

复杂光照条件下的高精度三维成像技术

赵慧洁^{1,2*}, 李宇曦^{1,2}, 姜宏志^{1,2}, 李旭东^{1,2}

¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

²北京航空航天大学青岛研究院, 山东 青岛 266101

摘要 现代工业零部件的加工已经实现了无需二维标注图纸,由计算机辅助设计 3D 模型直接输入数控系统加工。加工工艺的进步给工件测量和质量评价方法带来了新挑战,通过获取零部件的高精度稠密三维点云的“靠模”质量评价方法得到了重视,特别是对于结构复杂的零部件。然而,高精度复杂结构的零部件三维测量遇到两个难题:1)金属零部件加工后表面光洁度很高,主动投射的条纹光束会引起金属表面的强烈反光致盲或者复杂结构引起的投射光多次反光混叠;2)复合材料的半透明会引起投射光的次表面散射。这些因素都会导致测量失效。现有结构光主动视觉三维重构技术无法解决上述难题。针对复杂型面免喷涂三维重构问题,建立基于单像素成像方法的复杂光照分离模型,实现直接光与复杂光照分离。为了解决单像素成像方法效率低、速度慢、难以满足工业现场测量需求的问题,提出一种基于局部区域延拓的并行单像素成像方法。实验结果表明,并行单像素成像方法能够很好地实现工业测量现场多次反光与次表面散射光干扰条件下的三维重构。

关键词 成像系统; 单像素成像; 多次反光; 次表面散射; 三维测量

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223393

High-Precision 3D-Imaging Technology Under Complex Illumination

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

¹School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

²Beihang University Qingdao Research Institute, Qingdao 266101, Shandong, China

Abstract The processing of modern industrial parts has realized the technology for directly inputting 3D computer-aided design models into numerical control systems without the need for two-dimensional marking blueprints. The advancement of processing technology has introduced new challenges to workpiece measurement and quality evaluation methods. The profile modeling quality evaluation method based on obtaining high-precision and dense 3D point cloud models of workpieces has received attention, particularly for the manufacturing of parts with complex structures. However, the high-precision 3D measurement of parts with complex structures presents two challenges. The first is the very high surface finish of metal parts after processing. Actively projected patterns cause strong reflections on the metal surface, resulting in the problem of blindness or interreflections between complex structures, the latter of which results in aliasing. The second is the subsurface scattering of projected light owing to the translucency of composite materials. These factors induce measurement failure. The existing structured light-active vision 3D reconstruction technology cannot solve the aforementioned problems. Thus, a complex light separation model based on a single-pixel imaging method is established to address the problem of 3D reconstruction under complex illumination without spraying. This method realizes the separation of direct and complex illumination and resolves the aforementioned difficulties. To tackle the problems faced by the single-pixel imaging method, including low efficiency, speed, and its practicability in real-world measurement scenarios, a parallel single-pixel imaging method based on a local region extension method is proposed. Experiments demonstrate that the parallel single-pixel imaging method can solve the problem of 3D reconstruction under the influence of interreflections and subsurface scattering that may occur in practical measurement situations.

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

收稿日期: 2022-12-26; 修回日期: 2023-03-11; 录用日期: 2023-03-16; 网络首发日期: 2023-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB2010701)、国家自然科学基金(61875007,61735003)

通信作者: hjzhao@buaa.edu.cn

1 引言

无二维图纸的计算机辅助设计(CAD)3D模型直接进入数控系统加工,对工业零部件的尺寸精度评价提出了挑战。特别是在被测工件非常复杂的情况下,原来的加工图纸可能有上百个尺寸,但是3D模型中只给出了关键部位的尺寸公差,实际上,在这种新的工艺模式下,产品设计公差标注和加工质量的评价都面临新的挑战。在这种背景下,通过获取零部件的高精度稠密三维点云的“靠模”质量评价方法得到了重视。其中,基于条纹投射的双目三维视觉成像测量方法的精度和数据密度最符合“靠模”质量评定的需求。

在条纹投射主动视觉三维重构方法中,面结构光^[1-2]三维测量技术能够快速获取全场三维数据,具有全场测量、速度快、精度高、数据密集等特点,在高精度、复杂零件测量中得到广泛应用。然而,高精度复杂结构的零部件三维测量遇到两个难题:1)金属零部件加工后表面光洁度很高,主动投射的条纹光束会引起金属表面的强烈反光致盲或者复杂结构引起的投射光多次反光和被测表面的直接反射光混叠;2)复合材料的半透明会引起投射光的次表面散射,这些因素使得现有条纹投射主动视觉三维重构技术精度降低,严重时会导致测量失效。因此,亟需创新复杂高光型面免喷涂三维成像新理论和新方法,这已成为高端装备智能制造的基础测量问题。

复杂光照下的免喷涂三维重构问题一直是国际研究的前沿和热点。针对该问题,国内外研究者提出了基于高频投射的复杂光抑制法^[3-6]、基于极线约束的直接照明匹配法^[7-8]、基于自适应型面分割的区域投射方法^[8-9]、基于次表面散射光的空间频率响应法^[3,10]、基于次表面散射的偏振特性法^[11]和基于半透明物体材质模型的误差补偿法等方法^[10,12-15]。然而,这些方法大都是以直接照明光或复杂照明光的理想假设为基础而提出的对复杂光进行抑制的解决方案,难以应对三维重构实际场合的各种复杂情况。例如:基于高频投射的复杂光抑制法基于如下假设——多次反光对具有同均值的不同高频条纹的响应相同,而直接反射光的强度与所投射的条纹强度成正比,因此该方法难以分离高频多次反光的影响;基于极线约束的直接照明匹配法依赖于非对极主导假设——极平面内传播的光线仅对直接光照有贡献,而对复杂光照无贡献,因此该方法无法解决复杂光大量存在于极平面内的情况;基于自适应型面分割的区域投射法假设不同表面之间仅存在二次反射光,因此该方法难以解决高次反射光所引起的误差;基于偏振成像的方法假设直接照明光具有与光源相同的偏振态,而其他复杂照明光则不具备这样的性质,因此该方法难以区分直接漫反射光与多次反光;基于次表面散射光的空间频率响应法通过投射低频率的条纹克服次表面散射光的影响,然而这种方法面临着

精度降低的问题,无法应用于高精度测量场合;基于误差建模的补偿法在已知材质经验模型的基础上,实现对三维重构误差的补偿,因此该方法难以应用于无法获取待测物体材质先验信息的情况。

本文提出一种新型的并行单像素成像方法,建立直接光照和复杂光照混叠后的复杂光照分离模型,将直接照明光线与其他复杂光照光线混叠后对相机单个像素的响应分离,是一种更为普适的三维重构方法。试图通过上述努力,为解决复杂光照下的三维重构问题提出一种统一的、完备的数学模型,使其能够解决在实际测量场景中可能出现的各种复杂光干扰下的三维重构问题。

2 面结构光三维视觉重构原理

以投影光栅相位方法为代表的结构光三维视觉重构技术具有非接触、测量效率高和数据点稠密等特点。该方法的基本原理如下:由投射器向被测表面投射正弦条纹等结构光,通过相机拍摄被测表面的条纹图像,通过相位解算等数据处理方法计算出被测表面的相位匹配特征,再根据立体匹配和三维重建算法获取高精度密集三维点云,具体如图1所示。

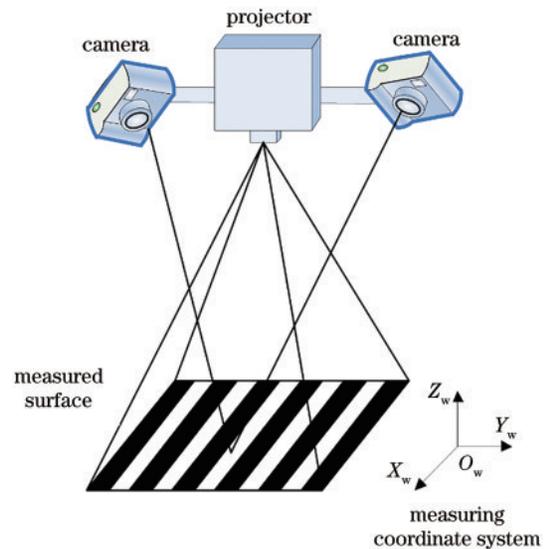


图1 基于投影光栅相位法的三维视觉传感器示意图

Fig. 1 Schematic of 3D vision sensor based on fringe projection grating phase method

