

单像素成像及其在三维重建中的应用

孙鸣捷, 张佳敏

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 不同于数码相机使用光电探测器阵列来获取图像, 单像素成像通过使用一系列掩膜图案对场景进行采样, 并将这些掩膜图案中的信息与单像素探测器测量得到的相应光强做关联计算以重建图像。虽然在传统可见光成像领域, 单像素成像性能远不如数码相机, 但许多研究成果表明, 其在复合波长、太赫兹、X 射线以及三维成像等一些非常规应用中具有一定优势。介绍了单像素成像技术的发展历程, 用数学模型对其成像原理进行了解释, 并分析了影响其性能的要害。此外, 文中还对三维单像素成像技术的研究工作及其潜在的应用前景进行了总结和展望。

关键词: 单像素成像; 鬼成像; 压缩感知; 三维成像; 光飞行时间; 立体视觉

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0603003

Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction

Sun Mingjie, Zhang Jiamin

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Unlike a digital cameras using a photodetector array to capture images, single-pixel imaging reconstructs images by sampling a scene with a series of masks and associating the knowledge of these masks with the corresponding intensity measured with a single-pixel detector. Though not performing as well as digital cameras in conventional visible imaging, single-pixel imaging has been demonstrated to be advantageous in unconventional applications, such as multi-wavelength imaging, terahertz imaging, X-ray imaging, and three-dimensional imaging. The developments and working principles of single-pixel imaging were reviewed, a mathematical interpretation was given, and the key elements were analyzed. The research works of three-dimensional single-pixel imaging and their potential applications were further reviewed and discussed.

Key words: single-pixel imaging; ghost imaging; compressive sensing; three-dimensional imaging; time-of-flight; stereo vision

收稿日期: 2019-04-05; 修订日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61675016)

作者简介: 孙鸣捷(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事单像素光学成像技术方面的研究。Email: mingjie.sun@buaa.edu.cn

0 引言

自从 1839 年人类发明相机以来,图像获取技术一直是重要的研究课题。目前,人们使用照相机镜头将目标成像至探测器阵列平面并记录相应的光强以获取图像。随着 CCD (Charge Coupled Device) 和 CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)器件的快速发展,数码相机和手机已经可以依靠指甲大小的芯片来获取分辨率达到千万像素级别的图像。

目前,单个探测器阵列包含像素数已超过 2000 万,在常规应用中,一味增加像素数量不仅没有必要性,而且增加了数据储存空间压力。除了使用探测器阵列外,也可以使用单像素探测器来重建图像^[1-4]。通过产生一系列掩膜图案照射场景,并用单像素探测器记录相应的总光强值,然后将测量值与掩膜图案信息做关联运算,就可以重建出场景图像。事实上,100 多年以前,在人们还没有发明出探测器阵列时,科研先驱们就开始在努力探索只借助一个像素来恢复图像的方法。例如,由 Paul Nipkow 在 1884 年提出使用螺旋孔磁盘的电子望远镜^[5]和 John Logie Baird 在 1929 年提出的电视放映机^[6]中都使用了单像素探测器来记录图像,这种成像技术在当时被称为“点扫描”。随后,科学家们在 1934 年建立了图像扫描的数学理论^[7]。虽然在探测器阵列出现后,点扫描系统不再是可见光成像的首选方案,但对于某些尚不存在探测器阵列或者探测器阵列极其昂贵的波长来说,点扫描(或者线扫描)系统仍在被广泛应用^[8-10]。

1995 年,科学家们通过实验成功实现了“鬼成像”^[11],这一成果重新点燃了人们对单像素成像系统方案的研究热情。该实验最初的设计目的是通过两

个桶型探测器(单像素探测器和收集透镜的组合)来测量自发参量下转换光源(Spontaneous Parametric Down-conversion)产生双光子的纠缠现象从而实现非定域目标的成像^[11-12]。但科学家们很快通过热光源实验^[13-16]和计算成像实验^[2,4,17]证明了鬼成像现象的本质并非量子纠缠,而是经典光学理论中光场关联概念的延伸^[18-19]。

鬼成像有时也被称为受量子理论启发的计算成像技术^[20],其中“计算”是指鬼成像系统获取的原始数据需经过重建算法的处理后才得到传统意义上的图像。从硬件角度来看,使用单像素探测器可能会比使用探测器阵列有着更高的能量收集效率、更低的噪声水平和更小的时间分辨率,而从软件角度来看,随着计算机处理能力的不断增强,复杂图像重建算法对图像信息的挖掘将为单像素成像提供了额外的技术竞争力。例如,压缩感知^[21-24]就是一种代表性的计算成像算法,它利用场景稀疏的先验信息,使单像素成像系统可以用远小于奈奎斯特定理的采样数实现对图像的重建,大大降低了系统收集、传输和存储图像所需的数据量。这种利用压缩感知技术的成像方法被称为单像素成像^[3]。

单像素成像和鬼成像两个研究领域的科学家们很快意识到,这两种成像技术的光学系统结构基本相同。如图 1(a)所示,单像素成像将空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)放置在相机镜头的焦平面上,SLM 将不同的掩膜图案显示在 SLM 以调制图像,之后使用单像素探测器记录相应调制光强值;而鬼成像,如图 1(b)所示,使用 SLM 产生不同的结构光来照明场景,再使用单像素探测器测量反射或透射的光强值。在这两种结构中,物体和 SLM 都是

