虚拟现实光学显示技术

王涌天*, 程德文, 许晨

北京理工大学光电学院, 北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081

* 通信作者. E-mail: wyt@bit.edu.cn

收稿日期: 2016-10-19; 接受日期: 2016-11-11; 网络出版日期: 2016-12-14

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2015AA016301)、国家重点研发计划 (批准号: 2016YFB1001502) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4152044) 资助项目

摘要 随着信息技术的快速发展, 对高性能虚拟现实技术及虚拟现实系统的需求与日俱增, 而虚拟现实设备营造高沉浸感的关键之一在于良好的显示效果. 本文介绍了当今虚拟现实领域所涉及的主要显示技术, 对每种技术的原理和特点进行了分析、比较和总结. 特别地, 对当前虚拟现实的最主流显示方式, 即头盔显示器, 进行了详细的分析, 并通过头盔显示技术的演变阐述当前显示技术所致力解决的问题与期望达到的目标. 最后对虚拟现实显示技术的未来发展趋势进行了展望.

关键词 虚拟现实 光学设计 头盔显示 投影显示 体三维显示

1 引言

虚拟现实技术 (virtual reality, VR), 是利用计算机模拟产生的三维空间, 提供使用者视觉、听觉、触觉等感官的模拟, 让使用者如同身临其境一般体验虚拟的世界. 虽然人类对世界的感知是多感官协同作用的过程, 但人所接收的信息绝大多数来源于视觉, 人对图像的敏锐程度也远高于听觉、嗅觉或者触觉. 在虚拟现实中, 要实现高沉浸感, 关键在于虚拟图像的显示. 本文所关注的也是虚拟现实中的显示技术.

2 虚拟现实图像显示的要求

虚拟现实中的显示技术需要服务于虚拟现实的目的, 即营造一种逼真的虚拟环境, 让用户具有很好的沉浸感. 沉浸感是用户感觉到的虚拟环境的真实程度, 良好的沉浸感会使得用户难以分辨环境的真假. 需要从人眼视觉特性着手, 人眼的单目视场角为水平 150° , 竖直 120° , 两只眼睛的视场只有部分重合, 重合区域为 50° 至 60° . 同时, 人眼的分辨率由视场中心到边缘迅速下降. 另外, 两眼观察同一景物时, 由于左右眼位置的区别, 每只眼睛的视角会有所差别, 双眼的视差会使得大脑获得物体的深度信息. 所以, 作为虚拟现实的显示设备, 应当具有与人眼类似的视场角、良好的显示效果 (足够的分辨率和色彩显示性能), 并且能够在一定程度上满足人眼立体视觉的特性.

引用格式: 王涌天, 程德文, 许晨. 虚拟现实光学显示技术. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 1694–1710, doi: 10.1360/N112016-00247

3 头盔式虚拟现实显示系统

头盔显示系统 (head-mounted display, HMD) 是最为典型的虚拟现实显示系统, 也是目前应用最为广泛的虚拟现实显示系统, 它是指佩戴在用户头部, 可以随着用户移动和转动, 并且向用户眼睛显示图像信息的设备. 头盔显示系统的分类是多样的. 按照所采用显示器的大小可以分为采用微显示器的头盔显示系统与采用较大显示器的头盔显示系统. 按照物像关系可以分为目镜式头盔显示系统与非成像式头盔显示系统, 大多数头盔显示器中的微显示器与用户眼底具有物像关系, 属于前者, 而视网膜投影 (扫描) 头盔以及光场显示头盔则不是. 按照立体感的程度划分, 常见的头盔显示器利用左右眼双目视差形成立体感, 而多焦点头盔、视网膜投影 (扫描) 头盔、光场头盔和利用单眼视觉的头盔等利用人类视觉的深度感知特性, 能产生更真实的立体感. 下面的几节将介绍与分析数种虚拟现实头盔显示中的关键技术.

3.1 目镜式头盔显示系统

目镜式头盔显示系统原理是将小型二维显示器所产生的影像藉由光学系统放大、拉远. 放大的效果等效于视场角的扩大, 并通常将虚拟图像拉远至人眼前侧 3~5 m. 另外, 由于左右眼往往各用一个显示通道, 左右眼通道显示具有一定视差的图像, 用户能够获得深度感觉. 头盔显示器主要由微显示元件和光学系统组成. 微显示元件的关键性能参数有分辨率和刷新速度. 前者指所能显示的像素的多少, 后者表示显示元件更新图像的快慢. 头盔显示系统采用的微显示器件主要有液晶显示器 (LCD)、硅基液晶显示器 (LCoS) 和有机发光二极管 (OLED).

光学系统的关键参数有视场角、出瞳距离 (设计人眼位置到最近镜片的距离) 和出瞳直径 (人眼位于出瞳直径范围内能看见完整画面). 通常, 能够良好佩戴的头盔系统, 出瞳距离应大于 10 mm, 而出瞳直径至少 4 mm. 更大的出瞳距离和出瞳直径将会让用户更容易佩戴.

头盔显示系统的分类方法多样. 考虑到光学系统是配合显示器作用的, 不同尺寸的显示器, 其配套的光学系统结构形式也会有差别. 据此, 将头盔显示器划分成使用微显示器 (通常 0.3 英寸到 0.8 英寸) 的头盔系统和使用中等大小显示器 (通常 3.5 英寸到 5.5 英寸) 的头盔系统.

早期的头盔显示系统采用微显示器, 通过球面镜系统成像获得虚拟图像. 由于球面镜系统校正像差的能力较弱, 需要的镜片数目较多, 并且系统往往具有比较小的视场角. 举一个典型例子, 6 片式的球面系统, 经过精心优化设计后可以提供 52° 视场角, 其出瞳距离和出瞳直径分别为 19 mm 和 8 mm^[1]. 为了减小镜片数目, 同时又保持或者提高光学性能, 非球面和衍射元件也应用到了头盔显示器中^[2~6]. 在光学设计中, 衍射面和非球面具有相似的作用, 其校正像差的能力强于球面系统.