投影光栅相位测量方法所需要投射的正弦条纹 $P_i(\mathbf{u}')$ 可以表示为

$$P_i(\mathbf{u}') = A + B \cdot \cos \left[\phi(\mathbf{u}') + \frac{\pi}{2} \cdot i \right], \quad (1)$$

式中:投射器上一点 $\mathbf{u}' = (u', v')$; A 表示平均亮度或者直流分量; B 表示条纹调制度; $\phi(\mathbf{u}')$ 表示投射器像平面 \mathbf{u}' 处的相位; i 为相移的系数,对于最常用的四步相移方法, $i = 0, 1, 2, 3$ 。

为了获取被测表面的相位匹配特征,记 $I_i(\mathbf{u})$ 为投

射器投射条纹 $P_i(\mathbf{u}')$ 时, 相机拍摄到的条纹图像, 则相机像素 $\mathbf{u}=(u, v)$ 所对应被测表面的相位匹配特征可先由式(2)获得包裹相位, 再根据多频外差法^[8]得到绝对相位。

$$\phi(\mathbf{u}') = \arctan \frac{I_3(\mathbf{u}) - I_1(\mathbf{u})}{I_0(\mathbf{u}) - I_2(\mathbf{u})} = \arctan \frac{\sin[\phi(\mathbf{u}')] }{\cos[\phi(\mathbf{u}')] }。 (2)$$

然而, 传统的面结构光方法在获取被测表面的相位匹配特征时都基于一个重要的假设, 即光线在被探测器接收前仅经过了一次反射^[17]。对于复杂型面测量而言, 由于表面材质的多样性和几何形状复杂性, 表面光照情况十分复杂, 出现多次反光/半透明次表面散射光等复杂光照环境, 与相机采集的直接反射光混叠, 导致上述假设不成立, 使得传统结构光三维测量方法失效。

3 传统复杂光照下三维视觉重构方法概述

将由被测物体型面复杂性和材质多样性所形成的混叠光统称为复杂光照。其中, 复杂光照根据其形成原因, 可被细分为以下几种: 1) 由于物体凹陷结构造成的多次反光现象所引起的, 如图 2 光线 b 所示; 2) 由于半透明物体的次表面散射现象所引起的, 如图 2 光线 c 所示; 3) 由于参与介质的体散射效应所引起的, 如图 2 光线 d 所示; 4) 由于被测物体透明表面的折射/反射现象所引起的, 如图 2 光线 e 所示。本研究的主要关注对象是: 由于物体凹陷结构所造成的多次反光条件下的三维重构问题与半透明物体的次表面散射条件下的三维重构问题。

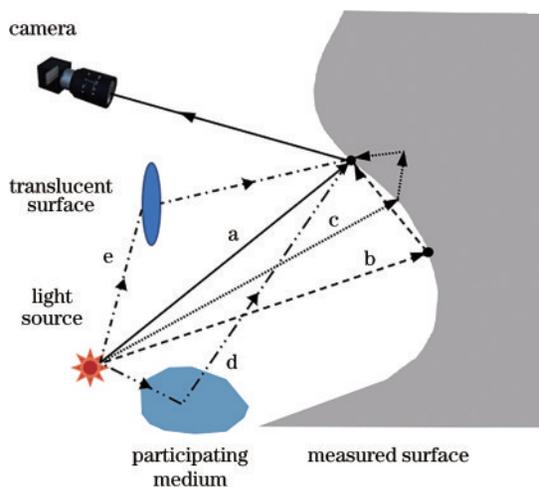


图 2 实际测量条件下被测物体表面的复杂光照

Fig. 2 Complex illumination of measured object surface under real measurement conditions

3.1 多次反光干扰下的三维重构

对具有强反光的金属材质, 物体表面之间由于镜面多次反光和光泽多次反光将产生强烈的复杂光照。本小节对近年来关于多次反光干扰下的三维重构问题

的研究现状进行总结, 主要从如下几个方面展开: 基于高频投射的分离方法、基于极线约束的直接照明匹配方法和基于自适应型面分割的区域投射法。

3.1.1 基于高频投射的分离方法

美国哥伦比亚大学 Nayar 等^[3]的开创性研究使复杂光照的分离开始受到计算机图形学和计算机视觉领域中研究者的广泛关注。他们发现直接照明和复杂光照对于投射图案的空间频率的响应不同。基于该发现, 他们提出利用高频图案分离直接光照和复杂光照的方法。他们的方法对复杂场景的适用性较强, 且可以分离出直接光和由于多次反光、半透明散射、体散射、散射介质等多种全局效应产生的复杂光照, 为真实感渲染和复杂光照下的三维测量提供了新方法。美国哥伦比亚大学 Gupta 等^[4]提出微相移方法, 将所投射的条纹限制在一个高频的窄带区间内, 从而解决多次反光存在时的三维重构任务。Gupta 等^[5-6]提出逻辑编码, 使用异或操作将传统格雷码方法中的每幅图案拆分为两幅高频格雷码, 从而避免多次反光导致的解码错误。

3.1.2 基于极线约束的直接照明匹配方法

O'Toole 等^[7]提出结构光传输方法, 通过在相机前加装数字微镜器件(DMD)和采用投射器向场景投射结构光的方式, 同时对信号接收端和光源发射端进行编码, 从而增强光传输路径中的直接光分量。北京航空航天大学 Zhao 等^[8]提出极线成像方法, 使用传统结构光中使用的投射器-相机对, 降低了结构光传输方法对硬件的较高要求。

3.1.3 基于自适应型面分割的区域投射法

Hu 等^[9]的研究是这类方法的早期代表性工作。他们在被测零件 CAD 模型分析的基础上, 对被测型面进行分割以避免多次反光的干扰。在执行过程中, 通过生成投射器和相机所需掩码, 对每个区域独立地进行三维重构, 实现了抗多次反光干扰的三维重构。Zhao 等^[8]提出极线成像和区域投射相结合的多次反光三维重构方法。

3.2 次表面散射光干扰下的三维重构

当光线照射到半透明物体表面时, 其中一部分光线会透射到物体表面, 并在物体内部经历复杂的散射和折射后, 从不同于物体表面入射点的其他位置射出。本小节对近年来关于次表面散射干扰下的三维重构问题的研究现状进行总结, 包含以下几种方法: 基于次表面散射光的空间频率响应法、基于次表面散射偏振特性法和基于半透明物体材质模型的误差补偿法。

3.2.1 基于次表面散射光的空间频率响应法

根据 Nayar 等^[3]的开创性研究, 次表面散射光对高频条纹同样具有模糊效应, 即当不同的高频条纹投射到半透明物体表面上时, 由次表面散射效应所造成的全局光影响趋近于直流分量。因此, 高频条纹投射方法同样可用于解决次表面散射下的三维重构问题。北京航空航天大学 Xu 等^[10]认为高频投射方案可以减少

由半透明次表面散射造成的系统误差,但是另一方面由于所投射的条纹频率过高,条纹调制度下降,增加了测量的随机误差。

3.2.2 基于次表面散射的偏振特性法

Chen 等^[11]根据表面反射和次表面散射对偏振光的不同响应特征将偏振差分成像应用于相移条纹投射法,抑制由物体半透明所造成的此表面散射光,从而减小半透明物体的测量误差。

