单像素成像在三维测量中的应用

姜宏志1,2,李宇曦1,2,赵慧洁1,2*

(1.北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院精密光机电一体化技术教育部重点实验室,北京100191;
2.北京航空航天大学青岛研究院,山东青岛266101)

摘 要: 在条纹投影等传统结构光三维测量技术中,在全局光照的干扰下,无法获得高质量、高精度的 三维测量结果。典型的全局光照效应包括互反射和次表面散射。互反射发生在凹陷的光亮反射表面, 而次表面散射发生在半透明材料表面。单像素成像 (Single-pixel imaging, SI) 技术可以通过没有空间 分辨率的探测器捕获场景,然而,大多数现代数码相机采用传统像素化的图像传感器。在这里,我们提 出了将单像素成像技术扩展到像素化的图像传感器中,将图像传感器上的每个像素都被视为是一个独 立的单像素成像单元,可以同时获取图像。实验表明,这种单像素成像方法可以完全分解直接光照和 全局光照,实现在全局光照干扰下的高质量、高精度三维重建。 关键词: 单像素成像; 互反射; 次表面散射; 三维测量

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0303017

Application of single pixel imaging in 3D measurement

Jiang Hongzhi^{1,2}, Li Yuxi^{1,2}, Zhao Huijie^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, School of Instrumentation and Optoelectronic

Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beihang University Qingdao Research Institute, Qingdao 266101, China)

Abstract: Traditional optical 3D shape measurement methods, such as Fringe projection techniques, cannot acquire high-quality and high-accuracy 3D measurement results in the presence of global illumination. Typical global illumination effects contain interreflections and subsurface scattering. Interreflections occur in concave surfaces with glossy reflection, and subsurface scattering occurs in translucent materials. Single-pixel imaging (SI) techniques can capture a scene through a detector with no spatial resolution. However, traditional pixelated imaging sensors are commonly adopted in most modern digital cameras. Here, we extended SI to pixelated imaging sensors, in which every pixel on an imaging sensor was considered an independent unit that can simultaneously obtain an image. Our experiments show that the SI can completely decompose direct and global illumination. Furthermore, high-quality and high-accuracy 3D profile in the presence of global illumination can be reconstructed.

Key words: single-pixel imaging; interreflections; subsurface scattering; 3D measurement

收稿日期:2019-12-26; 修订日期:2020-02-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目 (61735003)

作者简介:姜宏志 (1978-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学三维测量和数据处理方面的研究。Email: jhz1862@buaa.edu.cn 李宇曦 (1991-), 男, 博士生, 主要从事计算成像与光学三维成像方面的研究。Email: yuxili@buaa.edu.cn

通讯作者:赵慧洁(1966-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事光学成像、三维测量和数据处理方面的研究。Email: hjzhao@buaa.edu.en

0 引 言

三维光学测量技术^[1]由于其具有非接触、高效率 等特点,被广泛应用于工业制造、逆向工程、文物保 护、医疗卫生等领域。结构光法是一种常见的光学三 维测量方法,通过投射结构光图案,使用像素阵列的 传统相机捕获场景图像,并结合三角测量原理对物体 表面的三维坐标进行测量。

然而,基于三角测量原理的结构光三维重建方法 能够获得正确结果的一个重要的假设是光线在被探 测器接收前仅经过了一次反射^[2]。由于被测表面形貌 的复杂性和材料的多样性,在实际测量条件下,探测 器像素所接收到的光线常是来自于不同光源位置处 的混合光,使得上述假设不成立。按照光与被测物体 的作用方式,像素探测器接受到的混合光可进一步被 分解为直接光照 (Direct illumination)与全局光照 (Global illumination)^[3]。直接光照是指在传播过程中 未被散射且仅在场景中反射一次的光,满足上述假 设;而全局光照又被称作间接光照,是指发生散射或 在场景中经过了多次反射或散射的光线,不满足上述 假设,从而导致测量误差或数据缺失。因此,在全局 光照干扰下,二值图案、相移条纹等传统结构光三维 测量方法均无法实现完整和高精度的测量。