自由曲面棱镜式头盔最早由 Okuyama 和 Yamazaki 提出^[7], 其微显示器发射的光线通过折射进入这个楔形的棱镜后, 发生一次全内反射和一次反射后透射出棱镜表面, 进入人眼. 从而单片自由曲面元件产生了 4 个有效的光学面. 又由于自由曲面出众的像差校正能力, 自由曲面棱镜式头盔第一次仅用一片光学元件就实现了良好的头盔显示效果, 同时又保证了系统的轻小型特性. Cheng 等^[8]对自由曲面棱镜系统进行再设计, 如图 1 所示, 并通过像质自动平衡算法实现 53.5° 的大视场角与 1.875 的小 F#, 这些参数远优于同时期的其他自由曲面棱镜系统 (见表 1), 大大提升了显示效果. 使用中等尺寸显示器的头盔显示器在最近几年随着 LCD 与 OLED 显示屏分辨率的显著提升而普及. 这种头盔显示器的特点在于可以借助人机屏幕作为显示器. 而智能手机本身就是具有运算、处理和交互一定功能的设备, 使用其作为头盔显示系统的主要组成部分可以极大地降低成本. 此外, 从光学设计的角度出发, 使用较大尺寸的显示器意味着光路中光线的偏转角相对较小, 光学系统可以相对简单, 见图 2 的

图 1 (网络版彩图) Cheng 等设计的自由曲面棱镜式头盔光路图 (a) 与棱镜实物 (b)

Figure 1 (Color online) 2-D layout (a) and the prototype (b) of the free-form prism HMD designed by Cheng et al.

表 1 不同自由曲面棱镜头盔的参数比较

Table 1 A comparison of different free-form prism HMDs

Parameter	Eye-Trek FMD	Z800 3Dvisor	i-Visor	ProView SL40	FF prism
Field-of-view ($^{\circ}$)	37	39.5	42	40	53.5
Exit pupil distance (mm)	23	27	22	30	18.25
Exit pupil diameter (mm)	4	4	3	5	8
Focal length (mm)	21	22	26.7	20.6	15
Size of micro-display (inch)	0.55	0.61	0.81	0.59	0.61
F/#	5.25	5.5	8.9	4.1	1.875
FOV/F#	7.05	7.25	4.72	9.76	28.53

对比. 目前的使用中等尺寸显示器的头盔系统往往只需采用单片球面透镜或者非球面透镜就能实现良好的显示效果, 视场角可以达到 90° 甚至更大. 最早将中等尺寸显示器头盔成功推向市场的是美国的 Oculus 公司, 近些年来这种类型的头盔显示设备成为消费级虚拟现实显示器的主流产品. 对于这类头盔目镜的设计, 大视场角会导致镜片元件中心厚度的增大. 为了避免这一点, Wearality sky 利用 Fresnel 透镜减小镜片厚度, 实现 150° 的超大视场. 不同结构形式的头盔显示器的参数参见表 2. 目前, 约束该类型头盔显示设备的关键因素在于显示器 (手机屏) 分辨率的不足, 在具有大视场角的头盔中往往能观察到网格状的像素结构. 而在下一节, 我们将讨论能够消除这种像素感的头盔显示技术.

3.2 大视场高分辨率头盔显示技术

为了提高头盔显示的沉浸感, 必须尽量提高其目视光学系统的视场角. 当实际应用要求头盔显示器的视场角进一步增大时, 采用单显示通道的传统设计方案会出现分辨率下降的问题, 影响到显示的沉浸感效果. 因为视场角和分辨率存在 $R = 2\theta/N$ 的关系, 其中 R 为最小可分辨角度, θ 为半视场角, N 为头盔中使用的微型显示器在这个方向上的像素数. 在 N 为一定值时, R 与 FOV 相互制约, 无法同时满足大视场和高分辨率的要求. 因此, 研制高分辨率大视场头盔显示器必须采用新的解决方法. 获得大视场高分辨头盔的途径有 3 条, 其一是提高显示器的分辨率 (总像素数), 这要求显示器在不改变尺寸的情况下其像元的尺寸减小. 另外两条途径通过光学手段实现大视场高分辨率: 利用人眼视

图 2 (网络版彩图) 采用微显示器的头盔目镜系统 (a) 与采用中等大小显示器的头盔目镜 (b)
Figure 2 (Color online) HMD system with micro-display (a) and medium-sized display (b)

表 2 不同结构形式的目镜式虚拟现实头盔显示器典型产品的技术指标
Table 2 A comparison of different types of immersive HMDs

Type	Number of lenses	Type of image source	FOV
Spherical HMD	6	0.61'' Micro-display	52°
FF prism	1	0.61'' Micro-display	53°
Spherical HMD	1	5.5'' Display	90°
Fresnel lens HMS	2	5.5'' Display	150°

觉特性, 合理分配显示内容; 通过光学拼接的方式, 将多个具有较小视场角的显示通道合成后获得大视场.

利用人眼视觉特性的方法具体可以分成 3 种实现方式. 第一种利用人眼小凹成像的特性, 仅对关注区域进行高清化显示. 这种方法在大视场范围内显示一幅低分辨率的背景图像, 同时对用户眼部进行跟踪获知用户关注区域, 将另一幅小视场的高清图像重叠在该位置. 这种方法缺点在于需要高精度、快速的眼球跟踪装置, 结构也比较复杂. Rolland 等^[9] 提出静态光电插入式头盔显示原型. 如图 3 所示, 该系统利用微透镜阵列将高分辨率图像复制成图像阵列, 再利用光学开关阵列选通, 将与用户观察位置对应的图像单元叠加在背景图像上. 双目分视技术是另一种利用人眼视觉融合特性的方法. 图 4 为这种方法的示意图, 用户的一只眼睛观察大视场低分辨率图像, 另一只眼观察中心区域小视场高分辨率图像. 该方案成本低廉, 但是用户只能观察到中心区域的高清晰图像, 且无法产生立体效果. 美国 Kaiser Electro-Optics (KEO) 公司推出相关产品¹⁾. 双目交叠技术使得左右眼观察到的视场仅仅只有中心一部分重合, 从而在不损失分辨率也不增加头盔复杂程度的条件下增大水平方向的总视场. 但是这种方法要求低畸变的光学系统, 设计装调难度较大, 同时可能造成用户合像困难、视觉疲劳等问题.

