图像进行调制,然后将调制后的图像中继到LCoS2 115的位置,并再次由LCoS2 115进行调制。LCoS1,LCoS2的图像由虚线框119示出。偏振状态在被LCoS2 115反射之后改变,使得最终图像被中继到HDR显示引擎170之外的左侧。在该配置中,LCoS2 115显示高频分量,而LCoS1 114显示低频分量。由于重新映射结构,LCoS2 115的每个像素可以调制LCoS1 114的相应像素。

[0083] 这种配置的优点是,由于中间图像被中继到HDR显示引擎之外的位置,因此对于目镜设计不需要较长的后焦距。图像和观察光学器件之间的距离可以小到几毫米。尽管如此,尽管此配置对观察光学器件有宽松的要求,但中继光学器件仍需要具有卓越的性能,因为LCoS1 114图像需要重新成像两次,这针对两次成像路径两次引入波前误差。与所有以前的设置相比,由于两个SLM图像都多中继一次,因此中间图像质量将不如其他配置好,这将导

致更大的波前变形。如果中继光学器件不具有理想的性能,则必须通过观察光学器件校正残余像差。

[0084] 图9示出具有单程中继的双LCoS布局。LCoS2显示高频分量,而LCoS1显示低频分量。与图8中在图像中继之前对图像进行调制的配置不同,光源首先被映射到LCoS1,然后由LCoS1调制并中继到LCoS2的位置。与类似图8所示的重新成像中间图像相比,此设置避免了中继光学系统中的两次通过,并减少了中继系统引入的像差效应。

[0085] 然而,尽管通过单次中继传递会提高系统性能,但由于中间图像位于HDR引擎内部的LCoS2上,因此观察光学器件的后焦距需要较长。后焦距将高度取决于PBS的尺寸以及系统NA。这限制了观察光学器件的配置,增加了观察光学器件设计的难度。

[0086] 图10示出另一个紧凑型HDR显示引擎。代替在两个微型显示器之间使用中继系统,此配置使用了反射镜和物镜,可以将其视为对折的中继系统。LCoS1显示低分辨率图像,LCoS2显示高空间分辨率图像。LCoS1由光引擎照亮,其光路被另一个PBS 213折叠。该光首先被LCoS1照亮,然后透射通过立方PBS并被物镜准直。然后,在从反射镜反射并穿过四分之一波片之后,它被PBS 113反射。通过使用半折叠中继系统,将LCoS1中继到LCoS2的位置,以便分别通过两个LCoS对图像进行两次调制。

[0087] 这种设置的优点是系统可以非常紧凑,因为它不仅可以通过立方PBS折叠光路,而且还可以将中继系统的长度缩短到原来的一半。但是,这两种配置的缺点在于,它要求观察光学器件(目镜)具有较长的后焦距,如前所述,这给观察光学器件设计带来了更多困难。

[0088] 表1总结了不同的HDR显示引擎设计的主要特征。我们可以看到观察光学器件BFD和HDR引擎光学器件性能之间的权衡。原因是尽管引入光学器件可以重新定位中间的图像位置,但也会带来像差。通过引入反射型SLM大大提高了光效率。表示实际对比度扩展的调制能力让步于对准精度。那是因为最小化微显示器的衍射效应可以减小重叠的衍射面积并提高调制能力,但是这还要求与两个SLM上的相应像素进行高精度对准。总体而言,每种设计都有其自身的优点和缺点。针对特定HMD系统的HDR显示引擎的选择应取决于整体系统规格,例如系统紧凑性、照明类型、FOV等。

基本类型	图号	高空间频率信息	低空间频率信息	中间图像位置	后焦距要求	光效率
堆叠 LCD	4	LCD1	LCD2	LCD1	长	低
LCoS-LCD	5	LCoS	LCD	LCoS	长	中
双 LCoS	6	LCoS1	LCoS2	LCoS1	非常长	高
LCoS-LCD & 中继	8	LCoS	LCD	LCD	短	中
[0089] 双 LCoS & 中继 (双程)	9	LCoS2	LCoS1	HDR 引擎之外	短	高
双 LCoS & 中继 (单程)	10	LCoS2	LCoS1	LCoS2	长	高
双 LCoS & 集成系统	11	LCoS2	LCoS1	LCoS2 / HDR 引擎之外	长/短	高

[0090] 表1:不同HDR HMD类型之间的比较

基本类型	图号	调制能力	紧凑度	光学性能要求	对准要求
堆叠 LCDs	4	弱	短	低	中
LCoS-LCD	5	弱	居中	低	低
双 LCoS	6	弱	居中	低	非常低
LCoS-LCD & 中继	8	强	居中	中	高
[0091] 双 LCoS & 中继(双程)	9	强	非常长/长 (自由形式)	非常高	高
双 LCoS & 中继(单程)	10	强	非常长/长 (自由形式)	中	高
双 LCoS & 集成系统	11	强	居中	非常高	高

[0092] 表1 (续):不同HDR HMD类型之间的比较

[0093] 具体实施方式的实施

[0094] 在详细示出本发明所公开的实施例的示例之前,值得注意的是,本发明不限于该特定应用和布置,因为本发明还可以应用于其他实施例。

[0095] 示出本文使用的某些词的含义将很有帮助:

[0096] HDR-高动态范围

[0097] HMD-头戴式显示器

[0098] SLM-空间光调制器

[0099] EFL-有效焦距

[0100] FOV-视场

- [0101] NA-数值孔径,F/#-f数
 [0102] LCoS-硅上液晶,LCD-液晶显示器
 [0103] PBS-偏振分束器,AR-涂层-防反射涂层
 [0104] RGB LED-RGB发光二极管,FLC-铁电液晶
 [0105] WGF-线栅膜
 [0106] OPD-光程差
 [0107] MTF调制传递函数

[0108] 图14示出了根据本发明的一种提出的HDR HMD系统的示意图。上方虚线框中所示的组件是HDR显示引擎部分,用于调制和生成HDR图像。这种配置与图9所示类似,具有中等中继设计要求,但目镜需要较长的后焦距。在此设计中,相对于图9的设计更可取的是,光引擎(带有背光和WGF)内置在LCoS1中,因此无需考虑光源路径,这使得HDR引擎更加紧凑,因此需要对HDR显示引擎的照明设计的考虑较少。底部的虚线框示出观察光学器件,它可以是观察光学器件的任何实施例。在我们的系统中,我们使用了成品目镜,它可以放大由两个微型显示器调制的中间图像。

FLCoS 规格

参数	规格
显示技术	反射型 CMOS 上的铁电液晶 (FLCoS)
显示格式	4:3 (1280(H) x 960(V))
显示区域对角线	10.16mm
[0109] 面板有效面积	8.127mm x 6.095mm
像素间距	6.35 微米
显示色彩模式	场序
色彩输入	24 位 RGB
显示帧率	60Hz (NTSC)

[0110] 表2LcoS规格

[0111] 在此特定实施例中使用的SLM是FLCoS(铁电LCoS),由CITIZEN FINEDEVICE CO., LTD制造,具有分辨率为1280x 960的Quad VGA格式。面板有效区域为8.127x 6.095mm,对角线为10.16mm。像素大小为6.35微米。铁电液晶使用具有手性近晶C相的液晶,其表现出铁电特性、具有非常短的切换时间。因此,它具有以非常快的帧频(60Hz)进行高保真色彩顺序显示的能力。时序RGB LED与FLCoS同步,以提供时序照明。WGF以一定的曲率覆盖在FLCoS面板的顶部,以提供均匀的照明并将照明光与出射光分开。图15示出LCoS1的WGF顶盖的视图。RGB LED封装在顶盖内。由于HDR显示引擎使用两个SLM调制单个照明光,因此在该系统中仅使用了一个光源。因此,在此设计中,LCoS2在移除WGF盖并禁用RGB LED的情况下使用,而

WGF盖和RGB LED都保留在LCoS1中作为系统照明。表2示出本发明中使用的LCoS规格的概要。

[0112] 在设计中使用了立方PBS。图13示出立方PBS的示意图。之所以使用PBS是因为入射光的两个偏振分量需要分开进行调制。PBS由两个直角棱镜组成。使用介电分束器涂层将入射光束分成透射部分,并将反射部分涂覆到斜边表面上。立方PBS能够将偏振光束分成两个线性的正交偏振分量,分别为S偏振和P偏振。S偏振光相对于入射光方向反射90度,而P偏振光在不改变传播方向的情况下透射。与由于两个反射面而具有重影的平板分束器相比,立方PBS在直角侧具有AR涂层,可以避免重影,并且具有最小化由其倾斜(tip)和俯仰(tilt)引起的光路位移的能力。我们在此设计中使用的PBS具有N-SF1基底,尺寸为12.7mm。透射和反射效率均超过90%,在420-680nm波长范围内的消光比超过1000:1。尽管在本设计中我们采用了立方PBS,但是其他类型的PBS,例如线栅型,也适用于本发明。

[0113] 光中继系统的远心性

[0114] HDR显示引擎系统中设计了具有单位放大倍数的双远心中继系统,图11。该中继系统用于光学对准和覆盖两个微型显示器LCoS1,LCoS2的标称像平面。以下三个原因使双远心成为该系统的重要要求:首先,远心使光锥垂直于LCoS2处的像平面。为了在LCoS2的像平面位置获得均匀的照明,远心性是必要的。其次,LCoS1/LCoS2的性能受到其视角的限制。这意味着,视觉性能或调制效率仅在有限的视锥范围内才是不错的。为了充分利用其调制功能,应将来自LCoS1的入射光和向LCoS2图像平面发射的光都限制在视锥范围内。第三,LCoS面板的位置在实际操作中可能无法准确定位。相对于设计的标称位置,建好的物理位置可能会有一点偏差。双远心中继系统即使在有微小位移的情况下也能够保持均匀的放大倍率。

[0115] 优化注意事项

[0116] HDR显示引擎设计的规格可以基于所有上述分析来确定。LCoS的对角线尺寸为10.16毫米,相当于全场的 ± 5.08 毫米。采样了0mm,3.5mm和5.08mm的物高以进行优化。LCoS的视角为 $\pm 10^\circ$ 。物空间NA被畸变设置为0.125,并且可以扩大到0.176。系统倍率设置为-1,具有双远心配置。将畸变设置为小于3.2%,此后可以数字方式校正残留失真。采样波长分别为656nm,587nm和486nm,加权因子相同。表3列出了系统设计规格的概要。同样,在这种设计中首选成品透镜。

[0117] 中继系统设计规格

参数	规格
对象: LCoS	
面板有效区域	8.127mm x 6.095mm
显示区域对角线	10.16mm
分辨率	1280 x 960
光源	RGB LED
立方 PBS	
[0118] 立方体尺寸	½” (12.7mm)
材料	N-SF1
其它参数	
NA	0.125 to 0.176
放大率	-1
远心性	双远心
畸变	< 3.2%
总轨迹	< 125mm
优选成品透镜	

[0119] 表3

[0120] 图14A-14E示出系统的优化结果。图14A是经过全局优化后的HDR显示引擎的布局。在图14A中,元件1是具有上述N-SF1基底的立方PBS。在最初的试验中,色差似乎是主要的影响,这在最初尝试时降低了图像质量。为了补偿系统色差,在光阑两侧以适当的方向预设了三个成品双合透镜(图14A,双合透镜2、3、4),以平衡不同波长的横向和纵向焦移。

图 14A 的透镜的设计示例

表面序号	表面类型	半径	厚度	透镜材料
S1	球形	无穷大	12.700	SF1
S2	球形	无穷大	3.4143	
S3	球形	13.6000	2.6000	SF11
S4	球形	21.9740	2.3963	
S5	球形	161.0500	4.000	NSF6
S6	球形	28.4500	8.000	NLAK22
S7	球形	-31.6900	0.1000	
S8	球形	14.7688	4.5001	784720.257572
S9	球形	无穷大	1.3093	
S10	球形	-11.4494	2.0000	784720.257565
S11	球形	无穷大	0.6607	
S12	球形	-11.4298	2.0000	603420.380296
S13	球形	11.4298	1.9007	
光阑	球形	无穷大	4.6687	
S15	球形	无穷大	3.0547	516800.641668
S16	球形	-9.9162	0.0999	
S17	球形	43.9600	6.0000	NLAK22
S18	球形	-42.9000	4.0000	NSF6
S19	球形	-392.2100	1.6411	
S20	球形	29.0100	9.0000	NLAK22
S21	球形	-25.5300	4.0000	NSF6
S22	球形	-132.9200	13.4589	
S23	球形	-9.7896	3.0000	CAFL
S24	球形	-20.4225	7.4333	
S25	球形	无穷大	4.5001	603421.380300
S26	球形	-18.8225	10.9931	

[0122] 表4

[0123] 为了进一步降低像差,在PBS和双合透镜2之间以及光阑和双合透镜3之间分别提供了两个弯月形的成品单透镜,请参见表4。为了控制系统的诸如彗形像差和畸变之类的奇数像差,单透镜的形状、方向和位置相对于孔径光阑接近镜像对称。其余五个单透镜元件的

形状,厚度和半径设置为可变的,如表4所示。出于与备用镜片匹配的目的,在全局优化过程中,将这些元素限制为具有最常见的形状和材料。图14B-14E示出全局优化后的系统性能。图14B示出三个采样场的OPD。优化后,OPD保留了约1.2个波。图14C示出优化后的残余畸变小于3.2%。图14D、图14E分别示出点图和MTF。在78.7周期(cy)/mm的截止频率下,MTF高于40%。

[0124] 图15A-15G示出所有透镜(图15A 401、402、403)与成品透镜匹配后的最终优化结果。为了匹配RGB LED的一次发射波长和人类视觉系统的色觉,将具有1:3:1加权因子的470nm,550nm和610nm设置为采样的系统波长。图15A元件403设置为覆盖有WGF的LCoS1留有足够的工作距离。图15B-15G示出优化后的最终性能。OPD非常平坦,在全场中只有轻微色差。畸变小于1.52%,如图15C所示。图15E示出系统MTF。在截止频率时,MTF超过25%,而中心场MTF在78.7cy/mm时超过45%。图15F示出焦点的色度变化。波长焦点偏移已得到很好的校正。图15G示出场相关的相对照明。在整个视场中,相对亮度高于94%。

[0125] 根据本发明实施例配置的HDR显示引擎的原型。

[0126] 在本发明中还提出了用于HDR显示引擎的光机械设计。机械部分的特殊设计是在孔径光阑位置上的可调孔径。用手柄可以很容易地将这部分放入槽中取出或从槽中取出。通过在该元件上增加一个较小或较大的孔径,可以将系统NA从0.125更改为0.176,以寻求系统吞吐量和性能之间的最佳平衡。这些机械零件然后通过3-D打印技术制造。

[0127] 图16示出根据图14A的设计为HDR显示引擎构建的原型,具有图15A的成品透镜。将两个LCoS(LCoS1,LCoS2)固定在微型光学平台上,具有两个旋钮以精确调整其定向和方向。两个LCoS设置为面对面,中间放置中继管。两个LCoS和中继管在光轨上对齐。为了测试HDR显示引擎的性能,将成品目镜放在PBS的反射光束可以穿过的一侧。将具有16mm焦距透镜的机器视觉相机放在系统的眼罩处,以进行性能评估。

[0128] HDR-HMD校准和渲染算法

[0129] 在实施HDR HMD系统之后,开发了HDR图像渲染算法,见图17,并使用图16的原型进行应用。为阐明系统的内在机理,所建议的HDR HMD的几何参数和辐射参数应校准。几何校准旨在优化空间中的两个图像的相对位置以及单个畸变系数。为了获得像素级的精细图像调制,两个LCoS图像应完美重叠。尽管图16的FLCoS仅为0.4英寸,但是在通过目镜放大之后图像翘曲变得可见。在这种情况下,即使很小的位移也可能导致可见的重影和伪影。由于难以通过手动调整两个LCoS的相对位置来实现像素级对准,因此需要进行几何校准以获取相对图像位置,以便以数字方式校正对准误差。此外,应校准系统内的残余畸变。由于两个微显示器图像经历不同的光路,所以两个图像将具有不同的畸变系数。即使只有数十个像素畸变错误,由于两个LCoS对应像素之间的位移,合成图像的性能在图像边缘也会严重降低。

[0130] 执行辐射参数的校准和渲染算法以追求适当的辐射分布和像素值。由于HDR图像实际上是存储的绝对亮度值而不是灰度级,因此需要校准显示色调映射曲线以正确显示图像。此外,由于光学和照明分布,可能会固有地存在一些不均匀的辐射度分布,应先进行测量和校正。更重要的是,应将HDR原始图像数据分成显示在两个FLCoS上的两个单独图像。基于图16原型的配置分析,两个SLM应该包含不同的图像细节和由系统配置确定的空间频率。为了正确显示和重建所需的图像,如下介绍了一种渲染算法。

[0131] 几何校正

[0132] 尽管图16原型的两个LCoS固定在带有3维平移台的倾斜式平台上,以微调其位置和定向,但实际上不可能将LCoS1标称图像平面中的每个像素覆盖到LCoS2的位置。两个图像平面中每个像素之间的位移会导致图像质量显著下降,尤其是对于高空间频率信息而言。即使两个LCoS图像平面可以完全重叠,两个LCoS上的边缘像素仍将具有明显的位移。这是因为在通过目镜放大中间HDR图像之前,生成了具有不同光路的两个LCoS图像。LCoS1图像通过中继系统并重新成像两次。这导致两个LCoS图像在标称图像平面上具有不同的畸变系数,并使图像对准更加困难。在这种情况下,不仅图像质量会下降,而且每个像素的命令级别也无法按预期适当地分配到调制动态范围。

[0133] 为了充分理解图像是如何畸变和偏离的,我们首先应该确定每个LCoS的图像形成光路。图18示出每个LCoS图像形成的光路。如果我们将每个光学元件简化并符号化为矩阵,那么每次光通过一个元件时,我们都会将其矩阵乘以入射图像,因为它对图像做了一些更改。然后,每个LCoS图像形成过程可以表示为一个方程式:

$$[0134] \quad C_1 = P_1 R R D_1 L_1 \text{ 和 } C_2 = P_2 R D_2 L_2 \quad (1)$$

[0135] 其中 L_1 和 L_2 是未畸变的原始图像; D 是在整个成像光通过期间引入的畸变; R 是反射。由于图像的奇偶性变化,需要考虑反射。 P 是从3-D全局坐标到2-D相机框架的投影关系。 C_1 和 C_2 是相机拍摄的图像。

[0136] 为了使 C_1 和 C_2 光学重叠,上述两个等式应为代数等价的。我们可以得出结论,除了考虑反射引起的奇偶性变化之外,还应该校准每个LCoS的投影矩阵 P 和畸变系数 D ,以获得二维投影等效性。

[0137] 几何校准基于Lee S和Hua H的HMD校准方法(Journal of Display Technology (显示技术杂志),2015,11(10):845-853)。畸变系数和中间图像位置是根据放置在目镜出射光瞳处的机器视觉相机进行校准的,该相机也应该是观察者眼睛的位置。为了获得原始图像点与HMD光学器件畸变的对应点之间的关系,应先校准相机的固有参数和畸变,以消除相机带来的影响。我们使用Zhang Z. (Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Computer Vision,1999.The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on.IEEE,1999,1:66-673(通过从未知方向查看平面进行灵活的相机校准[C]//计算机视觉,1999年。第七届IEEE国际会议论文集,IEEE,1999年,1:666-673))讨论的相机校准工具箱对这些参数进行校准,并采用一系列未知定向的棋盘格图案,提取角点位置并与期望值拟合。在消除相机畸变的影响之后,刚体变形应在原始采样图像和畸变图像之间保持稳定。然后可以基于透视投影模型来估计畸变系数和图像坐标。HDR HMD几何校准的过程如图19所示。此处使用的目标图像是19*14的圆点图案,该图案在整个FOV上以相等的空间对图像进行采样。用相机拍摄偏斜的图像,然后斑的每个中心点被提取作为采样场,以估计两个标称图像的平面距离、定向、径向和切向畸变系数。这些校准的参数被保存用于对准算法,如下所示。

[0138] 图像对准算法

[0139] 为了使观看图像完全重叠,应基于校准结果,采用HDR图像对准算法对数字原始图像进行预变形。该算法的工作流程图如图20所示。如果我们使用LCoS2图像作为参考图像平面,则在此图像对准过程中需要对LCoS1图像进行两次几何校准(图20:(1)和(2))。首先应将LCoS1图像投影到LCoS2的图像位置,以使所显示的两个图像看起来都像相对于投影中心

位于以相同的定向位于相同位置,也就是相机的观看位置,如图21原点所示。

[0140] 为了校正投影位置,为简化起见,使用了针孔相机模型。为了使投影图像在相机位置上重叠,基于全局坐标系中的至少四个投影点导出了变换矩阵。对于每个LCoS2点(1, n, p),可以通过参数方程计算LCoS1上的相应投影点(x_g, y_g, z_g):

$$[0141] \quad \begin{cases} x_g = l * t \\ y_g = n * t \\ z_g = p * t \end{cases} \quad (2)$$

$$[0142] \quad t = \frac{A^2 + B^2 + C^2}{Al + Bn + Cp}$$

[0143] 其中(A, B, C)是LCoS1相对于相机的法向方向。t是投影参数。

[0144] 在二维投影平面中,原始位置和投影位置由投影变换矩阵H关联:

$$[0145] \quad \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

[0146] 请注意, (x, y) 和 (x', y') 是投影平面上的局部坐标。然后,对于单应性的均匀解,应通过以下公式计算3x 3变换矩阵H的元素:

$$[0147] \quad \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1x_1 & -x'_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1x_1 & -y'_1y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_2x_2 & -x'_2y_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -y'_2x_2 & -y'_2y_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_3x_3 & -x'_3y_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -y'_3x_3 & -y'_3y_3 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_4x_4 & -x'_4y_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & -y'_4x_4 & -y'_4y_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ x'_3 \\ y'_3 \\ x'_4 \\ y'_4 \end{pmatrix} \quad (4)$$

[0148] 其中 $h_{11} \sim h_{32}$ 是元素变换矩阵, $h_{33} = 1$ 。(x, y) 和 (x', y') 的下标表示为不同的采样点。它们都表示投影平面中的局部坐标,并且可以通过从其对应的全局坐标进行坐标转换来计算。通过使用变换矩阵并采用适当的插值方法,可以渲染投影图像,如图22右列中所示的图像,其中通过单应性将LCoS1图像变换到LCoS2的位置。

[0149] 单应性之后进行第二次基于相机的校准(图20: (2))。它旨在获得相对于LCoS1当前投影图像位置的径向和切向畸变系数。然后,将通过校准的畸变系数,投影的LCoS1图像相对于其当前位置进行预变形。为了提高对准精度,可以通过残差分析来执行一些局部调整。

[0150] 由于将图16的LCoS2设置为观察参考,因此校准和对准算法非常简单,只有用于畸变校正的一个校准和预变形过程,如图20所示:请参见(3)。

[0151] 图22示出该算法如何针对原型的每个LCoS图像工作的示例。为了观察整个场的未对准,我们用于评估对准的图像是等距均匀网格(图22左列)。当将网格分别显示在两个LCoS上时,我们在每个微型显示器上观察到严重畸变的网格,如图22第二列中的相机拍摄的图像所示。此外,如果将LCoS2图像设置为参考图像位置,则LCoS1图像在投影到相机观看位置时会显示出轻微的位移和倾斜。这两个图像的组合将导致严重的模糊和偏离的HDR图像,就相机观看而言。(图22,第3列)示出经过HDR图像对准算法处理后的后处理图像。LCoS1图像偏离了其原始位置,并且两个图像都进行了预畸变以进行畸变校正。图23示出将后处

理图像同时显示在原型的一个显示器上的网格图像对准结果。通过采用HDR图像对准算法,投影到相机视图的两个网格可以重叠,几乎看不到误差。

[0152] 误差分析

[0153] 应该分析原型的残留对准误差,以评估对准性能。为此,应适当采样并提取相机视图上的本地图像投影坐标,以进行比较。在该实验中,可以在误差分析中使用棋盘图案或圆形图案,分别如图24A和24B所示。在固定的相机观看位置的情况下,针对LCoS1或LCoS2二者同时拍摄投影图像,然后通过图像后处理提取拐角或加权中心的坐标。可以基于提取的像素位置的相对位移来计算和绘制数值误差和矢量误差。在图24A,24B中,我们分别在整个场上使用了15*11采样的棋盘图案和19*14采样的圆形图案作为采样目标。图24C示出了图24B中的圆形采样位置的残留误差图。该向量从L1采样位置指向L2。注意,图24C中的矢量仅表示位移的相对大小,而不是绝对值。通过分析整个视场上的对准误差分布和方向,可以基于残余误差分析进行一些局部改进。

[0154] HDR图像源和生成

[0155] 在讨论HDR HMD的辐射校准和渲染算法之前,应注意,具有8位深度的标称图像格式不再提供足够宽的动态范围以在建议的HDR HMD上渲染HDR场景,其具有重现16位深度的图像的能力。因此,应当采用HDR成像技术来获取16位深度的原始图像数据。生成HDR图像的一种常见方法是在相同的场景下、但在不同的曝光时间或孔径光阑下拍摄多个低动态范围图像。然后,由这些图像生成扩展的动态范围照片,并以HDR格式存储,该格式存储绝对亮度值而不是8位命令级别。基于此方法生成以下使用的HDR图像。HDR图像产生过程不是本发明的主要部分,因此将不更详细地提及。