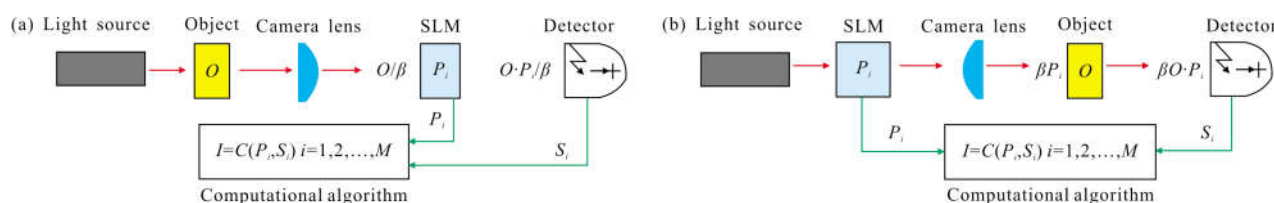


图 1 两种成像结构的示意图

Fig.1 Schematics of two imaging architecture

关于它们之间的透镜形成共轭关系的。

为避免混淆,下文中将鬼成像和单像素成像统称为单像素成像。虽然在常规的可见光成像领域,单

像素成像的系统性能远不如探测器阵列,但大量研究成果表明,在复合波长^[25-29]、太赫兹^[30-31]、X 射线^[32-34]、时间测量^[35-37]以及三维成像^[38-43]等难以使用传统相

机进行测量的非常规成像应用中,单像素成像具有一定优势。文中主要讨论如何利用单像素成像来获取场景中物体的三维信息。下文中将基于图 1(a)中的焦平面调制的系统结构进行讨论。

1 三维单像素成像

1.1 单像素成像的数学理解

从数学的角度来说,一幅灰度图像可以看作一个二维数组,数组中每个元素的值代表物体相应空间位置的反射率。如果将这个二维数组展开为一维数组,则图像可以表示为 $I=[i_1, i_2, \dots, i_N]^T$,重建图像的过程等价于确定 I 中 N 个未知数的过程。点扫描的方法可理解为一次测量一个未知数,然后依次测量数组中所有的未知数来获得图像。这种单点扫描方法的成像时间与 N (即图像中像素点的个数)成正比,当 N 增加时,成像时间会相应增加。数码相机采用含有 N 个像素的探测器阵列来同时测量图片中的 N 个元素,从而解决了成像时间过长的问题。然而在紫外光谱或者时间相关单光子计数等非常规应用中,往往不存在成熟的探测器阵列来进行测量,这就需要借助单像素成像来获取图像。单像素成像系统中,相机镜头将图像 I 成像至放置在透镜焦平面处的 SLM 表面上,SLM 显示掩膜图案 P_i 并调制图像 I ,然后利用单像素探测器测量反射光或透射光的总强度,也就是 P_i 和 I 的内积:

$$s_i = P_i \times I \quad (1)$$

式中: $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN}]$ 是从二维掩膜图案变换得到

的一维数组。使用单像素系统进行 M 次测量,可以得到以下线性方程组:

$$S = P \times I \quad (2)$$

式中: $S = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T$ 是由 M 个测量值组成的一维数组; $P = [P_1, P_2, \dots, P_M]^T$ 是一个 $M \times N$ 的二维数组,这里称为测量矩阵。这样,重建物体图像的问题转化成了利用 M 个线性方程求解出 N 个独立未知数 (i_1, i_2, \dots, i_N) 的问题。若要公式(2)有唯一解,则需满足 $M=N$ 以及 P 是正交矩阵,否则公式(2)就是不恒定方程。如果满足上述的两个条件,图像可以根据以下等式重建:

$$I = P^{-1} \times S \quad (3)$$

测量矩阵 P 最明显的选择就是单位矩阵 $E_N^{[3-4,49-51]}$ 。但是,由于绝大多数自然场景都是稀疏或者可压缩的,即可以使用合适的基向量来表示,这种逐点扫描的方式似乎效率不高。更重要的是,在公式(2)的要求下,这些稀疏基形成的测量矩阵也是正交的,比如 Hadamard 矩阵^[27,52-54]、傅里叶^[47,55-56]、小波^[57-60]等都是单像素成像测量矩阵的常规选择。因此,可以在不影响图像的重建质量的情况下采用欠采样策略,即按重建权重大小对稀疏基进行排序,选择最靠前的 M 个来进行测量^[27,55,57,61]。如图 2 所示,在 $M \ll N$ 的条件下,重建图像质量下降非常有限。需要注意的是,与压缩感知中只需要假设场景具有一般稀疏性不同,正交欠采样策略需要对场景有具体的先验知识,即进行一次完整的正交采样。这一想法与图像压缩技术,如 JPEG 等的思路更为接近^[62]。

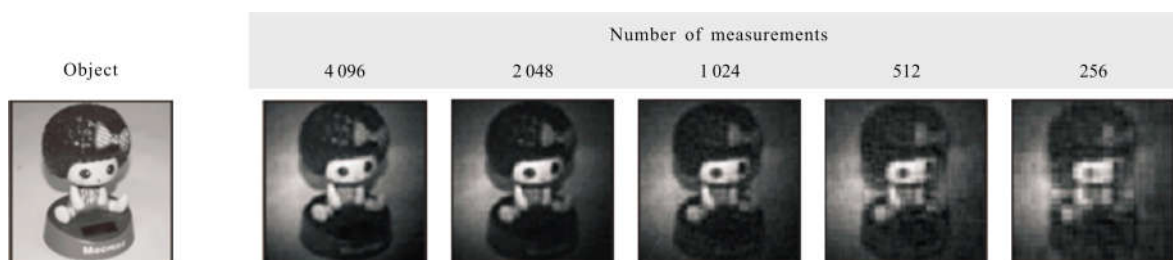


图 2 不同测量次数下单像素成像实验重建的图像(64 pixel×64 pixel)

Fig.2 Image reconstructed (64 pixel×64 pixel) by single pixel imaging experiment under different measurement times

