

文章编号 1004-924X(2012)05-1141-12

数字全息三维显示关键技术与系统综述

马建设^{1*}, 夏飞鹏², 苏 萍¹, 潘龙法²

(1. 清华大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055; 2. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要: 三维全息显示能够表现出与真实物体一样的深度和视差, 是一种理想的三维显示方法。但是, 三维物体计算全息图计算复杂且计算量巨大, 因此, 如何快速生成三维物体计算全息图是数字三维全息动态显示中的关键问题之一。本文首先论述了数字全息三维显示的关键技术, 包括物点散射法、体视全息法、层析法等三种三维物体计算全息图实现方法, 一种 RGB 分离的真彩色全息显示实现方法和若干提高全息再现像质的方法; 然后对几种最新典型的数字三维全息显示系统进行了技术分析; 最后总结了数字全息三维显示领域的发展动态, 指出三维全息显示技术会朝着实时、动态、更大尺寸、更高分辨率方向发展。

关键词: 计算全息; 三维全息显示; 真彩色显示; 空间光调制器

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.1141

Survey on key techniques and systems of digital holographic 3D display

MA Jian-she^{1*}, XIA Fei-peng², SU Ping¹, PAN Long-fa²

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: mjs888@126.com

Abstract: As an ideal 3D display way, holographic 3D display can present the same information of depth and parallax as real objects. However, the computer-generated hologram for a 3D object has to do complex and massive computations, how to create a computer-generated hologram quickly for the 3D object has become a key problem in the digital holographic 3D display technique. In this paper, the key techniques of digital holographic 3D display are discussed firstly, including three kinds of methods for creating computer-generated holograms like object point scattering, holographic stereograms and holographic tomography, a RGB separating method for colorful holographic 3D display, and several kinds of improving quality methods for reconstructed images. Then, few latest holographic 3D display systems and key devices are analyzed technically. Finally, it summarizes the present state of the digital holographic 3D display technique and points out that the technology will develop to real-time, dynamics, larger sizes and higher resolution.

Key words: computer-generated hologry; holographic 3D display; colorful display; spatial light modulator

收稿日期: 2012-01-20; 修订日期: 2012-02-15.

基金项目: 粤港关键领域重点突破项目 (No. 2009205128)

1 引言

近年来,三维(three-dimension, 3D)立体显示技术发展迅速,眼镜/头盔式三维立体显示和光栅式自由立体显示、合成成像立体显示、体三维显示等各种三维显示技术层出不穷^[1-12]。光学全息技术能够记录物光波的振幅和位相全部信息,再现显示时能够产生包含物体全部信息的三维像^[13],是最接近实际观察模式的三维显示。数字全息三维显示将全息图数字化,用数字器件显示、处理,具有灵活方便、可显示虚拟物体及数据、能够在线及时更新显示内容等优点,已成为全息显示的一个重点发展方向,近些年来被国内外相关学者广泛关注和研究^[14-17]。数字全息三维显示的一个关键技术便是全息图的记录。用传统光学方法记录三维物体的全息图,原理直观,不需要复杂的计算,但如何进行颜色的记录、实现大视角再现、白光再现以及再现时如何消除干扰级次像都是研究的热点。计算全息^[18-19]直接使用计算机生成全息图。对于三维物体而言,由于其的空间结构复杂难以用具体数学函数描述其物光波的分布,而且三维信息量大,三维计算全息繁杂,因此,如何压缩三维计算全息计算的数据量、实现大视角全视差的显示、以及如何实现真彩色全息显示已成为计算全息的难点。本文论述了物点散射法、体视全息法、层析法等 3 种三维物体计算全息图实现方法和一种 RGB 分离真彩色全息显示的实现方法,并对几种数字全息三维显示系统进行了技术分析。

2 三维物体计算机制全息图

2.1 计算全息原理

全息图的制作可分为两种:一般光学全息图^[20]和计算机制全息图(Computer-generated Hologram, CGH)。传统的光学全息图是直接利用光学干涉法在记录介质上记录物光波和参考光波叠加干涉后的干涉图样,而计算全息图则不需要实际搭建光路而是在计算机中模拟物体的物光波和参考光波的干涉全息过程来生成数字化的全息图。根据计算全息图制作时不同的编码技术,计

算全息图大致可分为迂回位相型计算全息图,修正离轴参考光计算全息图,相息图和计算全息干涉图等^[21]。要实现数字全息三维显示,则需要得到三维物体的计算全息图。

2.2 三维物体计算全息图实现方法

一直以来,计算全息算法大多以二维平面物体或二维图像为基础展开。理论上讲,计算全息也能完全真实的再现三维图像。但由于三维物体的空间结构复杂,难以用具体数学函数描述其物光波的分布,也由于三维信息量大,三维计算全息图难于计算,为此,研究者在保证三维再现像质的前提下设计了多种方法来简化三维物体的计算全息。

2.2.1 物点散射法

将三维物体看作由有限个物点组成的集合,每个物点看成一个点光源,计算机模拟点光源在有限方向上的光学传播,得到该点在全息面上的复振幅分布,叠加所有物点的复振幅即可得到物体的波面在全息面上的信息分布,通过编码即可得 3D 全息图^[22]。

物点散射法虽能实现三维物体全息图,但对于复杂的三维物体而言,要实现高分辨率的再现像需要采样较多的物点,从而导致计算量巨大。菲涅尔波带法是研究者提出的物点散射法的一种^[23],它通过规整同深度的采样物点来提高算法速度。

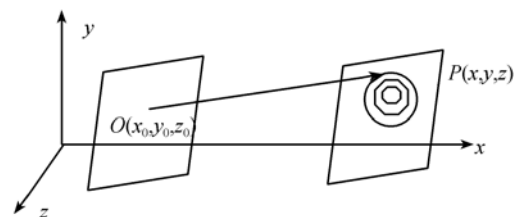


图 1 点物的菲涅尔衍射

Fig. 1 Beam path of Fresnel holography for a point

将三维物体看作由许多物点组成,一个物点对应的全息图可以用菲涅尔波带表示,如图 1 所示,先由 O 点和 P 点的坐标求出 O 点到 P 点的距离 r ,再由 r 计算出 O 点光波到达 P 点波带时波前的位相 φ 。