互反射和次表面散射是两种典型的全局光照。 互反射发生在凹陷的光亮反射表面,是由一束光照射 到被测物体表面后,反射到被测物其他位置处而形成 的^[4]。次表面散射发生在半透明材料表面及其下方区 域,是光线入射到被测物体后,在物体内部发生散射, 然后从入射点周围出射的现象^[5]。目前在实际工业应 用中,避免全局光照对测量产生影响的一般方法是: 向物体表面喷涂显影剂,使表面反射特性趋向漫反 射,从而消除互反射与次表面散射的影响。然而在很 多应用场景中,被测物是不允许喷涂显影剂的,例如 数控加工中的在位测量和生产流水线上的在线测量 等;还有些物体因为自身的属性不能喷涂显影剂,比 如文物、高温物体等;而且显影剂的厚度会导致额外 的测量误差,在测量后清洗物体表面的显影剂还会引 入额外的工序,大大增加了检测时间和成本。因此, 如何在不喷涂显影剂的情况下避免全局光照对测量 产生影响,是对复杂型面进行完整高精度三维测量的 关键技术瓶颈。

针对此问题,国内外学者进行了初步探索。由于 直接光照不改变投射条纹的空间频率,而间接光照会 降低投射图案的空间频率。基于该原理, Nayar 等人^[6] 提出了利用高频图案分离直接和间接光照的方法,向 场景投射变化的高频图案,使低频的间接光照分量保 持恒定,从而将相机采集到的直接反射分量和低频相 互反射分量分离。Gupta 等人^[7]提出了微相移,将投 射条纹的频率限制在一个高频的窄频带中,从而抑制 相互反射对测量产生的影响。天津大学的王晋疆等 人^[8] 通过高频格雷码结构光识别出相互反射区域,去 除传统格雷码结构光的错误解码结果,并生成相互反 射区域的相机掩模和投射掩模;然后只对掩模区域投 射传统格雷码结构光,得到相互反射区域的测量数 据。由于间接光照具有消偏的特性, Chen 等人^[9]将偏 振差别成像应用于相移条纹投射法,他们在投射器前 放置一个起偏器,使从投射器出射的光变为线偏振 光。在相机前放置一个可以旋转的检偏器,相机成像 两次,检偏器的偏振态一次与起偏器平行,另一次与 起偏器垂直在两次成像的图像中光强不变,用来减小 测量半透明物体的误差。

然而,这些方法都在一定程度上对光传输过程作 出了假设,因此解决的方法不具有一般性,在某些情 况下仍然会出现测量失败或精度降低的问题。例如, 对于高频投射类的方法,其假设场景中只存在低频的 相互反射,因此该类方法仅适用于相互反射的成分为 漫反射和低频镜面反射的情况。而对于线偏振光的 方法,其假设直接光照不产生消偏效应,但由于漫反 射光也会发生消偏,当被测物表面镜面反射较弱时, 该方法无法进行有效测量。因此,需要一种能够更加 通用的方法对探测器像素的混合光进行分解,从而使 全局光照下的三维测量问题真正解决。

单像素成像技术可以通过没有空间分辨率的探测器捕获场景^[10-12]。与大多数现代数码相机对反射 光场进行采样不同,这种成像方法通过空间调制器 (例如投影仪)对入射光场进行编码,从而得到入射光 场视角下最终可被单像素探测器所接受到的光能量, 无论这些能量是由物体所直接反射后被探测到的还 是经过了复杂的散射后才被探测到的。因此,单像素 成像在原理上就为混合光线的分解提供了完善、通用 的理论模型。 单像素成像技术目前已经被广泛应用于光谱探测^[13-15]、红外^[16]、太赫兹^[17,18]、3D^[19,20]和时域^[21-23]信号的采集。文中将单像素成像技术扩展到传统像素化的图像传感器中,将图像传感器上的每个像素都被视为是一个独立的单元,可以同时获取图像。

1 理论分析

三维结构光测量系统由投影仪和相机组成。光 线由投射器发出,经过场景的反射与散射后,被相机 接收。由于全局光照的影响,相机中每个像素所接收 到的光线并不都是直接反射光,还可能包含互反射光 和次表面散射光,如图1所示。





图 1 中黑色的光线为直接光照,该光线照射到物体,被物体反射后直接被相机捕获到。红色的光线为 互反射光,是由一束光照射到被测物体表面后,反射 到被测物其他位置处而形成的。绿色的光线是次表 面散射光线,这部分光线入射到被测物体后,在物体 内部发生散射,然后从入射点周围出射,最终才被相 机捕获到。

