

全息图 计算机 信息处理

光学模型

(3)

计算机科学 1999Vol. 26No. 10

9-11

## 计算机生成全息图综述

A Survey of Computer-Generated Holography

王元鹏 杨 钦 赵沁平

TB877

(北京航空航天大学计算机系 北京 100083)

**Abstract** This paper introduces the principles and methods of computer-generated holography, discusses the difficulties in current research of computer-generated holography and forecasts its applications.

**Keywords** Holography, Interference, Diffraction, Fringe

## 1. 引言

早在 1965 年, Kozman 和 Kelly 就提出了计算机生成全息图(Computer Generated Holography, 简称 CGH)的概念<sup>[1]</sup>, 那时受计算机速度、容量和显示器分辨率等因素的约束, 直到 80 年代中期以前计算机全息图的研究一直未取得大的进展。在 1989 年, 美国麻省理工学院(MIT)媒体实验室以 S. A. Benton 为首的研究小组开始对计算机生成全息图进行研究, 在美国 ARPA(高级研究计划局)、NSF(国家科学基金会)和 IBM、NEC、Kodak、Hughes Aircraft、Intel、Philips、Sharp、Sony、Sun、Microsoft 等世界著名企业和组织的大力资助下, 应用 Mark Lucent 研究的快速算法, 在计算机生成全息图方面取得了突破性的进展, 于 1990 年首次生成 30mm×30mm×30mm 的实时、三维全息图<sup>[2]</sup>, 1992 年又生成了 150mm×75mm×160mm 真彩的实时三维全息图像<sup>[3]</sup>, 使计算机生成全息图朝着实用化迈出了一大步。MIT 在 CGH 方面取得的进展不仅让人们看到真三维图像, 而且它所带来的信息表达技术的创新将对信息处理领域产生深远的影响。

国内对全息技术的研究主要集中在物理光学领域, 80 年代清华大学、北京理工大学等单位曾开展 CGH 研究, 取得了一些成果, 但由于计算机软、硬件技术的限制以及应用前景不明朗, CGH 研究目前国内已很少。本文基于 MIT 新近取得的进展以及 CGH 在影视艺术、全息防伪、可视化和其它领域的应用前景, 综述了 CGH 的原理、方法、关键技术和发展趋势。

## 2. 计算机生成全息图

## 2.1 三维感与全息图

现实世界中的物体都是三维的, 人类通过视觉感知三维环境, 获得对物体的三维感, 从而得到对客观世界的理解。三维感也叫深度感。在现代心理学上公认有十种暗示用来察觉像的深度<sup>[4]</sup>, 这些暗示分为两大类: 生理学暗示和心理学暗示。生理学暗示包括调节、会聚、双眼差异、单眼移动视差; 心理学暗示包括视网膜像的大小、线形透视、面积透视、重叠、阴影和影子、结构梯度。研究表明, 前者比后者更为重要<sup>[4]</sup>。

早在 19 世纪初人类就开始研究三维成像技术, 主要成果有体视镜、视差挡板技术、集成照相术、柱镜板图片、投影式显示等<sup>[4]</sup>。这些技术只能提供全部深度感的一种或者几种, 不是真正的三维显示。全息技术能够提供所有深度感, 是真正的三维显示。1947 年, 英国科学家 Dennis Gabor 首次提出“全息”的概念, 1960 年发明激光, 1962 年 Leith 和 Upatnieks 提出离轴全息图<sup>[1]</sup>, 全息技术引起广泛研究, 相继提出了多种全息的方法。普通照相只记录光波的强度, 未记录光波的相位, 不能反映物体的三维信息, 而全息技术使用光学原理, 将物体发出的光线以干涉条纹的形式记录下来, 使物体的所有三维信息都存储在记录介质上。当用另外一束激光照射全息条纹时, 根据衍射原理能重现出被记录物体的光线, 从而形成与原物体逼真的三维像。这种光学记录和光学重现的过程称为全息技术<sup>[5]</sup>。

## 2.2 计算机生成全息图的原理

计算机生成全息图是根据光学模型计算出三维物

王元鹏 硕士研究生, 研究方向: 可视化; 杨 钦 博士研究生, 研究方向: 可视化, 计算机图形学; 赵沁平 教授, 博士生导师, 研究方向: 虚拟现实, 人工智能, 可视化。

体的全息条纹,然后再重放出来,其过程如图1所示。

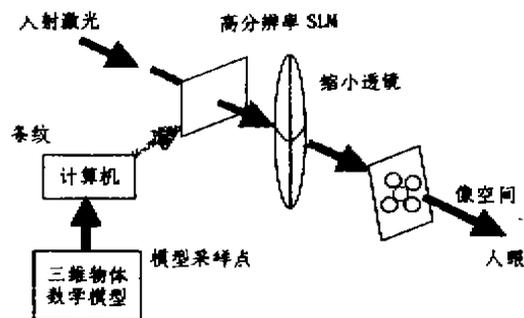


图1 计算机生成全息图的示意图

与光学全息相比,目前计算机生成全息无论在全息图的生成速度和分辨率上还有一定的差距,但计算机生成全息可以对虚拟物体制作全息图,而且随着计算机软、硬件速度的提高,计算机生成全息图正朝着实时动态的目标逼近。计算机生成全息图分为两个步骤:

- 计算全息条纹。根据光学原理计算出三维物体的全息条纹。全息条纹的产生过程主要是三维信息的计算、编码,这个阶段需要大量的计算。物体的三维信息是物体上的点发出的光线的复振幅,包括振幅和相位。要想把物体的三维信息全部保存下来,就必须把振幅和相位同时保存下来。按照对相位记录的不同可以分为两类:直接记录相位和将相位转化为强度信息。相应的产生全息条纹的方法有三种:物波直接编码方法、基于干涉的条纹生成法和基于衍射的条纹生成法。其中物波直接编码法是直接记录相位信息。

- 光学重现。用激光照射记录全息条纹的介质,全息条纹将入射的激光向特定的方向衍射,衍射光线会聚形成三维物体的像。

### 2.3 计算机生成全息条纹方法

2.3.1 物波直接编码法 这种方法对物体发出的传播到全息平面上的光波直接编码。对光波的振幅编码比较容易,它可以通过控制全息图上小单元的透过率或者开孔面积来实现。对光波的相位编码则比较困难,虽然理论上可以使光波通过一个具有二维分布的相位板,但这在技术上十分困难。人们提出了迂回相位编码法,主要有罗曼型迂回相位编码法、四级相位编码法和三阶迂回相位法等<sup>[1]</sup>。

2.3.2 基于干涉的条纹生成法 传统的计算机生成全息图模拟光学全息的干涉过程。根据光线传播的规律,一个点的光波波前传播到全息平面上,同时参考光波的波前也传播到全息平面上,在全息平面的每一个点将这两个波前进行矢量叠加,求得该点的复振幅分布。将物体空间的所有采样点都进行这个叠加过程,最后将全息平面上的每一个点的复振幅进行叠加,

便得到最终的全息条纹。这种方法速度慢,并且有噪声。

2.3.3 基于衍射的条纹生成法 与基于干涉的条纹生成方法不同,基于衍射的方法没有模拟光学的干涉过程,而是根据衍射原理,从成像点反向运算,得到全息条纹。衍射公式为:

$$\lambda f = \sin\theta_1 - \sin\theta_2 \quad (1)$$

其中 $\lambda$ 是条纹的频率, $f$ 是入射激光的频率, $\theta_1$ 是衍射角, $\theta_2$ 是入射角。可以看出,如果要求入射光线透过全息平面某一点后朝某一个角度 $\theta_2$ 衍射,全息平面上该点处必须含有频率为 $f$ 的条纹。基于上述原理,麻省理工学院的 Lucent 提出了全息元素法,取得了比较好的效果<sup>[6]</sup>。

### 2.4 光学重现

光学重现是利用生成的全息条纹将入射光向特定的方向衍射,衍射光线会聚,形成原物体的三维实像。

全息条纹一般被记录到空间光调制器(spatial light modulator,简称 SLM)上。SLM 是一种可以对某光波的波前的某些性质进行调制的器件。例如通过吸收调制其振幅和强度,通过折射率对相位进行调制或通过旋转对偏振态进行调制等。作为输入转换器件及信号变换器件,以及对光波前进行一些基本处理操作的能力使此种 SLM 成为光信息处理中的一个关键部件。按照 SLM 携带的信息信号是电的还是光的区别,可将 SLM 分成为两种主要的类型:电寻址的或光寻址的 SLM。按照输入信息信号是否可擦除,可将 SLM 分为静态和动态两种。如果记录介质是稳定的、长期的,则只能进行静态显示,这种方法制作周期较长,一般需经历记录、曝光、显影、重现等步骤;第二种是动态显示,这种方法使用的介质是可以擦除的,可以重复使用。现在主要的 SLM 有液晶显示器(LCD),可变形微小镜面设备(DMD)和扫描式声光调制器(SAOM)等<sup>[7,8]</sup>。

## 3. 技术难点

计算机生成全息图的研究成果充分说明了软、硬件技术上的可行性,显示出实用化的前景,目前计算机生成全息的困难主要在于全息图的大运算量和大数据量。一个 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 大小的图像,要生成一幅全视差的全息图象,其数据采样量大概是 $100\text{G}$ <sup>[1]</sup>,如此巨大的数据量使计算机生成全息特别依赖于硬件的 CPU 速度和高分辨率显示器,而且要达到实用水平,还必须解决传输问题,从目前的研究成果看,这些硬件在技术上已可行,只是费用太昂贵,在不远的未来硬件的成本有望接近实用水平。