[0156] 辐射图校准

[0157] 为了显示具有所需亮度的HDR图像,应校准每个微型显示器的色调响应曲线,以将绝对亮度转换为像素值。此步骤中使用了分光辐射计,它可以分析狭窄入射角内的光谱和亮度。将其安放在目镜的出射光瞳中心,以在观看每个微型显示器时测量辐射。为了获得每个LCoS的响应图,在每个微型显示器上显示一系列具有相等灰度差异的纯红色、绿色和蓝色目标,作为测量的采样灰度值。可以使用分光辐射计校准每个灰度的XYZ三激值,然后将其转换为RGB值,并根据以下公式归一化为每种颜色的响应曲线:

$$\begin{aligned}
 v_r(R_i) &= \frac{X_{R_i} - X_0}{X_{R_{max}} - X_0} \\
 v_g(G_i) &= \frac{Y_{G_i} - Y_0}{Y_{G_{max}} - Y_0} \\
 v_b(B_i) &= \frac{Z_{B_i} - Z_0}{Z_{B_{max}} - Z_0}
 \end{aligned} \tag{5}$$

[0159] 为了消除背景噪声的影响,应根据等式5校准并从每个数据中减去与[RGB]=[0 0 0]对应的三激值(X_0, Y_0, Z_0)。两个SLM的响应曲线分别校准,并在测试LCoS上显示目标图像,同时使另一个图像保持全反射(最大值[RGB]=[255 255 255])。然后,使用分段三次多项式通过采样值对色调响应曲线进行插值,如图25所示。很明显,显示响应不是线性关系,而是伽马指数大于1。

[0160] HDR背景均匀度校准

[0161] 为了渲染所需的图像灰度,另一项必要的校准是HMD固有场依赖亮度校准。由于光学器件渐晕、相机感觉和背光不均匀的影响,图像辐射可能无法在整个视场上均匀分布。即使在微显示器上显示均匀的值,由于这些内部伪影,实际上也无法在整个FOV上看到均匀的亮度。因此,在图像渲染过程中应纠正所有这些各种各样的伪影。

[0162] 由于分光辐射计的接收角很窄并且在测量过程中难以精确控制其方向,因此直接测量整个场的辐射是不可行的。因此,采用了基于相机的场相关辐射校准。该过程在图26中的步骤(1)和(2)中示出。为了准确地校准辐射分布,应先校准并消除相机固有的影响。相机响应曲线由标准监视器校准,该监视器的辐射图已经被测量,根据图26虚线内所示的程序。通过拍摄一系列具有相同辐射差的均匀背景场景,相机色调响应可以被准确地校准。它用于相机伽马解码,此后恢复了所拍摄的HMD图像的绝对亮度值,图27A。重要的是要知道相机不应在整个视场中都饱和。不均匀的图像辐射度布是由于两个因素造成的:来自相机固有的(图27B)和来自HMD固有的(图27C)。为了去除相机相关物,如图27B所示,进行了第二次校准(图26:(2),测量相机背景均匀性),以遍及整个视场拍摄显示统一命令级别的标准监视器的图片[255 255 255]。为了获得每个像素的相对亮度,将相机背景和相机拍摄的HMD背景都裁剪到实际覆盖HMD场的区域,如图27A和图27B中用虚线表示。然后,将图27A,27B中所示的区域被内插到显示分辨率,以对相对亮度进行像素化分析,如图27C和图27D所示。通过将原始亮度值图(图27C)除以相机场相关图(图27D),可以获得像素化的HMD相对亮度分布。

[0163] 在进行均匀性校正之前(图27D),我们首先需要将归一化因子 $f(x,y)$ 定义为整个像素场中像素数 (x,y) 处的亮度值与最大亮度值之比。通过用归一化因子截断色调响应曲线并将其其余部分缩放为1,可以实现背景校正。图27D示出均匀性校正后的一些采样点色调响应曲线。由于对辐射场差异进行了数字补偿,因此均匀性校正后的色调映射曲线不是在整个场上具有相同的响应曲线,而是高度依赖于像素位置。

[0164] 但是,应该注意,均匀性校正牺牲了中心场像素命令级别,以提高SLM面板(或面板显示器)的均匀性。如果命令级别被过多截断,HDR引擎可能会在某种程度上失去其有效性。因此,在该算法中,可以将削波因子提供给用户以在均匀度和系统动态范围之间选择适当的折衷。

[0165] 图28C示出背景均匀性校正的结果。容易理解的是,校正后中心场变暗,以补偿通过渐晕和照明在拐角处损失的辐射。图28A,28B示出在处理对准和辐射渲染算法之后在LCoS1和LCoS2上显示的一对渲染图像。如图28A所示,已经在LCoS1图像上校正了均匀性。与图28B中的未校正场景相比,图28A的中心具有阴影区域。我们可以看到背景均匀性校正更像是过滤器或蒙版。图28C应用于原始图像,以通过合并的伽马编码过程补偿不均匀分布的背光。经过整个均匀性校正过程后,图像现在变得更加均匀和真实。

[0166] HDR图像辐射度渲染算法

[0167] 当我们将每个像素调制均等地分为两个SLM时,需要重新计算两个LCoS上每个像素的命令级别。但是,即使我们希望将像素值平均分配到两个SLM中,该过程也不会简单地使原始图像值成为平方根。微型显示器具有非线性的色调响应曲线。如图26和相关的文本所示。这意味着,由于用于显示亮度编码的伽马校正,如果命令级别下降到其初始值的一半,则亮度将不会是一半。而且,色调响应现在取决于场,这意味着即使对于相同的所需亮度,每个像素现在也具有不同的目标命令级别。开发了一种用于解决所有问题的辐射渲染

算法,其示意图如图29所示。每个SLM的调制幅度都可以通过取其原始值的平方根来获得(图29(1))。为了获得所需的亮度值,应基于每个SLM的显示色调响应曲线计算相应的像素值。图16中原型的LCoS1负责低空间频率信息。如果需要,首先对图像进行下采样(图29(2)),这将在下面进行讨论。然后用修改后的色调响应曲线对下采样后的图像进行编码。为了校正图像背景不均匀性,可以使用最大亮度分布修改LCoS1色调响应曲线。对于每个像素,色调响应曲线将以不同的绝对值截断并提取,这取决于它们的最大亮度比。图31示出一个如何基于色调响应曲线查找相应像素值的示例,其中 g_1', \dots, g_1^n 和 g_2 表示两个SLM色调响应的反函数,其中n表示像素计数。由于亮度均匀性校正,LCoS1色调响应曲线将取决于像素的位置。

[0168] LCoS2图像将渲染作为对LCoS1图像的补偿。由于两个微显示面板的物理分离,LCoS1图像平面相对于系统参考图像平面会有一些位移,该位移在图16中的LCoS2位置设置。在这种情况下,应考虑衍射效应。无像差非相干点扩展函数(PSF)使参考图像平面上的LCoS1实际图像实际模糊。(Sibarita J B. Deconvolution microscopy [M] // Microscopy Techniques (解卷积显微镜[M] // 显微镜技术) Springer Berlin Heidelberg, 2005: 201-243):

$$[0169] \quad PSF(r, \Delta z) = \left| 2 \int_0^1 J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda} NA \cdot r \cdot \rho\right) \exp\left\{i \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sigma \cdot \rho^2\right\} \rho d\rho \right|^2 \quad (6)$$

[0170] 其中 $\sigma = 2\Delta z \sin^2 \frac{\alpha}{2}$, Δz 是LCoS1与参考图像位置之间的位移; r 是径向距离; λ 是波长; ρ 是出射光瞳的归一化积分变量; α 是衍射锥的半角。可以将参考图像平面上的实际LCoS1散焦图像视为原始图像,并将其与点扩展函数进行卷积(图29(3))。然后通过将模糊的LCoS1图像除以总亮度来计算LCoS2所需的亮度。然后通过LCoS2响应对图像进行编码。通过使用HDR图像辐射渲染算法,可以根据图30计算每个SLM上的期望像素值 $C1_n$ 和 $C2$,并且可以很好地再现HDR图像亮度。

[0171] 空间频率重新分配-图像下采样

[0172] 可以使用可选的渲染过程来重新分配图像空间频率。对于中继HDRHMD系统而言,这是不必要的,因为每个显示器上的像素都具有一对一的成像对应关系。但是,将具有不同权重的空间频率分配到两个微型显示器上可能会留下更大的对准公差。此外,对于一个更靠近标称图像平面的SLM和另一个更远离标称图像平面的SLM的非中继HDR显示引擎,在更靠近图像平面的微型显示器上加权较高的空间频率信息可能会提高整体图像质量。图31示出目标图像及其通过不同的低通滤波器进行下采样后的频域。然而,尽管这是增加对准公差的好方法,尤其是当两个SLM具有一定距离时,下采样也会引入一些伪影,这在边界和灰度级阶跃变化处会更加明显。

[0173] 系统性能

[0174] 图32A示出将色调映射到8位后的原始目标HDR图像。通过在“HDR图像源和生成”标题下的上述方法生成该测试的HDR图像,以合并具有多次曝光的图像。该合成图像利用以上在“辐射度图校准”和“图像对准算法”标题下的结合图20和图29和文本公开的辐射和对准渲染算法进行处理,然后在两个LCoS上显示。黑白相机放置在HMD眼罩的中央,以拍摄重建的场景。由于相机的位深度较低,因此可以拍摄多张图像并将其合成为一张HDR图像,从而

获得比单个图像更高的动态范围,从而更好地接近人眼的动态范围。图32B示出HDR HMD系统性能。作为比较,图32C、32D示出了LDR HMD上示出的色调映射HDR图像(图32C)和LDR HMD上示出的LDR图像(图32D)。与仅示出8位深度图像的LDR HMD相比,在图32C,32D中,提出的HDR HMD显示出更高的图像对比度,在暗和亮区域均具有更多细节,并且保持了良好的图像质量。

[0175] 本文引用了许多专利和非专利出版物,这些出版物的每一个的全部公开内容通过引用并入本文。

[0176] 根据前述说明书,本发明的这些和其他优点对于本领域技术人员将是显而易见的。因此,本领域技术人员将认识到,在不脱离本发明的广泛发明构思的情况下,可以对上述实施例进行改变或修改。因此,应当理解,本发明不限于在此描述的特定实施例,而是旨在包括在如权利要求书所阐述的本发明的范围和精神内的所有改变和修改。

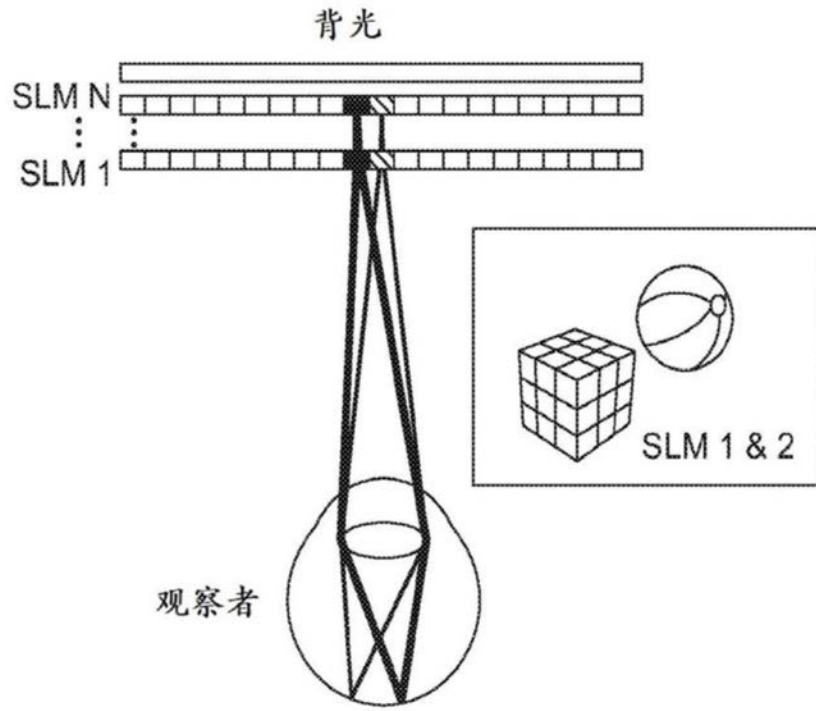


图1A

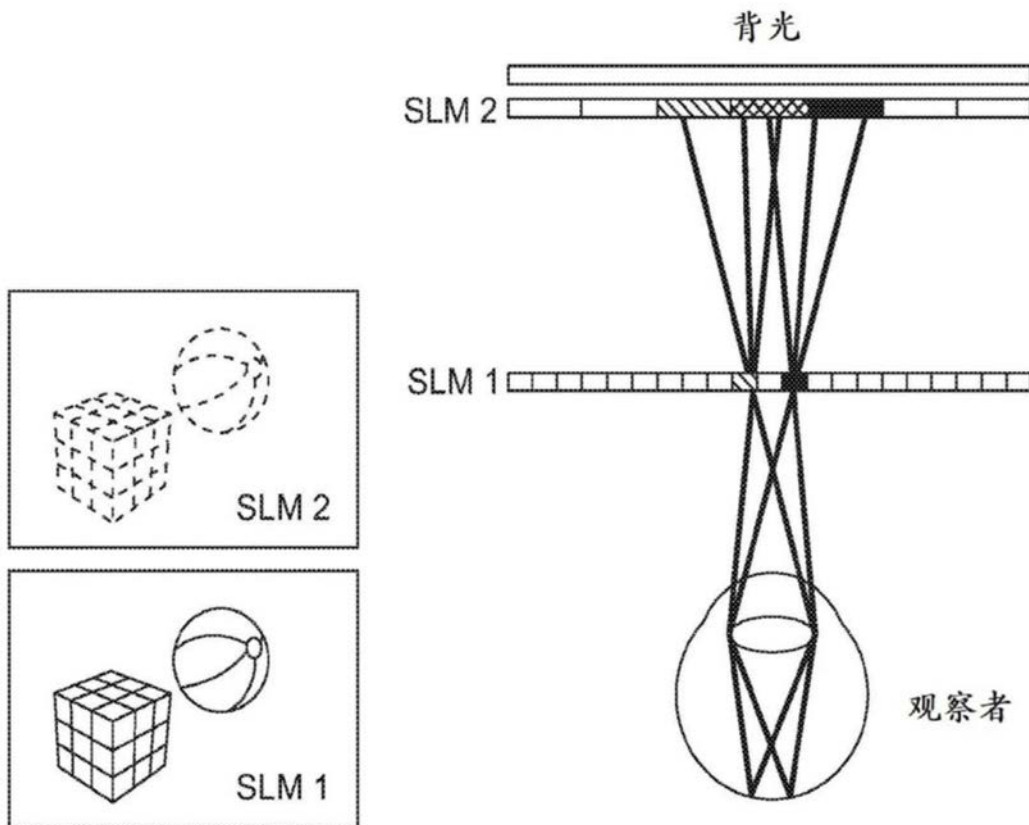


图1B

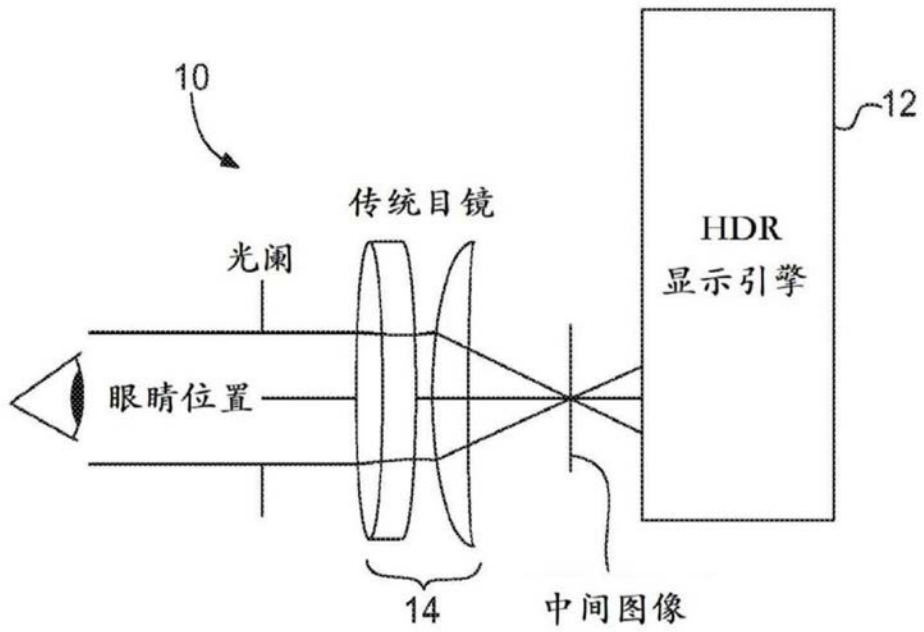


图2A

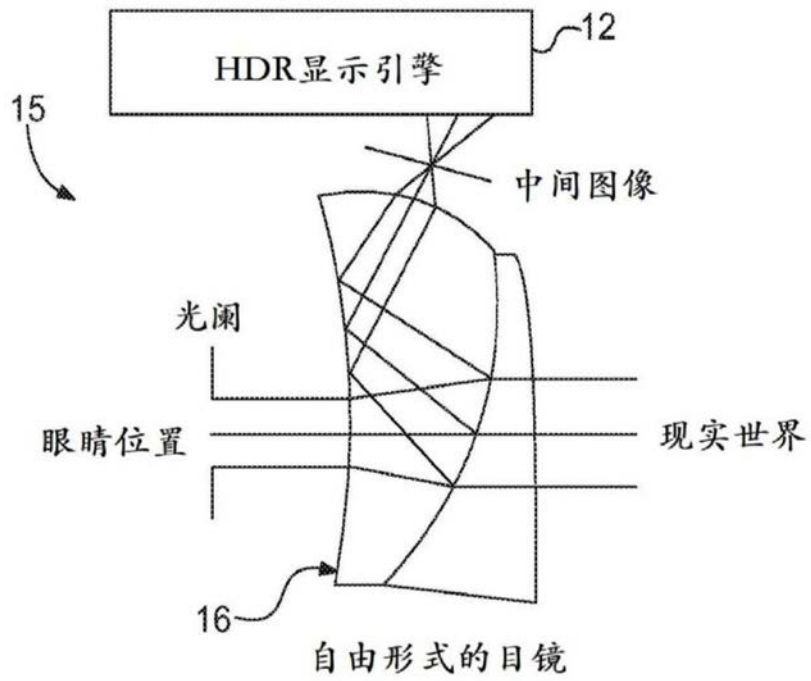


图2B

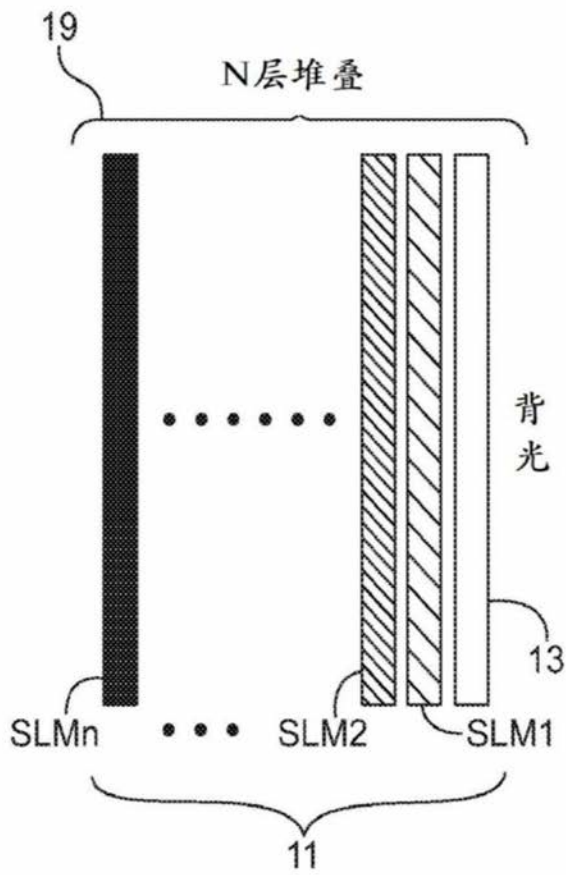
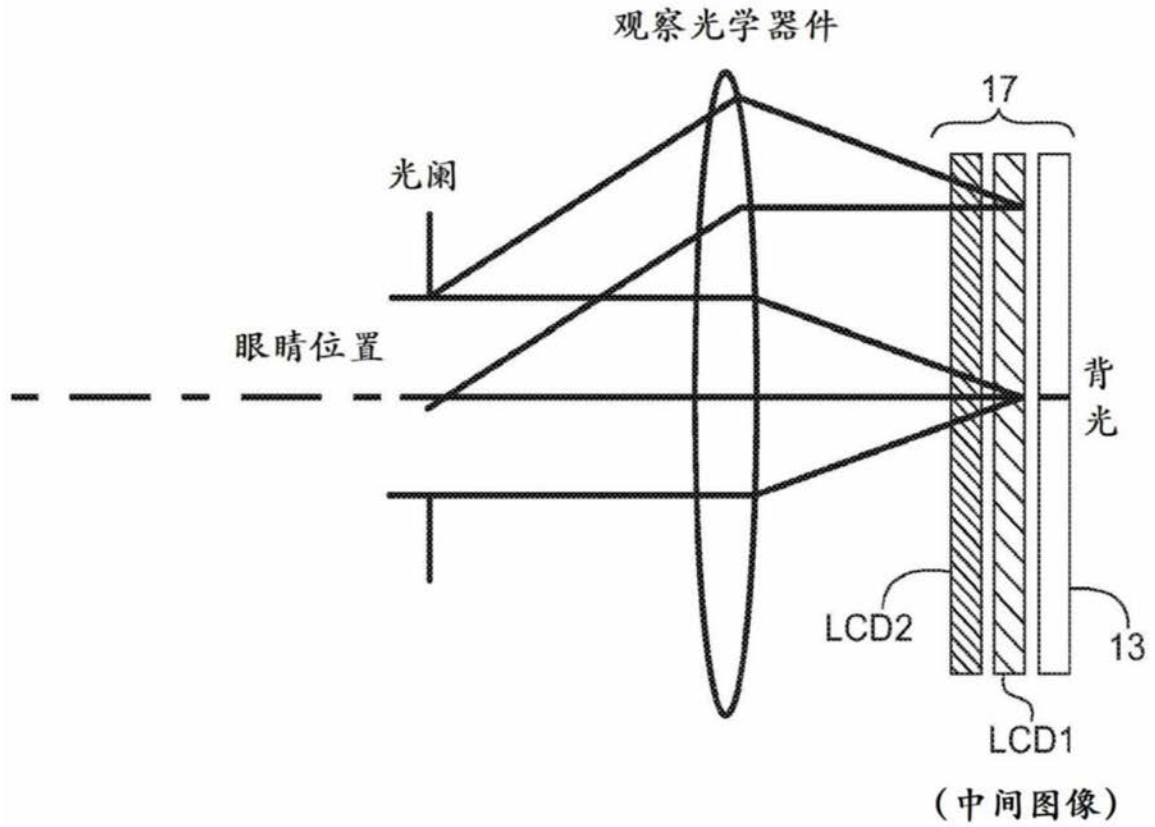