光学拼接将一系列 (N 个) 小视场、高分辨率的显示单元按特定的方式排列安装在一起, 在相接的区域采取部分视场重叠的方式消除缝隙. 拼接式头盔显示器将视场扩大到近乎原来单个模块的 N 倍, 并且在整个视场内的角分辨率与单个模块时相同. 对于视场和分辨率之间的矛盾, 这是一个完全解决方案, 可以实现真正意义上的高分辨率大视场头盔显示器, 非常适用于沉浸式的虚拟现实环境. 但是该技术需要多个显示通道, 结构复杂, 拼接装调相对困难. Song^[10] 通过双通道目镜的拼接获得了全视场 $66^\circ \times 32^\circ$ 的头盔显示系统. 由于两个通道的光轴不重合, 梯形畸变难以避免. 除此之外, 传统旋转对称目镜系统的光学拼接还会造成有效出瞳距和有效出瞳直径的减小以及存在视点畸变等问题. 然而, 这些缺陷在自由曲面光学拼接中可以得到校正. 由于自由曲面的非对称特性以及高自由度, 在设

1) <http://www.rockwellcollins.com>.

图 3 (网络版彩图) 光电插入式头盔显示原理, 修改自 [9]

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the optoelectronic inset HMD, modified from [9]

图 4 (网络版彩图) 双目交叠显示原理

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of binocular overlap

图 5 (网络版彩图) 自由曲面棱镜拼接式大视场高分辨率头盔显示系统: (a) 为两面拼接实现 $56^\circ \times 45^\circ$ 的大视场, 在虚拟现实应用中并不需要右侧的自由曲面补偿透镜; (b) 为 6 片拼接以实现 $119^\circ \times 56^\circ$ 的大视场角^[11]

Figure 5 (Color online) Optical tiling of free-form prism HMD (a) and the scheme of achieving a FOV of $119^\circ \times 56^\circ$ with 6 prisms (b)

计各个自由曲面子通道的时候可以让其光轴与人眼视轴重合, 从而消除视点畸变与梯形畸变. 通过控制表面面型可以保证系统的有效出瞳距与出瞳直径. Cheng 等^[11] 提出了双自由曲面棱镜拼接式的头盔显示设备, 获得 $56^\circ \times 45^\circ$ 的大视场与 3.2 角分的角分辨率, 参见图 5. 同时, Cheng 等^[11] 还提出其他的自由曲面棱镜拼接形式, 其中六块棱镜拼接可以获得 $119^\circ \times 56^\circ$ 的大视场角, 同时角分辨率保持为 3.2 arcmin.

3.3 多焦面头盔显示技术

人眼对深度信息的感知依据有多个, 其中起着主要作用的是人双眼的会聚线索与单眼的调焦线索. 当前大多数立体显示设备都是通过显示具有一定视差的图像引导用户双眼形成特定会聚角而形成立体感. 然而, 用户的眼睛却聚焦到所显示的图像的位置, 这个位置往往和双眼会聚的位置不一致. 有资

图 6 (网络版彩图) Hu 等采用变形镜的多焦面头盔显示系统原理图, (a) 与 (b) 分别为自由曲面棱镜头盔显示光路与采用变形镜的中间像生成光路, 修改自 [16]

Figure 6 (Color online) 2-D layout of the dual focal-plane HMD with deformable mirrors (DM) proposed by Hu et al. (a) The freeform prism HMD, and (b) the intermediate image generator with a DM, modified from [16]

料显示, 会聚与聚焦的不一致是用户观看立体图像时视觉不适和视疲劳的主要原因之一. 为了让用户获得舒适的虚拟现实体验, 需要具有调节人眼聚焦距离 (即显示的图像的深度) 的头盔显示设备.

1996 年, Shiwa 等^[12] 提出通过改变目镜到显示器距离的方式调整人眼聚焦的方法并进行实验. 在实验中, 由用户控制的步进电机带动目镜进行沿光轴方向的运动, 从而改变人眼聚焦距离, 始终让虚拟图像的深度与双眼会聚的深度一致. 他们的系统能够在 0.3 s 内实现 30 cm 到 10 m 图像深度的切换. 后来也有研究以目镜固定而显示器轴向运动的方式实现类似的功能^[13]. 这类系统含有快速运动元件, 并不实用. 更重要的一点是, 这种设备还需要辅助设备来获悉人眼试图聚焦的深度, 才能将显示的画面调整到正确的距离.

为了避免要根据眼睛聚焦的位置来显示图像的情形, 人们提出构建多个具有不同深度的虚拟图像平面 (焦面), 并将待显示的三维物体渲染到不同焦面上的方法. 不同焦面的场景相互融合形成有立体感的三维图像, 有效地改变人眼的调节距离, 产生具有真实感的立体视觉. 现有的产生多个焦面的方法主要有两种: 分时复用式与空间并行式.

分时复用式多焦面头盔在某个特定时刻只具有一个深度的焦面, 通过自身光焦度或者物像关系的变化使得系统的焦面在几个特定深度之间迅速切换, 进而生成若干焦平面. Love 等^[14] 提出利用方解石晶体的双折射效应与偏振光开关构建分时复用的多焦面头盔显示设备. 这个样机包含两片透镜, 每个透镜具有两个光焦度, 于是根据偏振态的不同能生成 4 个焦面. 使用一个光电液晶起偏器控制通过各镜片的光线偏振态. 这个系统并未能小型化作为头盔显示器使用. Liu 等^[15] 提出了利用液体透镜生成两个焦面的显示系统并进行了实验验证. Hu 等^[16] 利用变形镜改变中间像的轴向位置, 再借由自由曲面棱镜实现了双焦面的构建, 其光路图如图 6 所示. 这个双焦面系统已经可以佩戴于头部, 但由于光路复杂, 镜片数目较多, 体积仍然比较庞大.

空间并行式多焦面系统往往采用多个显示器, 通过多个光学显示通道获得多个焦面. 与分时复用

图 7 (网络版彩图) Cheng 等设计的空间并行式双焦面头盔显示系统^[18]

Figure 7 (Color online) 2-D layout of the spatial-multiplexed dual focal-plane HMD proposed by Cheng et al.

式不同, 空间并行式系统能够同时显示数个不同深度的图像. Rolland 等^[17]于 1999 年提出一种多焦面显示方式, 使用多个具有不同深度的显示器堆栈, 并将待显示的三维场景各个部分显示在位置最接近的显示器上. 目前这个构想还没有实现. Cheng 等^[18]利用两片自由曲面棱镜的轴向堆叠, 首次设计出了可以佩戴的轻小型双通道头盔显示器, 如图 7 所示. 在这个系统中, 两个显示通道分别产生位于 1.25 m 和 5 m 处的焦面.