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}, \quad (1)$$

$$\varphi = \varphi_{\text{ref}} + 2\pi r/\lambda, \quad (2)$$

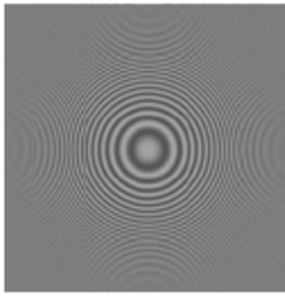


图 2 菲涅尔波带
Fig. 2 Fresnel zone

对于同一衍射距离上的所有物点,若采用平面波照明,它们对应的菲涅尔波带是相同的,选取一个物点作为原点,计算其菲涅尔波带,称之为“主菲涅尔波带”。主菲涅尔波带可以直接利用菲涅尔衍射公式计算获得,同深度各点的衍射图样中心和主菲涅尔波带中心的相对位置就是各点和主菲涅尔波带对应的原点的相对位置,将主菲涅尔波带平移至物点的衍射图样位置即可得到各点的菲涅尔波带,然后将所有点的菲涅尔波带叠加,即可获得三维物体的全息图。

基于菲涅尔波带法的实验如图 3 所示^[22]。

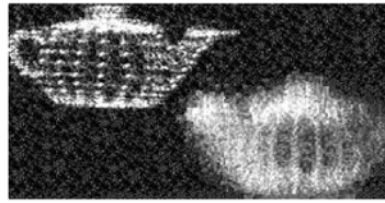
菲涅尔波带法适用于较复杂的物体,相对于传统物点散射法计算量明显减少,信息连续无冗余;但再现像质受采样点数多少影响较大,而且为同轴全息,再现时需进行滤波消除零级衍射斑,以减小对再现像的影响。



(a) 计算机生成三维茶壶模型
(a) Computer-generated 3D teapot model



(b) 菲涅尔波带全息图
(b) Fresnel zone plate hologram



(c) 全息图再现
(c) Reconstructed image by the hologram
图 3 菲涅尔波带法实验

Fig. 3. Experiments of Fresnel zone plate method

2.2.2 体视全息法

用计算机或相机获得三维物体的多个视角的二维投影像,对这些二维图像进行编码处理可得三维物体的计算全息图。

第一种处理方法是对每张投影像加入倾斜因子并进行积分计算,并将其积分制作为该视角投影图中对应点的像素值,组合一起得到全息图^[24]。

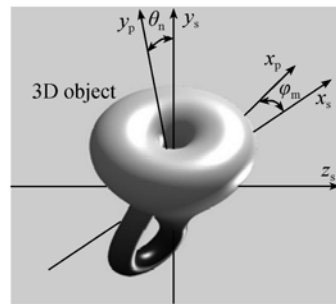


图 4 3D 物体坐标系
Fig. 4 Coordinate system of the 3D object

三维物体坐标系如图 4 所示, (x_p, y_p) 为投影面坐标, (x_s, y_s, z_s) 为世界坐标系。

设 φ_m 为 x_p 与 x_s 的夹角, θ_n 为 y_p 和 y_s 的夹角, $\varphi_m = m\Delta\varphi$, $\theta_n = n\Delta\theta$, m 和 n 均为整数,且 $1 \leq m \leq M$, $1 \leq n \leq N$, $M \times N$ 为全息图的像素总量, $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\theta$ 为角分辨率。由坐标系关系有:

$$x_p = x_s \cos \varphi_m - z_s \sin \varphi_m, \quad (3)$$

$$y_p = y_s \cos \theta_n - z_s \sin \theta_n \cos \varphi_m - x_s \sin \varphi_m \sin \theta_n. \quad (4)$$

计算 (φ_m, θ_n) 视角下倾斜因子 k_{mn} :

$$k_{mn} = \exp[-j2\pi b(x_p \sin \varphi_m + y_p \sin \theta_n)], \quad (5)$$

式中 b 为实常数。

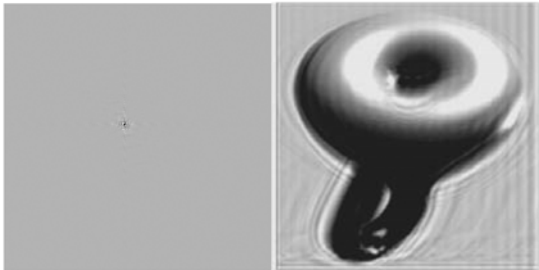
计算 (φ_m, θ_n) 视角下的二维投影图幅值 P_{mn} (x_p, y_p) , 再对全息面相应点 (m, n) 复振幅的贡献

值 $s(m, n)$:

$$s(m, n) = \iint k_{nm} P_{nm}(x_P, y_P) dx_P dy_P, \quad (6)$$

将 $s(m, n)$ 编码成全息图即为三维物体的全息图。

计算机模拟的三维物体^[35]如图 5, 生成的全息图如图 5(a), 图 5(b)为全息图再现效果。



(a)全息图 (b)再现三维像
(a)hologram (b)3D reconstructed image

图 5 体视全息法实验

Fig. 5 Experiments of holographic stereogram method

第二种处理方法是將二维投影像分别傅里叶变换成二维频谱矩阵, 将所有二维矩阵组成一个三维矩阵, 通过分析光场分布的函数式可以从中提取一个能表示物体三维特征的二维矩阵, 对这个二维矩阵进行编码即可得三维物体的全息图^[25-26]。