图3

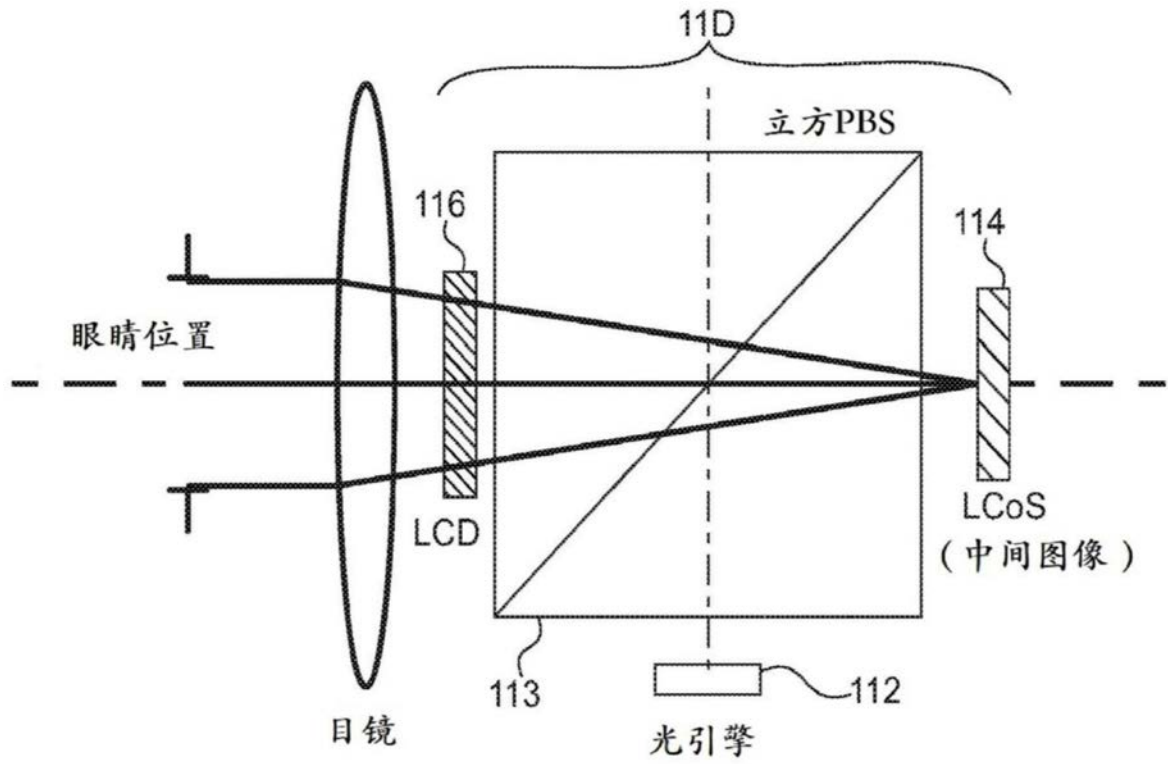


图4A

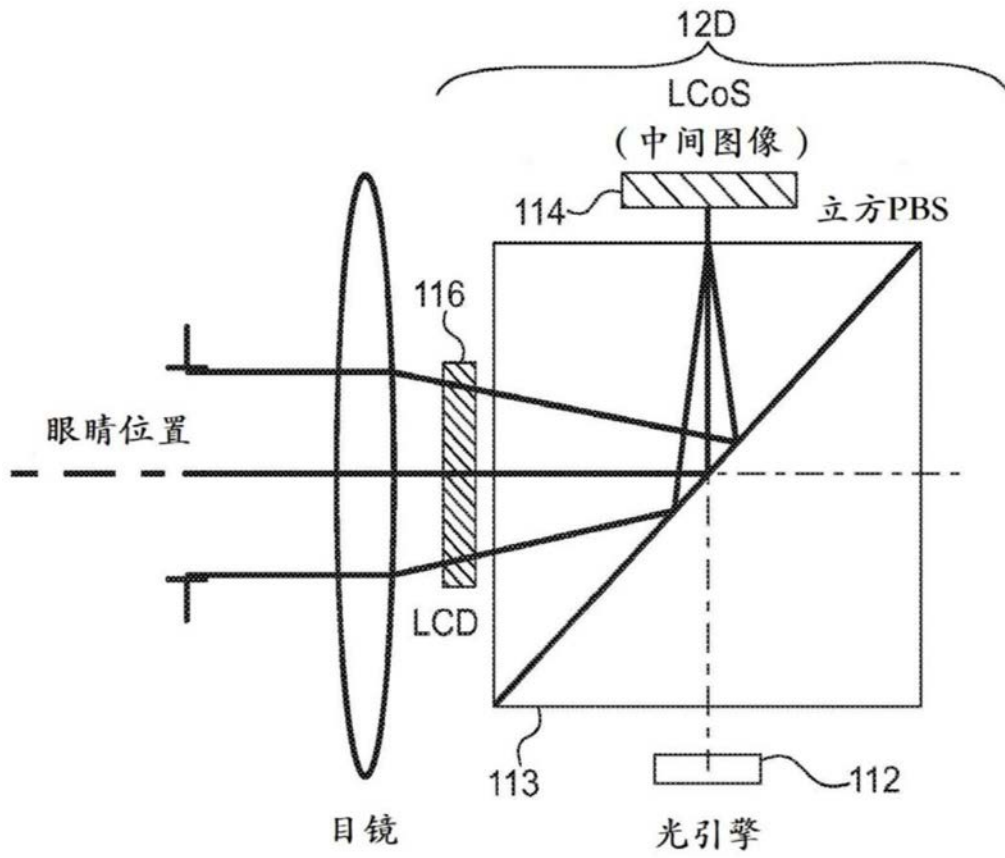


图4B

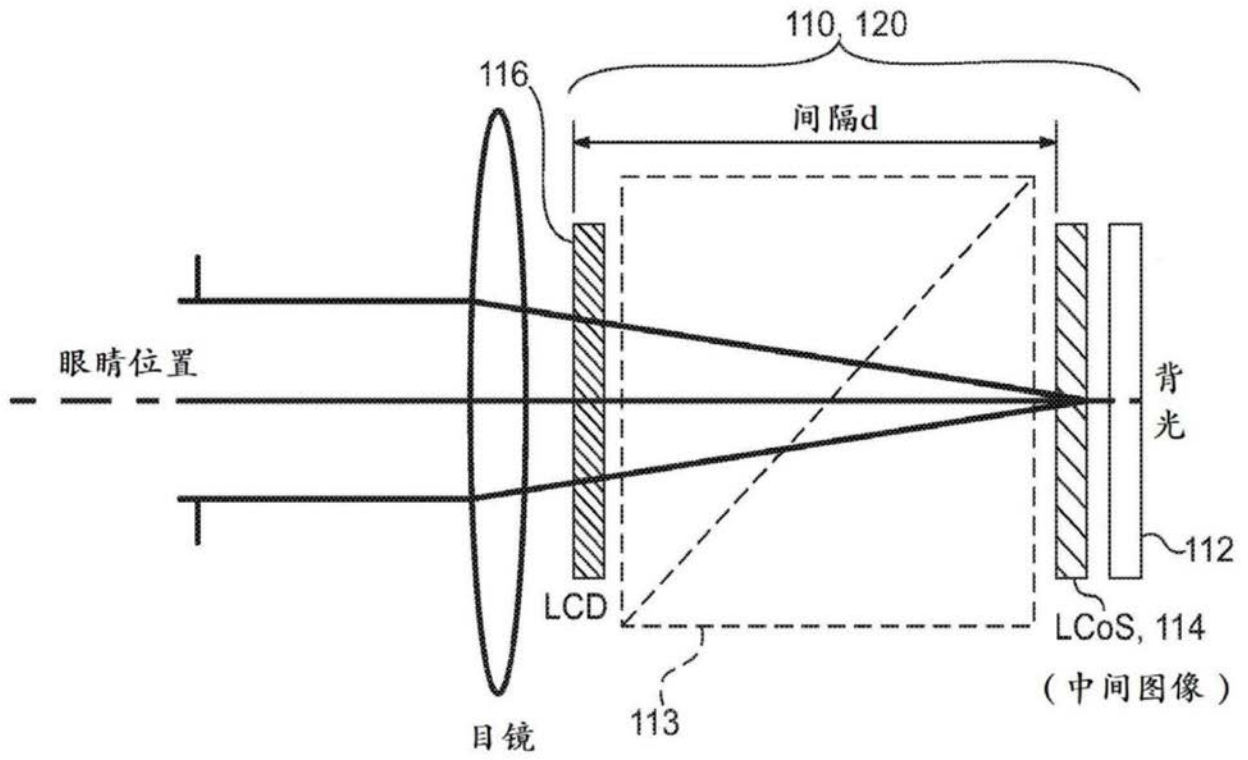


图4C

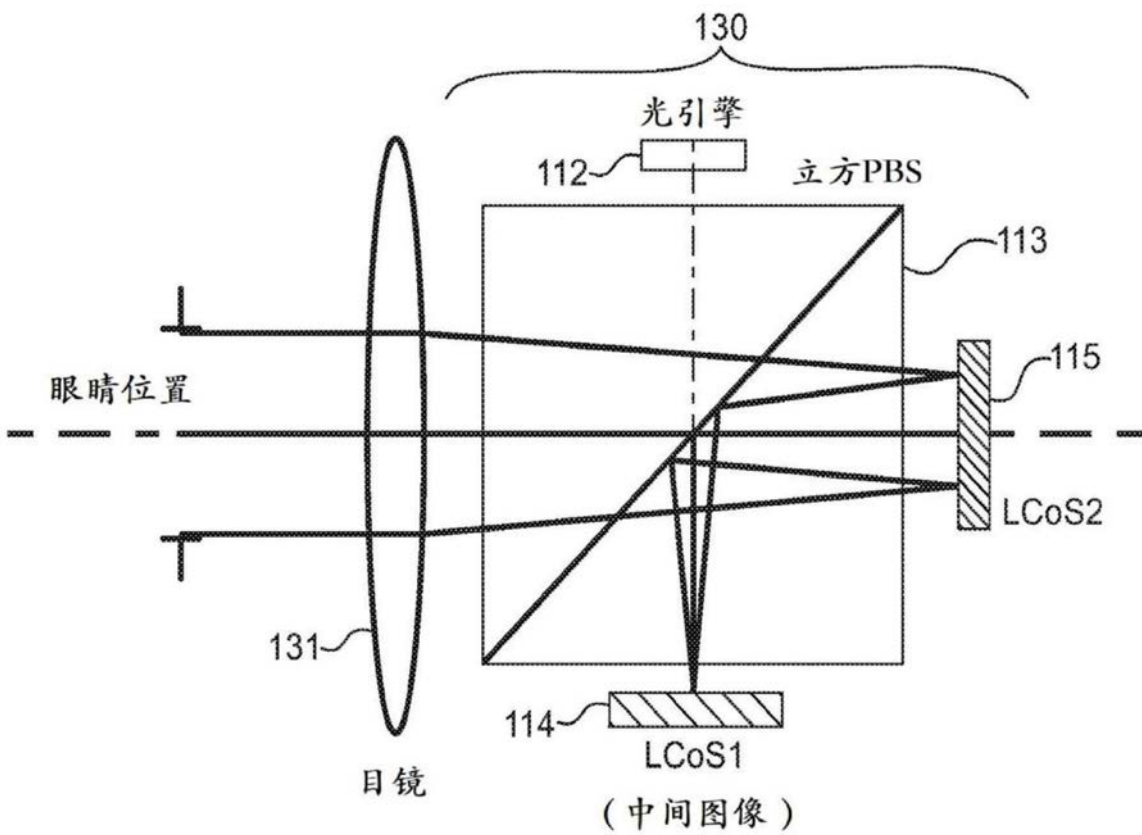


图5A

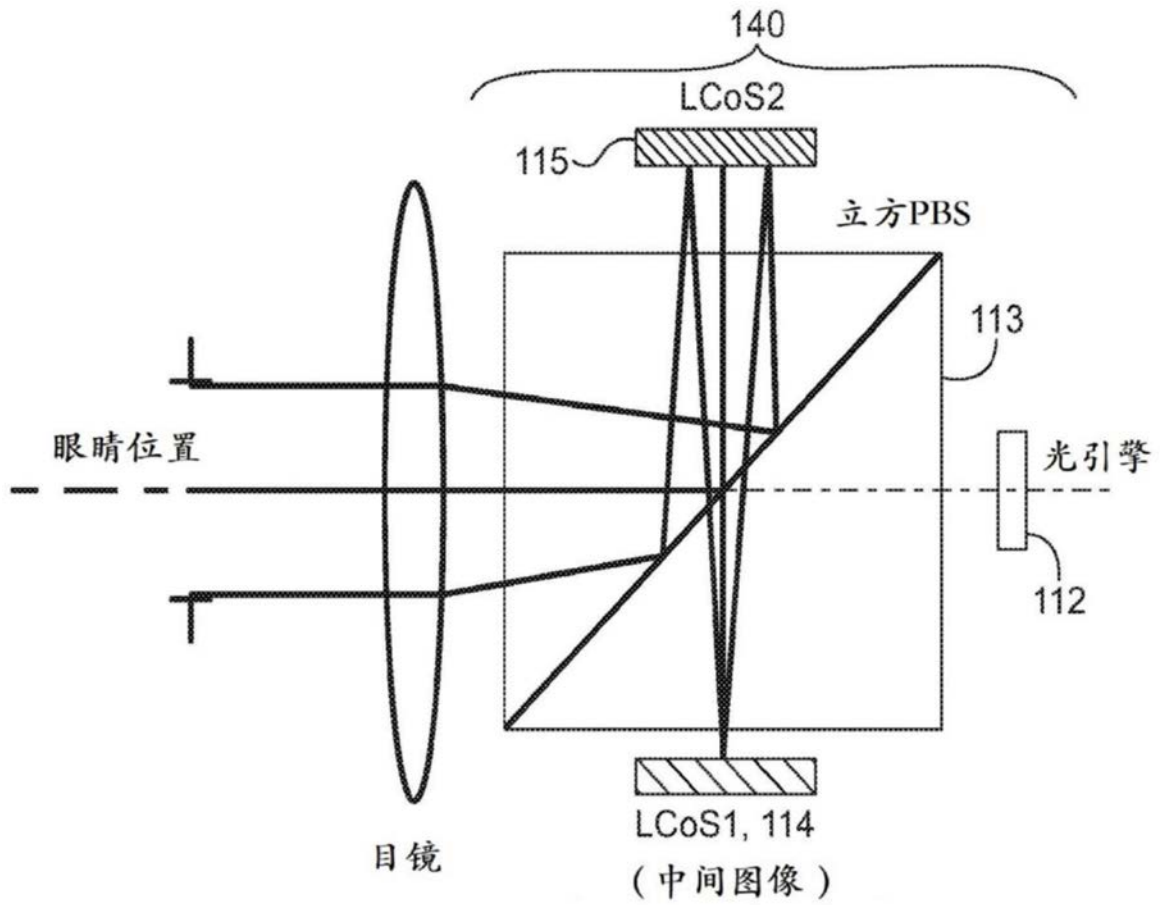


图5B

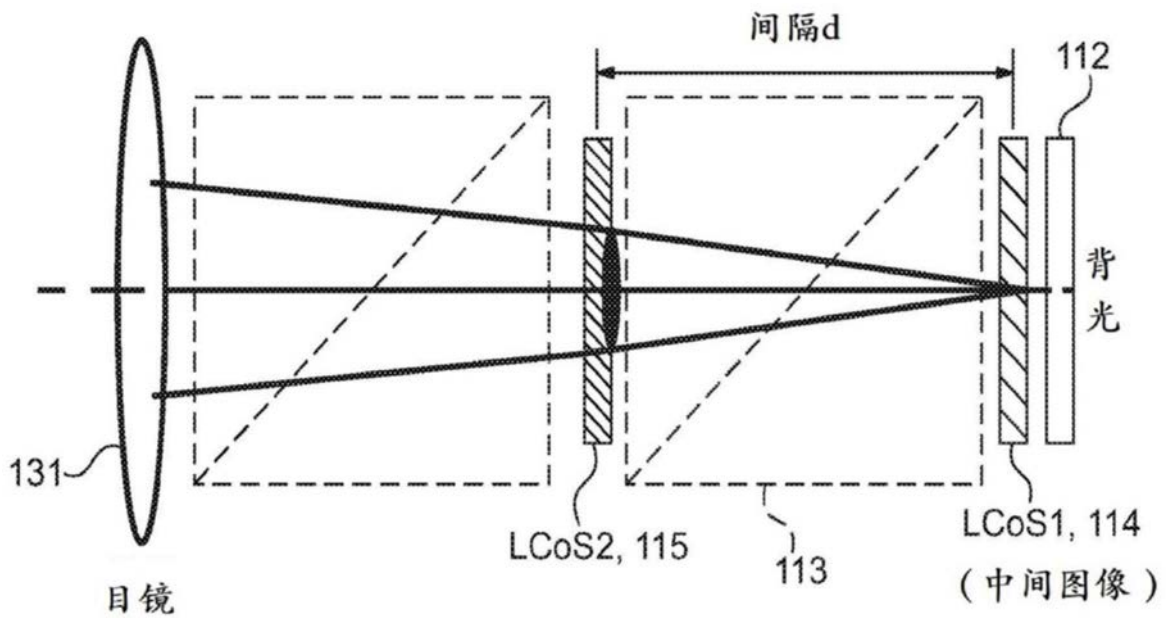


图5C

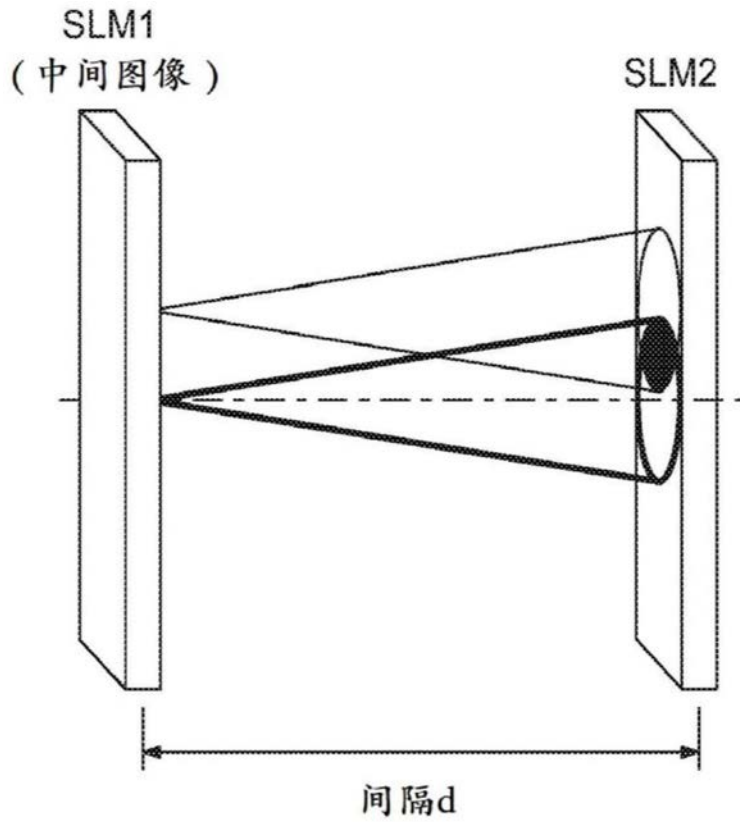


图6A

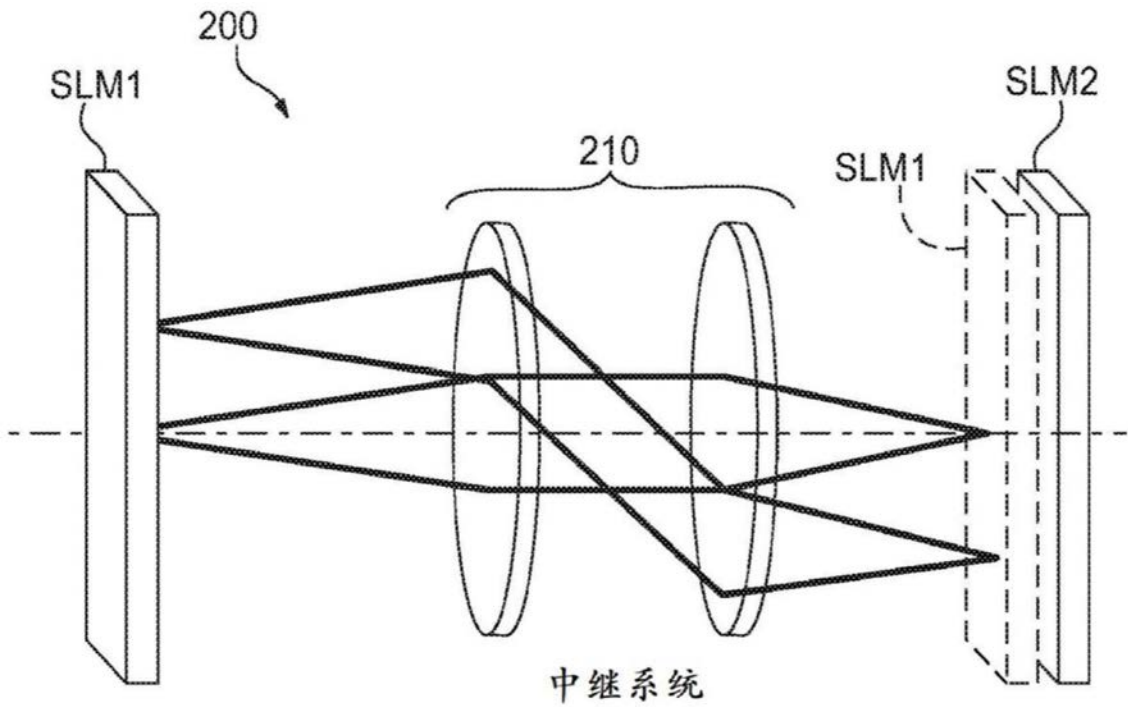