对于分时复用系统, 由于受到人眼最小刷新频率和液体透镜或变形镜、微型显示器刷新频率的限制, 一个微型显示器和液体镜头 (或变形镜) 可以生成 2 到 3 个焦平面. 如果需要更多的焦面则需要额外的分光镜和液体透镜 (或变形镜). 对于空间并行系统而言, 要实现更多的焦面在光路结构上更加困难. 所以目前仍然难以实现具有多个焦面的轻小型头盔显示系统.

3.4 利用单眼视觉的头盔显示技术

利用单眼视觉可能是缓解会聚与聚焦不匹配问题的另一条道路. “单眼视觉”原本是治疗老花眼 (基本丧失屈光度的调节能力, 往往只能看清远处的物体) 的一种方法: 通过佩戴眼镜、隐形眼镜或者通过手术的方法让一只眼镜能够观察近处的物体而另一只眼镜观察远处的物体. 尽管左右眼不能同时看清物体, 但这种治疗方法具有良好的患者反映. Johnson 和 Konrad 各自独立地将其应用到立体显示领域中^[19,20]. 图 8 显示了单眼视觉显示的原理. Konrad 制作了单眼视觉头盔, 左眼图像位于 500 mm、右眼图像位于无穷远处, 并进行实验. 实验结果表明单眼视觉头盔显示系统相对与传统视差型头盔显示系统能让用户识别目标更加精确, 耗时也更短, 同时无需牺牲使用的舒适度. 而相对于多焦面头盔系统, 单眼视觉头盔系统结构简单、成本低廉.

3.5 视网膜投影技术与视网膜扫描显示技术

普通的头盔显示系统, 无论其采用怎样的结构形式, 其实质上都是一个目镜系统, 将显示器生成的图像变成放大、拉远的虚像, 再借由人眼聚焦在视网膜上. 如果将人眼也视为系统的组成部分, 则显示器面和人眼视网膜面是共轭的物像面, 通常要获得更大的视场角则需要更大口径、更复杂的系统. 而视网膜投影显示 (retinal projection display, RPD) 打破了这种物像关系, 它采用 Maxwell 观察法, 使用空间光调制器在光束的不同孔径高 (h)、不同方位角 (θ) 的位置叠加图像信息, 让用户眼底的一点对应于从空间光调制器出射的特定孔径高、特定方位角的光线. 简化的视网膜头盔原理图如图 9 所示. 在这种对应关系下, 扩大系统视场角变化成为扩大光束的孔径, 也即对应于增大汇聚透镜的数值孔径.

图 8 (网络版彩图) 单眼视觉显示原理, 修改自 [19]

Figure 8 (Color online) Schematic diagram of monovision display, modified from [19]

图 9 (网络版彩图) 视网膜投影原理: Maxwell 观察法

Figure 9 (Color online) 2-D layout of Maxwellian view

从光学设计角度, 由于汇聚透镜只有零度这唯一的视场角, 采用非球面可以获得大数值孔径. Ando 在其提出采用全息光学元件的头盔显示器中首先用到了 Maxwell 观察法原理^[21].

另一方面, 这个系统可以看作具有无穷小出瞳直径的小孔成像模型. 我们知道对于理想的小孔成像系统, 景深为无限大并且改变像面的位置或者倾斜角度并不会对成像的清晰度产生显著影响, 而只是引起放大率和畸变的变化. 同样地, 视网膜投影显示的图像没有远近的概念, 在人眼视度调节的过程中图像始终是清晰的, 而在实际中, 由于系统并不是理想的针孔模型, 系统的景深是有限的. 视网膜显示系统的主要优势在于可以提供更清晰的图像、更高的对比度和更大的景深, 如图 10 所示^[22].

视网膜投影成像与视网膜扫描显示 (retinal scanning display, RSD) 是密不可分的, 如果认为视网膜扫描光束的口径足够细, 则可以将后者看作通过时序方式实现了视网膜投影. 两者之间的另一个差别在于, 对于视网膜扫描系统而言, 由于扫描是逐点显示的过程, 可以通过快速调焦来使得每个视场点具有不同的眼底离焦量, 这个离焦量的不同也就对应于显示画面的不同深度. 常见的方法是采用变形镜的方式. von Waldkirch 等^[23, 24] 研究了部分偏振光照明的视网膜扫描显示系统, 并提出用快速调焦的液体透镜进一步扩大视网膜投影系统景深的方法. 2003 年 McQuaide 等^[25] 利用带有变形镜的单眼视网膜扫描显示头盔实现 33 cm 到无限远的显示深度. Schowengerdt 等^[26] 将其扩展为双目系统, 实现了会聚与聚焦可以分别调制的立体头盔显示系统. Kim 等^[27] 将视网膜投影与扫描显示相结合, 由于人眼的视觉暂留作用, 用户观察到的是无数个 Maxwell 观察合成的效果, 从而生成了具有真

图 10 (网络版彩图) 视网膜投影显示的图像具有很大的景深, (a) 和 (b) 分别为聚焦在 5 cm 和 1.5 m 处的图像. 图中字母“A”为虚拟图像, 写有“手前”与“奥”的纸片分别位于 5 cm 与 1.5 m 处, 修改自 [22]

Figure 10 (Color online) The depth of view of RPD, the system is focused at 5 cm (a) and 1.5 m (b). Letter “A” is the displayed virtual image, and the cards with Chinese characters are at 5 cm and 1.5 m respectively, modified from [22]

实深度感的显示效果. 2014 年, Takahashi 等^[28] 利用衍射光学元件, 通过构建多个视点的方式实现了具有真实立体感的视网膜投影. 目前已经投入市场的视网膜投影显示设备与视网膜扫描显示设备主要有 MicroVision 公司的 NOMAD 激光扫描视网膜投影器^[29]、日本兄弟公司的 Airscouter 视网膜扫描头盔²⁾以及近期进入市场的 Avegant 公司的 Glyph 视网膜投影显示头盔³⁾.

