

□ 侏闻

理论创世

数字光学的全部复杂原理，都可以归结为“波、计算、像素”三个简洁而优美的概念。

第一个为数字光学筑牢根基的，是法国科学家傅立叶。18世纪末到19世纪初，法国大革命的风暴席卷欧洲，傅立叶在颠沛流离的流放岁月里，提出“世界即音乐，一切皆波动”。在傅立叶之前，学界将视觉和听觉视为两个独立的领域。人们用眼睛看光影，用耳朵听声音，从未想过这两者之间有什么内在关联。而傅立叶用数学证明，无论是听到的声音，还是看到的光影，本质上都是不同频率、振幅、相位的正弦波叠加而成。声音是时间维度的波动，频率决定了音高，振幅决定了响度。视觉则是空间维度的波动，频率对应着图像的细节，振幅对应着亮度，人们看到的五彩斑斓的颜色，不过是红、绿、蓝三通道波动的巧妙组合。

这一理论意味着，复杂多变的视觉场景不再是无法捉摸的“光影魔术”，而是可以被分解、被计算、被重构的波动集合。后来人们熟知的广播、电视等媒介技术，都源于傅立叶的这一思想，而数字光学的诞生，更是以此作为理论起点。

如果说傅立叶解答了世界如何被感知的问题，那么前苏联科学家科捷利尼科夫则直接定义了像素的本质，完成了“连续与离散的无损转换”，为数字视觉打通了“任督二脉”。

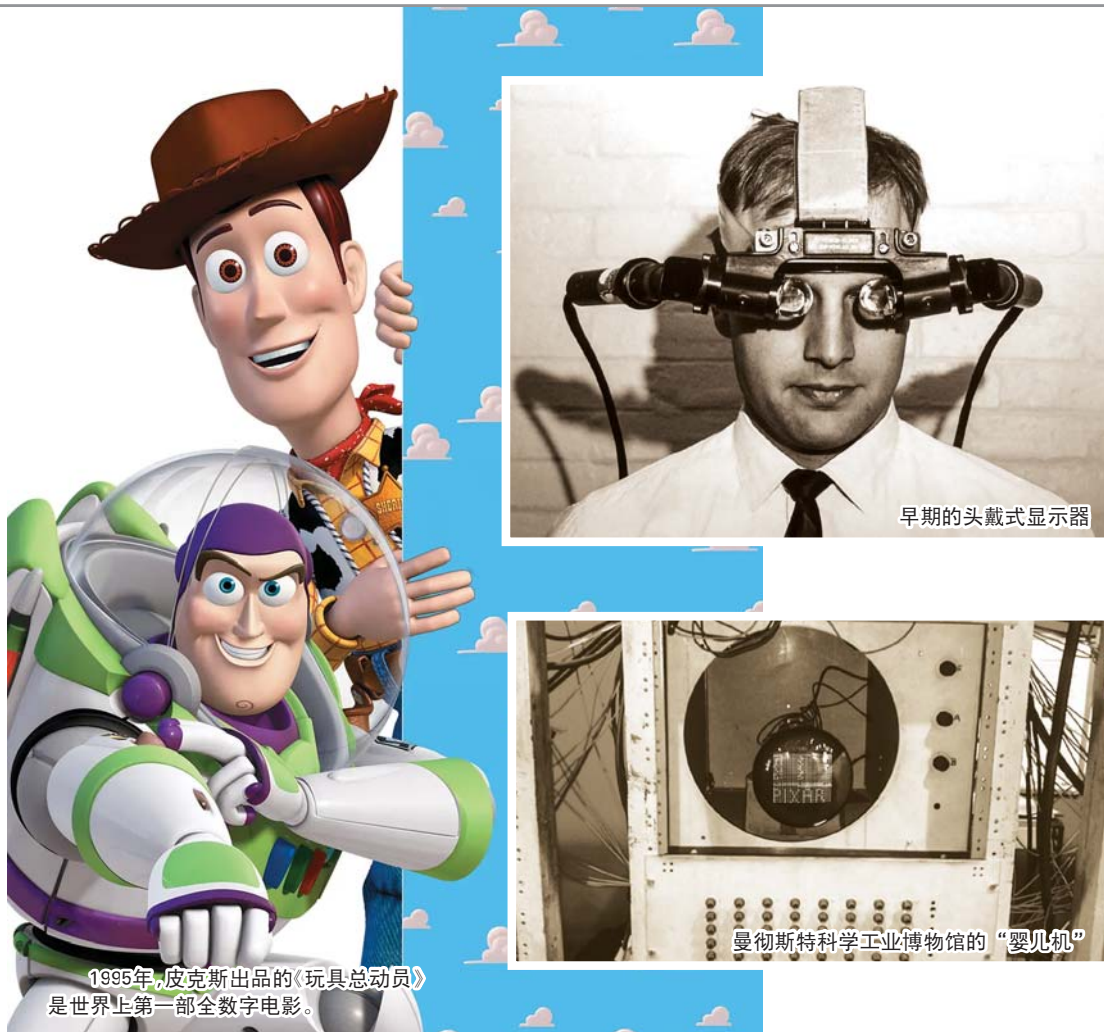
长期以来，采样定理的发现者一直被归功于美国科学家香农。但《像素传奇》还原了一个被遮蔽的真相：1933年，科捷利尼科夫就已完整、清晰地提出了采样定理，比香农整整早了15年，他才是像素真正的发明者。科捷利尼科夫的突破，简单来说，只要采样频率达到信号最高频率的两倍，那些离散的数字样本就能完美还原出连续的模拟信号。