图6B

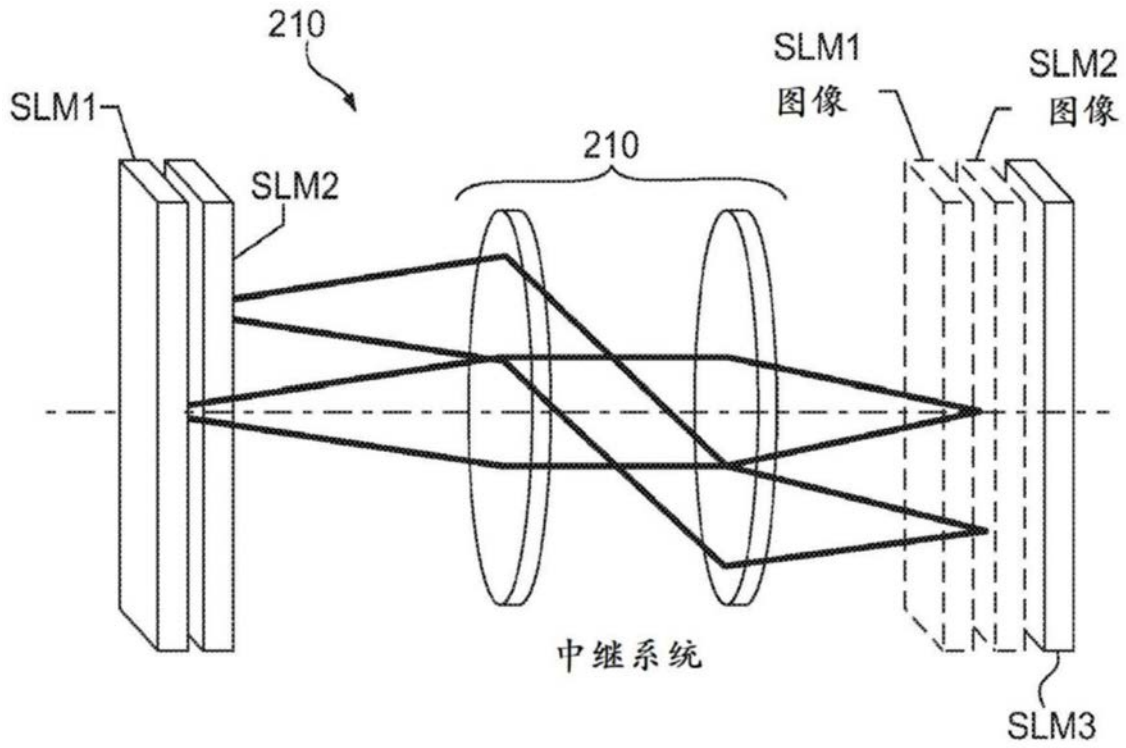


图6C

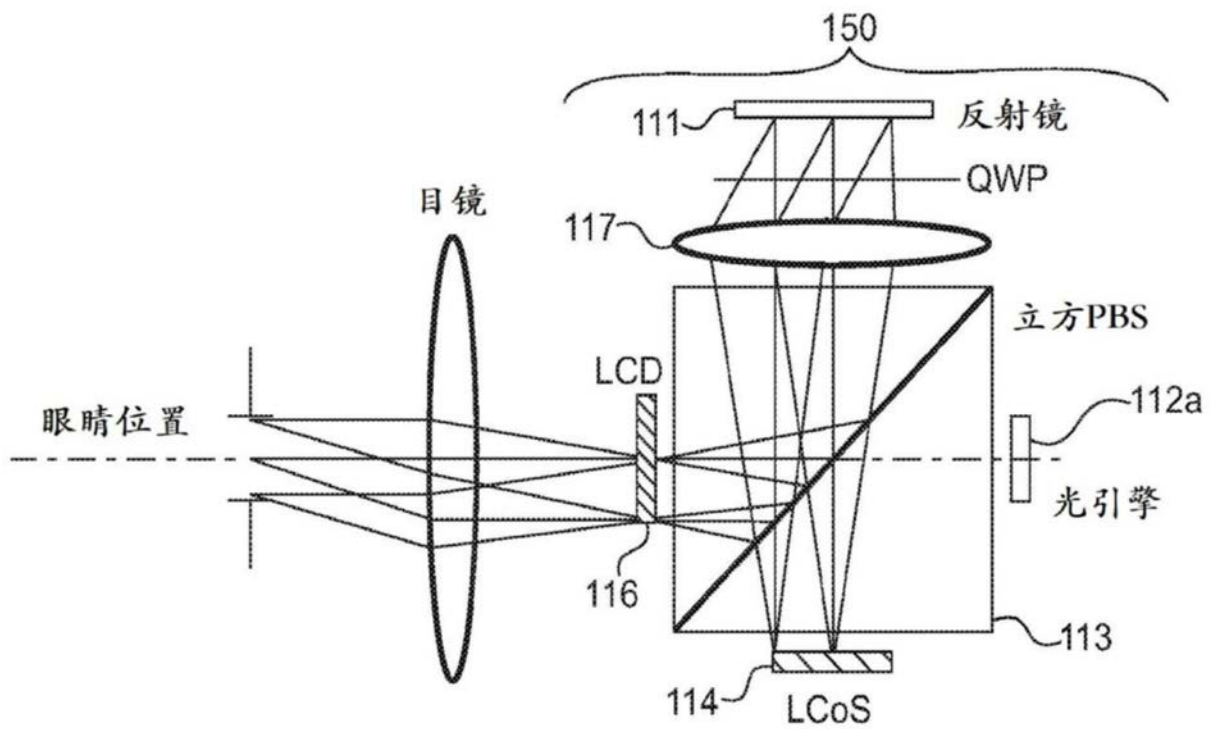


图7A

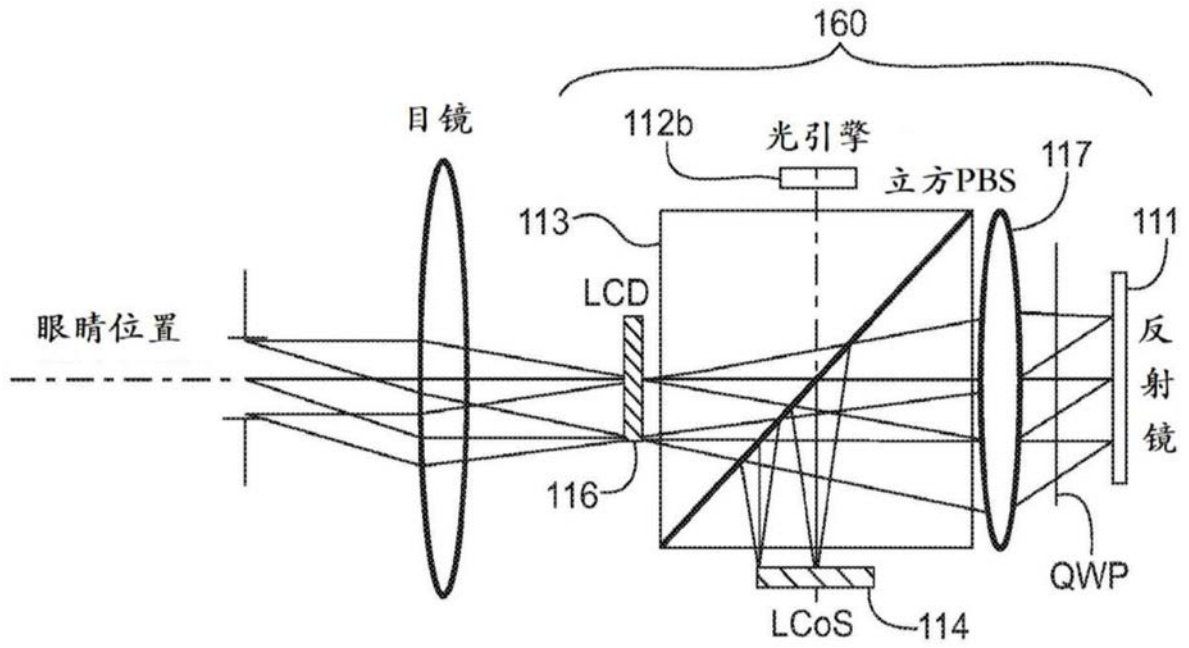


图7B

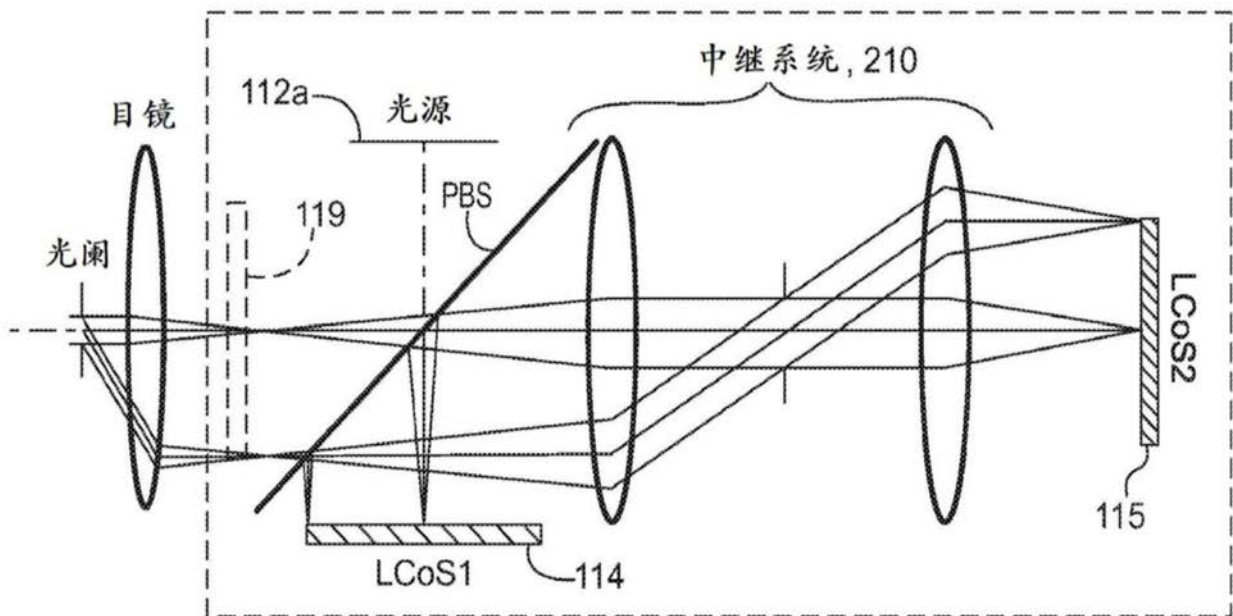


图8

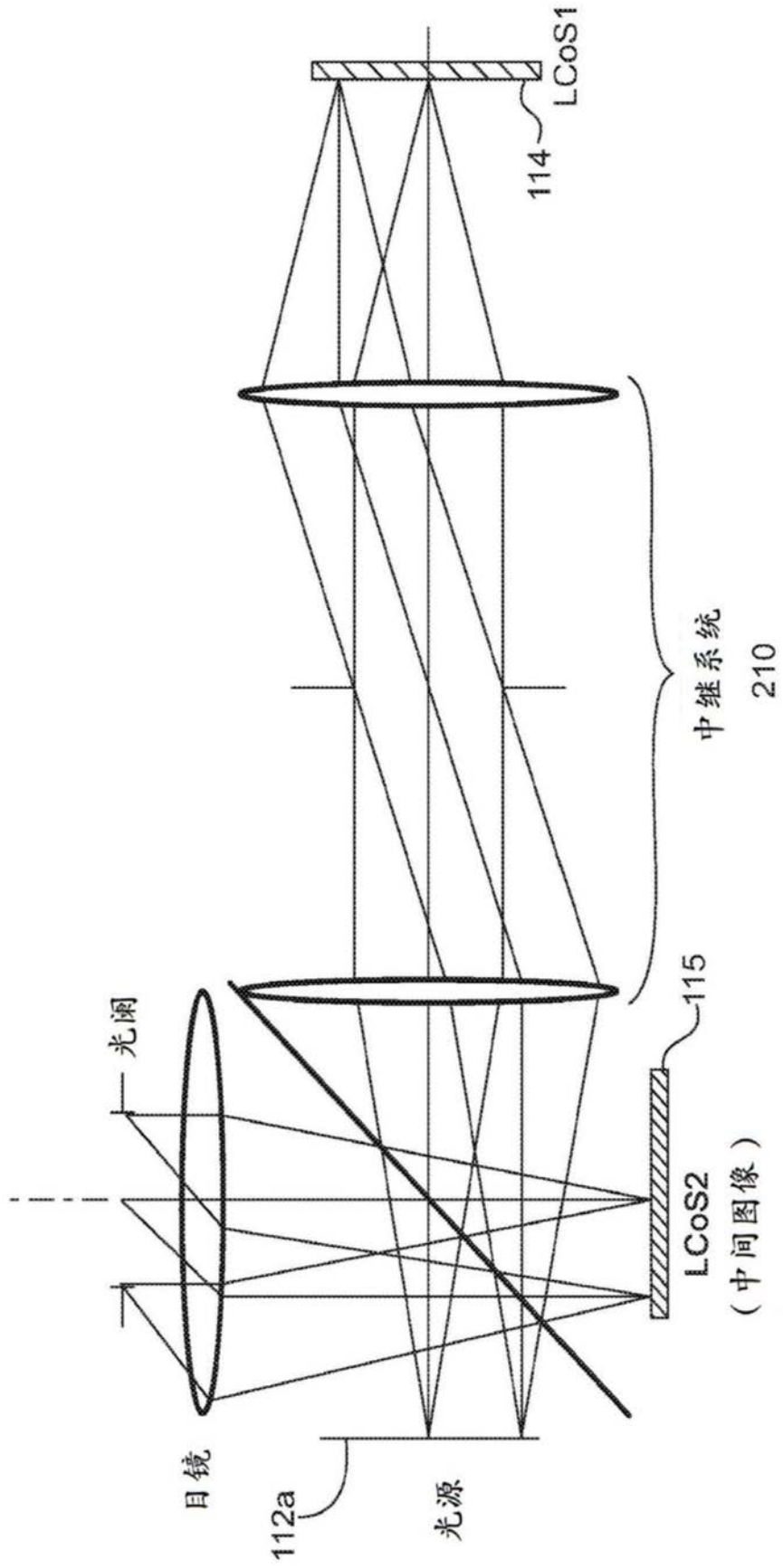


图9

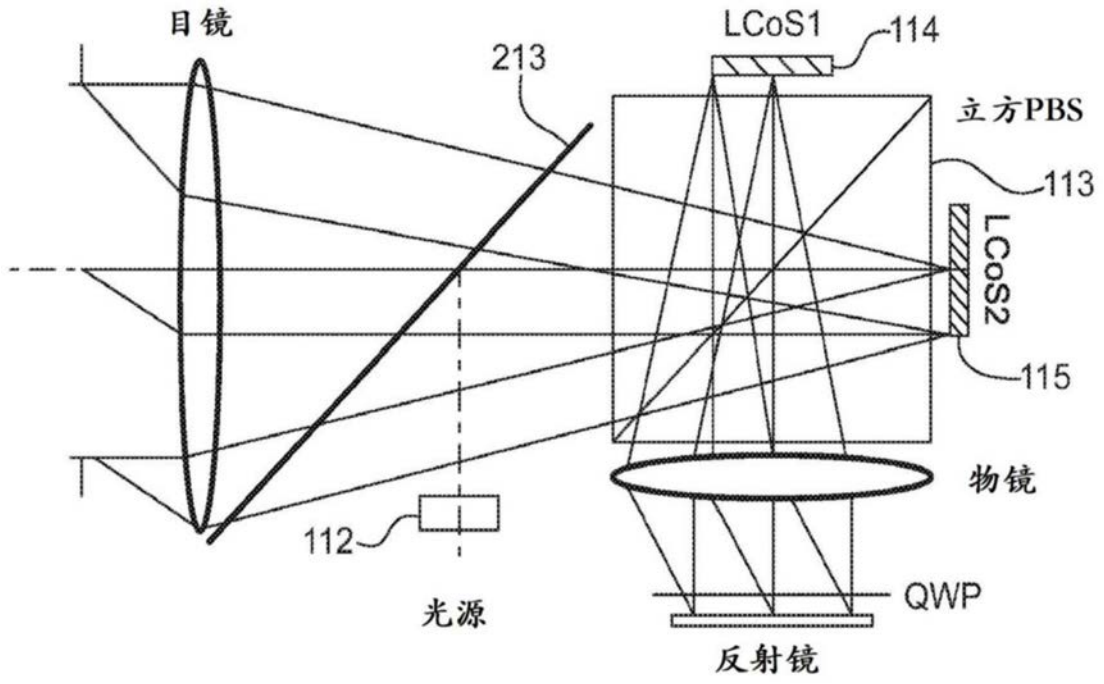


图10

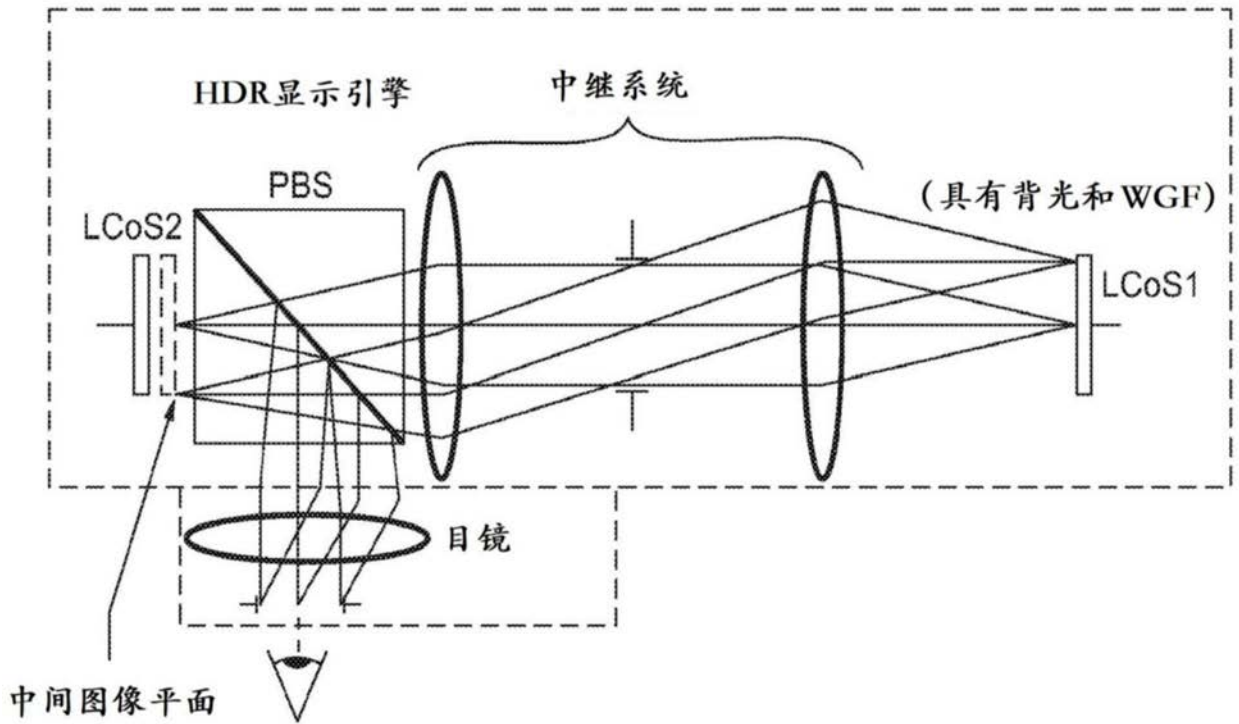


图11

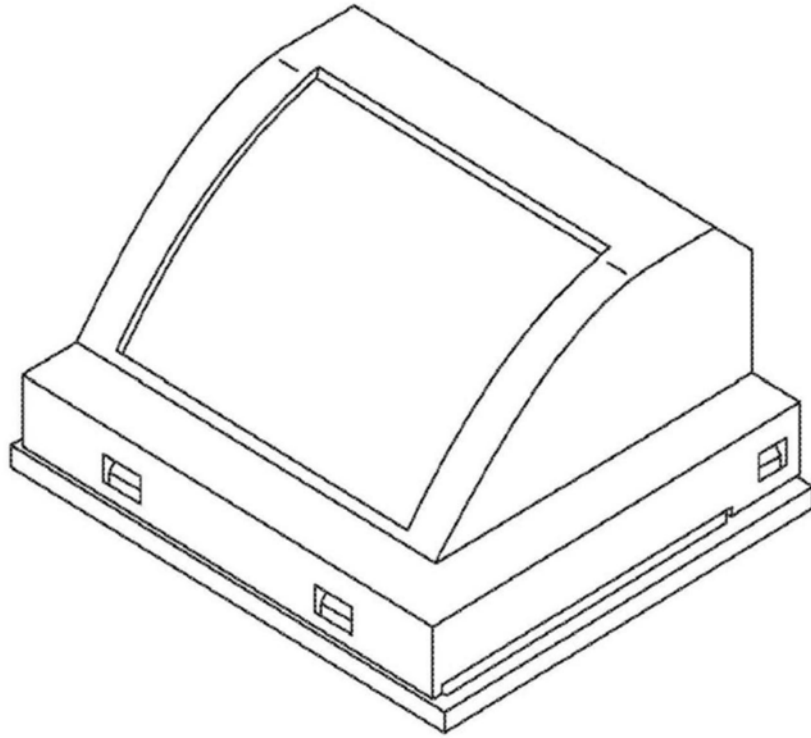