如果测量矩阵 P 并非正交矩阵,则事情会变得更加有趣。在单像素成像研究的早期阶段,科学家们使用激光器照射旋转毛玻璃产生随机掩膜图案以形成所谓的“赝热光源”^[10-11],这种随机图案形成的是

非正交的测量矩阵。基于经典光学理论中光场关联的理论,重建算法根据测量得到的光强值对相应的掩膜图案进行加权求和,从而重建图像场景^[2,4,10-11,63]。由于测量光场的部分相关特性以及重建算法的不成

熟,即使在测量过程中满足 $M \gg N$ 的条件,所得到图像的信噪比也很低。科学家们随后提出了一系列提高信噪比的方法^[64-69],其中最常用的方法是差分鬼成像技术^[64]。

幸运的是,2006年 Candès 和 Tao 在信息理论领域的先驱性工作表明,通过使用与信号不相干的稀疏基对信号进行(伪)随机的压缩采样,可以使用两种方法从 M 次测量值($M \ll N$)中恢复信号:匹配追踪和基追踪^[70]。这个理论的提出,对单像素成像需要大量测量以提高图像质量的问题,给出了完美的答案。简而言之,对于基于压缩感知的单像素成像,如果图像 I 在 N 维正交基 Q 下具有 n 个稀疏表示,并且测量矩阵 P 和正交基 Q 的乘积(即 $P \times Q$)满足 RIP 条件(Restricted Isometry Property),则可以通过使用 P 中的掩膜图像对场景采样,使用单像素探测器记录 M 次测量的测量值,从而稳定的重建出图像 I ,其中 $M \sim n \log(N/n)$ ^[71]。对于压缩感知的理解不是文中的讨论重点,感兴趣的读者可以参考 Candès, Donoho 和 Baraniuk 等人的工作^[21-24]。

值得一提的是,单像素成像中图像形成时间由两部分组成:采集时间(即执行 M 次测量的时间)和重建时间(即用重建算法处理实验数据的时间)。使用压缩感知可大大降低重建所需的测量次数,但后续的凸优化运算通常耗时巨大,这会限制单像素成像在实时成像中的应用。当然,在不需要实时呈现和分析图像的前提下,利用压缩感知可以使成像系统实现高动态的数据采集^[71]。而使用正交测量矩阵时,其重建算法通常具有线性迭代性质。这一重建算法不仅计算量远小于压缩感知算法,而且能在数据采集的同时进行多线程并行处理,使图像形成时间最小化。使用正交矩阵来测量也存在局限性,其重建图像的分辨率与所需的测量次数成正比,即使在测量过程中使用自适应算法也不能显著降低测量次数^[27,57,61]。

1.2 单像素成像的性能

传统数码相机的系统结构与单像素成像的系统之间唯一的区别就是数码相机中的探测器阵列被 SLM 和单像素探测器的组合所取代。因此,SLM 和单像素探测器的性能直接决定单像素成像的性能。

1.2.1 SLM

在单像素成像中可以使用多种形式的空间光调制器,例如旋转的磨砂玻璃^[10-11]、刻有预设掩膜图案

的定制散射板^[39,72]、液晶器件(Liquid-crystal Device, LCD)^[2,4]、数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)^[27-28]、发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)阵列^[43,73]和光学相控阵(Optical Phased Array, OPA)^[74-75]等。

(1) 空间分辨率

在单像素成像中,重建图像分辨率由掩膜图案的空间分辨率决定,而掩膜图案的空间分辨率又受限于 SLM 的空间分辨率。常用的 DMD 分辨率为 1024×768 ,比一般商用数码相机的分辨率要小。但是,采用可编程 LCD 或 DMD 模块可以灵活的执行采样过程,从而在信噪比^[53]、频率混叠抑制^[76]和局部分辨率^[77]等方面提高单像素成像的性能。

(2) 数据采集时间

在单像素成像中,获得一幅图像所需要的时间是单个掩膜图案投射的时间和重建所需的测量量 M 两者的乘积。单像素成像中经常选择 DMD 模块来进行调制,其常用的调制频率为 22 kHz。在不使用压缩采样的情况下,单像素成像获取一幅 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的图像所需要的采集时间为 46.5 ms ($1024/22 \text{ kHz}$),帧频为 21 帧/s,这无法满足高动态测量的要求。最近的一些研究表明,利用 LED 阵列^[73]、OPA^[74]等光电元件的快速开关特性,可以将调制频率提高到 1 MHz 以上,并有可能达到 GHz 的量级。

(3) 光谱特性

对于磨砂玻璃和刻有预先设计的掩膜图案的定制散射板,工作光谱的范围由制造材料决定。在使用 LCD 和 DMD 的时候,它们的透射或反射特性决定了可测量波长的带宽。在使用这两种设备的情况下,使用单像素成像通常可以测量较大的波长范围,这使得利用单像素成像体制对宽光谱成像成为可能。对于 LED 阵列和 OPA,光谱的宽度取决于发光元件,通常可探测的波长范围较窄。

1.2.2 单像素探测器

由于单像素探测器能够探测到的波长范围比探测器阵列更宽,因此单像素成像比数码相机对检测对象的选择范围更广。首先,几乎整个电磁波谱的任何波长都存在相应的单像素探测器;更重要的是,任何先进的探测器在开发出探测器阵列之前,会先以单像素探测器的形式出现。因此,单像素成像系统总能比探测器阵列更早的使用最尖端的探测器进行成像。例如,通过使用具有单光子灵敏度的单像素探测

器,单像素成像系统能够比使用探测器阵列的成像系统探测更远距离的物体。

当然,这些优势也需要付出代价。不同于探测器阵列可以一次性完成整个场景的测量,在只有一个探测单元的情况下,重建图像所需的多次测量必须在时序上逐一完成。为了弥补这一不足,单像素成像技术需要快速调制的 SLM、高速电子器件和强大的计算能力。