视网膜投影显示技术的局限性在于, Maxwell 观察法的汇聚点需要落在用户的瞳孔上, 这需要比较精准的佩戴. 用户在观看过程中的眼球转动也可能导致无法观察到图像的情况. 针对这一点, Takahashi 等^[30] 对 Maxwell 观察法进行改进, 使汇聚点的位置不落在瞳孔中心, 而是落在眼球转动中心的位置, 使得眼镜在转动过程中依然能看见画面. 对于类似于 Kim 以及 Takahashi 提出的具有多个汇聚点以实现真实立体感的视网膜投影显示或者视网膜扫描显示系统, 则需要保证全部或者足够多个汇聚点同时落在用户瞳孔上.

3.6 光场头盔显示技术

除了多焦面显示与视网膜显示外, 光场成像, 或者说集成成像, 也能够实现真实立体感. 光场显示模拟了真实场景中的光线的位置和传播方向. 光场头盔显示器常常借助微孔阵列或者微透镜阵列. 所要显示的每一个点, 都由数条不同传播方向、但反向延长线相交的光线表示. Wetzstein 等^[31] 利用多层 LCD 屏与定向背光照, 通过张量显示的方法获得了沉浸式光场头盔显示, 其外形尺寸与采用中等大小显示器的目镜头盔相当. Song 等^[32] 在自由曲面棱镜与它的微显示器之间加入微孔阵列获得光场头盔显示器, 并且通过实验验证了其具有 200 mm 至 1 m 深度显示范围, 参见图 11. Hua 等^[33] 采用微透镜阵列与自由曲面棱镜的组合获得了类似的深度显示效果. 对于沉浸式显示而言, 可以直接在显示器前一定位置放置微孔阵列或者微透镜阵列构成光场头盔显示器. Lanman 等^[34] 利用 OLED 微显示器与微透镜阵列实现的光场显示器在包含机械结构的情况下只有 11 mm, 约为普通目镜系统的四分之一, 其外形与显示效果如图 12 所示. 沉浸式光场头盔显示器优点是厚度薄、质量轻, 而且具有真实立体感. 其缺点也很明显, 为了实现对光线传播方向的采样牺牲了空间分辨率, 利用小孔阵列或者液晶屏开关系统显示的图像由于衍射效应会产生弥散. 另外为了获得最终的显示效果, 显示器上的内容需要很大计算量才能获得. 2015 年, Huang 等^[35] 在 Wetzstein 的基础上研制出了具有高分辨率

2) <http://www.brother.co.jp/special/hmd/airscouter/index.htm>.

3) <https://www.avegant.com>.

图 11 (网络版彩图) Song 等设计的光场头盔显示器. (a) 为原理样机, (b) 与 (c) 分别为聚焦于 200 mm 和 1 m 处的显示效果, 图中条纹为显示的虚拟图像 [32]

Figure 11 (Color online) Schematic diagram of the light-field HMD designed by Song et al. The prototype is shown in (a); (b) and (c) show the display results when focused at 200 mm and 1 m, respectively, and the stripes are displayed virtual image

图 12 (网络版彩图) Lanman 设计的光场显示器设备 (a) 与显示效果 (b), 修改自 [34]

Figure 12 (Color online) The device (a) and display effect (b) of the light-field HMD proposed by Lanman, modified from [34]

的光场头盔显示系统, 将光场头盔的实用化又向前推进了一步.

3.7 虚拟现实显示中的视度调节

虚拟现实头盔显示器作为一种目视系统若要获得广泛的应用, 则需要具有一定视度调节能力, 使得具有不同视力水平的用户均能正常使用. 以最简单的头盔显示器, 即使用较大显示器的单片式头盔 (如图 2(b)) 为例, 视度调节可以通过改变透镜与显示器之间的距离实现. 另外, 在光路中加入液体透镜、变形镜等变焦距元件也可以实现视度的补偿. 需要注意的是, 这种改变物距使用单个变焦距元件的视度补偿方式通常会造成显示视场角的变化. 在光学系统设计中采用像方远心结构可以避免物距变化引起的视场大小改变. 值得注意的是, 采用液体透镜或者变形镜的分时复用型多焦面头盔显示系统的硬件均可以用于视度调节, 虚拟现实中视度调节实质上相当于调整焦面的远近. 其与分时复用型多焦面头盔系统的差别在于视度调节并不需要快速的焦面移动, 所以可以采取相对简单的结构形式.

图 13 (网络版彩图) 投影式头盔显示系统原理样机, 修改自 [38]

Figure 13 (Color online) Design and prototypes of head-mounted projective displays, modified from [38]

3.8 投影式头盔显示系统

投影式头盔显示器最早由 Fergason^[36] 于 1997 年提出, 虽然它是用户佩戴在头部的显示设备, 但它的显示原理更接近于投影显示. 投影式头盔显示器用一对小型投影透镜与 45° 放置分束镜的反射将显示器的图像投向远处. 与普通投影机的差异在于: 这种投影系统并不会在屏幕上产生一个实像, 实际上它的屏幕位于焦面前面. 屏幕采用回向反射材料, 入射到屏幕面上的光线沿原路返回, 透射过分束镜进入人眼, 用户观察到的实际是一个虚像, 但这个虚像却是需要借助屏幕才能实现的. 投影式头盔显示器较传统的头盔显示器在许多方面都具有优势. 例如采用目镜的头盔显示器的尺寸会随着视场角的增大而增大, 而采用投影透镜的头盔尺寸不会随着视场角的增大而显著增大, 这样的特性可以为光学透视式头盔显示器设计出具有大视场角、超轻与小型化的光学器件. 如果使用投影透镜的对称设计, 投影式头盔显示器的最大的视场角可以达到 90° (一般为 50° 到 70°), 而且边缘视场的畸变能够降低到 15% 以下. 2002 年, Hua^[37] 的研究组在引入衍射光学元件和塑料光学元件的基础上研制了超轻型、高投影质量的镜头, 并于 2008 年结合用户自定义的镜头完成了另一种更加紧凑、适合于佩戴的样机^[38], 如图 13 所示. 该样机能达到 50° 的视场角, 重量仅为 750 克. Inami 等^[39] 研发了名为 X'tal Vision 的类似光学结构并提出了面向对象的显示和视触觉显示.

4 其他虚拟现实显示技术

除了头盔显示系统以外, 虚拟现实还有其他多种显示方式. 这些显示方式各具特点, 有着各自的应用领域.