体视全息法中二维投影像利用计算机或相机较易得到, 因而既适用于计算机生成的虚拟三维物体也适用于实际物体, 是一种比较常用的方法。再现像像质受视角分辨率影响, 角分辨率越高, 再现像质越高, 但同时计算量也越大, 信息冗余量越大。对于第一种处理方法, 当不满足傍轴条件时, 倾斜因子更容易受倾斜正弦值非线性变化的影响, 全息图计算的准确性和再现像的像质将受到影响, 此外全息面频谱的动态范围较宽不利于全息图的编码^[27]。对于第二种处理方法, 会用到傅里叶频谱, 光学再现则需要使用傅里叶变换透镜变换图像, 光学再现系统搭建比较复杂。

2.2.3 层析法

将 3D 物场沿深度方向分层成像, 将各层面在全息面的菲涅尔衍射复振幅叠加后, 加入参考光制作成一张全物场的全息图^[28-30]。层析法如图 6 所示。

层析法比较适用于计算机生成的复杂虚拟三维物体, 编码较易实现, 再现时还能观察到物体的

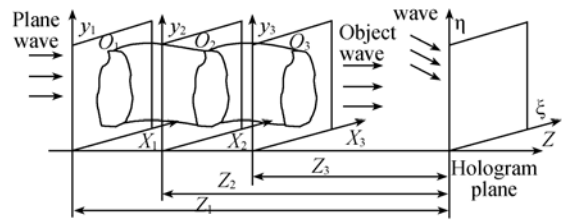
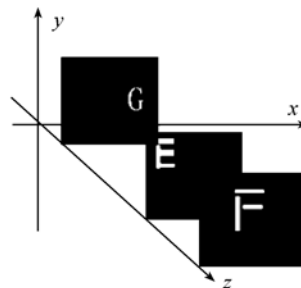


图 6 层析法原理图

Fig. 6 Schematic diagram of tomography technique

内部信息, 尤其适用于复杂数据的可视化、医疗诊断、汽车设计等领域, 但对于实际三维物体要得到物体的分层图像则比较困难。再现像像质受分层层数影响, 层数越多再现像的像质越好, 但计算量越大。

在计算机上模拟层析法, 分为 E, F, G 三层, 如图 7(a)所示。其中, E 层距离全息面 300 mm, F 层距离全息面 200 mm, G 层距离全息面 400 mm, 将三层传播到全息面的复振幅叠加, 加入参考光成一幅全息图, 并在距离为 200 mm 处再现, 滤除零级像后的再现图如图 7(b)所示。从再现图中可以看出, 离焦的 E 没有 F 清晰, 离焦更远的 G 更加模糊。



(a)模拟分层

(a) Tomography simulation



(b)200 mm 处再现像

(b) Reconstructed image at 200 mm

图 7 层析法实验

Fig. 7 Experiments of holographic tomography

总而言之,三种三维物体计算全息图实现方法均能相对快速地生成三维全息图。由于体视全息法对于虚拟和实际物体都适用且计算较快,已成为近来研究的热点,国内外已有对于体视全息法全息显示的研究^[24,31-33]。

2.3 真彩色全息显示实现方法

现实世界是真彩色的,如实景物体一般的真

彩色显示是三维全息显示的另一个关键问题。

RGB 分离法是一种能实现真彩色显示的简单易行的方法。将真彩色物体分解为 RGB 三基色分量,并分别进行全息图计算,然后分别进行再现,最后将三种再现像叠加到一起即为彩色再现像^[33-36]。

RGB 分离法流程图如图 8 所示。

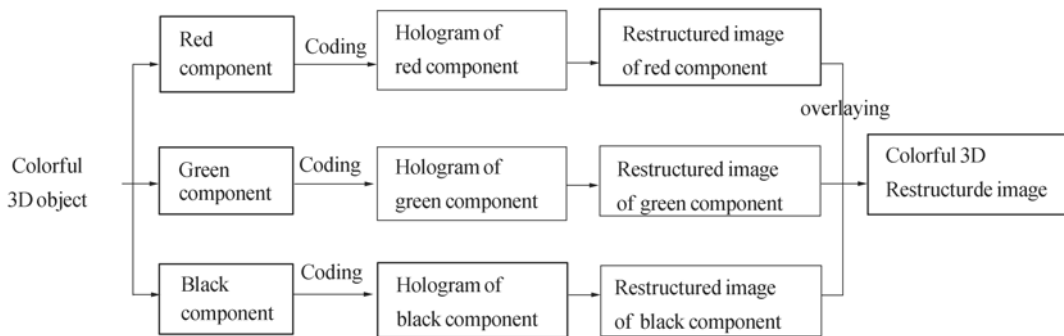


图 8 RGB 分离法流程图

Fig. 8 Flow chart of RGB separating process

2.4 全息再现像质的提高

全息再现时由于衍射等光学效应,会出现干扰级次使得再现像像质下降,影响全息显示效果。

在数字全息再现中,可以通过移相法、数字滤波法等消除干扰级次。在计算全息中,也发展出了博奇等算法^[37]消除最大的干扰项——0 级光,但是在纯振幅或纯位相的空间光调制器的记录中,共轭像的干扰仍然无法避免。实现完美再现像的方法是复振幅调制。早在 1960 年布朗恩和罗曼就已经应用迂回位相编码物光波的位相,使振幅型计算全息图可以同时记录复制函数的振幅和位相^[38]。在 4f 光路中串联一个振幅型和一个位相型 SLM 实现复振幅调制^[39]。但是在记录强度时,贴的吸收层会降低强度的对比度。2008 年 A. Jesacher 等人^[40]用 2 个在傅里叶共轭面上串联的纯位相型空间光调制器(Spatial light Modulator, SLM)实现复振幅调制,其中第一个纯位相器件记录的是振幅的傅里叶变换的相位图。这种方法没有牺牲强度的对比度,因而再现图的衍射效率接近 100%。但是由于纯相位型 SLM 是反射型器件,4f 光路成为反射型折转光路,并且两个纯位相型器件记录在同一个 SLM 上,其水平分辨率降低了一半,牺牲了全息图的动态范围。