有趣的是总可以在两种极端的测量方法之间做出折衷选择^[78-79]。与使用一个单像素探测器执行 N 次

测量或者使用具有 N 个像素点的探测器阵列进行单次测量的方法都不同,可以使用具有 X 个像素的探测器阵列执行 N/X 次测量。图 3(a)为单像素成像和数码相机处于交换曲线的两端,使用 X 个像素和 N/X 次测量是折衷方法;图 3(b)通过使用四象限探测器,成像系统的数据采集速度提高了 4 倍^[79]。在单像素成像系统中采用这种思想的示意图如图 3 (b)所示,尽管这个成像系统可能不再适用“单像素成像”这个名字,但是由于引入了 X 个单像素探测器,采集时间也相应变少。

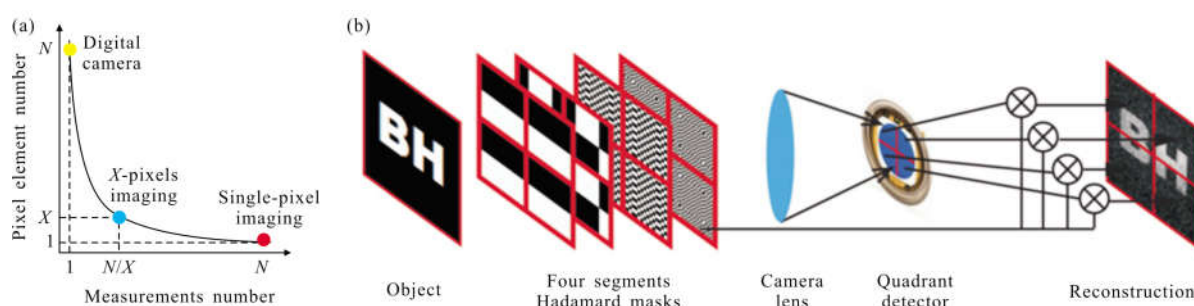


图 3 执行 N 次测量中时空交换的关系

Fig.3 Space-time trade-off relationship for performing N measurements

在进一步讨论之前,表 1 总结了影响单像素成像系统性能的几个要点,并列出了它们可能的备选

表 1 单像素成像中系统要素的概述

Tab.1 Summary of major elements in single-pixel imaging

Element	Choices	Advantages (*) and disadvantages (^)
System architecture	Focal plane modulation	* Active or passive imaging ^ Limited choice on modulation
	Structured light illumination	* More choices for active illumination ^ Active imaging only
	Rotating ground glass	* High power endurance; cheap ^ Not programmable; random modulation only
Modulation method	Customized diffuser	* High power endurance; can be customized ^ Not programmable; complicated manufacturing
	LCD	* Greyscale modulation; programmable ^ Slow modulation; low power endurance
	DMD	* Faster than LCD; programmable ^ Binary modulation; not fast enough
	LED array	* Much faster than DMD; programmable ^ Binary modulation; structured illumination only
Reconstruction algorithm	OPA	* Much faster than DMD; controllable ^ Random modulation; complicated manufacturing
	Orthogonal sub-sampling	* Not computationally demanding ^ Requires a specific prior
	Compressive sensing	* A computational overhead ^ Needs only a general sparse assumption

方案和相应的优缺点。

1.3 从二维到三维

三维成像是一项被广泛研究的课题,目前三维成像可被应用于公共安全、机器人、医学、国防等各种与人们生活息息相关的领域^[30-85]。针对不同的应用领域,科学家们提出了多种三维成像的方法,其中光飞行时间法(Time-of-Fight, TOF)^[50-51,86]和立体视觉法^[87-92]是研究中常用的方法。下面将总结单像素成像中是如何采用这两种方法来实现从二维图像获取到三维场景重建的。

1.3.1 光飞行时间法

光飞行时间的方法通过使用脉冲光照射场景,并将后向散射光被探测器探测到的时间 t_a 与脉冲照明时间 t_0 比较,从而确定场景中的距离信息 $d=\Delta tc/2$,其中 $\Delta t=t_a-t_0$ 为光飞行时间, c 是光速。对于单像素成像,如果可以获取场景中每个空间位置的距离信息,就可以结合深度图(包含距离信息的二维数组)和场景的横截面反射率图来重建三维场景。但是,在泛光照明的条件下使用单像素成像,从场景散射出的

照明激光脉冲会显著展宽,使用光飞行时间法只能得到整个场景的近似距离信息。从一系列展宽的脉冲信号中提取每个空间位置的深度信息的方法如下:

在二维单像素成像中,一个掩膜图案只对应一个测量光强。然而,在脉冲光照明和时间分辨探测器进行测量的时候,一个掩膜图案将对应一系列场景中不同深度位置的光强值。因此,通过将掩膜图案与不同深度下测量的光强值进行关联运算,可以得到每个深度下场景的二维图像,进而得到一个由二维图像形成的三维图像立方。通过对此图像立方中数据的进一步处理,可以提取出场景的反射率和深度信息,从而重构出三维图像。许多研究中^[38-41,43,45,72]都应用了以上的方法,其中 Sun 等人在 2016 年的研究成果最好的展现了这一方法的潜力^[45]。图 4 使用 Sun 等人的实验数据详细解释了该方法的过程,图(a)为从场景中背向散射的照明激光脉冲的原始信号;图(b)为展宽后的信号;图(c)利用探测信号得到的一组包含不同深度图像的立方;图(d)横截面上的每个位置沿纵向轴有强度分布,包含深度信息;图(e)为

