

全息光学调研报告

——数字化全息技术综述

杨博涵

PB20000328

摘要：在数字全息术蓬勃发展的背景下，笔者以数字全息的发展历史为主线，综述了数字全息技术领域中的关键的里程碑技术，介绍了自干涉非相干数字全息的实现方法，以及 3D 全息成像的多种技术类别。

关键词：全息术；数字全息技术；计算全息

1 引言

物理学家 Dennis Gabor 因发明全息术被授予 1971 年诺贝尔物理学奖。全息术是一种可以记录光波前（包括其幅度和相位）并重建的技术，其主要利用光的衍射来产生虚拟三维图像。先驱者们在很早就预言全息是实现完美 3D 显示的最终方法，这是因为全息术是目前可满足适配人类视觉系统光学要求的唯一方法。多年以来，研究者们都在为实现这一目标不断努力。

为了更加高效的处理，全息图的数字化将成为必然。数字全息技术（Digital Holography）是在传统全息的基础上利用 CCD 等光电器件代替传统银盐干板，记录被测样品的全息图并存储到计算机中，然后通过数值计算重构出被测样品的振幅和相位图像，从相位图像中进一步解析出样品三维形貌或折射率分布等多种信息的一种测量手段。该技术具有快速（全场成像）、无损（非接触）、无需荧光标记等优势。依靠计算机制作全色全息图，用数字化的计算方法制作全息图可以更好地平衡图像的颜色，并对数量很大的组合图像进行记录，因此也被称为计算全息技术，用其制作的全息图称作数字全息图或计算全息图[1]。

随着计算机的快速更新迭代，数字全息技术将主要应用在空间滤波、全息及莫瑞计量、光学全息的存储与处理以及激光的扫描等方面，是一门正在发展中的新兴学科。本文将综述数字全息图技术的发展历程和特点。

2 数字合成全息图

数字全息技术发展从合成全息图开始。合成全息图是利用三维物体一系列带有视差信息的二维像综合而成的全息体视图，它除了具有大视场、大景深、白光再现优点之外，还可综合出动感和真彩色。前期的合成全息图利用彩虹全息技术，分 3 步完成：

1. 摄取三维物体带有不同视差信息的一系列二维像。
2. 利用横向面积分割技术将不同视差的二维像记录为一系列沿水平方向排列的条形

全息图，称为初级视差全息图。

3. 用初级视差全息图的再现像记录白光再现的合成全息图。

20 世纪之交, 美国的 Zebra Imaging 公司发明了最新的数字式合成全息图, 在全息术研究领域掀起了一场数字化变革[2], 如图 1。

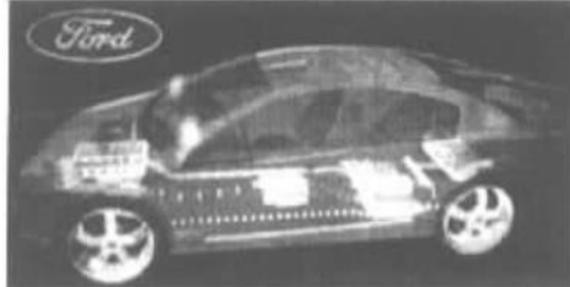


图 1 世界上最大的数字式合成全息图

它的主要特点是: a. 全息图的尺寸可以任意大 b. 由于是数字合成, 所以无需使用真实物体, 不仅可合成任意虚拟的物体和场景, 还能透视物体内部结构 c. 全视差、大视场、大景深 d. 无论从任何角度都可观察到不失真的真彩色像, 这是普通彩虹全息图无法做到的。

Zebra 数字合成全息技术为三维全息显示开辟了前所未有的应用前景, 自此之后, 数字全息技术蓬勃发展。

3 自干扰非相干数字全息

随后, 更加先进的自干扰非相干数字全息技术出现。自干扰全息术是记录非相干照明场景全息图的已知方法。自干涉原理表明, 来自同一物体点的任何两个波都是相互相干的; 因此, 这些波可以相互干涉。在不相干照明的情况下, 任何两个不同的源点是相互不相干的, 自干涉特性成为获得干涉图案从而记录全息图的唯一方法。

菲涅耳非相干相关全息术 (FINCH) 作为一种无需扫描即可记录不连贯的数字全息图的方法被提出[3]。FINCH 的概念受到自干扰数字全息系统的启发, 并从那时起刺激了许多研究。一种有效的 FINCH 系统的方案如图 2 所示。