图12

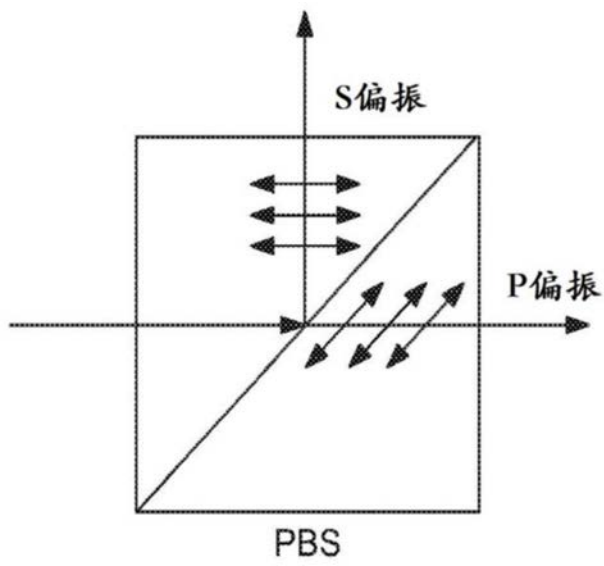


图13

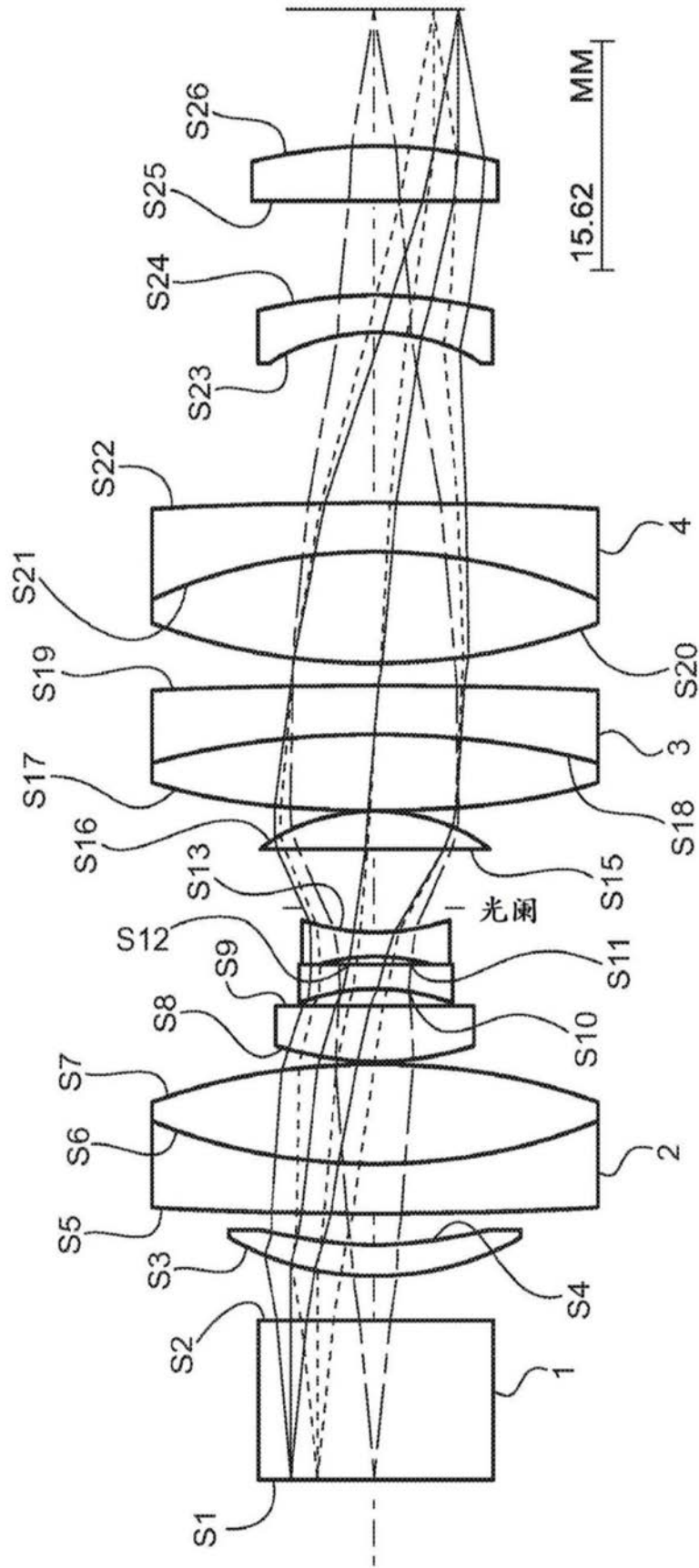


图14A

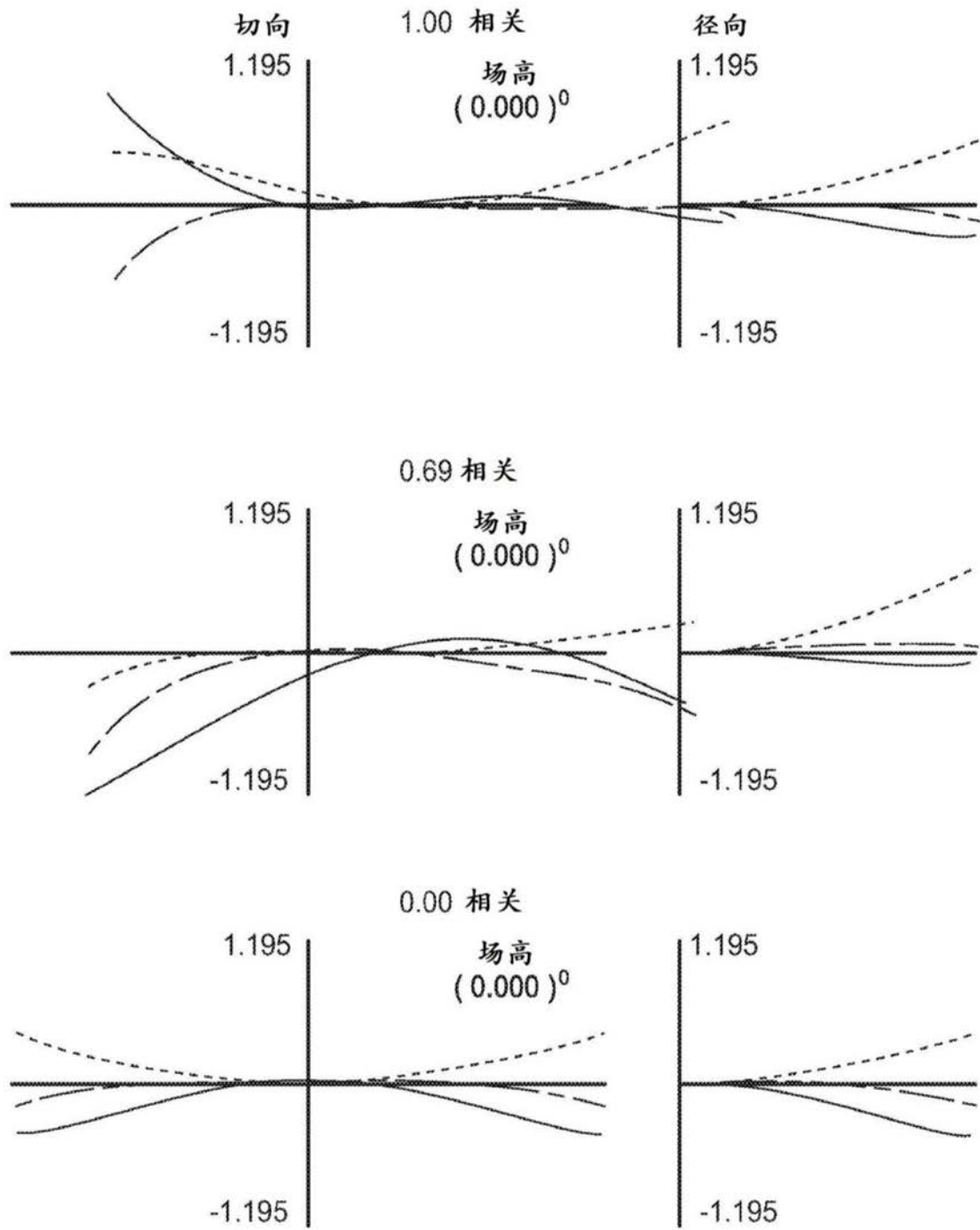


图14B

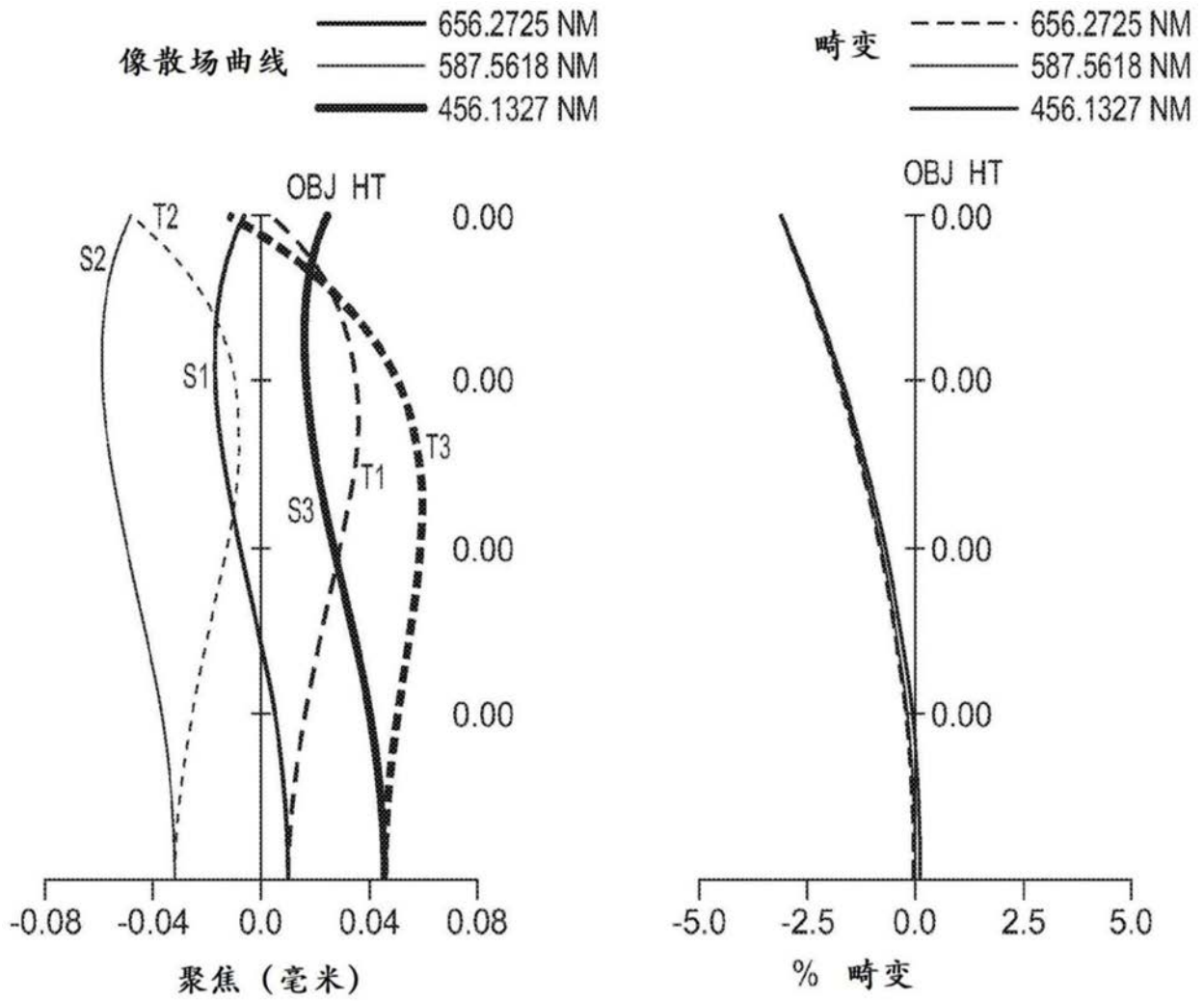


图14C

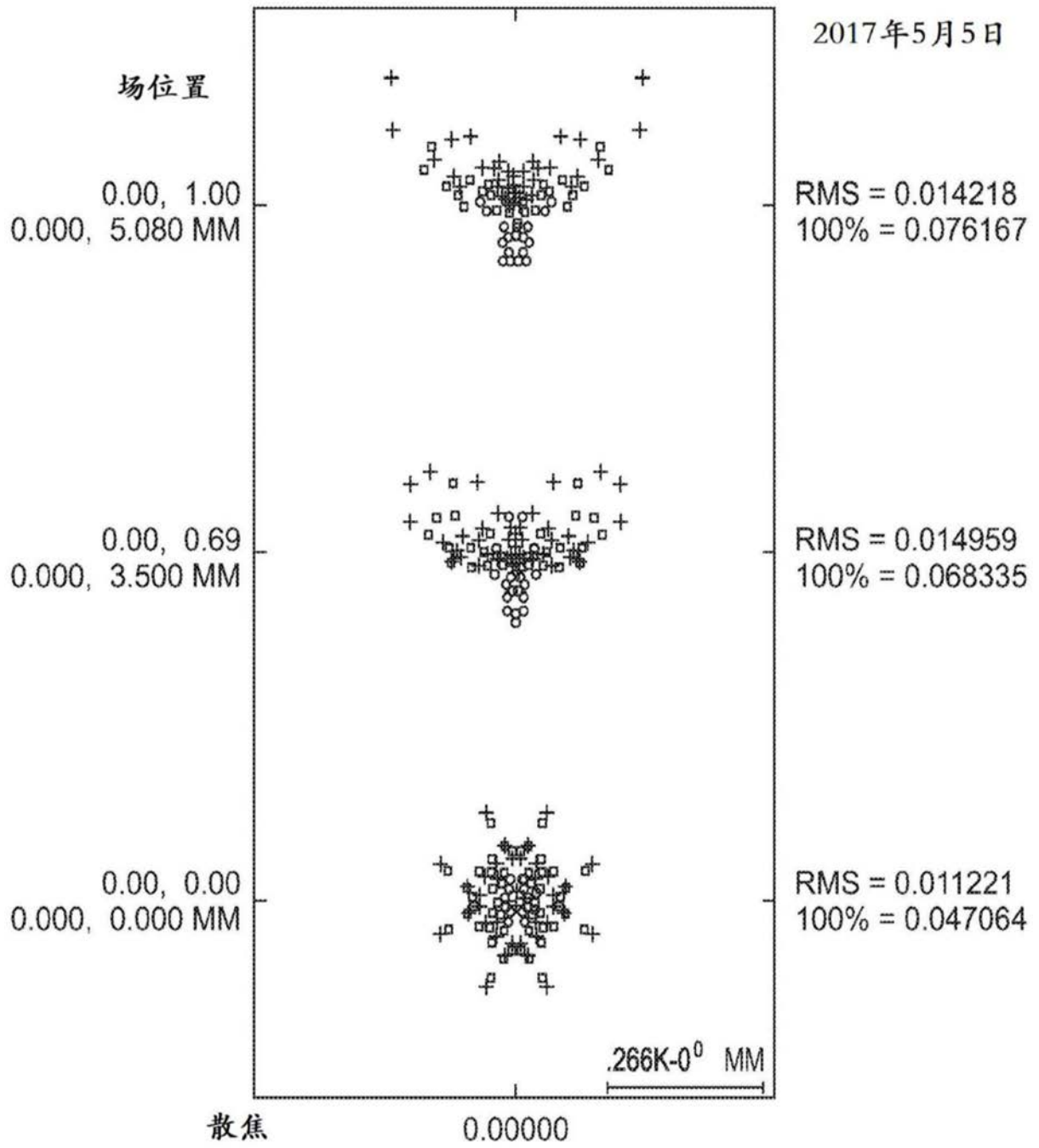


图14D

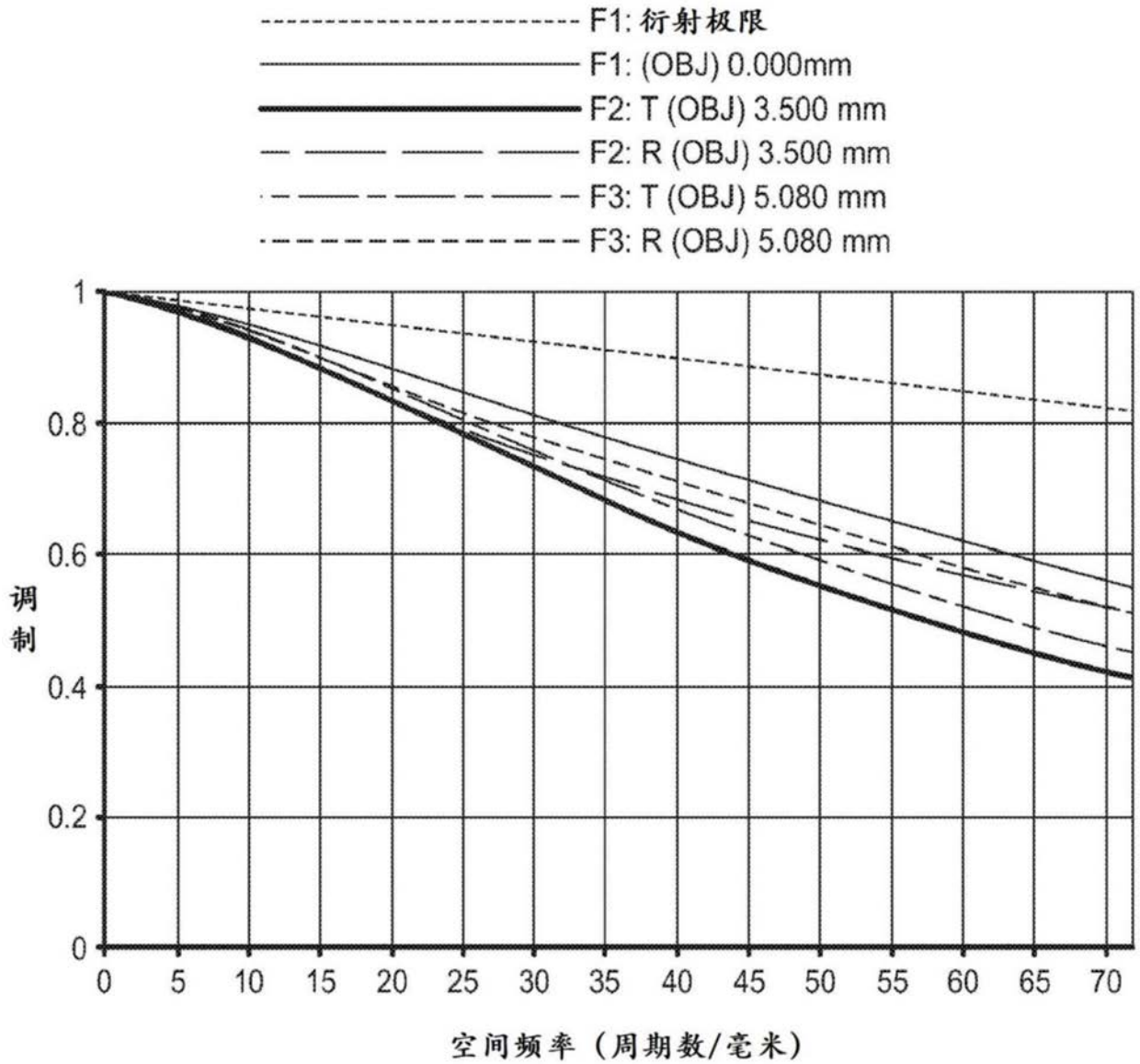


图14E

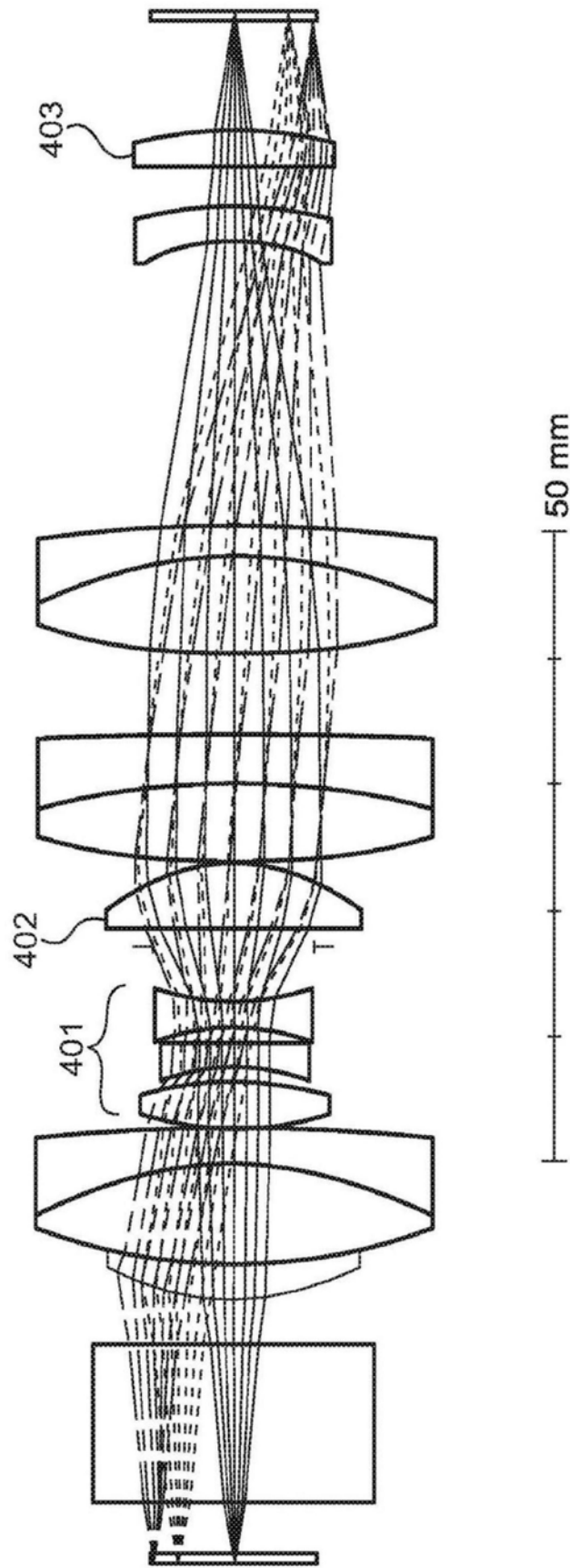
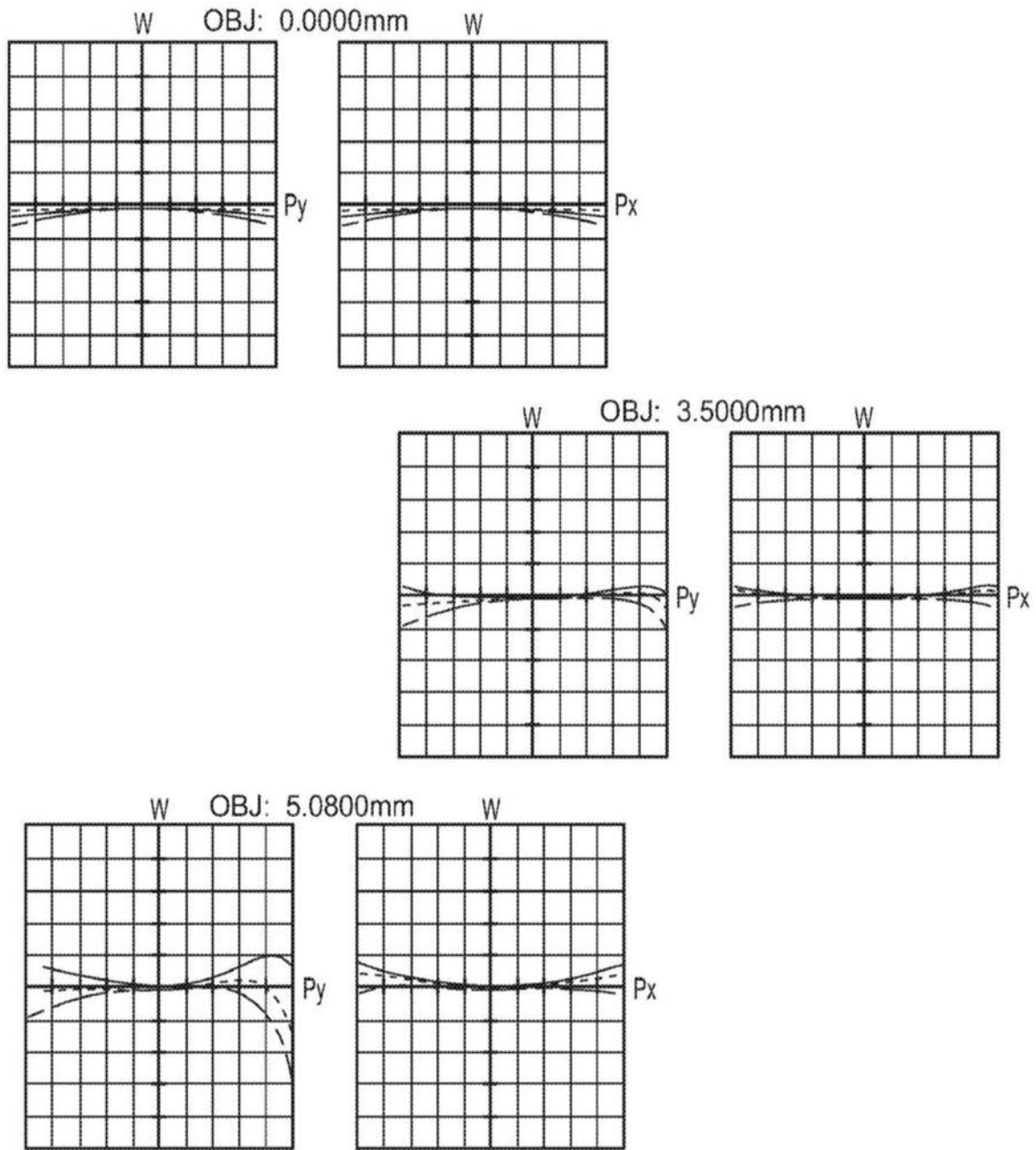