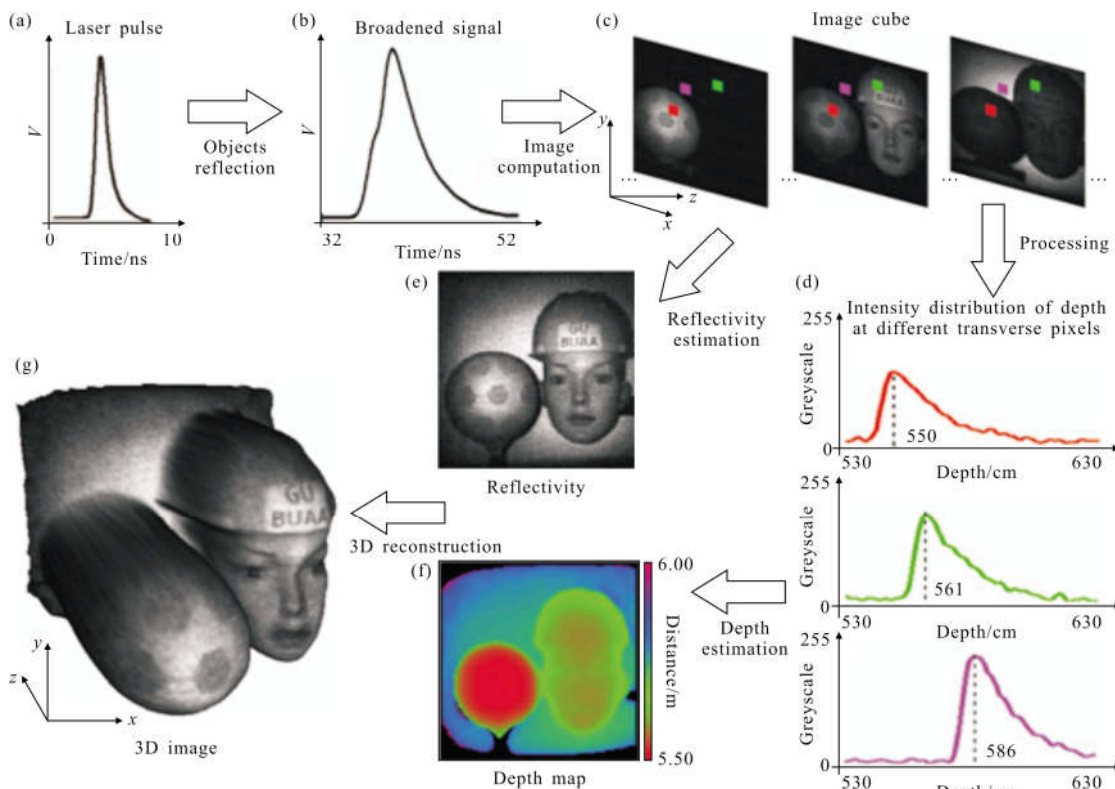


图 4 图像立方方法的概述

Fig.4 Overview of the image cube method

反射率图;图(f)为深度图,可以从图像立方体中解算出来,然后用于重建;图(g)为场景的三维图像。

这类方法具有比较直观的物理意义:图像立方的本质是一个三维数组,它也是场景内各个空间位置的瞬时测量值的集合,数组内的值也就是带有时间分辨探测器的点扫描成像系统的测量数据^[50-51]。使用图像立方方法时每个深度的二维图像都要重建,因此需要进行大量计算。利用正交测量矩阵来重建二维图像可以有效减少重建时的计算次数,而利用压缩感知只会进一步增加数据处理的负担。

罗切斯特大学的 Howland 等提出了另一种恢复深度图的方法^[40],该方法虽然在物理意义上较为抽象,但大大减少了三维重建时的计算量,更高效快捷。该方法不使用测量数据直接恢复深度图 I_D ,而是通过先计算场景横截面的二维反射率图 I 与深度图 I_D 的点积 $I_Q = I \cdot I_D$ 再去进一步计算深度信息。其中二维反射率图 I 可以由标准的单像素成像过程获得。 I_Q 满足以下方程:

$$S_Q = P \times I_Q \quad (4)$$

式中: $S_Q = [\sum_{j=1}^J (s_{1j}t_j), \sum_{j=1}^J (s_{2j}t_j), \dots, \sum_{j=1}^J (s_{Mj}t_j)]^T$ 是一个一维数组,数组中的每个元素表示在第 i 个掩膜图案的调制下,接收到的光子数 $s_{i,j}$ 与时间 t_j 乘积的累加和, J 是一次测量中记录的离散时间点数量。用同样的方法可以重建出变量 I_Q 的图像,然后除以 I ,就可以解算出深度图 I_D 。作为反射率图像 I 和深度图 I_D 的元素点积, I_Q 这个图像并没有直接的物理意义。由于该方法只需要进行两次图像重构,在不增加大量计算的情况下可以引进压缩感知算法来减少采样次数。

不讨论影响二维单像素成像性能的因素,基于光飞行时间法的三维单像素成像的性能与以下几个方面有关:

(1) 脉冲光的重复频率:一个脉冲对应一次掩膜测量,因此重复频率越高,SLM 显示掩膜图案序列的速度越快;

(2) 脉冲光脉宽:脉宽越窄,飞行时间测量的不确定性越小,来自不同深度物体的后向散射信号之间的叠加就越少,从而提高系统的纵向分辨率;

(3) 单像素探测器的类型:可根据应用情况选择是使用传统的光电二极管,还是使用具有高反向偏

置的光电二极管(例如单光子计数器)。单光子计数器是一种比较适合于微光成像的探测器类型,它可以较快的时间响应到达探测器上的光子。但是由于它在每个测量脉冲信号下只能检测到一个光子,因此总的探测效率非常低。此外,单光子计数器自身的死区时间通常为 10 ns,所以如果探测时较近的目标具有相对较高的被探测概率,那么探测器可能会一直屏蔽较远物体的回光信号。相比之下,在光照强度相对较大的场景中使用高速光电二极管可以记录单个光脉冲的时间响应;