根据图 1 可知, 光线从投影仪发出后, 可能经历 直接反射、互反射或次表面散射后被相机捕获。假设 当从投影仪像平面某点**x**'=(u',v')^T处发出光线的能量 为*P*(**x**')时, 相机像平面某点**x**=(u,v)^T处接收到的全部 光能量为*I*(**x**), 此时可定义无量纲的光传输系数*h*(**x**';**x**):

$$h(\mathbf{x}';\mathbf{x}) = \frac{I(\mathbf{x})}{P(\mathbf{x}')} \tag{1}$$

考虑到环境光的影响,相机像素的响应可表达为:

$$I_i(\mathbf{x}) = O(\mathbf{x}) + \int_{\Omega} h(\mathbf{x}'; \mathbf{x}) P_i(\mathbf{x}') d\mathbf{x}'$$
(2)

其中, O(x)为x处接收到的环境光能量。Ω为投影仪

的投射区域。该式表明相机某像素的响应受到投影 仪整个投射区域的影响。下角标i表示不同的投射次数。

1.1 投影光栅测量法原理分析

在基于四步相移原理的投影光栅测量方法中,投影仪投射的正弦条纹*P_i*(*x*')可以表示为^[24]:

$$P_i(\mathbf{x}') = A + B \cdot \cos\left[\phi(\mathbf{x}') + \frac{\pi}{2} \cdot i\right]$$
(3)

式中:A表示平均亮度或者直流分量;B表示条纹调制度; $\phi(x')$ 表示投影仪像平面x'处的相位; *i*为四步相移的系数, 取值为*i*=0,1,2,3。

当相机和投影仪均对焦完好,物平面上的每个点 都对应像平面上的一个点。设x'对应物体上的X',x对 应物体上的X,由上述分析可知,若全局光照不存在时, 当且仅当X'=X时, $h(x';x) \neq 0$ 。此时,光传输系数退 化为反射率R(x),根据公式(2)可知相机像素响应为:

$$I_i(\boldsymbol{x}) = O(\boldsymbol{x}) + R(\boldsymbol{x})P_i(\boldsymbol{x}') \tag{4}$$

其中,对相机像素响应有影响的投影仪坐标为一个特定的点x'而不再像公式(2)中受到整个投射区域的影响。

公式(4)中的x'可先由公式(5)获得包裹相位,再 根据多频外差法^[4]得到绝对相位。

$$\phi(\mathbf{x}') = \arctan \frac{I_3(\mathbf{x}) - I_1(\mathbf{x})}{I_0(\mathbf{x}) - I_2(\mathbf{x})} = \arctan \frac{\sin(\phi(\mathbf{x}'))}{\cos(\phi(\mathbf{x}'))}$$
(5)

由于全局光照的影响,相机像素的响应不再是仅 取决于投影仪上某一个像素的亮度,而将受到一个区 域范围内的影响。此时,根据公式(2),若依然使用公 式(5)进行解相,则解相结果为:

$$\phi_{c}(\mathbf{x}') = \arctan \frac{I_{3}(\mathbf{x}) - I_{1}(\mathbf{x})}{I_{0}(\mathbf{x}) - I_{2}(\mathbf{x})} = \frac{R(\mathbf{x}) \sin \phi(\mathbf{x}') + \int_{\Omega_{/\mathbf{x}'}} h(\mathbf{y}'; \mathbf{x}) \sin \phi(\mathbf{y}') d\mathbf{y}'}{R(\mathbf{x}) \cos \phi(\mathbf{x}') + \int_{\Omega_{/\mathbf{x}'}} h(\mathbf{y}'; \mathbf{x}) \cos \phi(\mathbf{y}') d\mathbf{y}'} \quad (6)$$