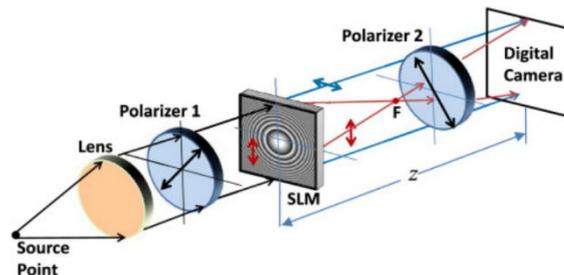


图 2 FINCH 用于记录非相干数字全息图的光学方案

FINCH 已被用于许多应用，如 3D 成像，荧光显微镜，超分辨率，图像处理和具有切片能力的成像。FINCH 通过启发其他基于衍射相位孔径的数字全息系统，如傅里叶不相干单通道全息（FISCH）和编码孔径相关全息技术，发挥了重要作用，图 3 为改进型的 FISCH 的一种实现。

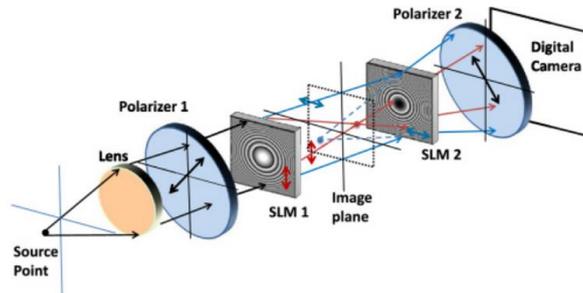


图 3 FISCH 用于记录非相干数字全息图的光学方案

在 FINCH 的推动下，高保真、高效、高密度的全息记录技术迅速发展，促进了虚拟现实和增强现实技术中用数字式合成全息显示器取代传统的图像显示设备的研发。

4 3D 全息显示

当然，除了采集，如何更加逼真的显示图像也是研究方向之一[4]。计算机数字全息的出现极大地推动了全息计算的发展。利用基尔霍夫和菲涅尔衍射理论计算由相位板在特定衍射距离上产生任意图像。但是 10^{15} b/s 级别 (720p video) 的数据比特率需求让计算变得庞大且耗时。而这需要更为简洁的全息计算算法，并且对应的针对全息计算的特定硬件平台也非常必要。

为了生成高质量的全息图形，以 3×10^{15} b/s 比特率为例，大概需要 23 万个 4K 空间光调制器（SLM），15000 台电脑来处理对应的数据，这些听起来很荒唐的数字再一次体现了全息 3D 显示的实现难度之大。

全息数据生成器件和方法通常可分为以下几类：

1. 硅基集成的液晶调制器：分辨率高，但液晶的刷新速率低。
2. 微机电系统：刷新率快，高集成度，但目前器件效率低。德州仪器处于领先地位，其下一代的高效率的相位调制器也正在研发。
3. 研发可实时刷新的全息材料：比如光折变聚合物，声光材料。
4. 相位阵列光子集成芯片：微纳尺度的相位阵列由一系列光波导组成并实现晶圆尺寸的大规模集成，如图 4，这些相位阵列通过片上的声光或热光调制器来改变其相位，并用光栅耦合出射。其优点是快速，相位易控制，片上大规模集成。缺点是相位分辨率较低，导致有较大的衍射旁瓣。

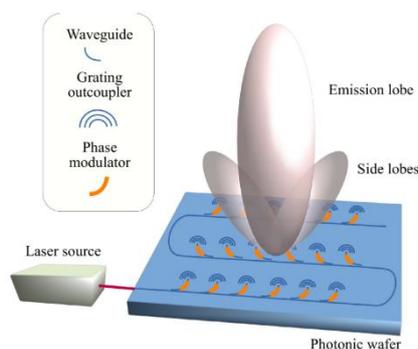


图4 相位阵列光子集成芯片原理图

在硬件的支持下，笔者相信在不久的将来能开发出真正意义上的全息电影和全息电视，立体眼镜、头盔显示器等仪器将极大地增强人们对虚拟世界的交互性、沉浸感和构想性。

5 总结

虽然目前还没有哪一个技术可以同时满足高分辨，高数据量生成且集成度高的需求，但数字全息成像技术仍被认为是实现理想 3D 显示的最终技术。即使目前还没有成熟完善的解决方案，但也无法掩盖人们为其已经做出的巨大贡献，科学家们正前所未有地将项技术变成现实。

经过半个世纪的发展，全息术正向着数字化、光机电一体化的方向发展，其应用领域将不断扩大。王大珩院士曾指出：“20 世纪是微电子的世纪，21 世纪将是光子的世纪”。而全息术将是光学中最耀眼的那颗星，将成为现实与虚拟世界的桥梁。伴随着这一时代进程，全息术必将在科学研究和社会生活的各方面发挥重大的作用。

6 参考文献：

- [1] 谢敬辉, 孙 萍. 全息术的新进展[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23: 133-139.
- [2] 李国建, 曲世鸣, 孙琳, 丁志. 数字全息技术及其实现[J]. 青岛大学师范学院学报, 1998, 15:18
- [3] Rosen J, Hai N, Rai MR. Recent progress in digital holography with dynamic diffractive phase apertures[J]. APPLIED OPTICS, 2022, 61(5):B171-B180
- [4] 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