3.2.3 基于半透明材质误差建模的补偿法

Lutzke 等^[12]针对半透明被测物体,使用误差补偿的方法对存在系统误差的数据进行误差补偿,从而获得更高质量的点云结果。Lutzke 等^[13-14]还使用蒙特卡罗方法对次表面散射光传输过程进行模拟,分析次表面散射对三维数据测量误差的影响因素,进而对测量数据进行误差补偿。Rao 等^[15]对包括次表面散射在内的局部模糊效应所引起的相位误差进行了分析,并提出了通过全局光传输系数进行相位误差校正的算法。Xu 等^[10]对条纹周期与测量误差之间的关系进行研究,并使用一个二次函数作为经验公式对其进行描述,并对测量数据进行误差补偿,实现半透明次表面散射干扰下的高精度三维重构。

3.3 现有方法存在的问题

现有针对复杂光照下的三维重构方法大都基于对直接照明光或复杂照明光的假设从而对复杂光进行抑制的基本思路。这些对复杂光进行抑制的方法中有许多是针对特定问题而提出的经验性方法,缺乏统一的理论基础。当实际测量环境不满足模型的要求时,这些测量方法仍然面临测量失效的问题。这是现有模型

难以实现复杂光照分离、导致三维测量失效的主要原因。综上所述,解决复杂光照下三维重构的核心瓶颈问题在于:亟需从数学模型和成像原理上进行根本性的变革与创新,才能有效解决高光/多次反光和半透明散射光等复杂光照条件下的三维成像问题。因此,有必要提出统一的数学模型将直接照明物点与其他复杂光照物点对像素响应的影响分离,形成一种更为普适的三维重构方法,使其能够解决在实际测量场合中可能出现的各种复杂光干扰下的三维重构问题。所提并行单像素成像方法立足于复杂光照的形成机理,深入研究投射器与相机之间的光传输过程,实现对复杂光照的完全分离,进而解决复杂光照条件下的三维重构难题。

4 并行单像素成像方法

单像素成像方法是指利用单个像素对待观测目标进行成像的一种新型成像方式。与传统像素阵列成像方式不同,单像素成像方法使用可编程空间光调制器对光场进行编码,再通过后端的重构算法计算得到待成像目标。单像素成像技术使用一个探测器收集全场反射数据,因此收集到的能量信号较强,重构的图像具有较强的信噪比。针对复杂高光型面三维成像的失效问题,建立基于单像素成像方法的复杂光照分离模型,即通过求解相机像素与投射器像素之间的光传输系数,实现直接光与复杂光照的分离。光传输系数描述了投射器各像素对相机像素成像能量的贡献,由于直接光与其他复杂光照来自不同位置的投射器像素,因此直接光与复杂光照在光传输系数中自然分离。基于单像素成像的结构光信号混叠与分离模型如图 3 所

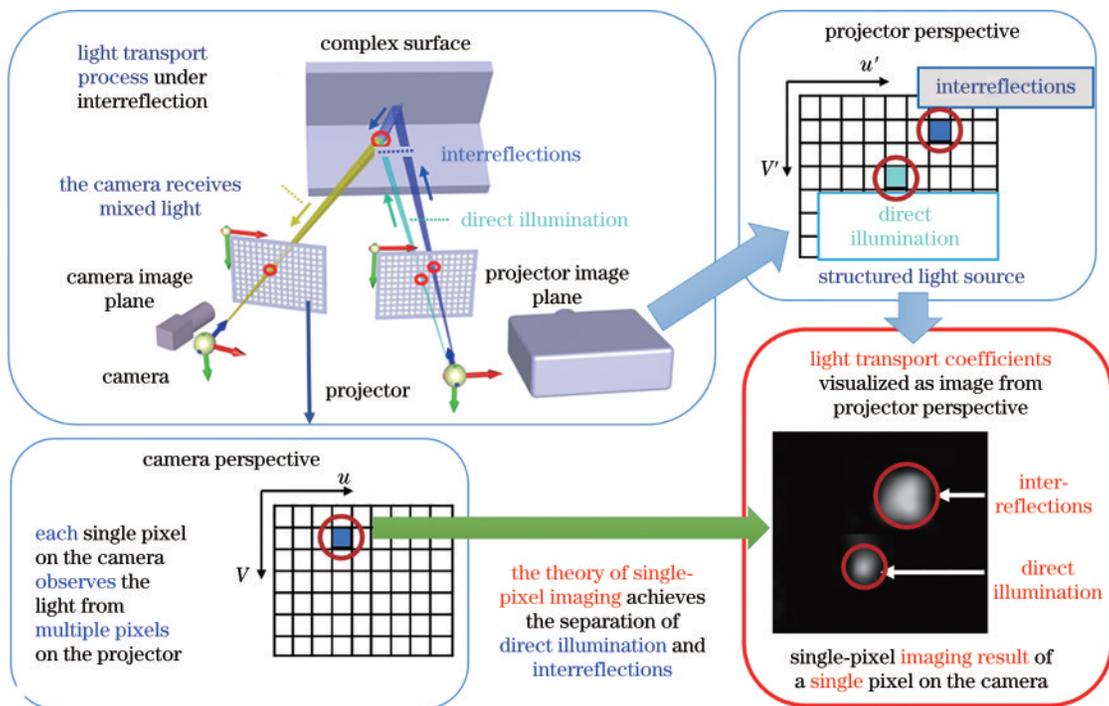


图 3 基于单像素成像的二维结构光信号混叠与分解模型(以多次反光为例)

Fig. 3 Two-dimensional structured light signal aliasing and decomposition model based on single pixel imaging (interreflections as an example)

示。其中,左上部分为多次反光条件下的光传输过程。相机像素中的光线为直接反射光与多次反射光的混叠,因此采用传统成像方法难以将二者分离(左下)。单像素成像方法通过对投射器视角进行成像(右上)得到光传输系数,因此可直接实现直接光与复杂光的分离(右下)。

4.1 基于单像素成像方法的复杂光分离模型

光线从投射器中的像素(u', v')发出,经过待测物体经过场景的反射或散射后,被相机像素(u, v)接收。由于复杂光照的影响,相机中每个像素所接收到的光线并不都是直接光,还可能包含多次反射光和次表面散射光。上述过程的光传输方程可描述为

$$I(u, v) = O(u, v) + h(u', v'; u, v) \cdot P(u', v'), \quad (3)$$

式中: $P(u', v')$ 为投射器像素(u', v')处所发射的辐亮度; $I(u, v)$ 为相机像素(u, v)所接收到的辐亮度; $O(u, v)$ 为相机像素(u, v)的环境光辐亮度; $h(u', v'; u, v)$ 为光传输系数,它描述了投射器各像素对相机像素成像能量的贡献。

当相机中的每个像素被考虑为一个独立的单像素探测器时,根据傅里叶单像素成像方法,通过投射器投射如下条纹:

$$P_\phi(u', v'; k, l) = a + b \cos \left[2\pi \left(\frac{k \cdot u'}{U'} + \frac{l \cdot v'}{V'} \right) + \phi \right], \quad (4)$$

式中: k 和 l 均为离散频率, $k=0, 1, \dots, U'-1, l=0, 1, \dots, V'-1$; U' 和 V' 分别为投射器的横向和纵向分辨率; ϕ 为初始相位, $\phi=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$; a 和 b 分别为条纹的平均亮度和对比度。

根据式(3)可知,相机某像素(u, v)处的响应可表达为

$$I_\phi(u, v; k, l) = O(u, v) + \sum_{v'=0}^{N-1} \sum_{u'=0}^{M-1} h(u', v'; u, v) P_\phi(u', v'; k, l). \quad (5)$$

对采集到的相机响应进行如下处理,可得到傅里叶系数:

$$H(k, l; u, v) = [I_0(u, v; k, l) - I_\pi(u, v; k, l)] + j \left[I_{\frac{\pi}{2}}(u, v; k, l) - I_{\frac{3\pi}{2}}(u, v; k, l) \right]. \quad (6)$$