图15A



光程差

40_IT_16

2/12/2017

最大量度: ± 10.000 波

0.470 0.550 0.610

ZEMAX

ZEMAX OPTICSTUDIO 15.5 SP2

STOCK6_FINAL_DOUBLET_0.125.ZMX

CONFIGURATION 1 OF 1

表面: 像

图15B

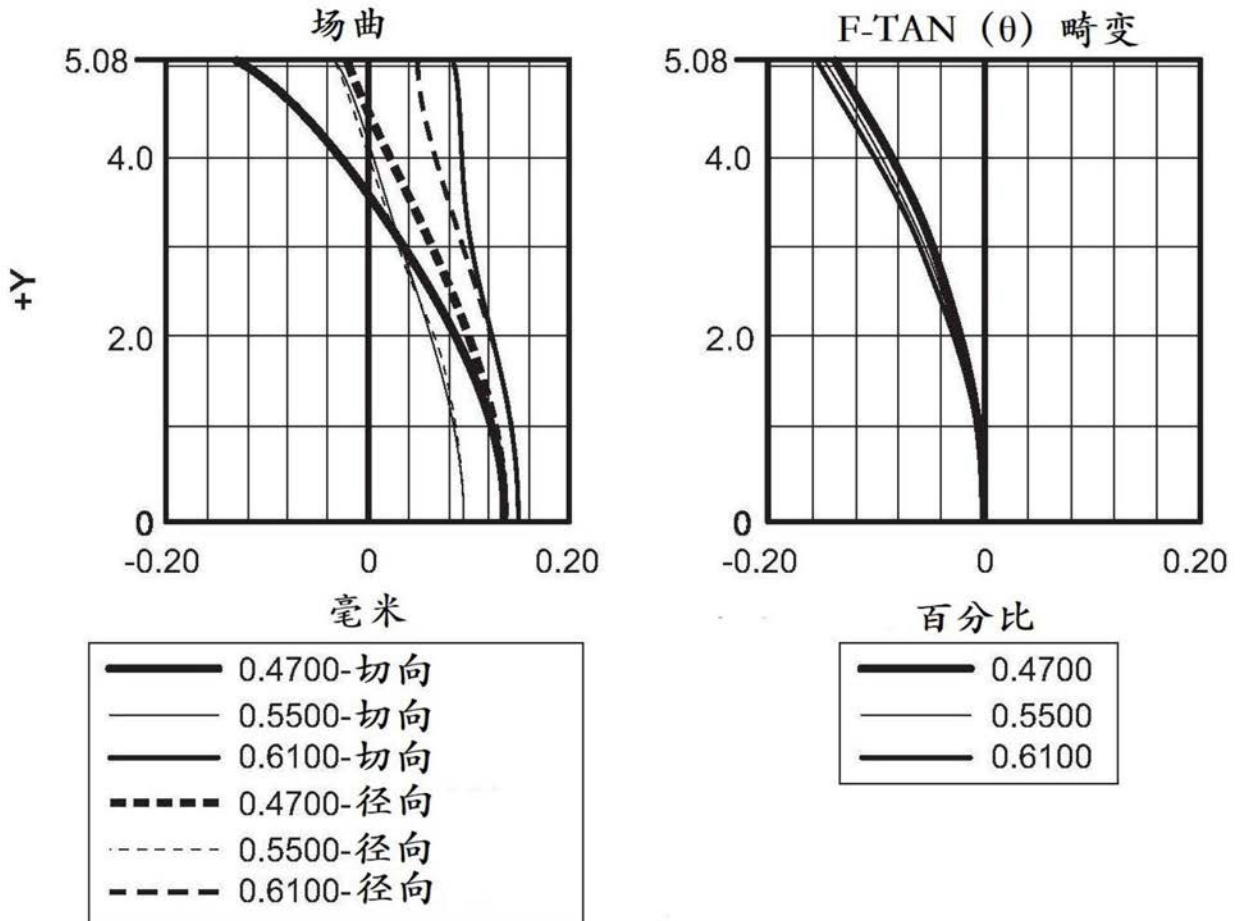


图15C

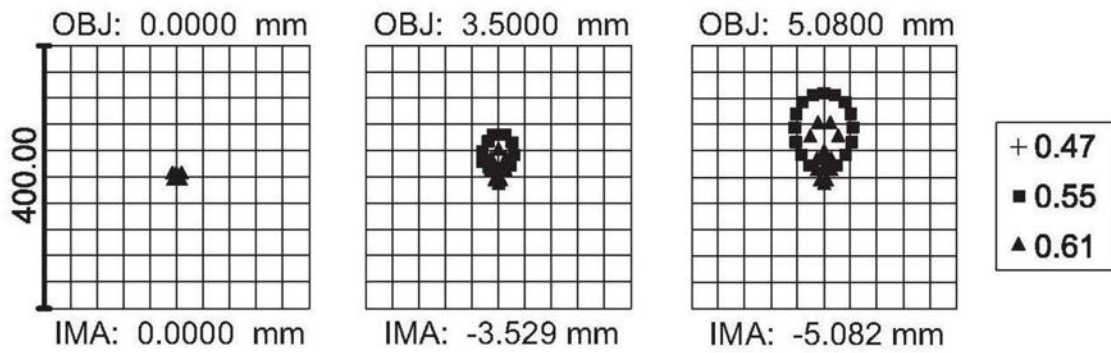


图15D

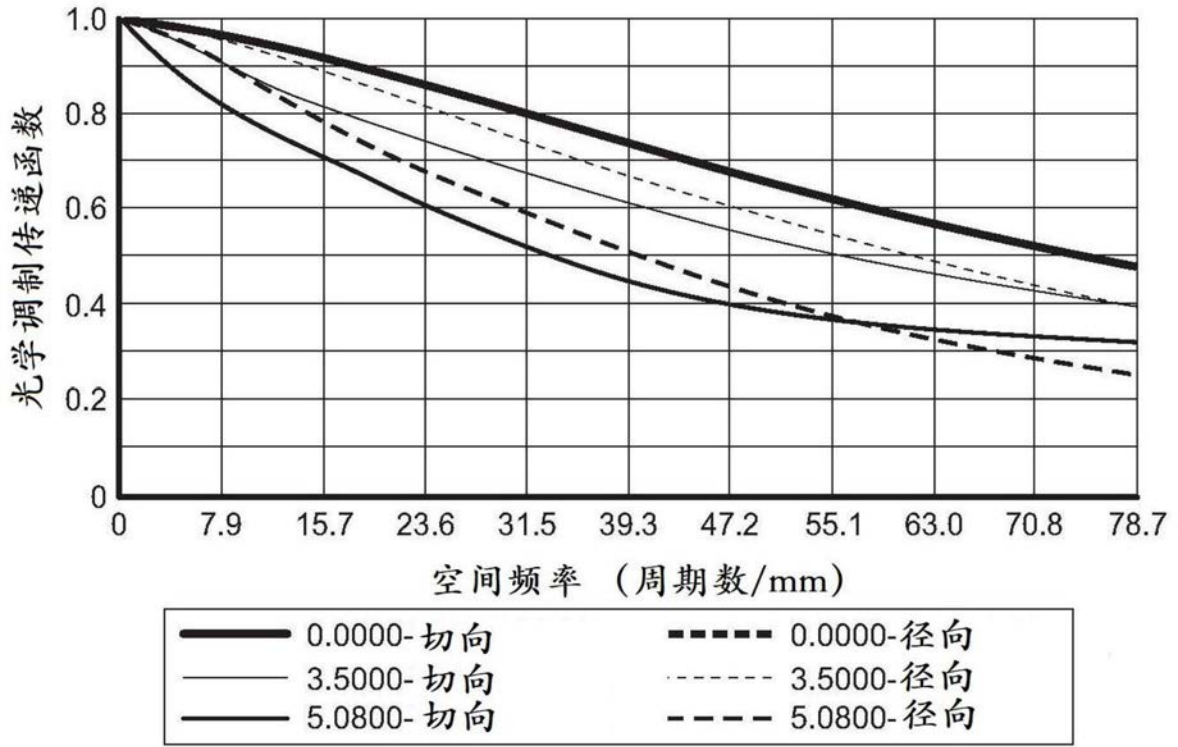


图15E

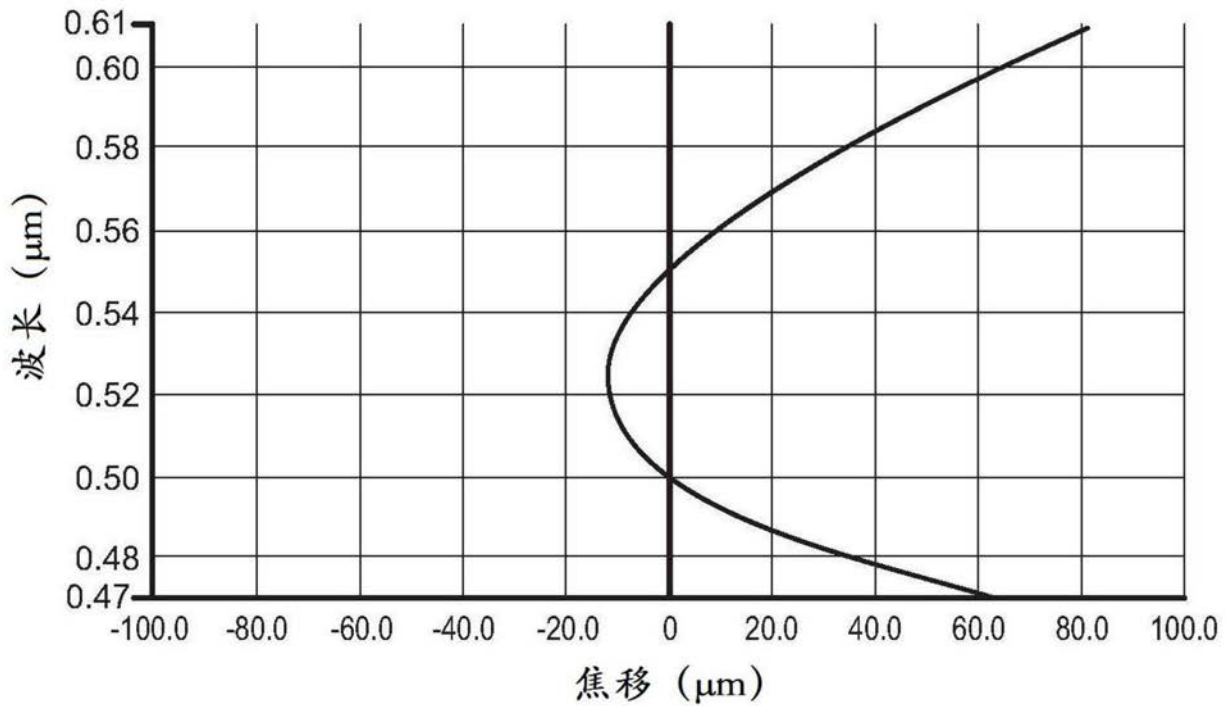


图15F

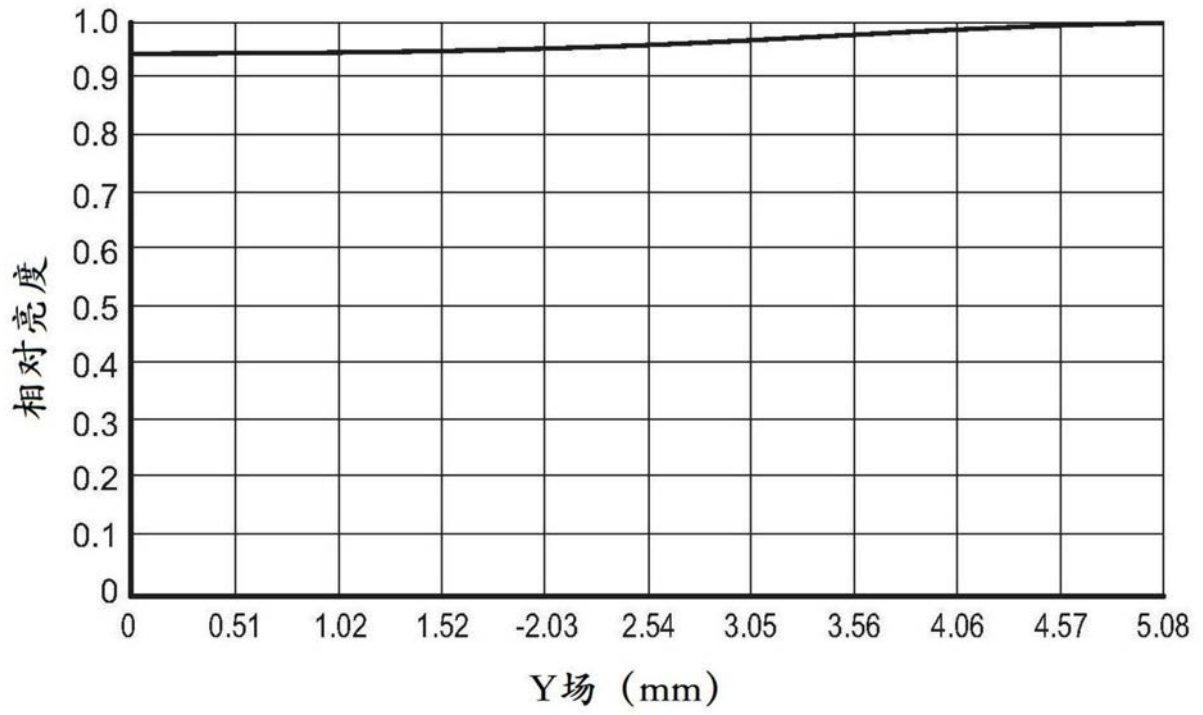


图15G

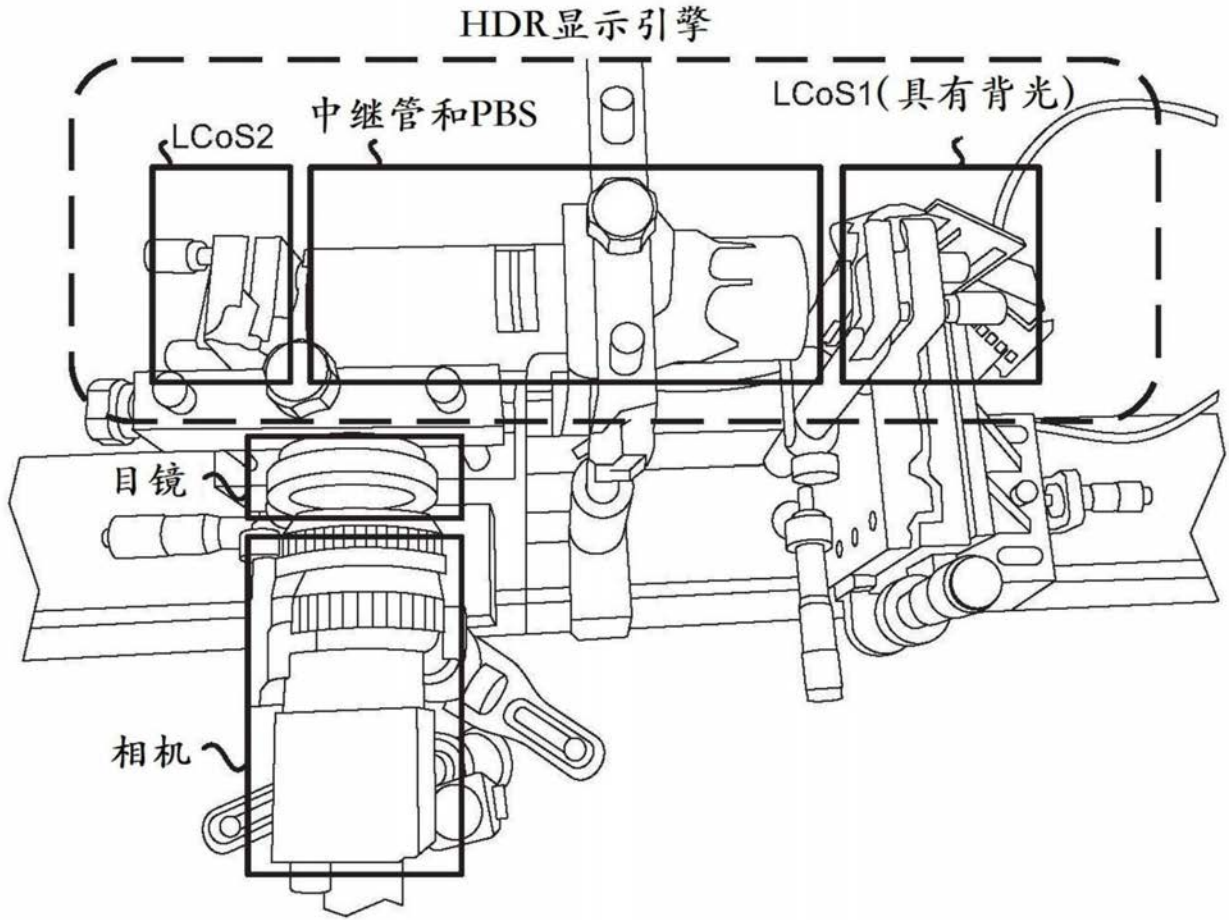


图16

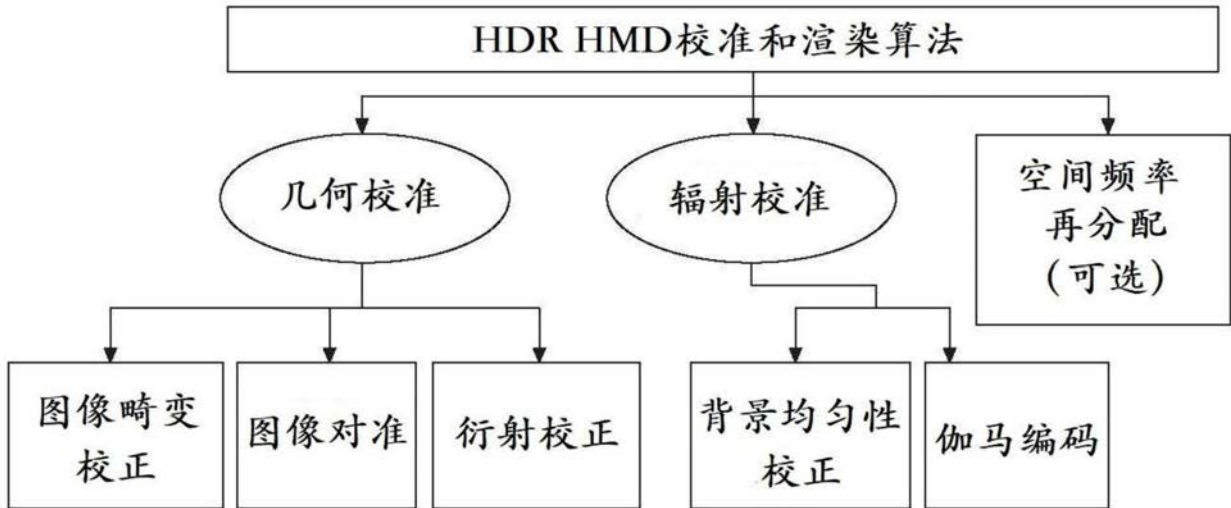


图17

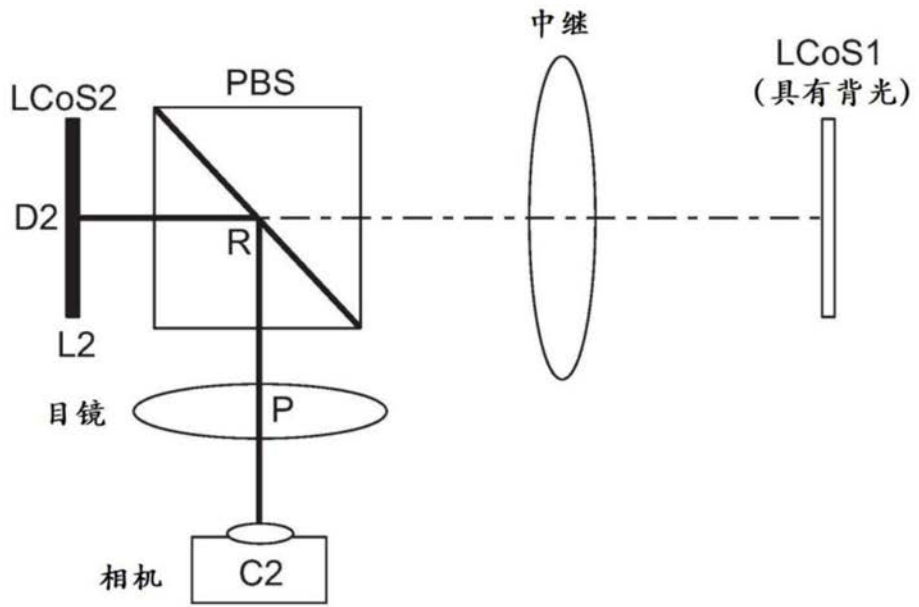
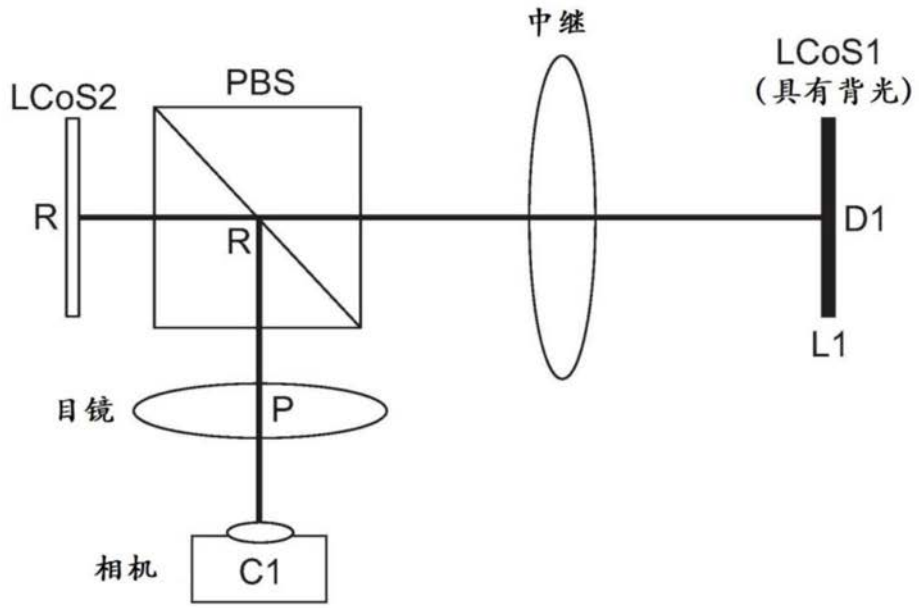