其中Ω_{/x}为投射区域中不包含x'的区域。x'为x在投影 仪像平面对应的直接反光点。y'为x投影仪像平面对 应的全局光照点。

相比于公式 (5), 公式 (6) 中的分子和分母分别增加了表示全局光照影响的项。

将公式(6)上下同除以*R*(*x*)cos *\phi*(*x*'),并使用三角 函数的和差角公式进行化简,可以得到:

$$\phi_c(\mathbf{x}') = \phi(\mathbf{x}') + \Delta\theta(\mathbf{x}) \tag{7}$$

其中,

$$\Delta\theta(\mathbf{x}) = \arctan \frac{\int_{\Omega_{/x'}} h(\mathbf{y}'; \mathbf{x}) \sin \Delta\phi(\mathbf{y}') d\mathbf{y}'}{R(\mathbf{x}) + \int_{\Omega_{/x'}} h(\mathbf{y}'; \mathbf{x}) \cos \Delta\phi(\mathbf{y}') d\mathbf{y}'} \qquad (8)$$

$$\Delta \phi(\mathbf{y}') = \phi(\mathbf{y}') - \phi(\mathbf{x}') \tag{9}$$

公式 (7) 表明当全局光照不可忽略时, 对相机像 素**x**由公式 (6) 解算得到的相位φ_c(**x**')相较于真实相位 φ(**x**')有一个偏差Δθ(**x**)。该偏差是光线从光源的其他 位置**y**'发出后, 经光传输过程后综合作用的结果, 由公 式 (8) 给出。由该公式可知, 全局光照的影响已经被 混合于结果中, 难以将它们分离开。这将造成三维形 貌测量不完整或发生错误, 解算得到的相位发生偏 移, 导致 3D 点远离实际位置。

另一方面,由公式(8)可知,仅在特殊情况下,例 如*h*(*y*';*x*)关于点*x*'为偶函数时,公式(8)中分子积分号 内的函数为奇函数。此时该积分项变为零,解算的结 果才是正确的。而对于一般情况,尤其是存在互反射 的情况下,*h*(*y*';*x*)将不关于点*x*'具有对称性。

1.2 单像素原理分析

由于单像素成像方法通过空间调制器(例如投影仪)对入射光场进行编码,从而得到入射光场视角下 最终可被单像素探测器所接受到的光能量。因此,根 据直接光照和全局光照的混合光特点,提出将单像素成 像原理作为直接光照和全局光照分解问题的理论模型。

假设采用基于傅里叶变换的单像素成像方法,向 被测场景投射正弦条纹:

$$P_i(\mathbf{x}'; \mathbf{k}) = A + B\cos\left[\mathbf{k}^T \cdot \mathbf{x}' + \frac{\pi}{2}i\right]$$
(10)

式中: $\mathbf{x}' = (u', v')^T$ 表示投影仪像平面某点; $\mathbf{k}' = \left(\frac{2\pi \cdot k}{M}, \frac{2\pi \cdot l}{N}\right)^T$ 表示离散空间频率; $M \pi N$ 为投影仪 的横向和纵向分辨率; $k \pi l$ 分别取 $k=0, 1...M-1 \pi l=0, 1...N-1_{\circ}$

若将相机上每个像素视为一个独立的单像素探测器,则对于相机像平面某点x,根据公式(2),其响应为:

$$I_i(\boldsymbol{x};\boldsymbol{k}) = O(\boldsymbol{x}) + \int_O h(\boldsymbol{x}';\boldsymbol{x}) P_i(\boldsymbol{x}';\boldsymbol{k}) d\boldsymbol{x}'$$
(11)

当完成投射傅里叶单像素成像所需要的条纹后, 根据下式进行傅里叶单像素成像重构:

$$F^{-1}\{[I_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{k}) - I_2(\boldsymbol{x};\boldsymbol{k})] + j[I_1(\boldsymbol{x};\boldsymbol{k}) - I_3(\boldsymbol{x};\boldsymbol{k})]\} = F^{-1}\left[\int_{\Omega} 2B \cdot h(\boldsymbol{x}';\boldsymbol{x})exp(j \cdot \boldsymbol{k}^T \cdot \boldsymbol{x}')d\boldsymbol{x}'\right] = 2B \cdot h(\boldsymbol{x}';\boldsymbol{x}), \qquad (1)$$

式中: F⁻¹(•)表示二维离散傅里叶逆变换。

公式 (12) 的解算结果为增加了一个比例因子的 从投影仪像平面任意点**x**'到达相机像平面某点**x**的传 输系数。若对于每个相机像素重复该重构过程,可求 解得到含有该比例系数的光传输系数。因此,原本来 自于光源不同位置且混合在一起的光线,就可以被分 解开来,也为全局光照干扰下的三维重构提供了前提 和基础。