光传输系数可通过傅里叶单像素成像的图像重构算法得到,即对得到的傅里叶系数进行离散傅里叶逆变换:

$$F^{-1} [H(k, l; u, v)] = F^{-1} \left\{ \sum_{v'=0}^{V'-1} \sum_{u'=0}^{U'-1} 2b \cdot h(u', v'; u, v) \exp \left[-j \cdot 2\pi \left(\frac{k \cdot u'}{U'} + \frac{l \cdot v'}{V'} \right) \right] \right\} = 2b \cdot h(u', v'; u, v), \quad (7)$$

式中: $F^{-1}[\cdot]$ 代表二维离散傅里叶逆变换。

式(7)的结果为增加了一个比例因子的从投射器像平面任意点(u', v')到达相机像平面某点(u, v)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。

4.2 基于局部区域延拓方法的高效率并行单像素成像方法

若采用传统的单像素成像求解式(7),所需要的投射数量与成像分辨率成正比。另一方面,当阵列探测器中的各像素均被视为一个单像素探测单元时,由于相机镜头的聚焦作用,每个像素仅能收到场景局部区域的反射光。本小节介绍局部区域延拓方法对单像素方法的成像过程进行加速的理论基础,形成并行单像素成像的原理。局部区域延拓方法建立在相机像素的可见域集中在一个局部区域范围内的基础上,通过向场景投射特定的条纹模式使像素仅对各自可见区域进行成像,从而使各像素并行地对场景进行探测,极大提升成像效率。

局部区域延拓方法的具体实现步骤如下:

1) 面向像素阵列探测器的傅里叶切片定位技术:根据傅里叶切片原理确定每个相机像素对应场景点所能接收到的直接照明光和间接照明光的范围大小。

2) 周期延拓条纹:取所有像素对应的接收域范围的最大值为投影条纹的分辨率,避免信息丢失,并通过周期延拓生成对应投射范围的投影条纹,投射到物体表面。

3) 局部区域图像重构算法:由局部区域图像重构算法计算得到投射器分辨率的重构结果。

4.2.1 面向像素阵列探测器的傅里叶切片定位技术

利用傅里叶切片原理,实现对接收域的定位。首先,投射式(8)、(9)生成的横纵方向条纹,如图4所示。

$$P_\phi^V(u', v'; k) = P_\phi(u', v'; k, 0) = a + b \cos \left(2\pi \cdot \frac{k \cdot u'}{U'} + \phi \right), \quad (8)$$

$$P_\phi^H(u', v'; l) = P_\phi(u', v'; 0, l) = a + b \cos \left(2\pi \cdot \frac{l \cdot v'}{V'} + \phi \right). \quad (9)$$

然后,根据四步相移投射模式的复数转换规则,计算得到场景图像沿横纵方向投影函数的傅里叶系数:

$$H^V(k) = [I_0^V(k) - I_\pi^V(k)] + j \cdot \left[I_{\frac{\pi}{2}}^V(k) - I_{\frac{3\pi}{2}}^V(k) \right], \quad (10)$$

$$H^H(l) = [I_0^H(l) - I_\pi^H(l)] + j \cdot \left[I_{\frac{\pi}{2}}^H(l) - I_{\frac{3\pi}{2}}^H(l) \right], \quad (11)$$

式中: $I_\phi^V(k)$ 为向场景投射条纹 $P_\phi^V(u', v'; k, 0)$ 时单像素探测器的响应值; $I_\phi^H(l)$ 为向场景投射条纹 $P_\phi^H(u', v'; l, 0)$ 时单像素探测器的响应值。

最后,将 $H^V(k)$ 与 $H^H(l)$ 分别进行一维离散傅里叶变换,得到原始二维图像向横纵方向的投影函数

$h^H(u'; u, v)$ 和 $h^V(v'; u, v)$:

$$h^H(v'; u, v) = \text{IDFT}[H^V(k)], \quad (12)$$

$$h^V(u'; u, v) = \text{IDFT}[H^H(l)], \quad (13)$$

式中:IDFT[·]表示一维离散傅里叶变换。

相机中各像素的接收域可通过寻找两个投影函数数值大于预定噪声阈值的区域而确定。利用纵横两个方向的投影函数,可确定一个矩形区域作为接收域,如图 4 所示。为了方便后续处理,记 $U_l(u, v)$ 和 $V_l(u, v)$ 分别为像素 (u, v) 横方向和纵方向投影函数大于噪声阈值的宽度,如图 4 所示。记 $B_M(u, v)$ 和

$B_N(u, v)$ 分别为像素 (u, v) 横方向和纵方向投影函数中大于噪声阈值区域的中心点,该中心点为标记像素接收域位置的参数。

基于傅里叶切片原理的定位技术如图 4 所示。其中:左上部分为根据式(8)、(9)所生成的纵横方向条纹;右上部分为通过向场景投射纵横方向条纹得到的原始二维图像向纵横方向的投影函数的示意图;下部分展示了如何根据投影函数确定横方向和纵方向投影函数大于噪声阈值的宽度。

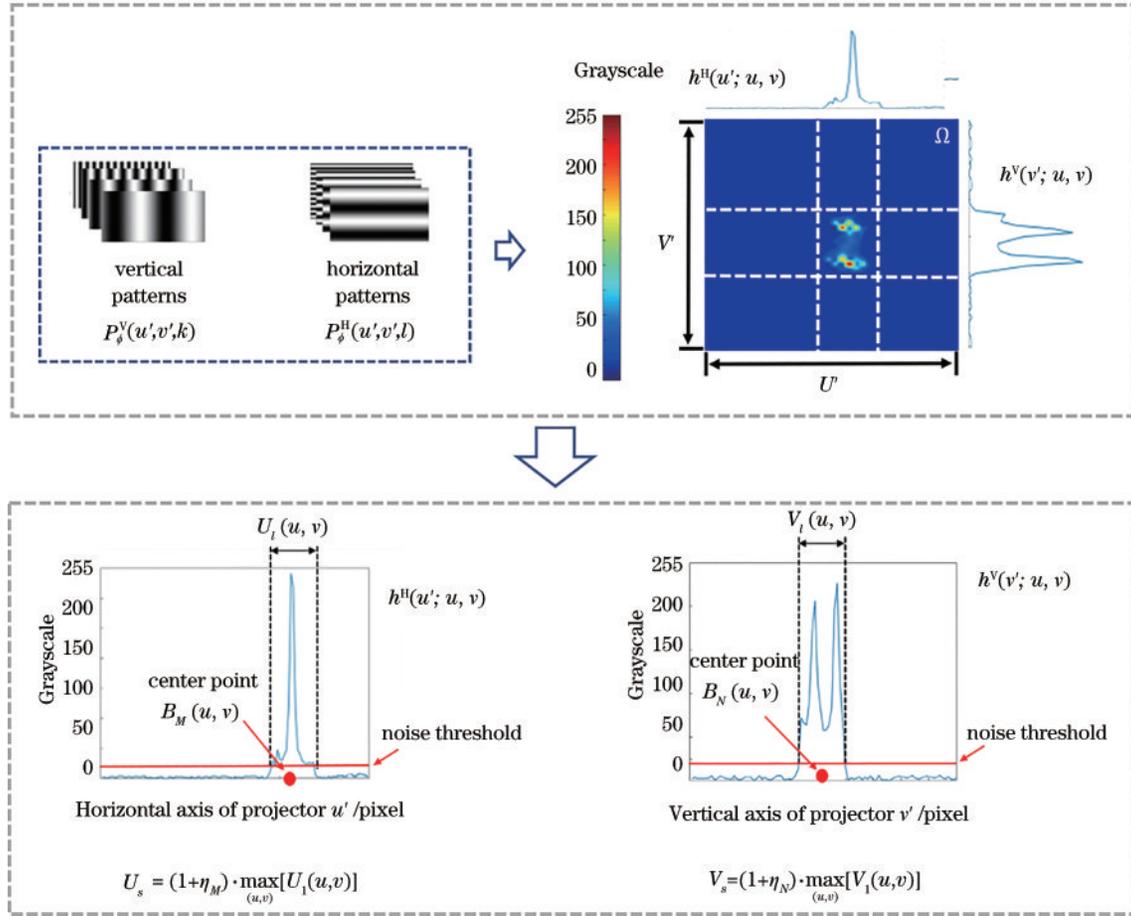


图 4 基于傅里叶切片原理的定位技术

Fig. 4 Localization technology based on Fourier slice theorem

4.2.2 周期延拓条纹

为了满足奈奎斯特采样定律,避免信息丢失,投射条纹的周期应该大于相机像素上的最大接收域。为了实现该目标,根据第 4.2.1 节的理论分析,采用的周期延拓生成公式为

$$\begin{aligned} \tilde{P}_\phi(u', v'; k_s, l_s) = & \sum_{r_1=0}^{\lfloor \frac{M}{M_s} \rfloor} \sum_{r_2=0}^{\lfloor \frac{N}{N_s} \rfloor} P_\phi^B(u' - r_1 U_s, v' - r_2 V_s; k_s, l_s) = \\ & a + b \cos \left[2\pi \cdot \left(\frac{k_s \cdot u'}{U_s} + \frac{l_s \cdot v'}{V_s} \right) + \phi \right], \quad (14) \end{aligned}$$