图18

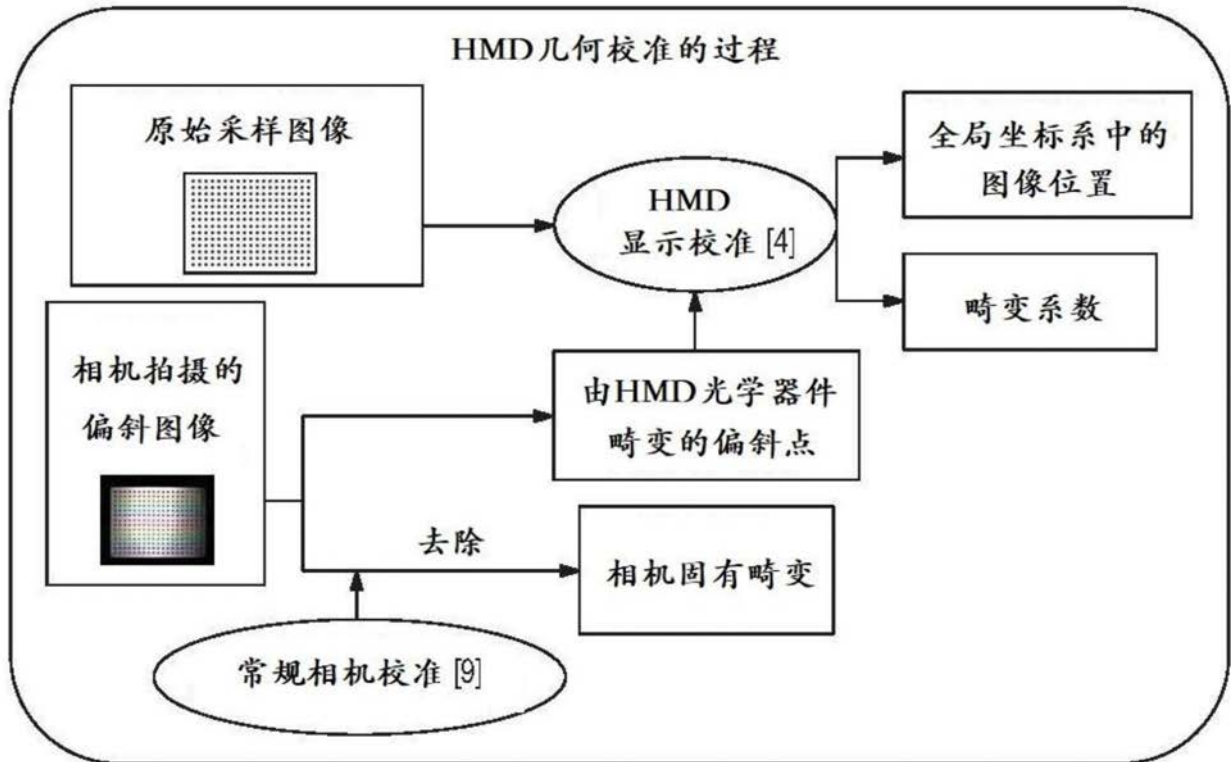


图19

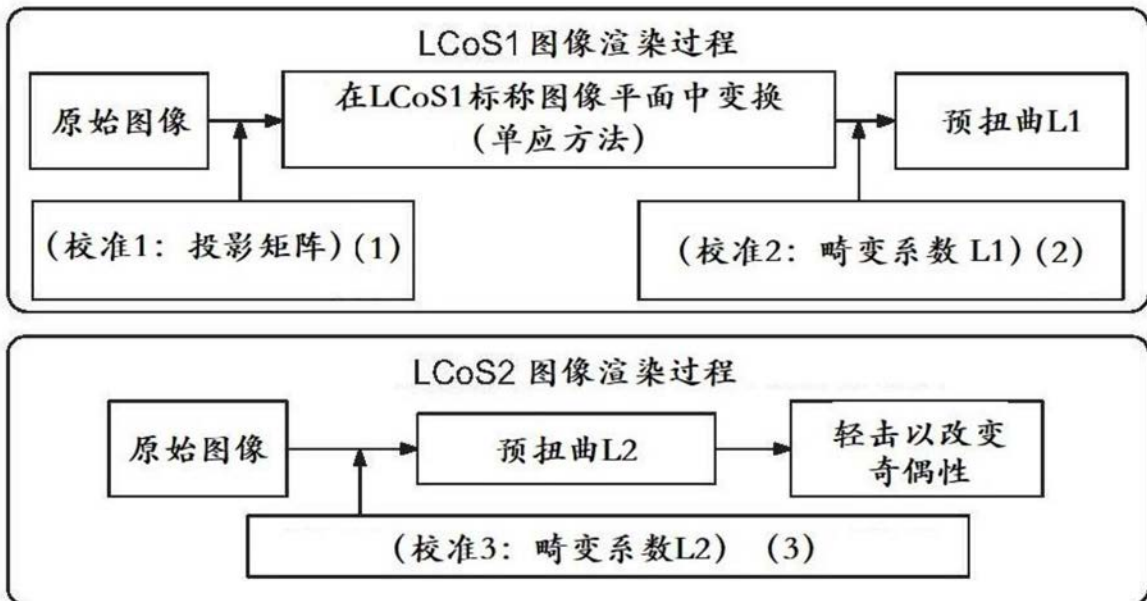


图20

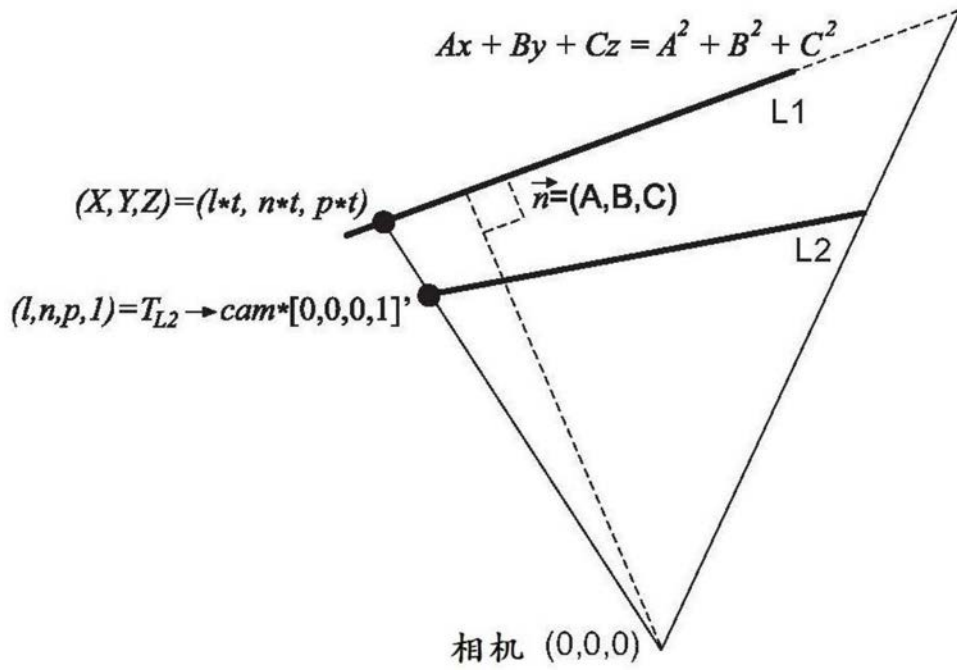


图21

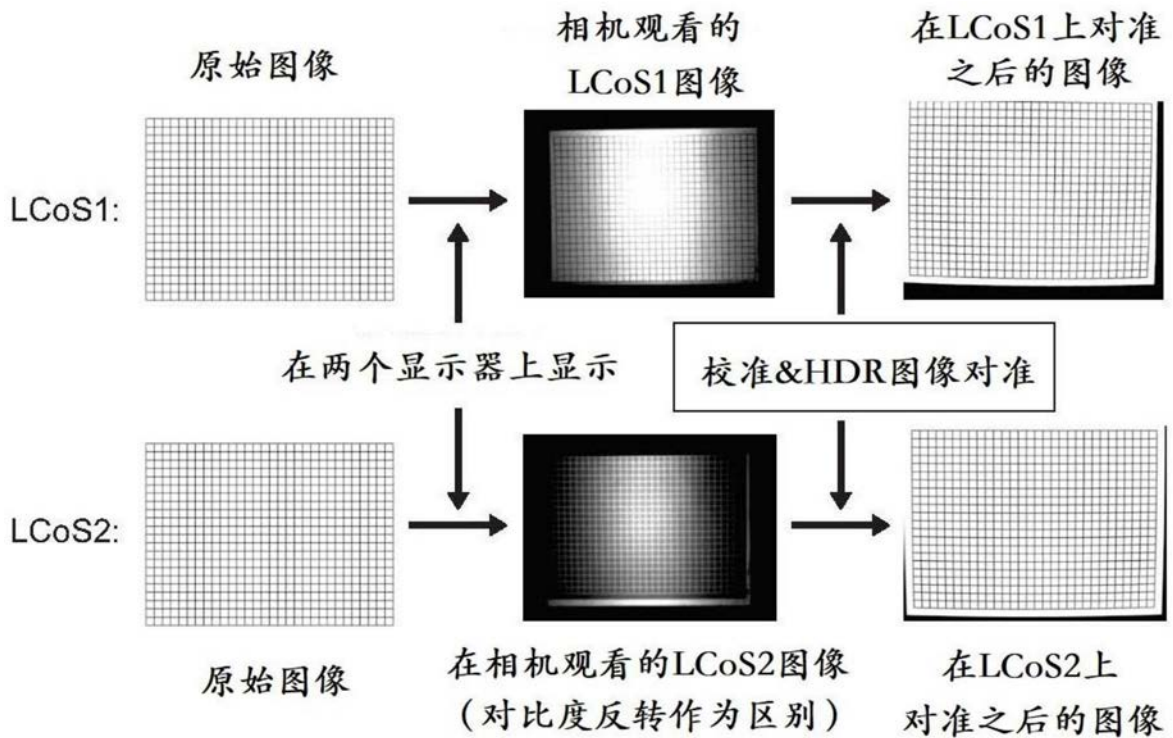
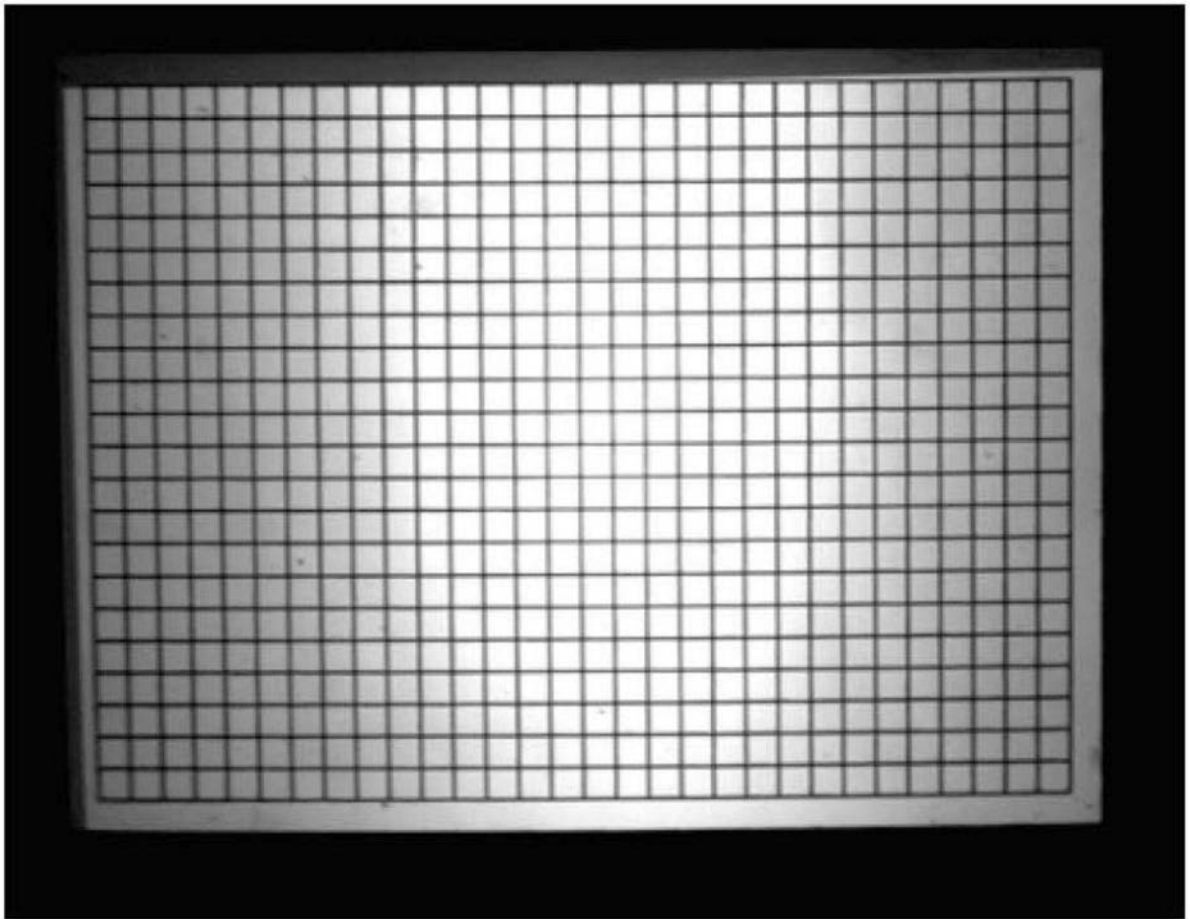


图22



对准处理后的网格
(LCoS1 + LCoS2 图像)

图23

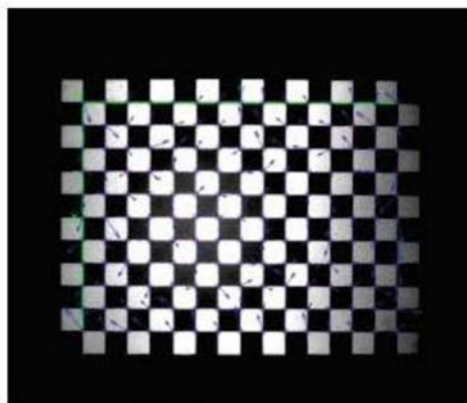


图24A

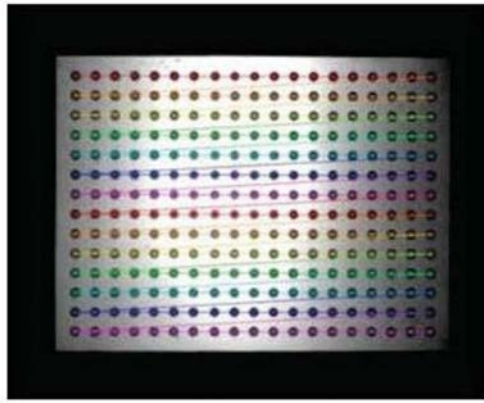


图24B

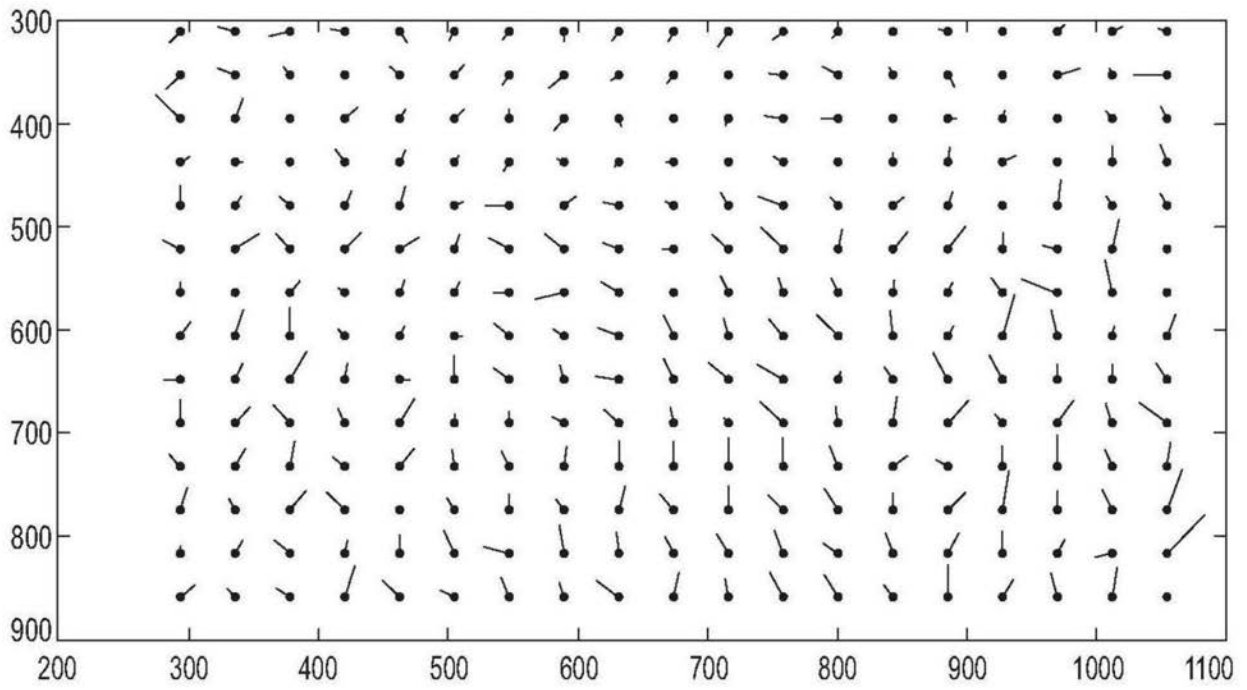


图24C

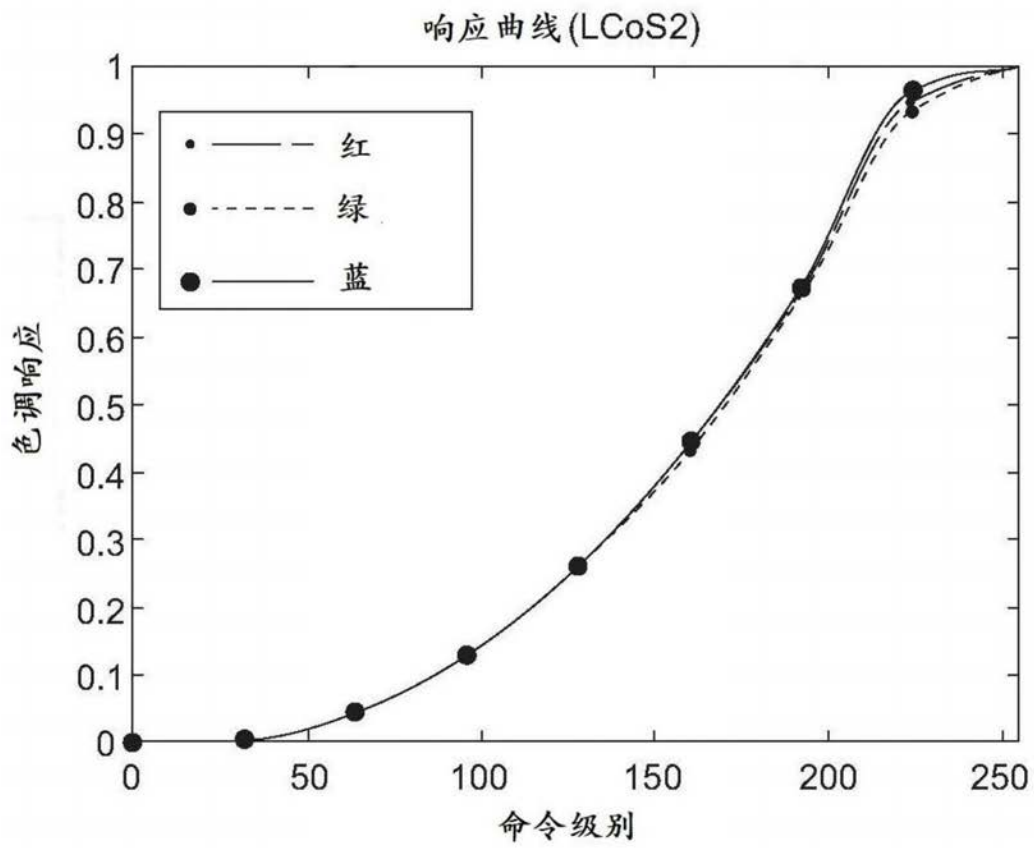
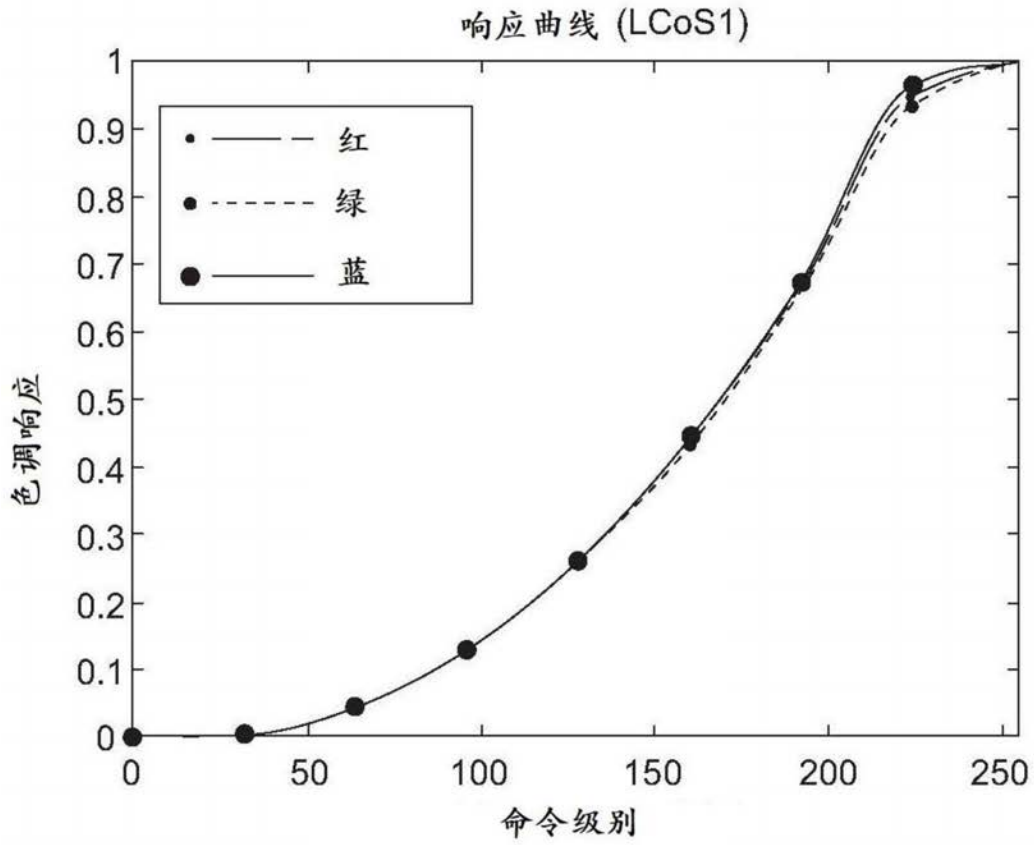


图25

HDR HMD辐射校准过程

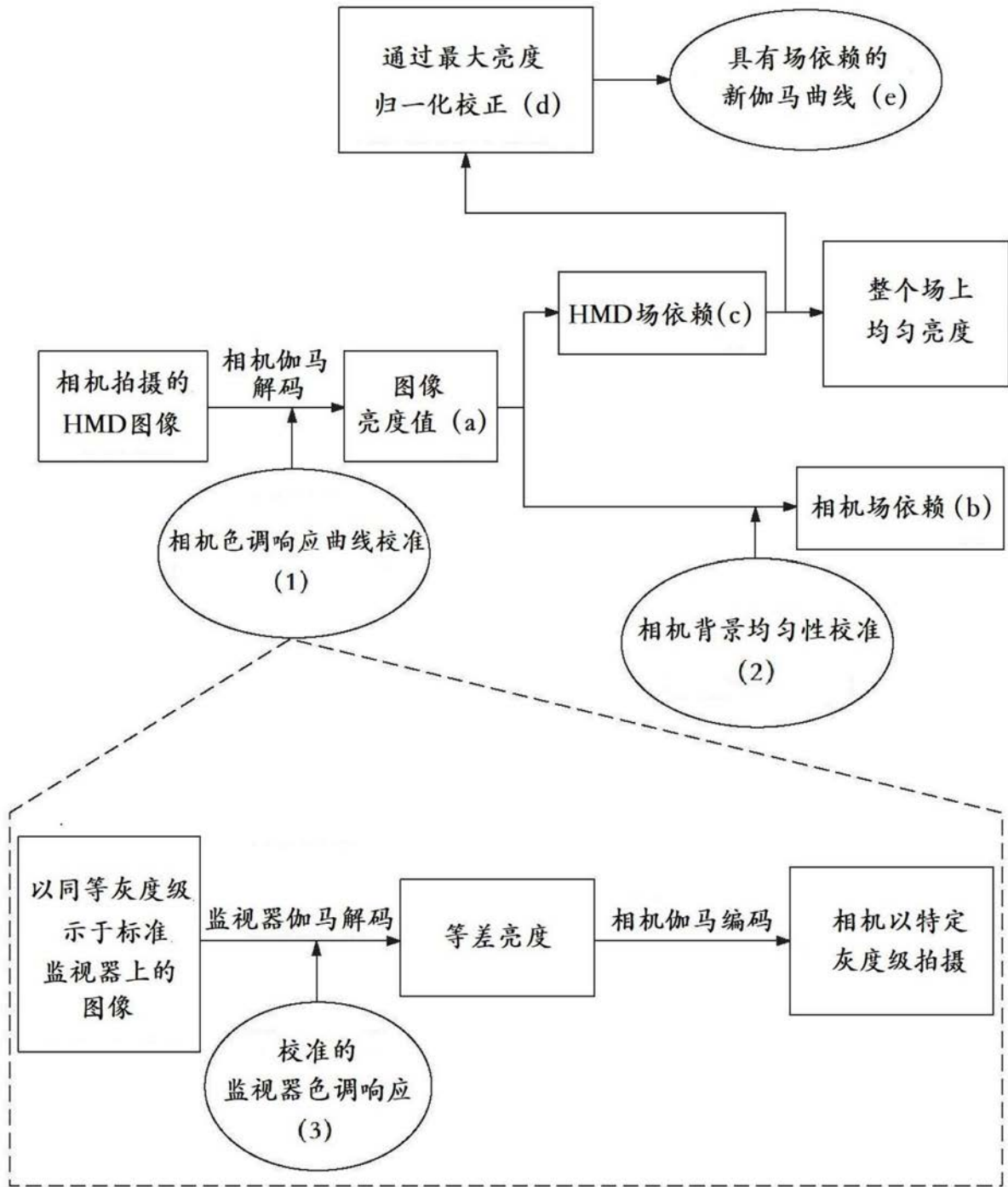


图26

拍摄的
图像

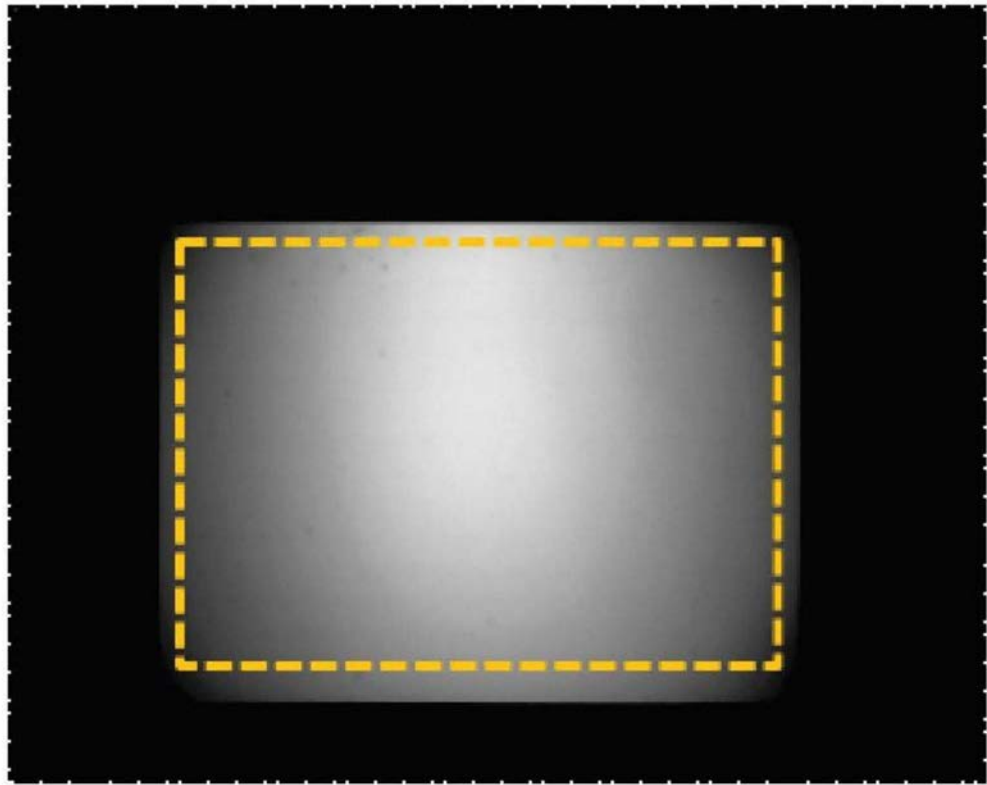


图27A

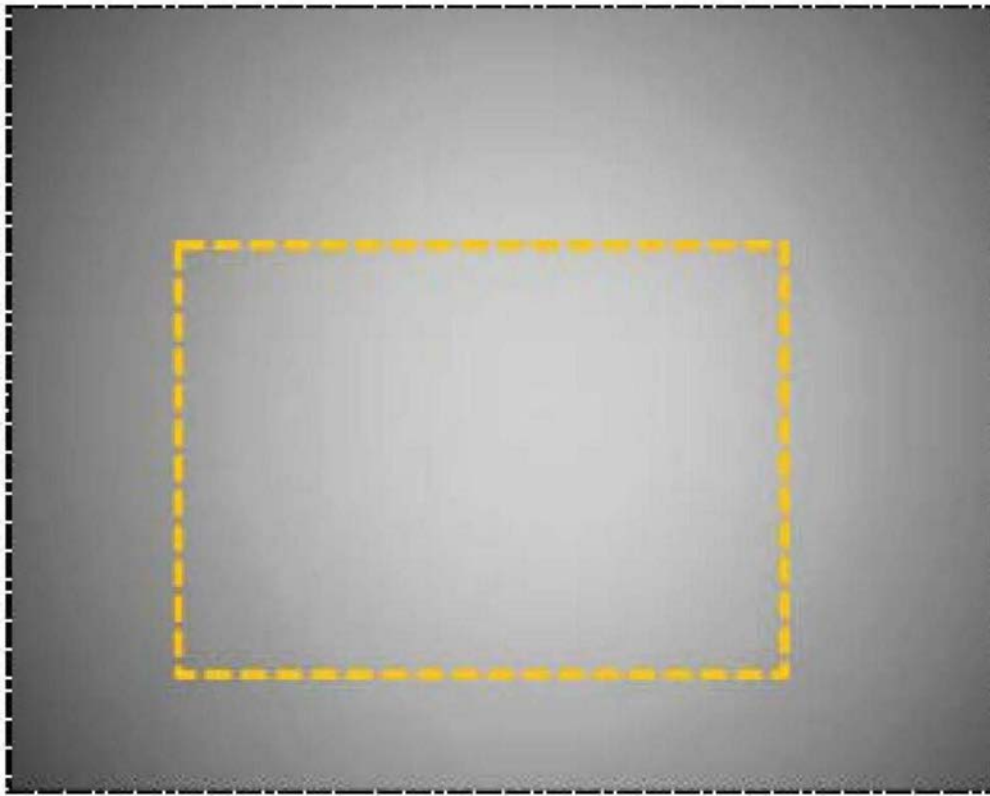


图27B

裁剪并
插值至
[960 1280]