4.1 投影显示系统

大屏幕立体投影显示系统是通过光的偏振原理来实现的, 即采用两台投影机同步放映图像, 将两台投影机前的偏光片的偏振方向互相垂直, 让产生的两束偏振光的偏振方向也互相垂直. 偏振光投射

图 14 (网络版彩图) CAVE 系统原理图

Figure 14 (Color online) Schematic diagram of a CAVE system

到专用的投影幕上再反射到观众位置时偏振光方向不改变, 观众通过偏光眼镜每只眼睛只能看到相应的偏振光图像, 从而在视觉神经系统中产生立体感觉. 如果一对投影机产生的画面大小不能满足要求, 可以通过数对投影机进行拼接式超大屏幕显示 (也称为多通道投影显示). 这种拼接的关键技术在于多通道渲染、多通道图像同步、投影图像几何校正与融合以及投影图像色彩平衡等. 同时, 为了营造逼真的场景, 让用户转动头部或者环顾四周都能看见场景, 投影幕往往采用柱面、球面或者胶囊状表面.

动态投影沙盘系统通过投影机将动态的虚拟图像投影到实体沙盘的表面, 实现了真实与虚拟的有机结合. 与大屏幕投影不同的是, 动态沙盘投影并不需要很大投影画面, 其关键在于能够在异形表面上精准地投影没有畸变的图案. 有的动态沙盘系统通过控制大量的可伸缩的推杆来控制投影表面的形状, 并通过投影将虚拟内容投影在沙盘上, 实现了实体和虚拟的双动态显示.

洞穴式自动虚拟环境 (CAVE 系统) 是一种融入式投影显示系统, 它基于多通道视景同步技术和立体显示技术的房间式投影可视协同环境, 可提供一个房间大小的四面 (或六面) 立方体投影显示空间, 供多人参与, 所有参与者均完全沉浸在一个被立体投影画面包围的高级虚拟仿真环境中. 借助相应虚拟现实交互设备 (如数据手套、力反馈装置、位置跟踪器等), 从而获得一种身临其境的高分辨率三维立体视听影像和 6 自由度交互感受, 参见图 14⁴⁾.

4.2 体三维显示系统

体三维 (volumetric 3D, V3D) 成像技术在透明体空间内显示的图像具有宽度、高度和深度, 可以多用户同时观察, 并且无需佩戴眼镜等辅助设备. 体三维的主要实现方式是高速旋转的二维画面, 利用人眼的视觉暂留特性获得三维物体. 为了正确形成三维图形, 体三维采用“体像素”的概念, 整个图像看作是所有体像素的集合. 体三维可以通过高速旋转 LED 屏幕的方式实现或者采用投影的方式获得转动的发光面. 发光面进行旋转, 每个时刻显示当前时刻所在截面的体像素. 采用投影仪的体三维显示系统可以采用一台与屏幕共同旋转的投影仪, 也可以采用环状分布的多台静止投影仪, 每个时刻只点亮正对屏幕的投影仪. 另外, 还可以将屏幕做成螺旋形状, 从而只需要一至两台静止投影仪就能够实现体三维显示.

4) <http://www.jamstec.go.jp/esc/research/Perception/vr.en.html>.

图 15 (网络版彩图) 北京理工大学研制的基于多投影机旋转屏的体三维显示系统 (a) 与显示效果 (b), 修改自 [44]
Figure 15 (Color online) (a) Volume 3-D system developed by Beijing Institute of Technology and (b) its display performance, modified from [44]

体三维显示系统的早期研究主要在美国海军和美国宇航局 (NASA) 资助下进行, 20 世纪 90 年代以来, 德州仪器、GENEX 等多家公司研制出基于氦氖离子激光器的真三维显示装置, 并将具有真实物理深度和全视景观察的真三维旋转面技术应用到航空、宇航与地球科学等领域 [40]。21 世纪以来, Actuality 公司开发出基于高频单投影机和平面旋转屏的真三维显示器 Perspecta™3D 系统 [41], 该系统被用于战场可视化、石油天然气勘探与辅助诊断。国内浙江大学建立了基于二维 LED 旋转屏的体三维显示装置 [42], 实现了 $292 \times 165 \text{ mm}^3$ 的体显示空间, 体分辨率 $256 \times 64 \times 512$, 1 bit 灰阶。南京航空航天大学研制出基于旋转螺旋屏的三维立体成像系统 [43]。北京理工大学研制了基于多投影机旋转屏的真三维显示系统, 大幅提高了系统刷新率和分辨率 [44], 其光路与显示效果见图 15。

与 2D 显示器相比, 真三维显示器可作为 3D 设计、可视化的显示终端。在模具设计和外形设计等领域, 如飞机、汽车或者手机外形设计方面, 在未生产样品前就能够获得几乎与实际物体相同的直观效果, 有助于提高设计和制造人员的工作效率, 缩短产品的试制周期。在飞机风洞实验中, 配合各种传感器, 利用该系统可以帮助设计人员更加准确地进行空气动力学的设计和实验。由于真三维显示图像无遮挡, 具有透视效果, 该系统尤其适用于医疗中 CT 图像的显示, 可以帮助医生更好地确定病灶的位置, 从而进行有效治疗。除此以外, 在机械装配、气象分析和空中交通管理、军事模拟以及广告娱乐等领域中也具有广阔的应用前景。体三维显示的局限性在于所生成的图像是半透明的, 难以实现真实物体的遮挡效果, 另外由于结构尺寸的显示, 体三维很难显示大尺寸的物体。

4.3 计算全息显示系统

计算全息显示系统按照技术路径具体可以分为 (1) 基于空间光调制器的显示系统, (2) 利用合成计算全息图实现的动态三维显示系统, (3) 基于视差原理的全息三维显示系统, 和 (4) 多幅全息图合成的三维显示系统。

计算全息显示技术的困难有几点: 其一是 CCD 和空间光调制器的分辨率限制了显示的分辨率; 其二是在软件方面巨大的计算量也限制了显示分辨率; 其三是观察再现像的视角受限, 这个问题与全息图的制作方法有着直接的关系 [45]。目前, 高分辨率、大观察角度的计算全息显示依旧是很难实现的。

4.4 其他显示系统

除了前述几种常见或热门的虚拟现实显示方式以外, 还有其他各种显示方式。

反射式透明显示器通过半反半透玻璃将下方的图像反射到用户的眼中以实现半透明的显示效果. 通过将多片半反半透透镜放置成倒金字的形式, 可以实现悬浮显示的效果. 用户围绕其走动可以观看不同视角的画面.