$$P_\phi^B(u', v'; k_s, l_s) = a + b \cos \left[2\pi \left(\frac{k_s \cdot u'}{U_s} + \frac{l_s \cdot v'}{V_s} \right) + \phi \right], \quad (15)$$

式中: $P_\phi^B(u', v'; k_s, l_s)$ 为基础条纹。

在生成周期延拓条纹时,所需要的横方向与纵方向延拓的周期 U_s 和 V_s 的表达式为

$$U_s = (1 + \eta_M) \cdot \max_{(u, v)} [U_l(u, v)], \quad (16)$$

$$V_s = (1 + \eta_N) \cdot \max_{(u, v)} [V_l(u, v)], \quad (17)$$

式中: $U_l(u, v)$ 和 $V_l(u, v)$ 分别为像素 (u, v) 横方向和纵方向投影函数大于噪声阈值的宽度; $\eta_M \geq 0$ 且 $\eta_N \geq 0$ 为接收域的富裕余量,一般设定为 0.1。

周期延拓条纹的生成方式如图 5 所示。其中,左侧为由基础条纹 $P_\phi^b(u', v'; k_s, l_s)$ 经过周期延拓生成待

投射条纹的示意图,右侧为经过周期延拓后的待投射条纹。

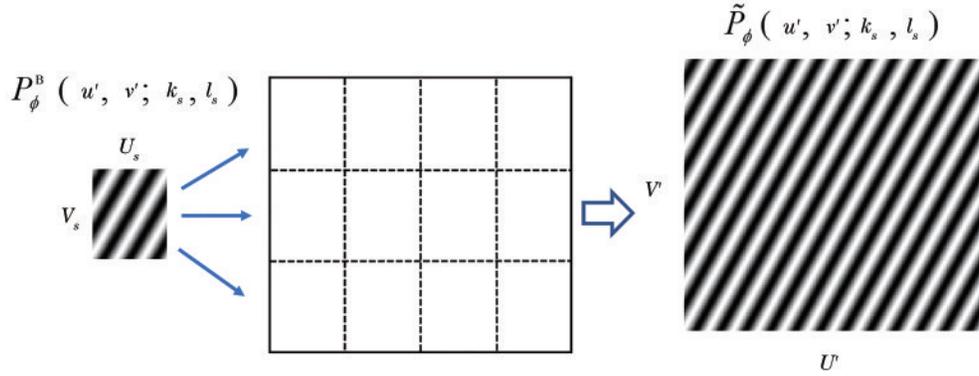


图 5 周期延拓条纹的生成

Fig. 5 The generation of periodic prolongation patterns

4.2.3 局部区域图像重构方法

局部区域图像重构方法包括两个步骤:1)采用傅里叶单像素图像重构方法重构图像;2)根据切片定位结果保留接收域中的图像。应采用局部区域图像重构方法对像素阵列探测器中的全部像素分别重构。

傅里叶单像素图像重构方法对采集到的频率进行二维离散傅里叶逆变换。设 $I_\varphi(u, v; k_s, l_s)$ 为向场景投射周期延拓条纹 $\tilde{P}_\phi(u', v'; k_s, l_s)$ 时,相机像素 (u, v) 采集到的灰度值,则根据四步相移投射模式的复数转换规则,可计算得到像素 (x, y) 光传输图像的傅里叶系数:

$$H(k_s, l_s; x, y) = [I_0(u, v; k_s, l_s) - I_\pi(u, v; k_s, l_s)] + j \cdot [I_{\frac{\pi}{2}}(u, v; k_s, l_s) - I_{\frac{3\pi}{2}}(u, v; k_s, l_s)]. \quad (18)$$

最后,对 $H(k_s, l_s; u, v)$ 进行二维离散傅里叶变换,得到周期延拓后的光传输系数图像:

$$\tilde{h}_r(u', v'; u, v) = \text{IDFT2}[H(k_s, l_s; u, v)], \quad (19)$$

式中:IDFT2[·]表示二维离散傅里叶变换。

根据傅里叶变换的基本理论,由二维离散傅里叶逆变换重构得到的函数自然具有周期性。因此,仅需保留重构得到周期延拓光传输系数图像 $\tilde{h}_r(u', v'; u, v)$ 中接收域内部的图像数据,将外部区域结果置零即可。然而,在实际应用中,二维离散傅里叶变换由快速傅里叶逆变换方法实现。一般而言,快速傅里叶变换仅返回第一个周期内的块重构图像 $h_r^b(k_s, l_s; u, v)$,因此,需要显示对该块重构图像进行周期延拓,从而得到 $\tilde{h}_r(u', v'; u, v)$:

$$\tilde{h}_r(u', v'; u, v) = \sum_{r_1=0}^{\lceil \frac{U'}{U_s} \rceil} \sum_{r_2=0}^{\lceil \frac{V'}{V_s} \rceil} h_r^b(u' - r_1 U_s, v' - r_2 V_s; u, v), \quad (20)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数; $u' = 0, 1, \dots, U' - 1, v' =$

$0, 1, \dots, V' - 1; r_1$ 和 r_2 为整数。该过程如图 6 所示。当 $u' - r_1 U_s$ 和 $v' - r_2 V_s$ 的值超出块图像定义域 $\{(u', v') | u' \in (0, U_s - 1), v' \in (0, V_s - 1)\}$ 时, $h_r^b(u', v'; u, v)$ 的值被假设为 0。

当得到周期延拓光传输系数图像 $\tilde{h}_r(u', v'; u, v)$ 后,根据切片定位获得的接收域中心位置 $B_M(u, v)$ 和 $B_N(u, v)$,保留以该位置为中心且边长为 U_s 和 V_s 的矩形区域内 $\Omega_r(u, v)$ 的数据。 $\Omega_r(u, v)$ 的表达式为

$$\Omega_r(u, v) = \{(u', v') | B_M(u, v) - \lfloor M_s/2 \rfloor \leq u' < B_M(u, v) + \lceil M_s/2 \rceil, B_N(u, v) - \lfloor N_s/2 \rfloor \leq v' < B_N(u, v) + \lceil N_s/2 \rceil\}, \quad (21)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 和 $\lceil \cdot \rceil$ 分别表示向下取整函数和向上取整函数。

将该区域外的区域置零,得到光传输系数的重构结果。上述过程可描述为

$$h_r(u', v'; u, v) = \tilde{h}_r(u', v'; u, v) \cdot M(u', v'; u, v), \quad (22)$$

$$M(u', v'; u, v) = \begin{cases} 1, & (u', v') \in \Omega_r \\ 0, & (u', v') \notin \Omega_r \end{cases}. \quad (23)$$

式中: \cdot 表示逐元素乘积; $M(u', v'; u, v)$ 为掩码。

局部区域图像重构方法的实施步骤如图 6 所示。由于现有快速傅里叶逆变换的返回结果中一般仅包含一个周期,因此首先需将其进行周期延拓。图 6 左上部分子图的含义是:对快速傅里叶逆变换后的结果进行周期延拓,延拓为与投影仪分辨率相同的图像,其操作对应于式(20)。图 6 左下角为横方向和纵方向投影函数,式(21)的接收域由横方向和纵方向投影函数决定。图 6 右侧为最终重构得到的光传输系数图像,该结果为经过式(22)操作后得到的图像。