图27C

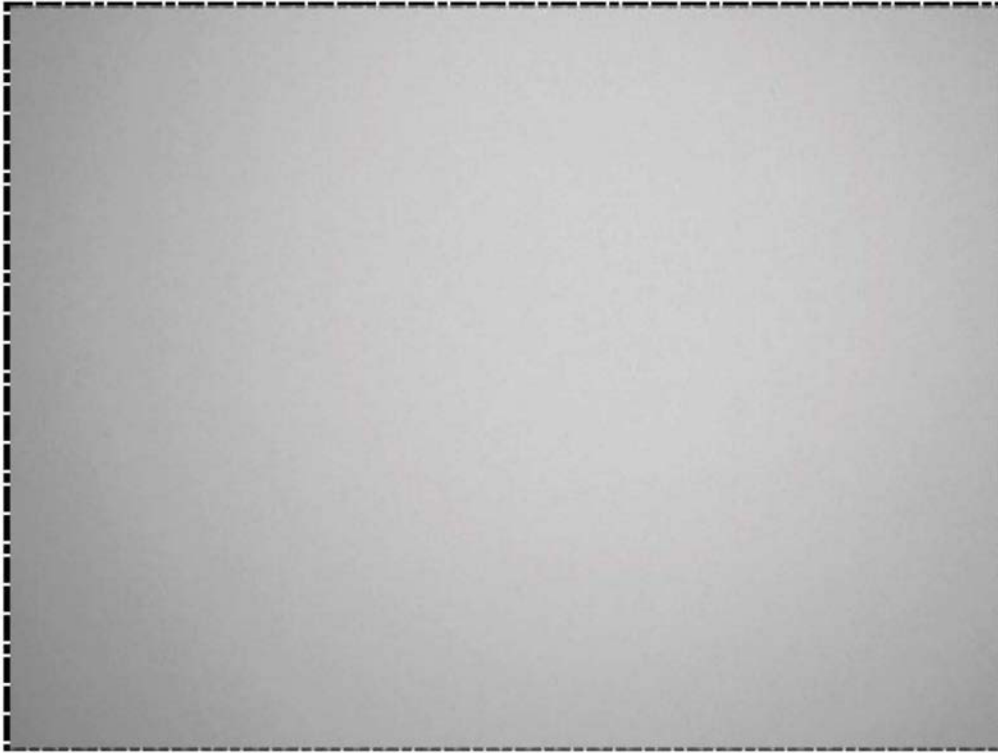


图27D

LCoS1



图28A



图28B

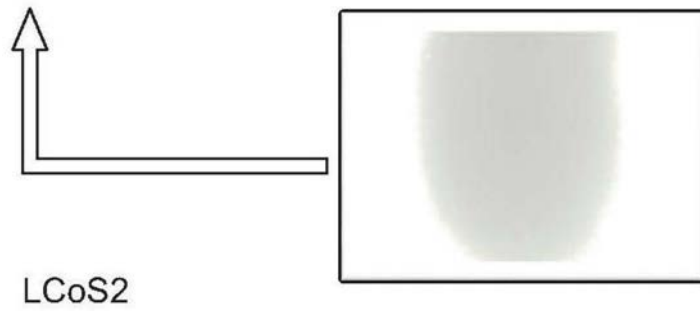


图28C

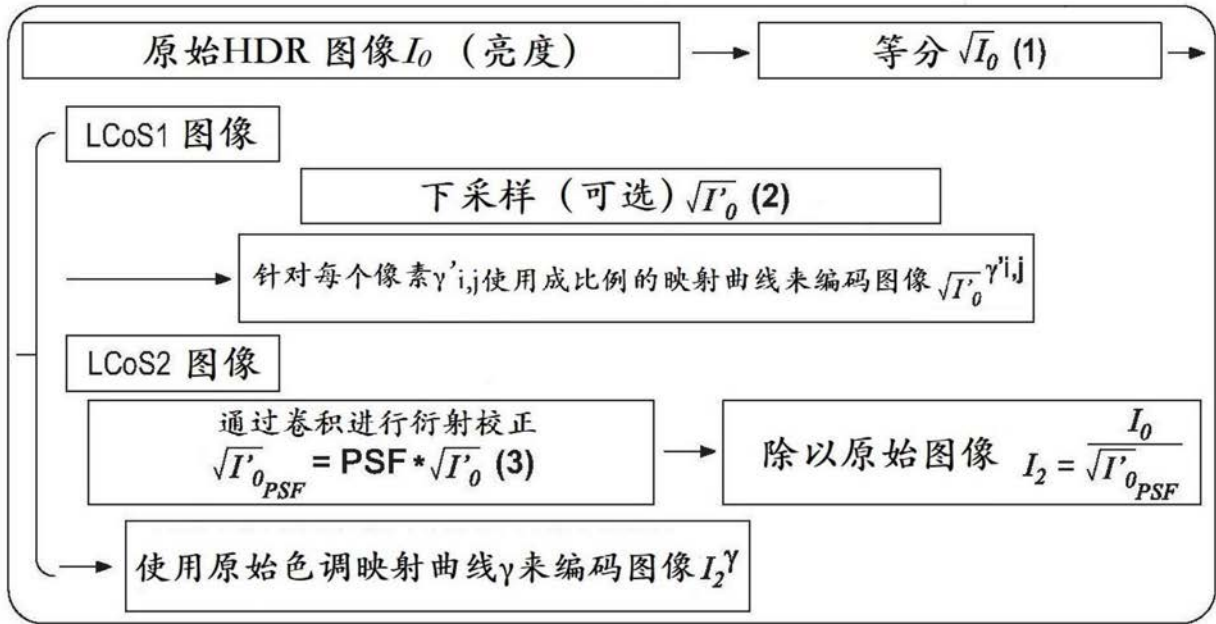


图29

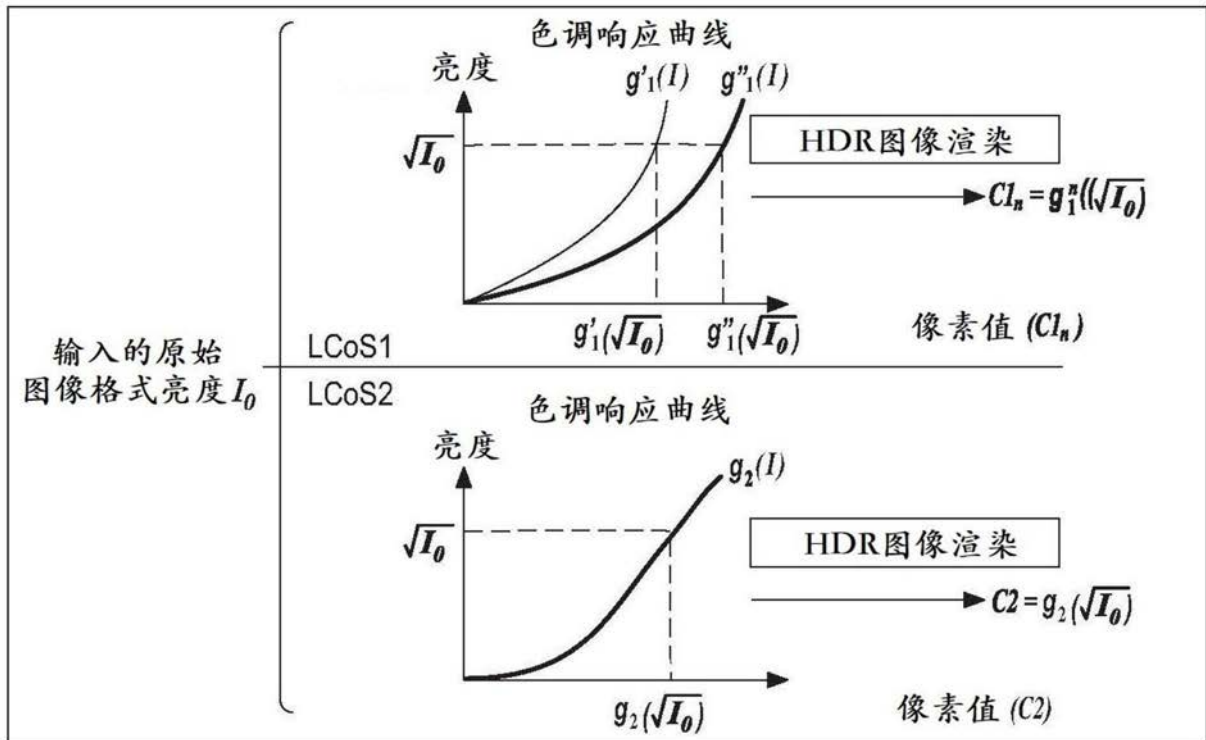
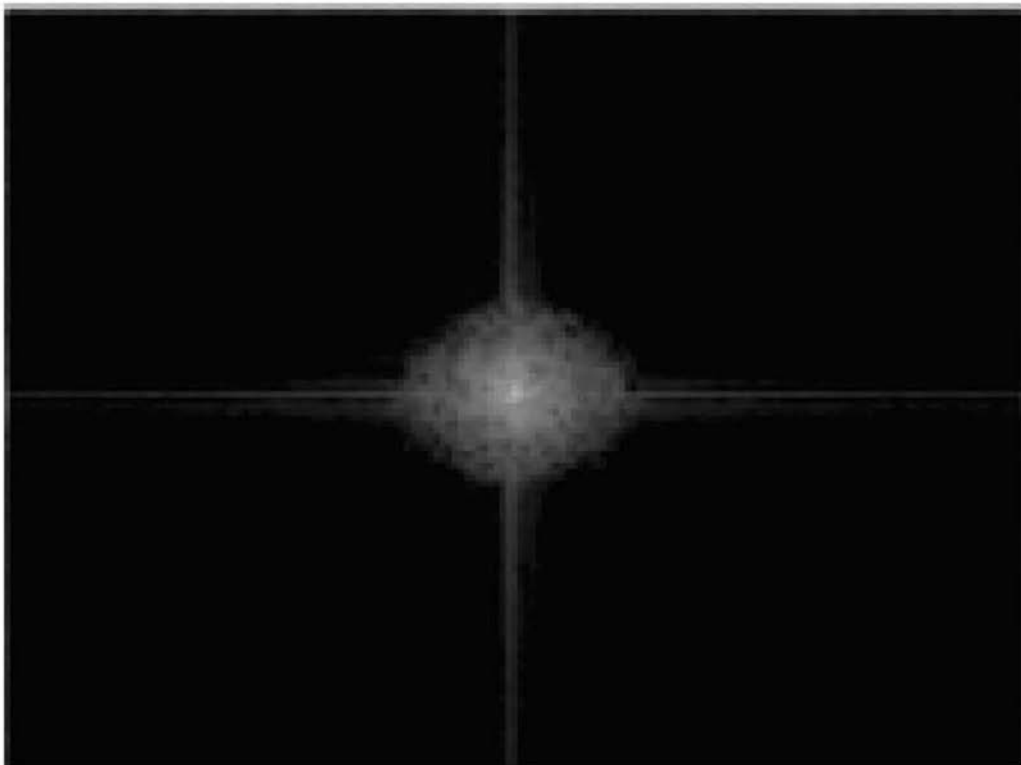


图30



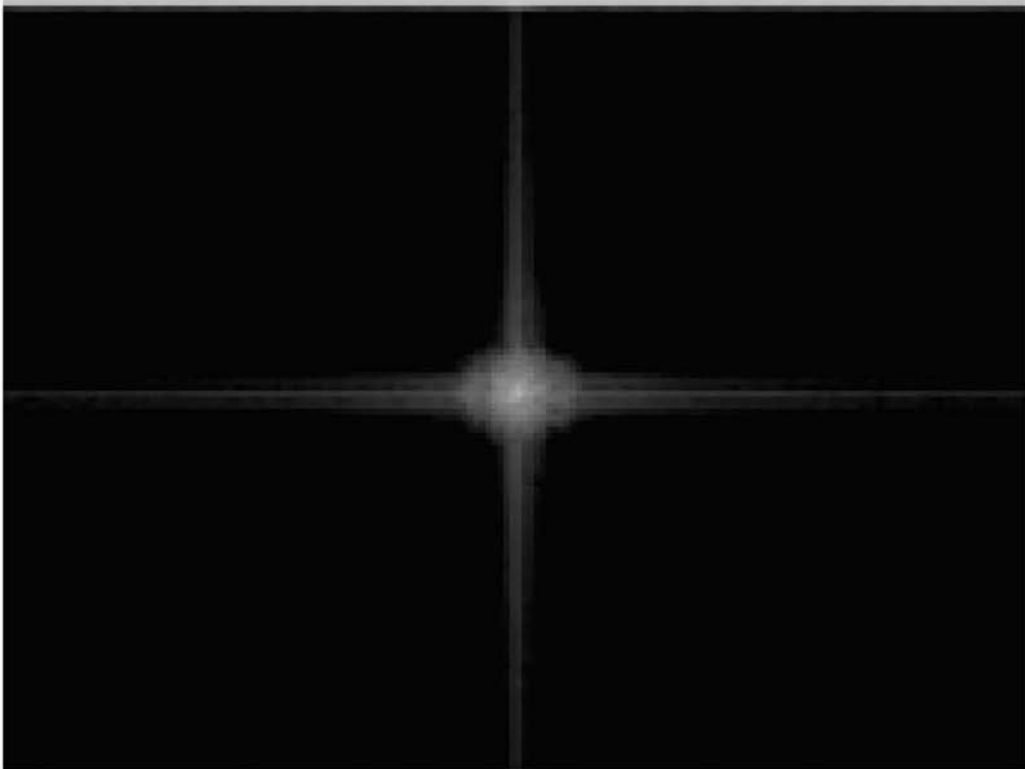
原始图像

图31



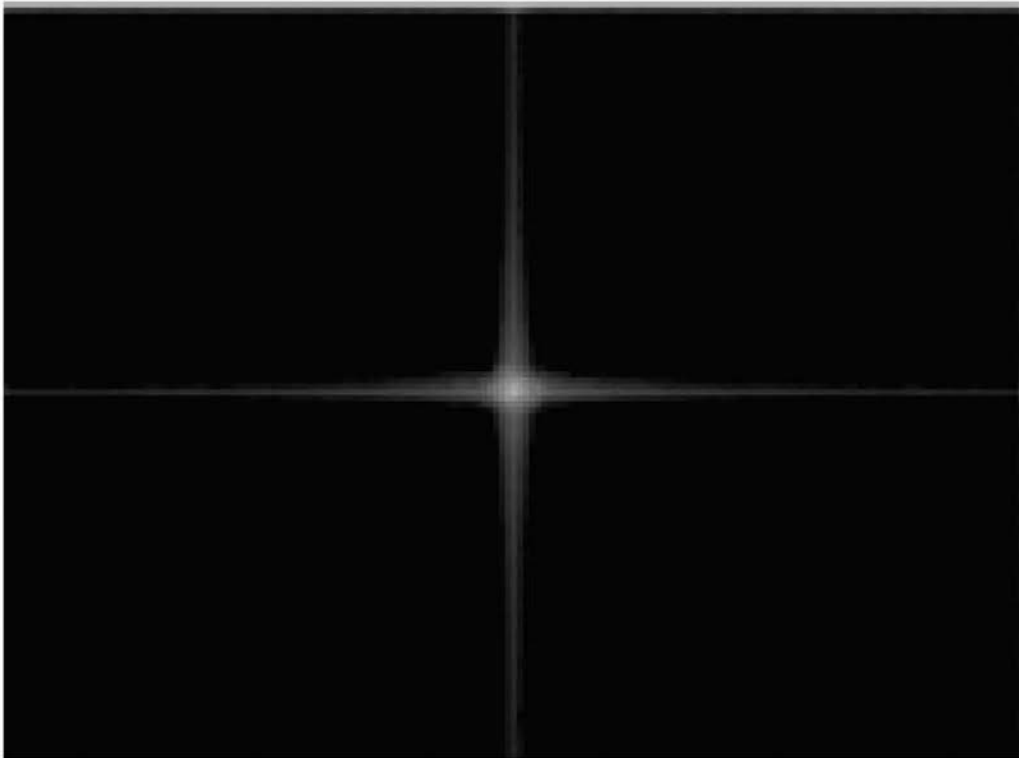
下采样至5弧分

图31(续)



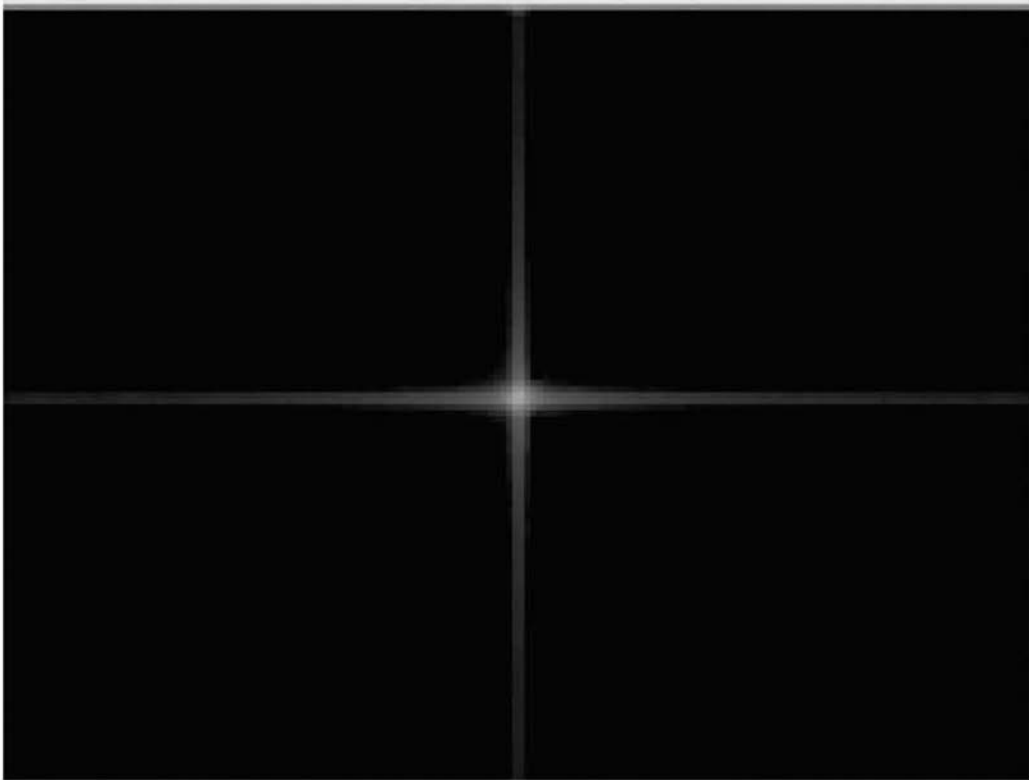
下采样至10弧分

图31(续)



下采样至20弧分

图31(续)



下采样至30弧分

图31(续)



图32A

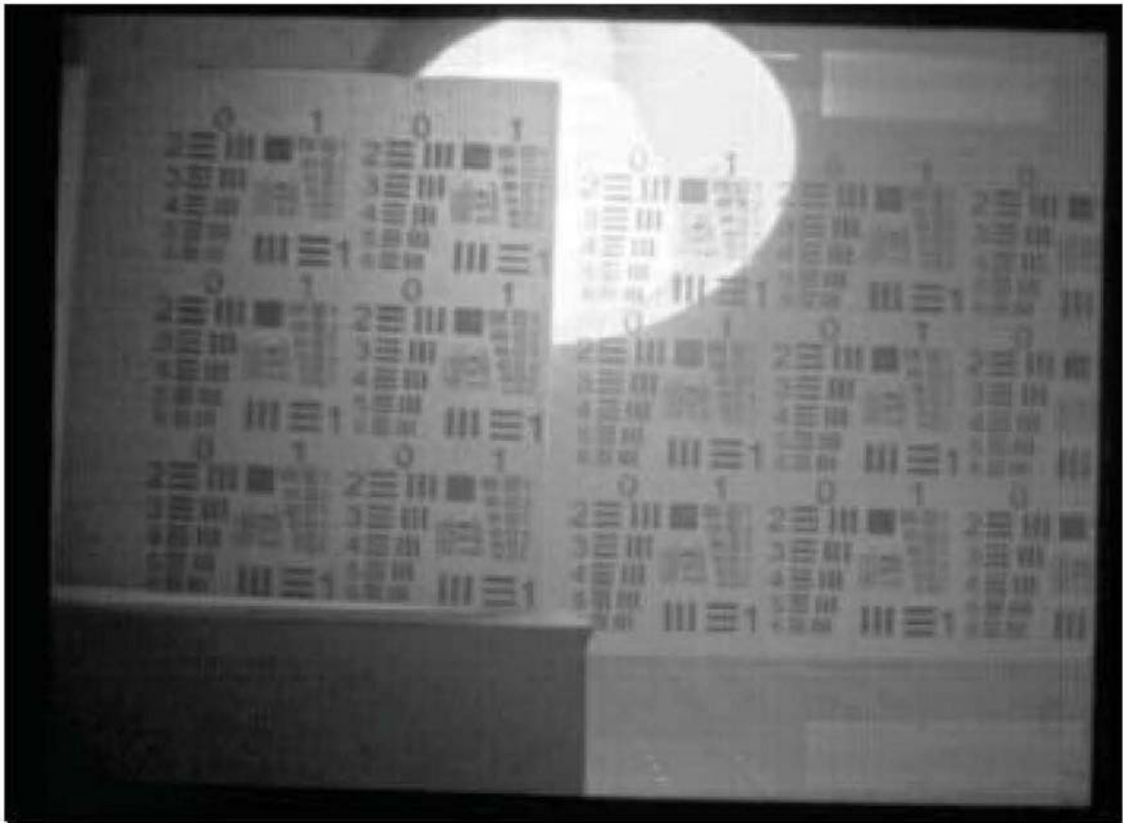


图32B

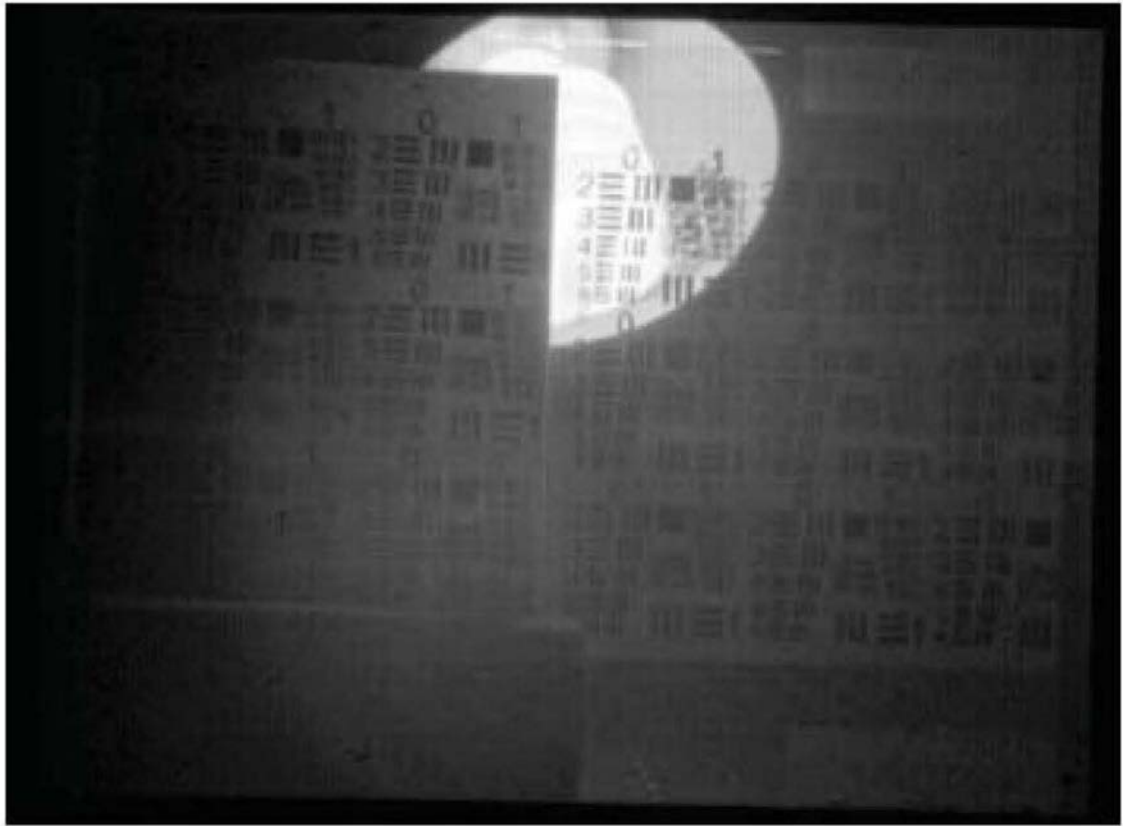


图32C

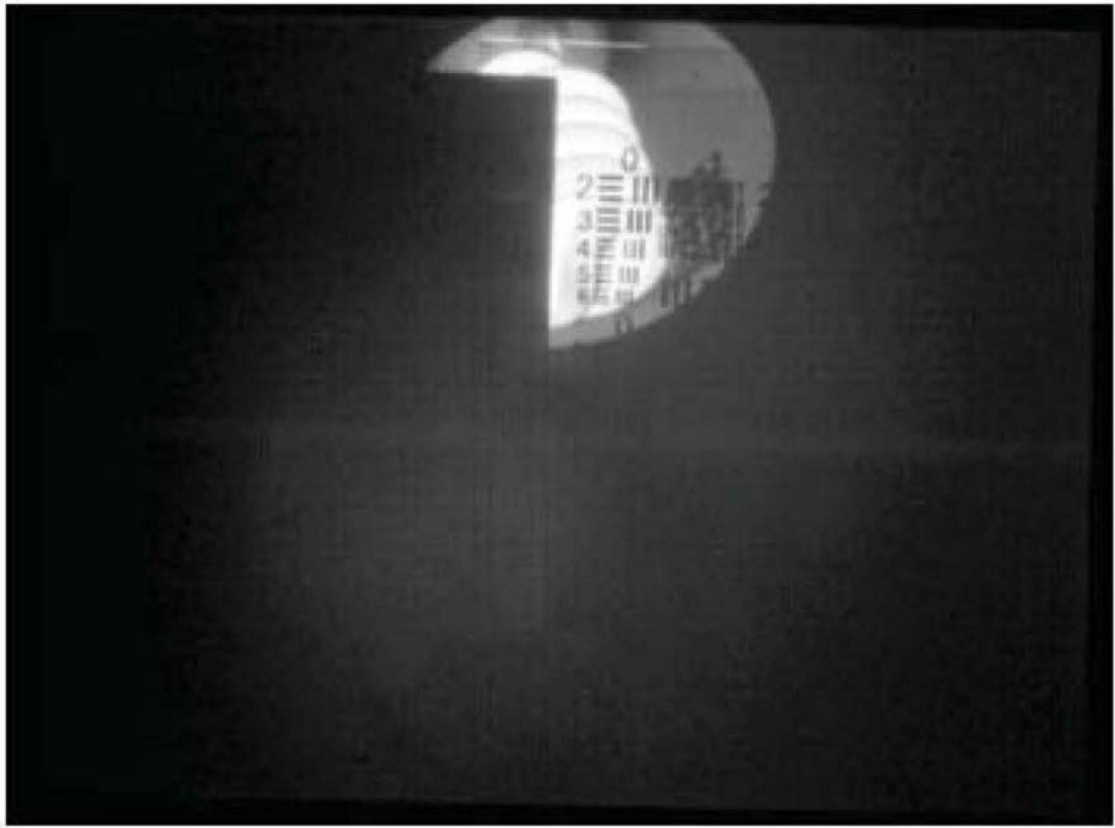


图32D