空气显示器通过高速喷射压缩空气在空中实现一层虚拟的屏幕, 通过投影机将虚拟画面投影到该层屏幕上可实现半透明显示效果. 传统的显示器往往只有比较小的视角, 而空气显示器可以在各个角度观看, 并且屏幕大小可以随意调整. 这种空气显示器将水转换成水蒸气形成一种独特的屏幕, 这些水蒸气可以悬浮于空气中. 目前俄罗斯的 Displair 公司已经向市场推出空气显示屏产品⁵⁾.

5 结束语

虚拟现实的显示手段多种多样, 各具特色. 头盔显示设备是最为典型也是最具有发展前景的虚拟现实显示设备. 小型化与大视场高分辨显示依然是头盔显示发展的趋势. 当前的头盔显示系统的研究热点已经从单通道的左右视差型头盔向多通道、兼具大视场与高分辨率以及真实立体感头盔的方向转移. 除了具有物像关系的传统目镜式头盔显示外, 视网膜显示技术、光场头盔显示技术这些新型头盔显示技术蓬勃发展.

目前的头盔显示器距离长时间使用中舒适的用户体验还有很长的路要走. 解决会聚与聚焦的不匹配问题是提高用户舒适度的一个重要步骤, 然而目前多焦面头盔还难以实现轻小型的实用系统. 视网膜显示设备的严格的佩戴精度要求使得用户体验打了折扣. 而对于光场头盔, 如何实现优良的图像显示效果是有待解决的问题.

不同技术交叉融合, 各取所长将会诞生出新型的高性能头盔显示设备. 如前所述, 视网膜显示技术与多视点技术的结合产生了具有真实立体感的头盔显示设备; 集成成像与自由曲面棱镜的结合诞生了光场头盔显示系统. 此外, 近些年眼动跟踪技术的发展也会对头盔显示技术有所促进. 带有眼动跟踪功能的头盔显示器可能具有更加轻小的结构和更加卓越的性能. 透射式头盔显示技术与其他虚拟现实显示技术, 例如投影技术、CAVE 等, 相结合能产生多层次的虚拟现实显示效果以及适用于多用户的虚拟现实显示系统.

除了头盔以外的显示方式仍然有一定的发展与应用前景. 尤其是计算全息显示系统, 如果计算能力不足的难题得以突破、空间光调制器的分辨率得以提高, 则不失为一种优秀的真实立体感虚拟现实显示方式.

参考文献

- 1 Cheng D W, Wang Y T. Eyepiece. China Patent, 101609208B, 2009-12-23 [程德文, 王涌天. 目镜. 国家发明专利, 101609208B, 2009-12-23]
- 2 Cheng D, Wang Y, Hua H. Large field-of-view and high resolution free-form head-mounted display. Proc SPIE, 2010, 7652: 76520D
- 3 Cheng D, Wang Y, Hua H, et al. Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling. Opt Lett, 2011, 36: 2098-2100
- 4 Cheng D, Wang Y, Hua H, et al. Free-form optics enable lightweight, high-performance head-mounted displays. Laser Focus World, 2012, 48: 67-69
- 5 Zhao Q L, Wang Z Q, Mu G G, et al. Hybrid refractive/diffractive eyepiece design for head-mounted display. Acta Photonica Sin, 2003, 32: 1495-1498 [赵秋玲, 王肇圻, 母国光, 等. 用于头盔显示器的折/衍混合目镜设计. 光子学

5) <http://displair.com/technology/>.

- 报, 2003, 32: 1495–1498]
- 6 Sun Q, Liu R, Piao R G, et al. Application of plastic aspherical elements in head mounted 3D display. *Opt Precis Eng*, 2005, 13: 47–52 [孙强, 柳荣, 朴仁官, 等. 塑料非球面透镜在头盔 3D 显示中的应用. *光学精密工程*, 2005, 13: 47–52]
 - 7 Okuyama A, Yamazaki S. US Patent, 5 706 136, 1998-01-06
 - 8 Cheng D, Wang Y, Hua H, et al. Design of an optical see-through headmounted display with a low f-number and large field of view using a free-form prism. *Appl Opt*, 2009, 48: 2655–2668
 - 9 Rolland J P, Yoshida A, Davis A L. High-resolution inset head-mounted display. *Appl Opt*, 1998, 37: 4183–4193
 - 10 Song W, Cheng D, Deng Z. Design and assessment of a wide FOV and highresolution optical tiled head-mounted display. *Appl Opt*, 2015, 54: E15–E22
 - 11 Cheng D, Wang Y, Hua H. Euro Patent, 2564259 B1, 2015-01-21
 - 12 Shiwa S, Omura K, Kishino F. Proposal for a 3D display with accommodative compensation: 3DDAC. *J Soc Inf Display*, 1996, 4: 255–261
 - 13 Shibata T, Kawai T, Ohta K, et al. Stereoscopic 3-D display with optical correction for the reduction of the discrepancy between accommodation and convergence. *J Soc Inf Display*, 2005, 13: 665–671
 - 14 Love G D, Hoffman D M, Hands P J W, et al. High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display. *Opt Express*, 2011, 19: 8045–8050
 - 15 Liu S, Cheng D, Hua H. An optical see-through head mounted display with addressable focal planes. In: *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed Augmented Reality*. Washington: IEEE Computer Society, 2008. 33–42
 - 16 Hu X, Hua H. High-resolution optical see-through multifocal-plane head-mounted display using freeform optics. *Opt Express*, 2014, 22: 13896–13903
 - 17 Rolland J P, Krueger M W, Goon A A. Dynamic focusing in head-mounted displays. *Proc SPIE*, 1999, 3639: 463–470
 - 18 Cheng D, Wang Q, Wang Y, et al. Lightweight spatially multiplexed dual focal-plane head-mounted display using two freeform prisms. *Chin Opt Lett*, 2013, 11: 031201
 - 19 Johnson P V, Parnell J A Q, Kim J, et al. Dynamic lens and monovision 3D displays to improve viewer comfort. *arXiv:1512.09163*
 - 20 Konrad R, Cooper E A, Wetzstein G. Novel optical configurations for virtual reality: evaluating user preference and performance with focus-tunable and monovision near-eye displays. In: *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Santa Clara, 2016. 1211–1220
 - 21 Ando T, Yamasaki K, Okamoto M, et al. Headmounted display using a holographic optical element. In: *Three-Dimensional Television, Video, and Display Technologies*. New York: Springer, 2002. 67–100
 - 22 Takatsuka Y, Yabu H, Yoshimoto K, et al. Retinal projection display using diffractive optical element. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, Kitakyushu, 2014. 403–406
 - 23 von Waldkirch M, Lukowicz P, Troster G. Defocusing simulations on a retinal scanning display for quasi accommodation-free viewing. *Opt Express*, 2003, 11: 3220–3233
 - 24 von Waldkirch M, Lukowicz P, Troster G. Oscillating fluid lens in coherent retinal projection displays for extending depth of focus. *Opt Commun*, 2005, 253: 407–418
 - 25 McQuaide S C, Seibel E J, Kelly J P, et al. A retinal scanning display system that produces multiple focal planes with a deformable membrane mirror. *Displays*, 2003, 24: 65–72
 - 26 Schowengerdt B T, Seibel E J, Kelly J P. Binocular retinal scanning laser display with integrated focus cues for ocular accommodation. *Proc SPIE*, 2003, 5006: 1–9
 - 27 Kim D W, Kwon Y M, Kim S K, et al. Analysis of a head-mounted display-type multifocus display system using a laser scanning method. *Opt Eng*, 2011, 50: 103–108
 - 28 Takahashi H, Yamada K. Retinal projection type super multi-view head-mounted display. *Proc SPIE*, 2014, 9012: 90120L