随着空间光调制技术的不断进步,用单一器

件实现复振幅调制是一种较为理想的实现完美再现像的方法。

3 数字全息三维显示系统

数字全息三维显示目前主要有两种方式。第一种是基于图像传感器记录全息图的数字全息显示系统,即在传统全息光路中用电子耦合元件(Charge-coupled Device, CCD)等图像传感器接收实景的全息图,再将记录得到的数字化全息图经过计算机处理之后进行再现从而实现三维显示;第二种是基于计算机生成全息图的数字全息显示系统,即以计算机直接生成计算全息图,将全息图进行再现从而实现三维显示。

3.1 基于图像传感器记录全息图的数字全息显示系统

在传统全息术中,采用化学感光材料制成的全息干板来记录全息图,每记录一次都对干板进行显影,定影,烘干等后续处理,过程十分繁琐,而且许多材料不能重复使用^[41]。

随着图像传感器技术和空间光调制器技术的发展,研究者提出了一种对传统全息术改进方案。在传统全息记录光路中,使用 CCD 等高分辨率的图像传感器代替全息干板来记录干涉形成的全息

图,图像传感器记录的数字化全息图可以传输到计算机上进行优化处理,然后对其进行再现。

2008年,U. Gopinathan 等人^[42]利用 CCD 和 SLM 构造了一个现实三维物体的全息投影显示系统,如图 9 所示。

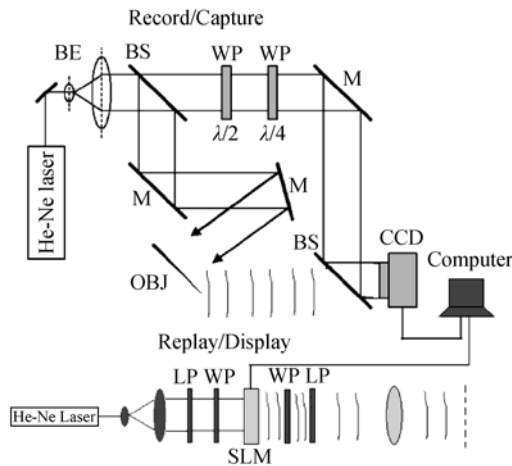


图 9 现实三维物体的全息投影显示系统

Fig. 9 Projection system for real world 3D objects

为了记录全息图,在系统的记录光路中,搭建了一个马赫-泽德干涉仪用于记录全息图,CCD 代替传统全息干板记录真实物体的全息图。在光路中插入一个四分之一波片或半波片引入 $0, \pi/4, \pi/2, \pi/4$ 的相移,利用四步移相法计算出波阵面的相位。将得到的波阵面经过计算机编码处理为适合 SLM 的形式后加载到 SLM 上实现光学再现。

这套系统的不足之一,是记录光路的马赫-泽德干涉仪搭建比较复杂,对周围环境的要求较高,而且在记录生成相位全息图时要利用四步移相法比较费时,难以实现动态三维显示,采用单色 He-Ne

激光器也难以实现彩色显示;另一个不足之处是由于记录光路的宽度有限导致 CCD 记录的视场也极其有限,只适用于记录和显示一些不大的三维物体。

国内苏州大学,天津大学,浙江大学等不少大学也对消除数字全息零级像,提高再现像质等相关问题做了许多研究^[43-48]。也有研究者将压缩感知 (compressive sensing) 算法应用于数字全息术中,以减少图像传感器的采样数据,加快系统的处理速度^[49]。

3.2 基于计算机全息图的数字全息三维显示系统

利用计算机直接生成数字全息图可以免去复杂的全息记录光路,更加方便快捷。虽然计算全息的理论在 20 世纪 60 年代便已产生,但由于计算机技术,光调制技术等相关领域的发展限制,直到 20 世纪 90 年代初,美国麻省理工学院多媒体实验室搭建了一个基于声光调制器 (Acousto-optical Modulators, AOM) 的全息三维显示系统^[50],才出现真正意义上的数字全息三维显示系统。随后,越来越多的数字全息三维显示系统相继出现。

3.2.1 基于合成图像技术的数字三维显示系统

2002年,S. H. Shin 等^[51]人将体全息基元图像阵列存储在光折变晶体之中,然后用位相共轭参考光读出再现,通过旋转扩散器减小了显示系统的散斑噪声。

2005年,韩国首尔国立大学的 K. Choi 等^[52]人利用微透镜阵列构造了一个全视差大可视角度的三维全息显示系统。如图 10 所示。

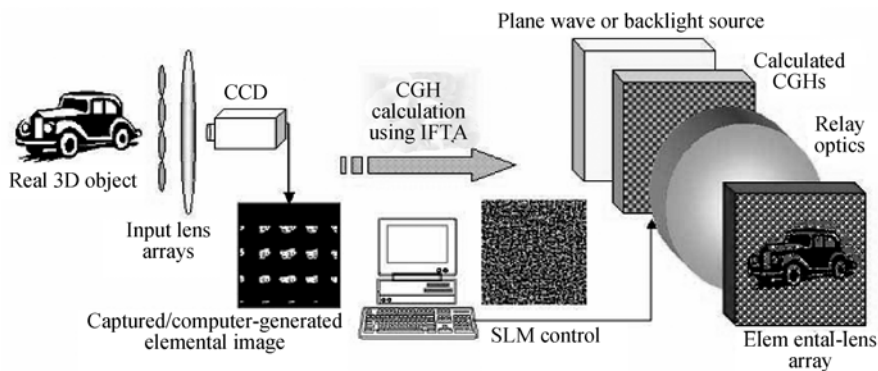


图 10 大可视角度全视差全息三维显示系统原理图

Fig. 10 Schematic diagram of full parallax viewing-angle enhanced CGH 3D display system

CCD 通过输入端的微透镜阵列记录下三维物体的二维基元图像,采用修正迭代傅里叶变换算法 (IFTA) 计算基元图像的全息图,加载到空间光调制器上,通过输出端的微透镜阵列成像,再现三维图像。