基于此，匠白光给出了像素的定义：像素是对可见世界的数字化视觉样本，是没有形状、没有维度、无法用肉眼直接看到的比特单元。人们在手机、电脑屏幕上看到的那些发光小点，并不是像素本身，只是显像元件。像素的本质，是记录亮度与颜色信息的数字符号，它需要通过扩展波的叠加，才能还原成肉眼可见的连续图像。

此后，英国科学家阿兰·图灵用通用计算理论，赋予了像素凭空创造的能力，让数字视觉从“记录现实”升级为“创造虚拟”，完成了数字光学的最后一块“拼图”。

1936年，图灵提出了通用图灵机模型，认为任何系统化的算法，都可以由一台通用机器来执行。按照他的研究，程序与数据共存于内存中，只要更换程序，就能改变机器的功能，这正是现在使用的所有计算机的本质。图灵的这一理论，让计算机拥有了通用性和增强性。通用性意味着计算机能完成所有可计算的任务，而增强性则依托摩尔定律，让计算机的算力以指数级增长，为数字视觉的发展提供了源源不断的动力。

对数字光学而言，图灵计算理论的影响深远。它让像素不再只能通过相机采集现实中的影像，更能通过计算机的计算，凭



1995年，皮克斯出品的《玩具总动员》是世界上第一部全数字电影。

早期的头戴式显示器

曼彻斯特科学工业博物馆的“婴儿机”

小小像素构筑视觉帝国

清晨刷手机看新闻，午后用平板追剧，深夜在电脑上浏览虚拟展厅……我们的一天，早已被各种屏幕上的光影包裹。可很少有人停下指尖的滑动，问一句：这些清晰流畅的影像从何而来？被大家随口称作“像素”的小东西，到底是什么？计算机图形学先驱匠白光，用一部《像素传奇：从计算机百年成像史到未来视觉帝国》，给出了答案。该书由“波、计算、像素”切入，还原了人类从“被动摹写光影”到“主动创造光影”的历程，纠正了诸多误读，最终告诉大家：那些看似渺小的像素，早已从抽象的数学概念，成长为重塑人类感知方式、构建未来视觉帝国的关键。

空生成不存在的视觉画面。我们现在看到的数字动画、虚拟场景、人工智能绘画，本质上都是基于图灵的计算理论，由像素创造出来的。

技术破晓

如果说三大理论是数字光学的“灵魂”，那么计算机硬件与电影动画技术，就是像素的“肉身”。

《像素传奇》指出，像素能够从抽象的理论概念变为可感知的现实，威廉姆斯-基尔伯恩管的发明起到了关键作用。这项发明，出自英国两位工程师威廉姆斯与基尔伯恩之手。1947年，两人在二战时期雷达技术发展的基础上，成功研发出了阴极射线管内存。该技术能发出阴极射线管的形式，存储在阴极射线管的屏幕上，使得屏幕既是计算机的内存，又是像素的显示器。

比特的可视化，催生了人类历史上最早的像素，也让数字光学从理论走向了现实。同年，基尔伯恩在32×32的点阵上，手动点亮了1024个光点，绘制出了人类历史上第一幅数字图像《黎明曙光》。它标志着数字光学的正式诞生，也宣告人类拥有了用数字创造光影的能力。

1948年6月21日，他们两人研发的“婴儿机”成功运行，世界上第一台电子存储程序计算机诞生。这台计算机的内存屏幕就是最早的像素显示屏。《像素传奇》用史料证明，像素与计算机天生

就是同源共生的。最早的计算机，本身就是像素显示器；最早的像素，就是计算机内存的可视化单元。

“婴儿机”的诞生，背后有着无数工程师的努力与争论。当时有两种方案，一种是结构复杂但性能稳定的选数管，另一种是结构简洁但尚不成熟的威廉姆斯-基尔伯恩管。最终，两人坚持选择了后者，他们认为，简洁的结构更适合后续的技术迭代，也更符合数字光学的底层逻辑。事实说明，他们的选择是正确的。

在计算机硬件实现突破的同时，电影动画技术也为数字视觉的发展提供了动态逻辑。传统电影的本质，其实是时间维度的采样。胶片上的每一帧都是对动态场景的时间样本，通过连续播放，利用人类的视觉暂留效应，还原出动态的画面。这种逻辑，与空间维度上像素的采样逻辑完全一致。从卢米埃尔兄弟的胶片电影，到迪士尼的传统动画，本质上都是逐帧创造视觉样本。可以说，电影动画技术为数字视觉的动态化提供了借鉴，也让像素从“静态的样本”逐渐发展为“动态的光影”。