1.3 直接光照点的确定

虽然单像素成像可以将来自光源不同位置的混 合光分解,但直接光照的位置却并没有被最终确定。 对于互反射存在的情形,某像素的单像素成像的结果 会呈现出多个较小的光斑。而对于次表面散射存在 的情形,某像素的单像素成像的结果会呈现出一个较 大的光斑,如图 2 所示。





图 2 互反射和次表面散射情形下的光传输系数图像;(a) 互反射情形 下的光传输系数;(b) 次表面散射情形下的光传输系数

Fig.2 Light transport coefficients in the case of interreflections and subsurface scattering; (a) light transport coefficients in the case of interreflections; (b) light transport coefficients in the case of subsurface scattering

12)

面中的极线方程,见图2。根据极线方程对光斑进行 筛选,仅当光斑中的最亮位置距离极线小于给定阈值 时,才将该光斑作为候选光斑。再对每个候选光斑求 取重心坐标,使用距离极线最近的重心坐标位置作为 最终的匹配点。最后,采用传统三维视觉重建算法, 完成三维场景重构。

实验与分析 2

首先对于一个同时存在互反射和次表面散射的 混合场景进行拍摄,获得三维重构数据,证明单像素 成像方法可以在互反射与次表面散射同时存在时进 行三维重构。其次,对次表面散射下的三维重构进行 了更进一步的研究和分析。分别对几个半透明物体 单独进行了测量,并与传统方法进行了对比。最后, 选择了标准尼龙球测量件和玉马对精度进行了评价, 证明单像素成像方法可实现在全局光照干扰下的高 质量、高精度三维重建。

实验中使用的相机分辨率为1920×1200,投影仪 分辨率为1920×1080。拍摄的帧频为60 fps。

2.1 混合场景

首先对一个同时存在互反射和次表面散射的场 景进行拍摄,获得三维重构数据。该场景包含5个不 同物体,如图3所示。小熊是由石膏制成,接近于漫 反射表面,作为参考。洋葱和冬瓜是半透明物体,会 产生较强的次表面散射现象。涡轮叶片和金属零部





- 图 3 混合场景中的被测物体: (a) 石膏小熊; (b) 洋葱; (c) 冬瓜; (d) 涡 轮叶片:(e) 金属零部件
- Fig.3 Measured objects in the compound scene; (a) gypsum bear; (b) onion; (c) white gourd; (d) turbine blade; (e) metal parts

件中产生较强的互反射。

图 4 给出了该混合场景的单像素成像的结果。 图 4(a) 为被拍摄的场景, 每个物体的名称被标在右 侧,同时选取了6个典型位置展示重构的图像。这 6个展示点位置被标记在图 4(a) 中,每个展示点所对 应的子图也用小写字母标记。在每个子图的右上角 标记了对应相机像素的具体位置坐标以及用于清晰 展示时的放大系数。

图 4(b) 为小熊腹部处的一点,由于小熊为石膏材 质,接近于漫反射表面,因此全局光照不明显,故成像

2.Onion (Subsurface scattering) 3. White gourd (Subsurface scattering) 4. Turbocharged blade (Strong inter-reflections) 5.Metal part (Strong inter-reflections) b Subfigure (b) C Subfigure (c) e Subfigure (e) d Subfigure (d) f Subfigure (f) g Subfigure (g) Camera pixel position: (500, 500) Multiplied factor: 230



- 图 4 混合场景单像素成像结果; (a) 拍摄场景; (b) 小熊腹部处某点的单像素重构结果; (c) 洋葱某点的单像素重构结果; (d) 冬瓜某点的单像素重构结果; (e) 涡轮叶片上某点的单像素重构结果; (f) 涡轮叶片另一点的单像素重构结果; (g) 金属零部件某点的单像素重构结果
- Fig.4 The reconstructed images of single pixel imaging method for the compound scenes; (a) the measured scenes; (b) reconstructed single-pixel imaging result of a point on the abdomen of the bear; (c) reconstructed single-pixel imaging result of a point on the onion; (d) reconstructed single-pixel imaging result of a point on the white gourd; (e) reconstructed single-pixel imaging result of a point on the turbine blade; (f) reconstructed single-pixel imaging result of a point on the metal parts