基于合成图像技术的数字三维显示系统有效简化了三维物体全息图的制作,但需要用到微透镜阵列使系统变得复杂难于构造,且不是真彩色显示。

3.2.2 基于新记录材料的全息三维显示系统

传统的全息记录材料如卤化银等需要进行显影,定影,烘干等后续处理,过程十分繁琐,而且不能擦除重复使用,但拥有全新特性的新记录材料应运而生,如光导热材料,光折变晶体等。

2008 年,美国亚利桑那州立大学的 P. A. Blanche 等^[53]人制作了一种光折变晶体并构造了一套可半实时更新的全息显示系统,如图 11 所示。

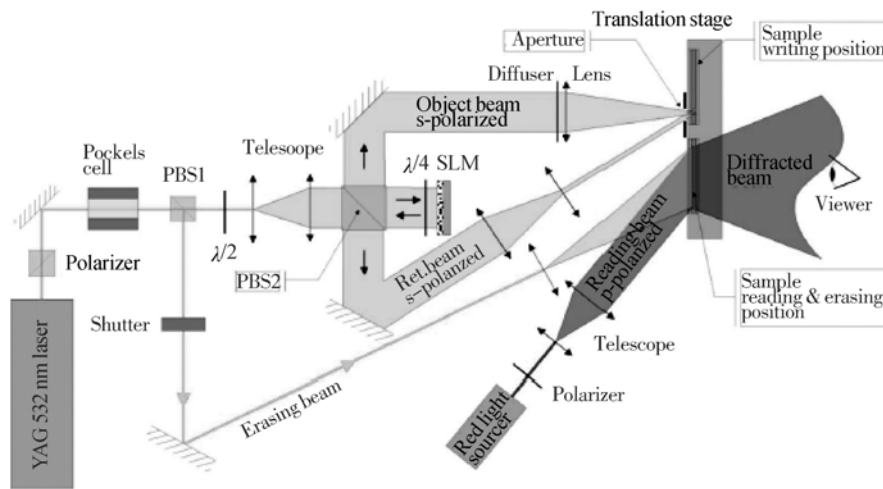


图 11 三维显示系统原理图

Fig. 11 3D Display optical setup sketch

制作出的光折变晶体具有可反复擦出和记录的优点,三维物体基元图像的全息图按序加载到 SLM 上,SLM 调制后的光波和参考光波形成基元全息图依次被光折变晶体记录,直到一块晶体记录完毕将之移至光学再现的位置,然后由红光再现三维像。该系统能够在几分钟之内擦除和更新图像,但仍有不足之处。首先是系统中同时有记录光路,擦除光路和再现光路,结构比较复杂,难于搭建,稳定性也不高;其次是刷新频率还达不到视频显示的要求。

3.2.3 基于液晶空间光调制器或数字微反射镜器件的全息三维显示系统

随着空间光调制器技术的发展,高分辨率高频率的液晶空间光调制器^[54] (Liquid Crystal-Spatial Light Modulator, LC-SLM) 或数字微反射镜器件^[55-56] (Digital Micro mirror Device, DMD) 逐渐取代声光调制器应用到全息显示技术之中。

液晶空间光调制器利用液晶的电光效应对入

射光进行调制;而数字微反射镜由上百万个微反射镜组成,每个微反射镜可由电压信号控制反射方向,完成光的开关态,从而实现对入射光的调制。

2002 年,日本的 T. Shimobaba 等^[31]人利用反射式液晶显示器 (LCD) 面板作为光调制器,光发射二极管 (LED) 作为参考光源构造了一个全息

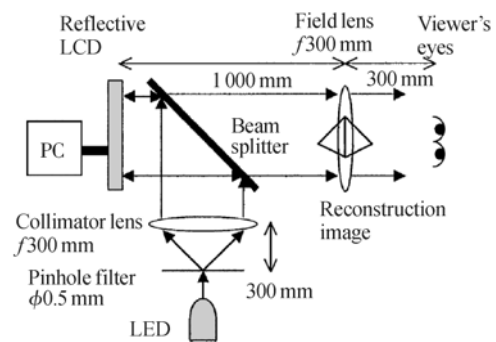


图 12 基于 LED 和 LCD 的全息三维显示系统

Fig. 12 Holographic 3D display system based on LED and LCD

三维显示系统,如图 12 所示。计算机采用前文提到的物点散射法生成物体的三维全息图,加载到反射式 LCD 上用 LED 进行再现。该系统由于采用物点散射法计算量较大难以获得高分辨率的再现像,另外 LED 相干长度较短影响再现效果。

2003 年, M. L. Huebschman 等^[57]人利用 DMD 搭建了一个动态全息三维图像显示系统,如图 13 所示。

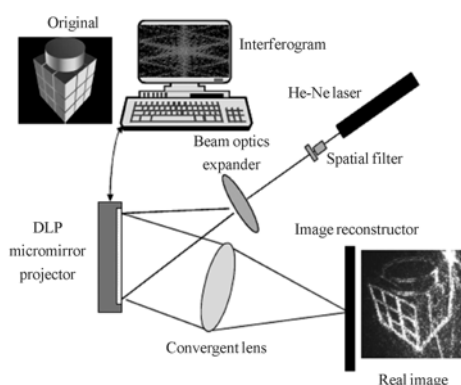


图 13 动态全息 3D 图像投影系统

Fig. 13 Dynamic holographic 3D image projection system

要实现动态显示,则需把动态图像分成不同的静态帧,利用计算机将每一个静态帧编码成全息图,再按序加载到光调制器中进行光学再现。当静态帧的刷新频率超过 25 Hz 时,人眼即可看到动态效果。这要求计算机有足够高的运算速度。

2009 年,涂铮铮等^[58]人构造了一套基于 DMD 和分数傅里叶算法的动态全息显示系统,系统的结构与图 13 类似,采用前文提到的体视全息法生成三维物体全息图加载到 DMD 上进行再现。