(4) 电子器件的时间间隔和时间抖动:这两个密切相关的参数,它们越小,成像系统的深度分辨率就越好。然而,更小的时间间隔也意味着测量时得到的数据量更多,增加了三维图像重建的负担。

基于光飞行时间的三维成像方法相比于立体视觉^[87-88]或者结构光照明^[93-94]的三维成像方法来说,一个主要的优势就在于光飞行时间法的测量是绝对测量。这意味着当增加测量系统与物体间的距离时,基于光飞行时间法的三维单像素成像系统的深度分辨率不会受到太大影响。因此,它是一种很好的远距离三维测量方法,例如激光雷达^[83]。

1.3.2 立体视觉方法

立体视觉法主要是通过从不同视角同时拍摄两幅或多幅图像来重建场景中的三维图像。但是在重建时,多个图像之间的几何配准位置可能会出现问題,导致重建结果不准确。相反,光度立体视觉技术只在一个固定位置使用不同的照明光采集图像^[89-92]。与立体视觉相比,光度立体视觉中的像素匹配更容易实现,但不同照明光下的图像必须按顺序拍摄,限制了系统的实时性能。

如图 5 所示,在利用立体视觉的三维单像素成像中,一个数字投影仪在物体上投射随机掩膜图案,四个单像素探测器分别安装在投影仪上下左右四个方向上,来测量物体对应方向上背向散射光的光强。通过四个单像素探测器记录的数据以及掩膜图案的信息,可以得到四个观察点位置上观察到的物体的二维图像。通过这四幅图像以及四个观察点之间的几何信息,就可以重建出物体的三维图像。与使用传统数码相机进行三维成像不同,使用单像素成像可以把三维成像系统简化为只需要一个空间光调制器(SLM)、一个相机镜头,以及几个单像素探测器的组

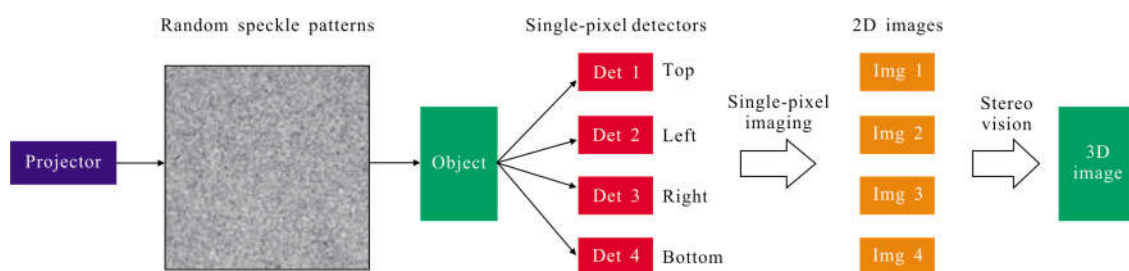


图 5 基于立体视觉的三维单像素成像原理图

Fig.5 Schematic of a stereo vision based 3D single-pixel imaging

合。虽然系统的结构简化了,但是三维重建的质量不会降低^[42]。此外,由于实验装置的简化,图像的同步采集和图像中像素匹配的处理都变得更为简单^[92]。

基于立体视觉的三维单像素成像的性能主要由两个方面决定:一是每一个观察点所采集到二维图像的质量;二是成像系统中观察点之间,观察点与物体之间的几何位置关系。格拉斯哥大学的科学家们分别于 2013 年和 2016 年进行了基于该方法的三维重建实验。相比于 2013 年所做实验中的方法^[42],在 2016 年,研究人员们通过使用高调制速率的 SLM 和正交的掩膜图案,提高了每个观察点上二维图像的质量,从而提升了三维场景重建的质量与速度^[92]。在最近的一项研究中,科学家们使用 LED 阵列代替 SLM,进一步降低了系统的成本^[48]。

在基于立体视觉的三维单像素成像方法中,系统的深度分辨率是一个相对的量,其很大程度上受到系统装置之间几何位置的限制。单像素探测器之间的距离与它们到物体的距离的比值对系统三维深度分辨率影响很大。基于立体视觉的三维单像素成像在近距离的工业检测和物体的三维轮廓提取等领域都有用武之地。

2 结束语

文中简要回顾了单像素成像技术的发展历程,用数学模型对其成像原理进行了解释,并从笔者对单像素成像技术的认识出发浅谈了其工作性能。讨论了两种不同三维单像素成像方法的优缺点以及潜在的应用。

单像素成像技术的发展潜力主要来源于其系统结构的三个方面:

(1) 单像素探测器的使用让单像素成像成为成像技术中测试各种尖端探测器(如单光子计数器)的理

想实验平台。此外,它还提供了一个融合单像素成像的其他成像技术的便捷渠道。例如,在超快时域成像方案中结合单像素成像可带来相应的空间分辨率^[95-98];

(2) 可编程 SLM 的使用为成像提供了额外的灵活性。例如,图像中像素的几何位置可以采用非笛卡尔坐标的方式排列,并且根据应用场景的需要,可以调整成像系统的信噪比、空间分辨率和帧率之间的平衡。但 SLM 自身的空间分辨率和调制速率会限制单像素成像的性能。因此,单像素成像技术的发展需要更高性能的 SLM 器件;

(3) 压缩感知可以使不遵循奈奎斯特定理的压缩采样数据重建出物体图像。使用压缩采样的方法可以在图像采集和传输过程中显著减少数据量,从而不需要采集到完整的图像信息再压缩。随着处理器能力的不断提高,压缩感知算法的计算负担也将不再成为限制单像素发展的因素。

尽管目前单像素成像性能,特别是在可见光谱范围内的成像性能无法与传统的基于探测器阵列的数码相机相比,但测试尖端探测器和验证新成像原理也是一个具有研究前景的领域。与数码相机相比,由于全球市场的需求少和资金投入不足,单像素成像技术并没有任何专门为其开发的器件。然而,随着逐渐涌现的低成本无人驾驶三维传感技术的需求,单像素成像的发展也有可能进入了一个全新的阶段。

参考文献:

[1] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429-R3432.