4.3 并行单像素成像的亚像素匹配方法

第 4.2 节给出了基于并行单像素成像方法对光传输系数采集的数学模型。由于直接光和复杂光来源于投射器的不同像素位置,故并行单像素成像已经实现了直接光和复杂光的分离。本小节的任务是分别筛选

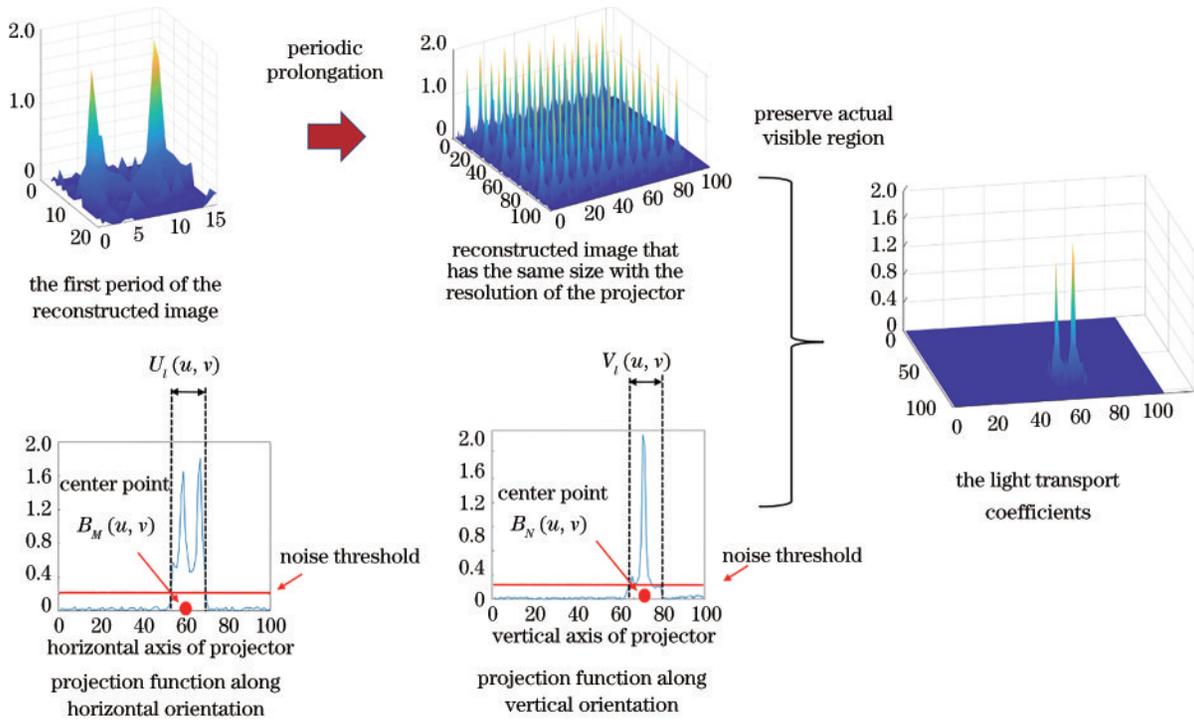


图 6 局部区域图像重构方法
Fig. 6 Local region image reconstruction method

出由直接光和其他复杂光所形成的光斑,并根据所筛选的光斑得到直接照明分量图和复杂照明分量图。为了实现复杂光条件下的三维重构目标,还需根据所筛选出的直接光斑计算亚像素匹配坐标。

根据双目立体视觉中的极线几何约束筛选出由直接光和其他复杂光所形成的光斑。由极线几何可知,某像素接收到的直接照明只可能来自于由该像素所确定的投射器平面的极线上,该约束条件被称为极线约束。从上述分析可知,依据极线约束可去除发生在极平面外的复杂光照的影响。

基于并行单像素成像的亚像素匹配方法包含以下 3 部分:极线方程的计算、直接光斑与复杂光斑的筛选方法、基于灰度质心的亚像素匹配方法。

4.3.1 极线方程的计算

对于相机的每个像素 (u, v) 计算其对应于投射器视角的极线方程,记为 $l'(u, v)$ 。

4.3.2 直接光斑与复杂光斑的筛选方法

对于每个相机像素,根据光传输系数的强度值选择候选的匹配点。由于被测物体的形态和材质属性的影响,投射器上某个像素发出的光线可能会经过多次反射光的作用才被相机上的某个像素所接收到。在投射器不同位置上发出的光线中最终能够照射到某相机像素的光强并不相同。在许多位置上,可能几乎没有光能够传输到该相机像素,而在其他某些位置上却有大量光线可以通过某种路径传输过来。上述光传输特征使得光传输系数中存在着分布于不同区

域的离散光斑。为了进行三维形貌测量,需要得到直接分量的匹配点。这个匹配点从一些候选点中得到,候选点为得到的光传输系数中每个光斑中强度的局部极大者。若记 $S_i = \{(m_j, n_j), j = 1, 2, \dots, K_i\}$ 为第 i 个光斑中的全部投射器位置, (m_j, n_j) 为该光斑中的第 j 个位置, K_i 为该光斑中总共的位置个数,则候选点 C_i 的计算公式为

$$C_i = \max_{(m,n)} h_r(m, n) \quad \text{s.t. } (m, n) \in S_i, \quad (24)$$

式中:相机像素位置 (u, v) 已被省略。

根据双目立体视觉中的极线约束,从候选点中寻找像素精度直接照明匹配点。对于结构光三维形貌测量系统,双目立体视觉中的极线约束规定了其光传输过程总会给你直接分量应满足的必要条件,可表述为:对于某相机像素,其投射器视角下光传输系数中的直接分量应通过由该像素所确定的极线。由于存在计算误差,因此选择候选点中距离极线最近者为像素精度直接照明匹配点 u' , 即

$$u' = \underset{i}{\operatorname{argmin}} d'_i, \quad (25)$$

式中: d'_i 为候选点 C_i 与极线的距离; argmin 返回使最小值成立的候选点。

4.3.3 基于灰度质心的亚像素匹配方法

当获得像素精度直接照明匹配点 (u^*, v^*) 后,通过重心亚像素匹配算法计算具有亚像素精度的匹配点 (u_s^*, v_s^*) :

$$\begin{cases} u_s^* = \frac{\sum_{(u,v) \in S} uh(u,v)}{\sum_{(u,v) \in S} h(u,v)}, \\ v_s^* = \frac{\sum_{(u,v) \in S} vh(u,v)}{\sum_{(u,v) \in S} h(u,v)}, \end{cases} \quad (26)$$

式中: $S = \{(u, v) | |u - u^*| \leq m, |v - v^*| \leq n\}$, m 与 n 的值设定为 2, 是为了限制亚像素计算的矩形区域边界。