两套以 DMD 为核心器件搭建的系统结构简单,方便易行,能够得到较高分辨率的再现像。两套系统最为关键的是三维物体全息图的制作,全息图制作的速度和质量决定了再现像的像质和显示效果。

在此基础上,不少研究者继续对全息三维显示进行了研究^[32,59-60]。类似于图 13 基于 DMD 等空间光调制器的全息三维显示系统结构简单,辅之以三维物体计算全息图和真彩色显示方案能

够实现良好的三维显示,是当前研究的重点和热点,但同时也存在着显示尺寸较小,难以达到视频显示的刷新频率要求等缺陷。

4 数字全息三维显示的技术发展方向

4.1 数字三维物体全息图数据压缩

由于三维物体的空间结构复杂难以用具体数学函数描述其物光波的分布,且三维信息量大使得三维计算全息难于计算,如何压缩全息图的数据量、简化全息图的计算一直都是一个重点核心的研究方向。前文提到的物点散射法等三种三维计算全息图实现方法是研究者提出的能够简化三维全息图计算的方法。从数据压缩角度而言,减少三维物体的数据采集量也是一种研究方向。2011 年以色列 Ben-Gurion 大学的 Yair Rivenson^[61]等人将近来研究较热的压缩感知理论与全息术结合,使生成全息图时三维物体的采集量得大大降低,实现了数据压缩。

4.2 高分辨率大视场视频级动态三维全息显示

全息三维显示作为一种理论上理想的三维显示技术,能够实现如真实三维世界一样的高分辨率大视场视频级动态三维全息显示是研究者的主要目的。

4.3 全息远程再现

将经过数据压缩的三维全息图通过网络传输,在另一位置实时三维再现也是一个重要的发展方向,这一研究将实现真三维显示视频连线。

5 结 论

综合可知,作为一种理想的真三维立体显示技术,数字全息三维显示技术近些年来正在迅猛发展,随着全息记录材料、计算全息算法理论、计算机技术、图像处理技术等相关领域的不断发展,全息显示会朝着实时动态、更大尺寸、更高分辨率、更方便快捷的方向不断前进。一旦成熟,数字全息三维显示技术必将在工业生产,娱乐电影与游戏,医疗卫生,宇航军事等领域得到广泛应用。

参考文献:

- [1] 田丰,廖薇,刘锦高. 基于DLP的自由立体显示系统构建[J]. 电视技术, 2010, 34(3): 31-34.
TIAN F, LIAO W, LIU J G. Realization of auto-stereoscopic display system based on DLP [J]. *Video Engineering*, 2010, 34(3): 31-34. (in Chinese)
- [2] 于瀛洁,蔡明义,张之江. 柱透镜光栅自由立体显示中几何参数间关系分析[J]. 光电子技术, 2010, 30(1): 10-15.
YU Y J, CAI M Y, ZHANG ZH J. Analysis for geometric parameter relation of lenticular sheet based autostereoscopic [J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, 30(1): 10-15. (in Chinese)
- [3] 黄涛,朱秋东,王涌天,等. 立体显示中的垂轴放大率[J]. 光子学报, 2010, 39(1): 116-118.
HUANG T, ZHU Q D, WANG Y T, *et al.*. Paraxial magnification of stereoscopic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(1): 116-118. (in Chinese)
- [4] 刘泽晟,李大海,郝敦博,等. 狭缝光栅自由立体显示器的优化设计[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2010, 47(2): 317-321.
LIU Z SH, LI D H, HAO D B, *et al.*. Optimum design of the auto-stereoscopic display using parallax barrier [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2010, 47(2): 317-321. (in Chinese)
- [5] KLEINBERGER P. Systems for three-dimensional viewing and projection; US, 6252707 [P/OL]. 2001-01-21. <http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?wo=1997026577>.
- [6] EZRA D, WOODGATE G J, OMAR B A, *et al.*. New autostereoscopic display system [J]. *SPIE*, 1995, 2409: 31-40.
- [7] PASTOOR S, LIU J, RENAULT S. An experimental multimedia system allowing 3-D visualization and eye-controlled interaction without user-worn devices [J]. *IEEE Trans. on Multimedia*, 1999, 1(1): 41-52.
- [8] SANG X Z, CHOI S, DOU W H, *et al.*. Demonstration of a large-size real-time full-color three-dimensional display [J]. *Optical Letters*, 2009, 34(24): 3803-3805.
- [9] 谢小燕,刘旭,林远芳. 体三维显示系统中基于集合近似法的灰度偏差研究[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1508-1514.
- XIE X Y, LIU X, LIN Y F. Study on gray scale deviations in three-dimensional volumetric display system based on geometric approximation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 29(6): 1508-1514. (in Chinese)
- [10] 曾吉勇. 折反射全景立体成像[D]. 成都: 四川大学, 2003.
ZENG J Y. *Catadioptric omnidirectional stereo imaging* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003. (in Chinese)
- [11] 徐韡,刘向东,刘旭,等. 基于3DS MAX信息源的体三维显示技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(11): 1723-1727.
XU H, LIU X D, LIU X, *et al.*. Volumetric 3D display technique on image information derived from 3DS MAX [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(11): 1723-1727. (in Chinese)
- [12] 邢建芳,龚华军,沈春林,等. 基于数字显微镜和旋转扫描技术的体三维显示器[J]. 光电子·激光, 2008, 19(8): 110. 1-510. 1.
XING J F, GONG H J, SHEN CH L, *et al.*. A volumetric display system based on DMD and swept volume technique [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008, 19(8): 110. 1-510. 1. (in Chinese)
- [13] GOODMAN J W. 傅里叶光学导论[M] 3版. 北京: 电子工业出版社, 2006: 211.
GOODMAN J W. *Introduction to Fourier optics (the third edition)* [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 211. (in Chinese)
- [14] 陈晓西,刘旭,林远芳,等. 三维物体的计算全息快速算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(1): 54-56.
CHEN X X, LIU X X, LIN Y F, *et al.*. Rapid algorithm for computer-generated hologram of three-dimensional object [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(1): 54-56. (in Chinese)
- [15] LOHMANN A W, WERLICH H W. Holographic production of spatial filters for code translation and image restoration [J]. *Physics Letters*, 1967, 25(8): 570-571.
- [16] BENTON A S, BOVE V M. *Holographic Imaging* [M]. Wiley-Interscience, 2008.