[2] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.

[3] Duarte M F, Davenport M A, Takbar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal*

- Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83–91.
- [4] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [5] Nipkow P. Optical Disk: German Patent, 30105[P]. 1884–1–6.
- [6] Baird J L. Apparatus for Transmitting Views or Images to a Distance: US, Patent 1699270[P]. 1929–01–15.
- [7] Mertz P, Gray F. A theory of scanning and its relation to the characteristics of the transmitted signal in telephotography and television [J]. *Bell System Technical Journal*, 1934, 13(3): 464–515.
- [8] Kane T J, Byvik C E, Kozlovsky W J, et al. Coherent laser radar at 1.06 μm using Nd: YAG lasers [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(4): 239–241.
- [9] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1716–1718.
- [10] Thibault P, Dierolf M, Menzel A, et al. High-resolution scanning x-ray diffraction microscopy[J]. *Science*, 2008, 321(5887): 379–382.
- [11] Scarcelli G, Berardi V, Shih Y H. Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuations? [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(6): 063602.
- [12] Shih Y H. Quantum imaging [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4): 1016–1030.
- [13] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [14] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Correlated imaging: quantum and classical [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(1): 13801–13802.
- [15] Valencia A, Scarcelli G, D' Angelo M, et al. Two-photon imaging with thermal light [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(6): 063601.
- [16] Zhai Y H, Chen X H, Zhang D, et al. Two-photon interference with true thermal light [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(4): 043805.
- [17] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110.
- [18] Erkmén B I, Shapiro J H. Unified theory of ghost imaging with Gaussian-state light [J]. *Physical Review A*, 2012, 77(4): 140–140.
- [19] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging[J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 949–993.
- [20] Altmann Y, McLaughlin S, Padgett M J, et al. Quantum-inspired computational imaging[J]. *Science*, 2018, 361: 6403.
- [21] Candès E J. Compressive sampling [C]//Proceedings of the 2006 International Congress of Mathematicians, 2006:1433–1452.
- [22] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [23] Candès E, Romberg J. Sparsity and incoherence in compressive sampling [J]. *Inverse Problems*, 2007, 23(3): 969–985.
- [24] Baraniuk R G. Compressive sensing [lecture notes][J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(4): 118–120.
- [25] Studer V, Jérôme B, Chahid M, et al. Compressive fluorescence microscopy for biological and hyperspectral imaging [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(26): E1679–E1687.
- [26] Welsh S S, Edgar M P, Edgar S S, et al. Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23068–23074.
- [27] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285–289.
- [28] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10669.
- [29] Bian L, Suo J, Situ G, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24752.
- [30] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605–609.
- [31] Stantchev R I, Sun B, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1600190.
- [32] Cheng J, Han S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9): 93901–93903.
- [33] Greenberg J, Krishnamurthy K, David B. Compressive single-pixel snapshot X-ray diffraction imaging [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 111–114.
- [34] Zhang A X, He Y H, Wu L A, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation [J]. *Optica*, 2018, 5(4): 374–377.
- [35] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Ghost imaging in the time domain[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 167–170.
- [36] Faccio D. Optical communications: Temporal ghost imaging [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 150–152.

- [37] Devaux F, Moreau P A, Denis S, et al. Computational temporal ghost imaging[J]. *Optica*, 2016, 3(7): 698–701.
- [38] Howland G A, Dixon P B, Howell J C. Photon-counting compressive sensing laser radar for 3D imaging [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(31): 5917–5920.
- [39] Zhao C, Gong W, Chen M, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- [40] Howland G A, Lum D J, Ware M R, et al. Photon counting compressive depth mapping [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23822–23837.
- [41] Zhao C, Gong W, Chen M, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere [J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2): 83–85.
- [42] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844–847.
- [43] Yu H, Li E, Gong W, et al. Structured image reconstruction for three-dimensional ghost imaging lidar[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14541–14551.
- [44] Yu W K, Yao X R, Liu X F, et al. Three-dimensional single-pixel compressive reflectivity imaging based on complementary modulation [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(3): 363–367.
- [45] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [46] Zhang Z, Zhong J. Three-dimensional single-pixel imaging with far fewer measurements than effective image pixels[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2497–2500.
- [47] Zhang Z B, Liu S J, Peng J Z, et al. Simultaneous spatial, spectral, and 3D compressive imaging via efficient Fourier single-pixel measurements[J]. *Optica*, 2018, 5(3): 315–319.
- [48] Salvador-Balaguer E, Latorre-Carmona P, Chabert C, et al. Low-cost single-pixel 3D imaging by using an LED array [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15623–15631.
- [49] Massa J S, Wallace A M, Buller G S, et al. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(8): 543–545.
- [50] McCarthy A, Collins R J, Krichel N J, et al. Long-range time-of-flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(32): 6241–6251.
- [51] McCarthy A, Krichel N J, Gemmell N R, et al. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8904–8915.
- [52] Lochocki B, Gambín A, Manzanera S, et al. Single pixel camera ophthalmoscope[J]. *Optica*, 2016, 3(10): 1056–1059.
- [53] Sun M J, Edgar M P, Phillips D B, et al. Improving the signal-to-noise ratio of single-pixel imaging using digital microscanning [J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10476–10485.
- [54] Wang L, Zhao S. Fast reconstructed and high-quality ghost imaging with fast Walsh-Hadamard transform [J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 240–244.
- [55] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [56] Czajkowski K M, Pastuszczak A, Kotynski R. Real-time single-pixel video imaging with Fourier domain regularization [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20009–20022.
- [57] Aßmann M, Bayer M. Compressive adaptive computational ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1545.
- [58] Yu W K, Li M F, Yao X R, et al. Adaptive compressive ghost imaging based on wavelet trees and sparse representation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7133–7144.
- [59] Rousset F, Ducros N, Farina A, et al. Adaptive basis scan by wavelet prediction for single-pixel imaging [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(1): 36–46.
- [60] Czajkowski K M, Pastuszczak A, Kotyński R. Single-pixel imaging with Morlet wavelet correlated random patterns[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 466.
- [61] Sun M J, Meng L T, Edgar M P, et al. A Russian Dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3464.
- [62] Aravind R, Cash G L, Worth J P. On implementing the JPEG still-picture compression algorithm [C]//Advances in Intelligent Robotics Systems Conference, 1989, 1199: 799–808.
- [63] Cheng X, Liu Q, Luo K H, et al. Lensless ghost imaging with true thermal light[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 695–697.
- [64] Ferri F, Magatti D, Lugiato L, et al. Differential ghost imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [65] Agafonov I N, Luo K H, Wu L A, et al. High-visibility, high-order lensless ghost imaging with thermal light [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1166–1168.
- [66] Sun B, Welsh S, Edgar M P, et al. Normalized ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16892–16901.
- [67] Sun M J, Li M F, Wu L A. Nonlocal imaging of a reflective