当获取得到亚像素匹配点后, 再根据三角测量原理重构得到三维坐标点。

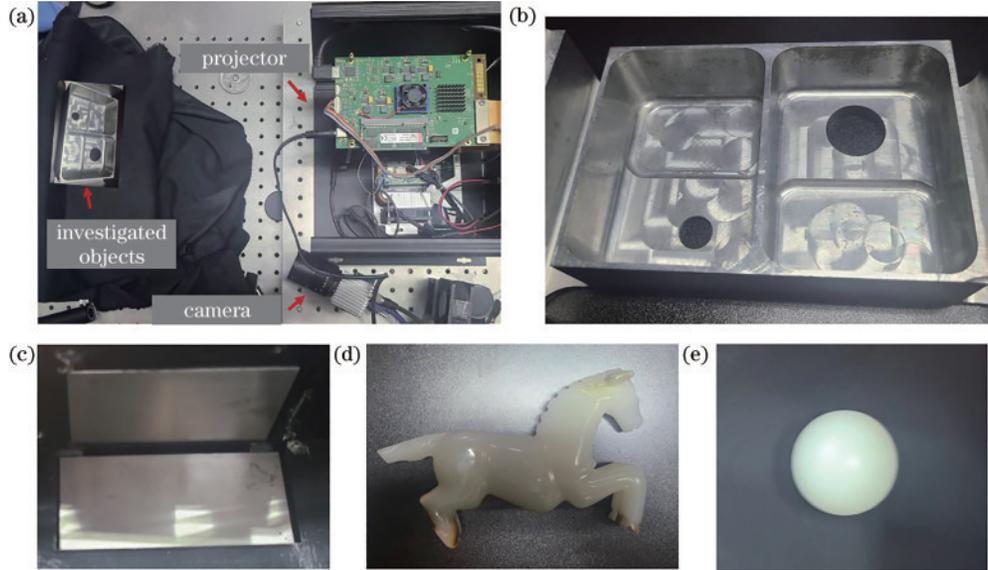


图 7 实验设备与测量对象。(a)实验设备;(b)金属工件;(c)V型金属槽;(d)玉马;(e)尼龙球

Fig. 7 Experimental setup and investigated objects. (a) Experimental setup; (b) metal workpiece; (c) V-shaped metal groove; (d) jade horse; (e) polyamide sphere

5.1 基于并行单像素成像方法的复杂光分离实验

采用并行单像素成像方法对金属工件和玉马进行成像。具体的实验过程如下:首先,根据式(8)、(9)生成纵横方向条纹,并向待测对象投射该条纹,当完成图像采集后,根据式(10)~(13)求解纵横方向的投影函数;然后,根据式(16)、(17)确定生成周期延拓条纹时所需要的横方向与纵方向延拓的周期,并根据式(14)、(15)生成待投射的延拓条纹;最后,投射周期延拓条纹,并使用相机进行采集,当完成数据采集后根据式(18)~(23)得到光传输系数图像。

图 8 展示了并行单像素成像的实验结果。对于金属工件测量对象,图 8(a)为相机视角的拍摄图像。在该图中标记有一个像素 A,该像素的并行单像素成像结果如图 8(c)所示。该成像结果即为光传输系数可视化后投射器视角的图像。像素 A 在相机视角的坐标位置标记于图 8(c)右上角。同时,为了将其灰度值转换至 0~255 区间范围,所需的倍乘因子也标记于右上角。从图 8(c)中可观察到两个明显的光斑。其中:靠下呈现出偏平形状的光斑对应于多次反光的分离光;

5 实验结果与分析

实验平台为一台工业相机与一台结构光投射器组成的单目结构光三维视觉传感器,如图 7(a)所示。其中,相机分辨率为 1600×1200 ,结构光投射器分辨率为 1920×1080 。该系统采集帧率为 165 frame/s。在测量之前标定相机与投射器组成的立体视觉系统的内外参数。测量对象为图 7(b)~(e)中展示的金属工件、V型金属槽、玉马和尼龙球。其中,金属工件和 V型金属槽中主要受多次反光干扰,玉马和尼龙球主要受到半透明次表面散射干扰。V型金属槽是由两块 1 级量块组成的。

靠上的圆形光斑对应于直接光照。从该实验可知,并行单像素成像方法实现了多次反射光与直接照明光的分离。对于玉马测量对象,图 8(b)为相机视角的拍摄图像。在该图中标记有一个像素 B,该像素的并行单像素成像结果如图 8(d)所示。该像素在相机视角的坐标位置标记于图 8(d)右上角。同时,为了将其灰度值转换至 0~255 区间范围,所需的倍乘因子也标记于右上角。从图 8(d)中可观察到一个较大的光斑。该光斑即为并行单像素成像方法对次表面散射光的分离结果。由于玉马的半透明材质的影响,像素 B 处可以接受到更大范围的投射器像素的影响,基于并行单像素成像方法重构得到的投射器视角的光传输系数可将不同投射器像素的影响分离。

5.2 基于并行单像素成像方法的三维重构

本小节对比了投影光栅相位方法与所提并行单像素成像方法对图 7 中 4 个物品的三维重构结果。由于金属工件与 V型金属槽中存在非常强烈的多次反光现象,传统的投影光栅相位方法无法得到完整的点云数据,如图 9(a)与图 9(c)所示。在采用并行单像素成像

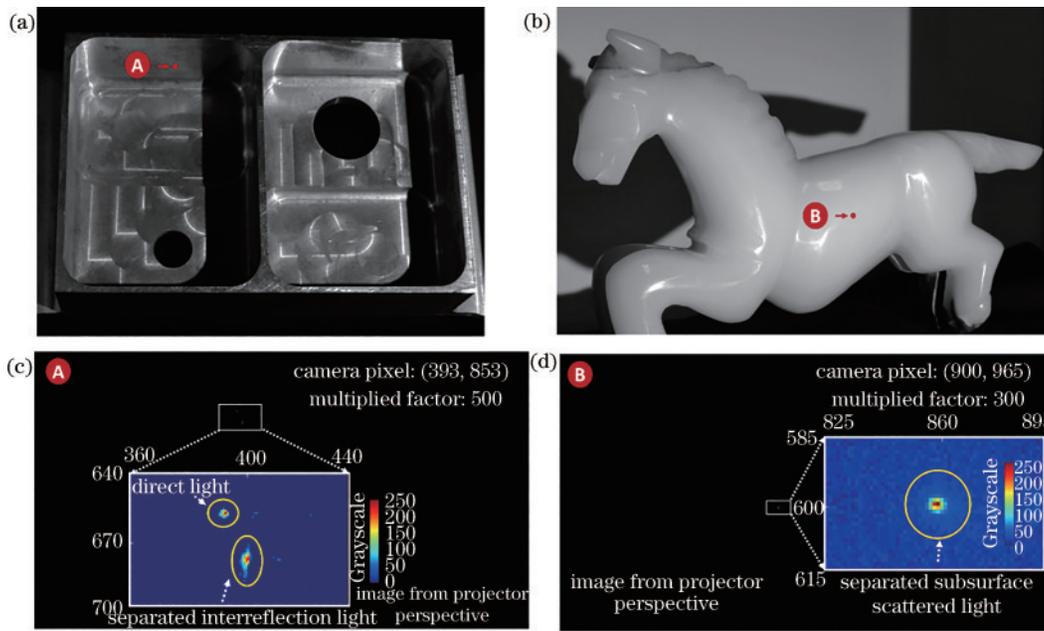


图 8 并行单像素成像方法的复杂光分离结果。(a)相机视角下的金属工件;(b)相机视角下的玉马;(c)工件上像素 A 的复杂光分离结果;(d)玉马上像素 B 的复杂光分离结果

Fig. 8 The results of separation of complex illumination by parallel single-pixel imaging. (a) Metal workpiece from the perspective of camera; (b) jade horse from the perspective of camera; (c) the separation of complex illumination of pixel A on the workpiece; (d) the separation of complex illumination of pixel B on the jade horse