- [17] STANLEY M, SMITH M A G, SMITH A P, *et al.*. 3D electronic holography display system using 100 Mega-pixel spatial light modulator [J]. *SPIE*, 2004, 5249: 297-308.
- [18] 曹玉茹. 全息显示的计算原理, 方法及系统实现 [D]. 合肥: 安徽大学, 2006.
CAO Y R. *Computing principle, methods and system implement on holography display* [D]. Hefei: Anhui University, 2006. (in Chinese)
- [19] 潘武, 田贻丽. 光学全息的数字实现 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增): 15-20.
PAN W, TIAN Y L. Digital implementation scheme of optical holograms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 15-20. (in Chinese)
- [20] 王丁, 李劲松. 白光编码法制作真彩色全息图 [J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2003, 26(11): 101-104.
WANG D, LI J S. 2-D real hologram making with white light recording method [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2003, 26(11): 101-104. (in Chinese)
- [21] 虞祖良, 金国藩. 计算机制全息图 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1984: 5.
YU Z L, JIN G F. *Computer-generated Hologram* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984: 5. (in Chinese)
- [22] 万远红, 张瑾, 浦东林, 等. 一种三维全息图的数字化实现方法 [J]. *光子学报*, 2010, 39(7): 1268-1271.
WAN Y H, ZHANG J, PU D L, *et al.*. Making three-dimensional holograms with a novel digital method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(7): 1268-1271. (in Chinese)
- [23] ZHANG X J, LIU X, CHEN X X. Computer-generated holograms for 3D objects using the Fresnel zone plate [C]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5636: 109-115.
- [24] LI Y, ABOOKASIS D, ROSEN J. Computer-generated holograms of three-dimensional realistic objects recorded without wave interference [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(17): 2864-2870.
- [25] 侯瑞宁. 计算全息三维显示的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
HOU R N. *Study on the three-dimensional display based on computer generated hologram* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- [26] 刘道金, 黄素娟. 基于三维傅里叶频谱的计算全息图 [J]. *光子学报*, 2010, 39(12): 2178-2182.
LIU D J, HUANG S J. Computer generated holography based on 3-D Fourier spectra [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(12): 2178-2182. (in Chinese)
- [27] ABOOKASIS D, ROSEN J. Computer-generated holograms of three-dimensional objects synthesized from their multiple angular viewpoints [J]. *Journal of Optical Society of America A*, 2003, 20(8): 1537-1545.
- [28] 郑华东, 于瀛洁, 程维明. 三维物体空间再现技术中的全息图计算 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 917-924.
ZHENG H D, YU Y J, CHENG W M. Computer-generated hologram calculation for spatial reconstruction of three-dimensional object [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 917-924. (in Chinese)
- [29] TRESTER S. Computer-simulated Fresnel holography [J]. *European Journal of Physics.*, 2000, 21(4): 317-331.
- [30] 周文静, 胡文涛, 郭路等. 少量投影数字全息层析重建实验研究 [J]. *物理学报*, 2010, 12(59): 8499-8512.
ZHOU W J, HU W T, GUO L, *et al.*. Experimental study of digital holographic tomography by a few projections [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 12(59): 8499-8512. (in Chinese)
- [31] ITO T, SHIMOBABA T, GODO H, *et al.*. Holographic reconstruction with a 10- μm pixel-pitch reflective liquid-crystal display by use of light-emitting diode reference light [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(16): 1406-1408.
- [32] 韩超, 韦穗, 权希龙, 等. 数字微镜器件的全息显示 [J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 190-194.
HAN C, WEI S, QUAN X L, *et al.*. Holographic display of micromirror device [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 190-194. (in Chinese)
- [33] PATURZO M, MEMMOLO P, FINIZIO A, *et al.*. Synthesis and display of dynamic holographic 3D scenes with real-world objects [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 8806-8815.
- [34] 郑华东. 数字全息三维立体显示关键技术研究 [D]. 上海: 上海大学, 2009: 57-58.
ZHENG H D. *Study on the key techniques of*