结果为一个较小的光斑。图 4(c) 和 (d) 对应半透明的 蔬菜表面, 因而成像的结果为一个较大的光斑, 是次 表面散射造成的。图 4(e)~(g) 中均有多个光斑, 是互 反射产生的。值得注意的是, 由于涡轮叶片的光泽表 面, 在图 4(a) 中涡轮叶片侧面处可以看到小熊爪子的 镜像。图 4(e) 展示了小熊爪子对涡轮叶片互反射的 结果。这张图中有两个光斑, 左侧的清晰可见, 是小 熊爪子把光反射到涡轮侧面的光线。右侧的相对较 暗,是照射到涡轮叶片侧面的直接光。图4的各个子 图表明单像素成像对混合光进行了有效分离。

图 5 展示了对该场景三维重构的结果。图 5(a) 为该场景的全局三维重建结果。图 5(b)~(g)分别对应 为图 5(a)中标有字母的方框内的局部放大图。这几 个子图的位置和图 4 中展示单像素成像结果的位置



- 图 5 混合场景三维重建结果; (a) 场景的三维重建结果; (b) 小熊腹部的局部放大; (c) 洋葱区域的局部放大; (d) 冬瓜区域的局部放大; (e) 小熊爪 子和涡轮叶片处的局部放大; (f) 涡轮叶片的局部放大; (g) 金属零部件的局部放大
- Fig.5 3D reconstruction results of the compound scene; (a) 3D reconstruction results of the scene; (b) enlarged abdomen region of the bear; (c) enlarged area of the onion; (d) enlarged area of the white gourd; (e) enlarged bear claw and turbine blade region; (f) enlarged region of the turbine blade; (g) enlarged region of the metal parts

相互一致。该实验证明了单像素成像方法可以在全 局光存在时进行三维重构,且鲁棒性较强,可同时应 对互反射和次表面散射同时存在的情形。

2.2 半透明物体三维测量

为了验证文中提出的单像素成像方法对半透明 物体表面三维重建的适用性,我们对多个具有半透明 性的物体进行单独测量,被测物体选用半透明性较强 的白洋葱、冬瓜,表面形貌较为复杂的貔貅雕像。并 同时对物体使用传统投影光栅测量法和改进后的 12 副平均的投影光栅测量法^[5]进行测量,与文中提出 的基于单像素成像的三维重构方法相对比,测量结果 如图 6 所示。



图 6 半透明物体三维测量结果对比

Fig.6 Comparison of 3D reconstruction results of translucent objects

图 6 中的不同行对应不同的被测物体,每一列分 别代表被测物体的彩色图片、传统投影光栅测量方法 的三维重构结果、改进后 (12 幅平均)投影光栅测量 方法的三维重构结果和文中提出的基于单像素成像 方法的三维重构结果。由图 6 可看出,基于单像素成 像的半透明物体三维重建方法比传统投影光栅测量 法和改进的投影光栅测量法,在重建结果上三维点云 更完整,数据质量较好,解决了传统测量方法因次表 面散射现象而导致的测量数据严重缺失问题。

2.3 半透明物体三维测量精度评价

为了证明文中提出的单像素成像方法可实现在 全局光照干扰下的高质量、高精度三维重建,实验选 用直径为 25.40 mm 的树脂聚酰胺 (尼龙) 材料的小球 和玉马作为测量对象,见图 7。



图 7 用于精度评价的半透明材质测量物体; (a) 尼龙球; (b) 玉马

Fig.7 Measured translucent material object for accuracy evaluation; (a) polyamide sphere; (b) jade horse

为了分析尼龙球的测量精度,对重建的点云数据 进行球面拟合,根据拟合球面的直径和平均绝对误差 和均方根误差对测量精度进行评价。对于玉马,首先 使用单像素成像方法对其头部进行三维重建。再对 玉马进行表面喷涂漫反射粉末,消去其半透明性,测 量获取参考点云。最后,将基于单像素成像的三维点 云与参考点云进行比较,以评估其精度。实验对拟合 球面后点云的平均绝对误差和均方根误差进行评 价。测量结果如图 8 所示,测量精度的评价数据如表 1