- object using positive and negative correlations [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(25): 7494–7499.
- [68] Song S C, Sun M J, Wu L A. Improving the signal-to-noise ratio of thermal ghost imaging based on positive-negative intensity correlation [J]. *Optics Communications*, 2016, 366: 8–12.
- [69] Sun M J, He X, Li M F, et al. Thermal light subwavelength diffraction using positive and negative correlations [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(4):15–19.
- [70] Candes E J, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies?[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406–5425.
- [71] Sankaranarayanan A C, Studer C, Baraniuk R G. CS–MUVI: Video compressive sensing for spatial-multiplexing cameras [C]//IEEE International Conference on Computational Photography, 2012: 6215212.
- [72] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26133.
- [73] Xu Z H, Chen W, Penuelas J, et al. 1 000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2427–2434.
- [74] Komatsu K, Ozeki Y, Nakano Y, et al. Ghost imaging using integrated optical phased array [C]//Optical Fiber Communication Conference. IEEE, 2017: 4.
- [75] Li L J, Chen W, Zhao X Y, et al. Fast Optical phased array calibration technique for random phase modulation LiDAR [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 11(1): 1–10.
- [76] Sun M J, Zhao X Y, Li L J. Imaging using hyperuniform sampling with a single-pixel camera[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 4049–4052.
- [77] Phillips D B, Sun M J, Taylor J M, et al. Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic super-sampling [J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): 1601782.
- [78] Herman M, Tidman J, Hewitt D, et al. A higher-speed compressive sensing camera through multi-diode design[C]//SPIE Defense, Security, & Sensing, 2013, 8717: 871706.
- [78] Sun M J, Chen W, Liu T F, et al. Image retrieval in spatial and temporal domains with a quadrant detector [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1–6.
- [79] Dickson R M, Norris D J, Tzeng Y L, et al. Three-dimensional imaging of single molecules solvated in pores of poly (acrylamide) gels[J]. *Science*, 1996, 274(5289): 966–968.
- [80] Udupa J K, Herman G T. 3D Imaging in Medicine [M]. Boca Raton: CRC Press, 1991.
- [81] Bosch T, Lescure M, Myllyla R, et al. Laser ranging: A critical review of usual techniques for distance measurement [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(1): 10–19.
- [82] Schwarz B. Lidar: Mapping the world in 3D [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 429–430.
- [83] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149–158.
- [84] Cho M, Javidi B. Three-dimensional photon counting double-random-phase encryption [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3198–3201.
- [85] Velten A, Willwacher T, Gupta O, et al. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(3): 745.
- [86] Keppel E. Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1975, 19(1): 2–11.
- [87] Boyde A. Stereoscopic images in confocal (tandem scanning) microscopy[J]. *Science*, 1985, 230(4731): 1270–1272.
- [88] Woodham R J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images [J]. *Optical Engineering*, 1980, 19(1): 139–144.
- [89] Horn B K P. Robot Vision[M]. US: MIT Press, 1986.
- [90] Horn B K P, Brooks M J. Shape from Shading [M]. US: MIT Press, 1989.
- [91] Zhang Y, Edgar M P, Sun B, et al. 3D single-pixel video [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(3): 035203.
- [92] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: A tutorial [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128–160.
- [93] Jiang C F, Bell T, Zhang S. High dynamic range real-time 3D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7337–7346.
- [94] Goda K, Tsia K K, Jalali B. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena [J]. *Nature*, 2009, 458(7242): 1145–1149.
- [95] Diebold E D, Buckley B W, Gossett D R, et al. Digitally synthesized beat frequency multiplexing for sub-millisecond fluorescence microscopy [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(10): 806–810.
- [96] Tajahuerce E, Durán V, Clemente P, et al. Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection[J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 16945–16955.
- [97] Guo Q, Chen H W, Weng Z L, et al. Compressive sensing based high-speed time-stretch optical microscopy for two-dimensional image acquisition [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29639–29646.