- 29 Davis W O, Brown D, Ma Y, et al. Evolution of MEMS scanning mirrors for laser projection in compact consumer electronics. *Proc SPIE*, 2010, 7594: 75940A
- 30 Takahashi H, Hirooka S. Stereoscopic see-through retinal projection head-mounted display. *Proc SPIE*, 2008, 6803: 68031N
- 31 Wetzstein G, Lanman D, Hirsch M, et al. Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting. *ACM Trans Graph*, 2012, 31: 13–15
- 32 Song W, Wang Y, Cheng D, et al. Light field head-mounted display with correct focus cue using micro structure array. *Chin Opt Lett*, 2014, 12: 39–42
- 33 Hua H, Javidi B. A 3D integral imaging optical see-through headmounted display. *Opt Express*, 2014, 22: 13484–13491
- 34 Lanman D, Luebke D. Near-eye light field displays. *ACM SIGGRAPH Talks*, 2013, 32: 2504–2507
- 35 Huang F C, Chen K, Wetzstein G. The light field stereoscope: immersive computer graphics via factored near-eye light field displays with focus cues. *ACM Trans Graph*, 2015, 34: 1–12
- 36 Fergason J L. US Patent, 5621572, 1997-04-15
- 37 Gao C Y, Biocca F, Hua H, et al. An ultra-light and compact design implementation of head-mounted projective displays. In: *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference*, Yokohama, 2001. 175–182
- 38 Zhang R, Hua H. Characterizing polarization management in a p-HMPD system. *Appl Opt*, 2008, 47: 512–522
- 39 Inami M, Kawakami N, Sekiguchi D, et al. Visuo-haptic display using head-mounted projector. In: *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference*, New Brunswick, 2000. 233–240
- 40 Geng Z. High resolution volumetric three-dimensional display—state of the art in information technology. *Sci Tech Rev*, 2007, 25: 21–26 [耿征. 真三维高清晰度显示技术——信息显示领域的重要发展方向. *科技导报*, 2007, 25: 21–26]
- 41 Reisa G A, Haviga P R, Hefta E L, et al. Color and shape perception on the Perspecta 3D volumetric display. *Proc SPIE*, 2007, 6558: 65580I
- 42 Lin Y F, Liu X, Liu X D, et al. Three-dimensional volumetric display system utilizing a rotating two-dimensional LED array. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23: 1158–1162 [林远芳, 刘旭, 刘向东, 等. 基于旋转二维发光二极管阵列的体三维显示系统. *光学学报*, 2003, 23: 1158–1162]
- 43 Fan Q J, Li L, Shen C L, et al. Research on volumetric 3D imaging system based on rotating helix screen. *Trans Microsyst Tech*, 2009, 28: 117–120 [樊琼剑, 李莉, 沈春林, 等. 基于旋转螺旋屏的三维立体成像系统研究. *传感器与微系统*, 2009, 28: 117–120]
- 44 Song W, Zhu Q, Liu Y, et al. Omnidirectional-view three-dimensional display based on rotating selective-diffusing screen and multiple mini-projectors. *Appl Opt*, 2015, 54: 4154–4160
- 45 Zhang W D. Research on the three-dimensional display. Dissertation for Ph.D. Degree. Tianjin: Tianjin University, 2010 [张未冬. 三维计算全息显示技术的研究. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2010]

Display technologies in virtual reality systems

Yongtian WANG*, Dewen CHENG & Chen XU

Beijing Engineering Research Center of Mixed Reality and Advanced Display, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

*E-mail: wyt@bit.edu.cn

Abstract With the development of information technology, the demand for high-end virtual reality (VR) techniques and such devices are increasing rapidly. And one of the key points to achieve high performance of VR devices is a high-quality display system. In this paper, the state-of-the-art display techniques in VR are discussed with their features analyzed and compared. Particularly, as the main form of VR display, head-mounted displays (HMDs) are discussed in detail. And by analyzing the hot fields in HMD technology, the special considerations

and aim of display techniques in VR are expounded. The last part is the prospect of display technology in VR systems.

Keywords virtual reality, optical design, head-mounted display, projection display, volume 3-D display

Yongtian WANG was born in 1957. He received the Ph.D. degree in engineering from Reading University, UK, in 1986. Currently he is a senior professor of optics and applied computer science in Beijing Institute of Technology. His interests involve optical design and CAD, virtual reality and augmented reality, display technology, and human-computer interaction. He is a fellow of OSC, OSA, SPIE, and IET.