图 8 半透明测量物体精度评价; (a) 尼龙球三维重建结果; (b) 尼龙球 重建差图; (c) 玉马三维重建结果; (d) 玉马重建误差图

Fig.8 Accuracy evaluation of translucent measured objects; (a) 3D reconstruction result of polyamide sphere; (b) reconstruction deviations of polyamide sphere; (c) 3D reconstruction result of jade horse; (d) reconstruction deviations of jade horse

表1 测量精度评价

Tab.1 Accuracy evaluation of the measured results

Measured objects	Fitted diameter /mm	Mean absolute error /mm	Root mean square error /mm
Polyamide sphere	25.408	0.020	0.026
Jade horse		0.049	0.059

所示。从实验结果可知,单像素成像的三维重构方法 获取的点云精度较高,误差较小。

3 结 论

综上所述,单像素成像方法可以完全分解直接光 照和全局光照,是解决混合光照分解问题的完善、通 用理论模型,在此基础上实现了在全局光照干扰下的 高质量、高精度三维重建。

笔者首先对复合场景进行测量,该场景中含有多 种不同材质属性的被测物体,实验表明,单像素成像 具有较高鲁棒性,可以在同时出现互反射和次表面散 射的情况下实现三维重建。其次,选取洋葱、冬瓜和 表面形貌较为复杂的貔貅雕像作为测量对象,将文中 提出的单像素三维重构方法与传统的投影光栅测量 方法和改进后的投影光栅测量法进行对比,结果表 明,单像素成像的三维重建点云更完整,解决了传统 测量技术在次表面散射干扰下的点云数据缺失问 题。最后,选取直径已知的尼龙球标准件和玉马对三 维测量的精度进行评价,结果表明,单像素成像方法 可实现在全局光照干扰下的高质量、高精度三维重建。

目前,笔者正进一步探索提高单像素成像效率的 方法,以解决单像素成像技术在三维测量中的实用化 问题。

参考文献:

- Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10–22.
- [2] Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Shape from interreflections [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1991, 6(3): 173–195.
- [3] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [4] Zhao H, Xu Y, Jiang H, et al. 3D shape measurement in the presence of strong interreflections by epipolar imaging and regional fringe projection [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7117–7131.
- [5] Xu Y, Zhao H, Jiang H, et al. High-accuracy 3D shape measurement of translucent objects by fringe projection profilometry [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 15118–15130.

- [6] Nayar S K, Krishnan G, Grossberg M D, et al. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 935–944.
- [7] Gupta M, Nayar S K. Micro phase shifting[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2012: 813-820.
- [8] Wang J, Zhang X. 3D measurement method of Gray code structured light under interference of reflected light [J]. Optical Technique, 2018, 44(1): 69–74. (in Chinese)
- [9] Chen T, Lensch H P A, Fuchs C, et al. Polarization and phaseshifting for 3D scanning of translucent objects[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2007: 1-8.
- [10] Sen P, Chen B, Garg G, et al. Dual photography[C]//ACM SIGGRAPH, ACM, 2005: 745-755.
- [11] Zhang Z, Wang X, Zheng G, et al. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619–19639.
- [12] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 13–20.
- [13] Bian L, Suo J, Situ G, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(24752): 1–7.
- [14] Hahn J, Debes C, Leigsnering M, et al. Compressive sensing and adaptive direct sampling in hyperspectral imaging [J]. *Digital Signal Processing*, 2014(26): 113–126.
- [15] Wang Y, Suo J, Fan J, et al. Hyperspectral computational ghost imaging via temporal multiplexing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016(28): 288–291.
- [16] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope [J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285–289.
- [17] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. *Applied Physics Letter*, 2008, 93(12): 121105.
- [18] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 605–609.
- [19] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detector [J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844–847.
- [20] Sun M, Edgar M, Gibson G, et al. Single-pixel threedimensional imaging with time-based depth resolution [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [21] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Ghost imaging in

the time domain [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 167–170.

- [22] Chen H, Weng Z, Liang Y, et al. High speed single-pixel imaging via time domain compressive sampling[C]//Conference on Lasers Electro-Opt, OSA, 2014: 132.
- [23] Devaux F, Moreau P A, Denis S, et al. Computational temporal

ghost imaging [J]. Optica, 2016, 3(7): 698-701.

[24] Jiang H, Zhai H, Xu Y, et al. 3D shape measurement of translucent objects based on Fourier single-pixel imaging in projector-camera system [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33564–33574.