20世纪90年代，随着摩尔定律的推进，计算机的算力实现了万亿倍的增长，数字视觉迎来了爆发式发展。1995年，皮克斯出品的《玩具总动员》横空出世，成为世界上第一部全数字电影。数字光学从实验室走向了产业，像素彻底取代了胶片，成为视觉媒介的主流。从此，人类进入了“数字电影时代”。

合流崛起

《像素传奇》将2000年前后的技术变革，定义为“数字大融合”。在这个时代，比特取代了所有的模拟媒介，成为唯一的通用视觉单元。笔墨、相片、电视、电影，所有的视觉载体都被转化为像素，人类进入了“像素汪洋”的时代。

1998年，高清电视信号首次播出，像素开始走进家庭的客厅。1999年，数码相机的成像质量媲美胶片，像素取代了胶卷，改变了人们的拍照方式。2000年，DVD普及，数字影像彻底取代了录像带。2007年，iPhone诞生，开启了移动像素时代，像素从此走进了我们的口袋。

短短十几年间，模拟图像被彻底边缘化，仅存于博物馆的陈列柜和幼儿园的手工课上，数字影像成为人类视觉的主流。从手机屏幕、汽车仪表盘，到虚拟现实、数字电影、电子游戏，像素成为所有视觉媒介的组织法则，无处不在。人们每天刷的短视频、看的电影、玩的游戏、拍的照片，本质上都是由无数个像素组成的。像素已经成为数字时代的视觉通用语言。

这是因为，在模拟时代，一幅画需要画在画布上，一张照片需要印在相纸上，一部电影需要刻在胶片上，它们的传播、复制都受到诸多限制。而在数字时代，一幅数字图像可以无限复制、跨媒介传输、全球共享，不再受画布、胶片、纸张

的束缚。这种变革，不仅降低了视觉创作的门槛，让人人都能成为视觉创作者，更改变了人类的连接方式。

通过回顾这段科技史，《像素传奇》提出，艺术、技术、科学从来不是相互对立的，而是相互融合、彼此成就的。傅立叶的数学理论，为数字视觉提供了支撑依据；威廉姆斯与基尔伯恩的工程技术，让数字视觉从理论落地为现实；皮克斯的动画艺术家，为像素赋予了情感与温度，让冰冷的数字，变成了打动人心的影像。因此，没有科学理论的支撑，技术就会失去方向；没有工程技术的落地，理论就会沦为空谈；没有艺术的加持，技术就会变得冰冷乏味。

也许很多人认为，科学家与工程师是对立的，艺术家与技术人员是对立的，觉得“搞科学的不懂艺术，搞艺术的不懂技术”。但在《像素传奇》看来，创造力从来没有高低之分，无论是科学家的理论探索、工程师的技术突破，还是艺术家的创意表达，都是推动数字视觉发展的有生力量。这种“合一思维”，不仅是对数字视觉技术史的总结，更是对未来创新的指引。

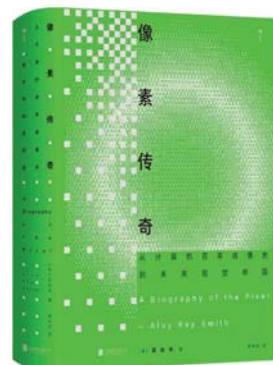
匠白光还在书中描绘了未来视觉帝国的蓝图。他认为，像素将朝着三个方向发展。

一是从二维走向三维。未来，像素将不再局限于平面屏幕，而是会升级为体素。体素将支撑起元宇宙、3D打印、医学成像等领域的发展，让人们能够真正走进虚拟空间，实现身临其境的体验。比如在医学领域，通过体素技术，医生可以更清晰地看到人体内部的结构，提高诊断的准确性；在元宇宙中，人们可以通过体素构建的虚拟形象，与他人进行实时互动。

二是智能像素的诞生。未来的像素将不再是被动的“显示单元”，而是会集成感知能力，成为主动适应环境的“智能单元”。比如，屏幕上的像素可以根据环境光线的强弱，自动调节亮度和对比度；可以根据用户的观看习惯，自动优化画面效果，让视觉体验更加舒适。

三是人工智能与像素的深度融合。人工智能技术将与像素完美结合，实现图像的自动生成、实时渲染、虚拟数字人创造等功能。人们只需要输入一个简单的指令，人工智能就可以利用像素，生成一幅精美的图像、一段生动的动画，甚至一个与真人无异的虚拟数字人。

匠白光强调，无论技术如何迭代升级，数字光学的基本法则没有改变。像素的终极意义是成为人类感知世界、创造世界、连接世界的通用语言，让科技与艺术实现终极合流，让人类的创造力在像素的世界里得到无限释放。



《像素传奇：从计算机百年成像史到未来视觉帝国》
【美】匠白光 著
邵中华 译
后浪 | 北京联合出版公司