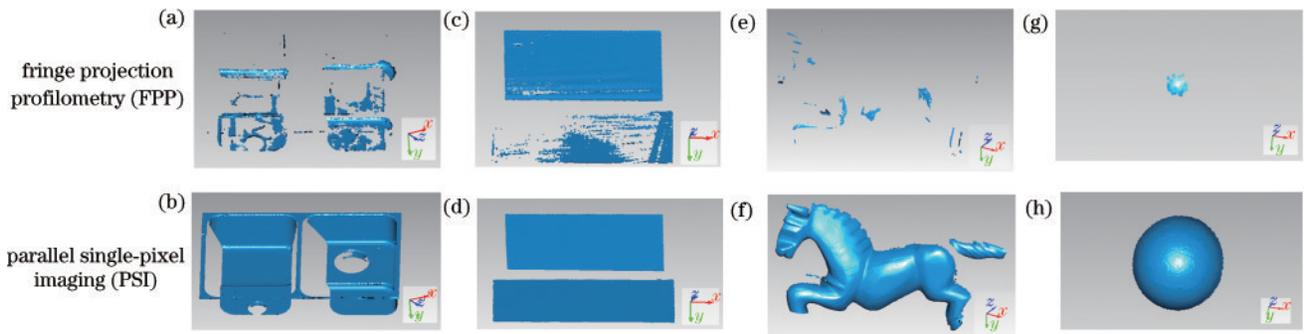


图 9 并行单像素成像方法与投影光栅相位测量方法的三维重构结果。(a)投影光栅相位方法的金属工件三维重构结果;(b)并行单像素成像方法的金属工件三维重构结果;(c)投影光栅相位方法的 V 型金属槽三维重构结果;(d)并行单像素成像方法的 V 型金属槽三维重构结果;(e)投影光栅相位方法的玉马三维重构结果;(f)并行单像素成像方法的玉马三维重构结果;(g)投影光栅相位方法的尼龙球三维重构结果;(h)并行单像素成像方法的尼龙球三维重构结果

Fig. 9 3D reconstruction results of parallel single-pixel imaging (PSI) and fringe projection profilometry (FPP). (a) 3D reconstruction results of metal workpiece by FPP; (b) 3D reconstruction results of metal workpiece by PSI; (c) 3D reconstruction results of V-shaped metal groove by FPP; (d) 3D reconstruction results of V-shaped metal groove by PSI; (e) 3D reconstruction results of jade horse by FPP; (f) 3D reconstruction results of jade horse by PSI; (g) 3D reconstruction results of polyamide sphere by FPP; (h) 3D reconstruction results polyamide sphere by PSI

方法时,根据定位阶段的结果,金属工件与 V 型金属槽的可见域为 128×128 。由三维重构的结果可知,并行单像素成像方法可得到完整的点云数据,如图 9(b)与图 9(d)所示。

玉马与尼龙球是半透明的,次表面散射现象使得传统的投影光栅条纹所投射的条纹调制度过低,从而导致测量失效,如图 9(e)与图 9(g)所示。对这两个场景,传统的投影光栅相位测量方法仅能得到很少部分的三维数据。在采用并行单像素成像方法时,根据定

位阶段的结果,玉马与半透明球的可见域为 100×100 。由三维重构的结果可知,并行单像素成像方法可得到完整的点云数据,如图 9(f)与图 9(h)所示。

5.3 基于并行单像素成像方法的精度分析

为了评价并行单像素成像方法三维重构的精度,对 V 型金属槽和尼龙球的点云数据分别采用最小二乘法拟合平面与球面,再计算点云与拟合平面或球面的均方根误差(RMS),以均方根误差值作为精度判定的依据。对于尼龙球,由于已知该尼龙球的真实直径为

25.470 mm, 还可通过点云拟合得到的估计直径与真实直径的偏差评价并行单像素成像方法的精度。精度评价的结果如图 10 所示。其中, 图 10(a) 为 V 型金属槽的平面拟合均方根误差。上表面的均方根误差为

0.015 mm, 下表面的均方根误差为 0.009 mm。图 10(b) 为尼龙球的球面均方根误差与拟合的直径值。球面均方根误差为 0.026 mm, 直径拟合值为 25.485 mm, 该值相对于真实值的偏差为 0.015 mm。

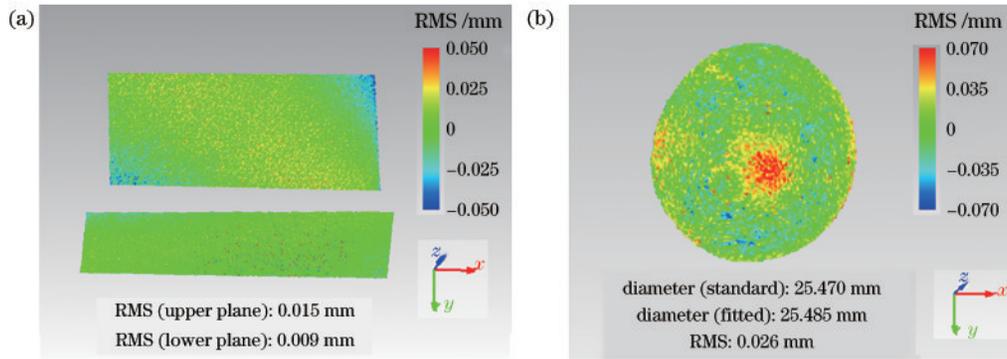


图 10 基于并行单像素成像的精度分析。(a) V 型金属槽的精度分析; (b) 尼龙球的精度分析

Fig. 10 Accuracy analysis for PSI. (a) Accuracy analysis for V-shaped metal groove; (b) accuracy analysis for polyamide sphere

6 结 论

首先介绍了条纹投射三维重构的基本原理, 并指出传统面结构光三维重构方法无法解决复杂光照条件下的三维重构问题。进一步概述了现有复杂光照下的三维视觉重构方法, 并指出这些方法是针对特定问题而提出的经验性方法, 缺乏统一的理论基础。所提并行单像素成像方法建立了复杂光照条件下三维重构问题的数学模型。该方法将直接照明光束与其他复杂光照光束对相机像素混叠响应的影响分离, 使其能够解决在实际测量场景中各种复杂光干扰下的三维重构问题。着重介绍了并行单像素成像的基本原理, 并针对多次反光与半透明次表面散射两种复杂光照现象进行实验验证所提方法的正确性, 同时进行了精度评价分析。

所提并行单像素成像方法仅研究了面向多次反光与半透明次表面散射两种情形下的三维重构。然而, 根据第 3 节的分析可知, 尚有如下几种复杂光照并未考虑: 1) 由于参与介质的体散射效应所引起的复杂光照; 2) 由于被测物体透明表面的折射/反射现象所引起的复杂光照; 3) 阶跃边缘处也会出现条纹混叠导致传统条纹投射三维重构方法失效。在后续的工作中, 可将并行单像素成像的基本原理拓展至上述几种复杂光照的分离与三维重构。

参 考 文 献

- [1] Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(8): 2666-2680.
- [2] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.
- [3] 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.
- [4] Gupta M, Nayar S K. Micro phase shifting[C]//2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 813-820.
- [5] Gupta M, Agrawal A, Veeraraghavan A, et al. Structured light 3D scanning in the presence of global illumination[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 713-720.
- [6] Gupta M, Agrawal A, Veeraraghavan A, et al. A practical approach to 3D scanning in the presence of interreflections, subsurface scattering and defocus[J]. International Journal of Computer Vision, 2013, 102(1): 33-55.
- [7] O'Toole M, Mather J, Kutulakos K N. 3D shape and indirect appearance by structured light transport[C]// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, March 29, 2016, New York: IEEE Press, 2016: 1298-1312.
- [8] Zhao H J, Xu Y, Jiang H Z, 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.
- [9] Hu Q Y, Harding K G, Du X M, et al. Shiny parts measurement using color separation[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 6000: 60000D.
- [10] Xu Y, Zhao H J, Jiang H Z, et al. High-accuracy 3D shape measurement of translucent objects by fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 18421-18434.
- [11] Chen T B, Lensch H P A, Fuchs C, et al. Polarization and phase-shifting for 3D scanning of translucent objects [C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis,

- MN, USA. New York: IEEE Press, 2007.
- [12] Lutzke P, Kühmstedt P, Notni G. Measuring error compensation on three-dimensional scans of translucent objects[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(6): 063601.
- [13] Lutzke P, Kühmstedt P, Notni G. Fast error simulation of optical 3D measurements at translucent objects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8493: 84930U.
- [14] Lutzke P, Heist S, Kühmstedt P, et al. Monte Carlo simulation of three-dimensional measurements of translucent objects[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(8): 084111.
- [15] Rao L, Da F P. Local blur analysis and phase error correction method for fringe projection profilometry systems[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(15): 4267-4276.
- [16] Jiang H Z, Zhai H J, 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.
- [17] Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Shape from interreflections[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1991, 6(3): 173-195.