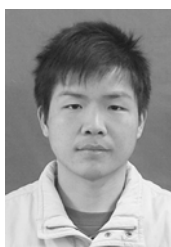
- three-dimensional display based on optoelectronic holography* [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009: 57-58. (in Chinese)
- [35] ONURAL L, YARAS T. Digital holographic three-dimensional video displays [J]. *Proceeding of The IEEE*, 2011, 99(4): 576-589.
- [36] 甘亮勤,杨上供,杜旭,等.真彩色动态全息图制作的新方法[J].*激光与红外*, 2010,40(3):339-342. GAN L Q, YANG S G, DU X, *et al.*. New method of making color dynamic hologram [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(3): 339-342. (in Chinese)
- [37] BURCH J J. A computer algorithm for the synthesis of spatial frequency filters [J]. *IEEE*, 1967, 55(4): 599-601.
- [38] BROWN B R, LOHMANN A W. Complex spatial filtering with binary masks [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(6), 967-969.
- [39] HSIEH M L, CHEN M L, CHENG C J. Improvement of the complex modulated characteristic of cascaded liquid crystal spatial light modulators by using a novel amplitude compensated technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 46(7): 070501-1-070501-3.
- [40] JESACHER A, MAURER C, SCHWAIGHOFER A, *et al.*. Near-perfect hologram reconstruction with a spatial light modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 2597-2603.
- [41] 吕乃光.傅里叶光学[M].北京:机械工业出版社, 2006:270-276. LV N G. *Fourier Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 270-276. (in Chinese)
- [42] GOPINATHAN U, MONAGHAN D S. A projection system for real world three-dimensional objects using spatial light modulators [J]. *Journal of Display Technology*, 2008, (4): 254-261.
- [43] 朱余良,周皓,顾济华.数字全息零级像的空域滤波预处理消除法[J].*激光与红外*, 2010, 40(7): 795-798. ZHU Y L, ZHOU H, GU J H. A pre-process method based on spatial filter for zero-order image elimination in digital off-axis holography [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 795-798. (in Chinese)
- [44] 曾凌,顾济华,周皓.小波变化消除数字全息零级像的应用[J].*苏州大学学报(自然科学版)*, 2010, 26(2): 56-60. ZENG L, GU J H, ZHOU H. Application of wavelet transform for elimination zero-order image in digital hologram [J]. *Journal of Suzhou University (Natural Science Edition)*, 2010, 26(2): 56-60. (in Chinese)
- [45] 钟丽云,张以谟,吕晓旭,等.数字全息中的一些基本问题分析[J].*光子学报*, 2004,24(4):465-471. ZHONG L Y, ZHANG Y M, LV X X, *et al.*. Analysis of some fundamental issue about digital hologram [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004,24(4): 465-471. (in Chinese)
- [46] 杨涛.数字全息再现像质量及应用的研究[D].杭州:浙江大学,2010. YANG T. *Study on the quality and application of the reconstructed image of digital holography* [D]. Hanzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [47] 李俊昌,樊则宾.彩色数字全息的非插值波面重建算法研究[J].*物理学报*, 2010,59(4):2457-2461. LI J C, FAN Z B. Algorithm of the non-interpolation wave-front reconstruction of the color digital holography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(4): 2457-2461. (in Chinese)
- [48] 王华英,赵宝群,宋修法.菲涅耳数字全息成像系统的焦深[J].*光学学报*, 2009,29(2):374-377. WANG H Y, ZHAO B Q, SONG X F. Focal depth of Fresnel digital holographic imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 29(2): 374-377. (in Chinese)
- [49] RIVENSON T, STERN A, JAVIDI B. Compressive Fresnel holography [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(10): 506-509.
- [50] LUCENTE M, HILAIRE P S, BENTON S A, *et al.*. New approaches to holographic video [J]. *SPIE*, 1992, 1732:377-386.
- [51] SHIN S H, JAVIDI B. Viewing-angle enhancement of speckle-reduced volume holographic three-dimensional display by use of integral imaging [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(26): 5562-5567.
- [52] CHOI K, KIM J, LIM Y, *et al.*. Full parallax viewing-angle enhanced computer generated holographic 3D display system using integral lens array [J]. *Optics Express*, 2005, 13(26): 10494-10502.
- [53] BLANCHE P A, TAY S, VOORAKARANAM R. An updatable holographic display for 3D visualization [J]. *Journal of Display Technology*, 2008(4):424-430.

- [54] 郑华东,于瀛洁,代林茂,等.彩色全息显示中液晶空降调制器位相调制偏差的矫正方法[J].物理学报,2010,59(9):6145-6151.
ZHENG H D, YU Y J, DAI L M, *et al.*. Correction method for phase-modulation deviation of liquid crystal spatial light modulator in full-color holographic display [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(9): 6145-6151. (in Chinese)
- [55] 许富洋,李勇,高志强.数字微镜器件闪耀特性及其在全息显示中的应用[J].光子学报,2011,40(3):332-335.
XU F Y, LI Y, GAO Z Y. Blazing characteristics of DMD and its application in holographic display [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 40(3): 332-335. (in Chinese)
- [56] 王大鹏,韦穗.数字微镜器件在视频全息中的应用[J].光学学报,2008,28(1):50-55.
WANG D P, WEI S. Characterization of a digital micromirror device for computer generated holographic video [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 28(1): 50-55. (in Chinese)
- [57] HUEBSCHMAN M L, MUNJULURIB, GARNER H R. Dynamic holographic 3-D image projection [J]. *Optics Express*, 2003, 11(5):437-445.
- [58] 涂铮铮,汤进,史东.基于DMD和分数傅里叶的动态全息体视图显示[J].计算机技术与发展,2009,19(8):247-250.
TU ZH ZH, TANG J, SHI D. Dynamic holographic stereogram display based on DMD and fractional Fourier transform [J]. *Computer Technology and Development*, 2009, 19(8): 247-250. (in Chinese)
- [59] 史东.体视全息图显示的理论及实验[D].合肥:安徽大学,2007.
SHI D. *The principle and experiment of holographic stereogram* [D]. Hefei: Anhui University, 2007. (in Chinese)
- [60] ABOOKASIS D, ROSEN J. Three types of computer-generated hologram synthesized from multiple angular viewpoints of a three dimensional scene [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(25): 6533-6538.
- [61] YAIR R, ADRIAN S, JOSEPH R. Compressive multiple view projection incoherent holography [J]. *Optics Express*, 2011, 7(19): 6109-6118.

作者简介:



马建设(1969—),男,河南永城人,博士后,副研究员,2000年于哈尔滨工业大学获博士学位,2003年于清华大学仪器科学与技术博士流动站完成博士后,现为清华大学深圳研究生院先进制造学部副主任,主要从事交互投影及成像技术方面的研究。E-mail: mjs888@126.com



夏飞鹏(1988—),男,湖北武汉人,硕士研究生,2010年于华中科技大学获学士学位,主要从事数字全息三维显示方面的研究。E-mail: longsky1107@126.com



苏萍(1984—),女,河南鹤壁人,博士后,2005年、2010年于清华大学分别获得学士、博士学位,现为清华大学深圳研究生院先进制造学部博士后,主要从事先进显示技术、三维显示系统、全息三维显示方面的研究。E-mail: su.ping@mail.sz.tsinghua.edu.cn



潘龙法(1946—),男,上海人,研究员,博士生导师,1970年毕业于清华大学,现为清华大学光盘国家工程研究中心主任,主要从事光盘存储领域的研究。E-mail: plf-om@mail.tsinghua.edu.cn

(本栏目编辑:李自乐)