在现有硬件条件下,计算机生成全息主要是通过

减少数据量来进行的,减少数据量的方法有两种,第一种方法是消除竖直视差,只考虑水平视差,这样一幅全息图就成为一系列竖直排列的条纹,其中每一条纹叫做一个全息直线。在竖直方向上的分辨率不用很高,2lp/mm 就可以达到要求,而在水平方向上的分辨率要足够高以能反映微小的变化,一般来说需要 1000lp/mm。这种方法可以使复杂度降低 1000 倍,问题是竖直方向没有立体感。第二种方法是降低观察角度,减小观察区域。从公式(1)中可以看到,在入射角  $\theta_0$  一定的情况下,衍射角  $\theta_1$  越大,则方程左边的值越大,而入射光波长  $\lambda$  是一定的,则  $f$  的值就会越大,要想不丢失全息信息,采样间距也要相应地减小。如果降低  $\theta_0$ ,采样间距也会增加,使得总的的数据量减少。如果衍射角接近 90 度,假设入射角是 0 度,那么根据公式(1),最高采样频率应该是  $2/\lambda$ 。但是如果让衍射角只有 30 度,那么最高采样频率是  $1/\lambda$ 。而让衍射角是 3 度,那么采样频率只有  $0.1/\lambda$ ,比衍射角是 30 度的情况数据量降低了 10 倍。这样处理使全息视角变小。

与全息图的高分辨率相关的另一个问题是空间光调制器(SLM)。在上面的讨论中,假设入射角是 0 度,衍射角是 30 度,要求采样频率为  $1/\lambda$ ,采用 He-Ne 激光,最小的采样间距是 0.6 微米,要求 SLM 的分辨率应该小于或者等于 0.6 微米,这是很困难的。现在最常用的 SLM 是 LCD,其最小的元素是 50 微米,远远大于 0.6 微米,其它的 SLM 也存在分辨率低这个问题。SLM 分辨率低的直接后果就是使得衍射角度变小,三维效果受损。一般方法是在重现的光路中加一个透镜,使得衍射角度增大,但这种方法用在大物体上有困难。

#### 4. 应用前景

计算机生成全息图使得人们可以在同一时刻、不

同的地点看到同样事物的像,或同一时刻、同一地点看到同样的事物做不同的运动,这一特点必然会使计算机生成全息图技术在不少领域得到应用。

作为真正的三维图像,全息图比目前二维表达方法多一维信息。采用计算机生成全息图将计算和显示紧密结合在一起,这种信息表达技术的创新必然会对人类社会产生深远的影响。仅从目前的研究水平看,计算机生成全息在影视艺术、全息防伪、远程教育、医学成像、可视化等方面具有诱人的应用前景。

#### 参考文献

- 1 于美文. 光全息学及其应用. 北京理工大学出版社, 1996. 8
- 2 Hilaire P S, et al. Electronic Display System for Computational Holography. In: Benton S A, ed. SPIE Proc. Practical Holography IV (Soc. Photo-Opt. Instr. Engrs., Bellingham, WA), 1990. 174~182
- 3 Hilaire P S, et al. Color images with the MIT holographic video display. In: Benton S A, ed. SPIE, Practical Holography VI. 1992. 73~84
- 4 大越孝敬[日]. 三维成像技术. 机械工业出版社, 1982. 12
- 5 朱自强,等. 现代光学教程. 四川大学出版社, 1990. 9
- 6 Lucente M. Diffraction-Specific Fringe Computation for Electro-Holography: [Ph. D. Thesis]. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, September 1994
- 7 杨振寰,等[美]. 光学信号处理、计算和神经网络. 母国光等,译. 新时代出版社, 1997. 5
- 8 Mark L. Interactive three-dimensional holographic displays: seeing the future in depth. Computer Graphics, 1997, 31(2): 63~67
- 13 Reimer U, Hahn U. Text Condensation As Knowledge Based Abstraction. 1988. 338~344
- 14 Copeck T, Delisle S, Szpakowicz S. Parsing And Case Analysis In TANKA. Available at: <http://www.site.uottawa.ca/tanka/rs.html>
- 15 Endres-Niggemeyer B, Neugebauer E. Professional Summarizing. No Cognitive Simulation Without Observation. Journal of the American Society For Information Science, 1998, 49(6): 486~506
- 16 Radev D R, McKeown K R. Generating Natural Language Summaries from Multiple On-line Sources. Computational Linguistics, 1998, 24(3)
- 17 吴岩, 刘挺, 王开铸, 陈彬. 中文自动文摘原理与方法探讨. 中文信息学报, 1998, 12(2): 5~16
- 18 新闻报道, 中英文自动摘要集成系统通过鉴定. 国际电子报, 1998-5-25(A8)
- 19 杨晓兰, 钟义信. 基于全信息词典的自动文摘系统研究与实现. 情报学报, 1997(5)
- 20 麻志毅, 姚天顺. 基于情境的文本主题求解. 计算机研究与发展, 1998, 35(4): 344~348
- 21 单永明. 一类规范文本篇章结构的自动标引. 中文信息学报, 1998, 12(4): 47~52
- 22 Text Summarization. Available at: <http://www.csi.uottawa.ca/tanka/ArtDB/bibliography.html>
- 23 刘伟权. 自然语言理解与汉语文本信息处理理论研究. [博士论文]. 北京邮电大学, 1997
- 24 郭祥昊. 语言信息处理理论及自动文摘关键技术的研究. [博士论文]. 北京邮电大学, 1998