

基于近场光度立体视觉的金属表面纹理重构

简振雄, 王晰, 任杰骥, 任明俊*

上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

摘要 精密金属零件的表面质量会影响产品的性能与外观,为此需要对零件的表面纹理进行测量与评定。常用的接触式测量方法测量效率低,而光学测量方法易受表面高亮反射的影响,为此提出一种基于近场非朗伯光度立体视觉的高亮金属表面纹理重构方法。为了有效描述非朗伯反射,该方法采用基于共位光源的逆向反射模型,用来解耦表面法向量与非线性反射模型。该方法利用邻域信息提高逆向反射模型的鲁棒性,利用最大值融合策略克服阴影影响并渲染生成针对性的仿真数据集,从而提高对金属表面反射的适应性。结果表明,所提方法能够高精度地重构高亮金属表面纹理,测量相对误差小于 15%。

关键词 测量; 表面测量; 计算成像; 光度学; 金属表面纹理

中图分类号 TP274

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1112002

Metal Surface Texture Reconstruction Based on Near-Field Photometric Stereo

Jian Zhenxiong, Wang Xi, Ren Jieji, Ren Mingjun*

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract The surface quality of precision metal parts will affect the performance and appearance of the product. For this reason, it is necessary to measure and evaluate the surface texture of the parts. Commonly used contact measurement methods have low measurement efficiency, and optical measurement methods are susceptible to the effects of surface highlight reflection. For this reason, a method based on near-field non-Lambertian photometric stereo vision for highlight metal surface texture reconstruction is proposed. In order to effectively describe the non-Lambertian reflection, this method uses an inverse reflectance model based on an inverse reflectance light source to decouple the surface normal vector and the nonlinear reflection model. This method uses neighborhood information to improve the robustness of the inverse model, and uses the maximum fusion strategy to overcome the influence of shadows and rendering generates targeted simulation datasets, thereby improving the adaptability to metal surface reflection. The results show that the proposed method can reconstruct the high-brightness metal surface texture with high precision, and the relative measurement error is less than 15%.

Key words measurement; surface measurement; computational imaging; photometry; surface texture of metal

OCIS codes 120.6650; 120.5240; 110.1758

1 引言

金属在加工过程中会产生刀纹等表面纹理,这会直接影响产品的外观和性能^[1],但其能够反映出系统的加工误差^[2]。使用机器人加工系统加工大型金属

构件^[3]的过程中,由于系统的刚度较差,而且易发生振动,所以容易在构件的表面上留下较明显的表面纹理,因此金属表面纹理重构技术对产品表面质量的控制和加工过程的监控都具有重要的意义。常用的表面纹理测量方法可分为接触式和非接触式两大类,其

收稿日期: 2020-11-11; 修回日期: 2020-12-13; 录用日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91948301)、上海市科委高新技术领域项目(19511106000)

* E-mail: renmj@sjtu.edu.com

中接触式测量方法主要使用轮廓仪来测量,非接触式测量方法主要采用光学方法,包括白光干涉^[4]、条纹投影^[5]、激光扫描^[6-7]和光度立体视觉^[8]等。

接触式测量方法通过记录探针接触被测表面的探针位置来测量物体点的空间坐标,该方法精度很高,结果稳定可靠,对物体表面的反射性质没有要求,但是单点测量的方式会极大地限制了采样速率,使其难以重构出整个表面的纹理。

白光干涉方法利用白光的干涉现象并通过纵向扫描的方式来寻找零光程差点以测量物体表面点的空间坐标,该方法具有纳米级的精度且能够适应大部分的反射表面,但其测量范围太小,通常小于 1 cm,因此不适合重构大范围的金属表面纹理。

条纹投影方法和激光扫描方法都依据三角测量原理来测量物体表面点的空间坐标。首先将特定图样投射到物体的表面上,然后使用相机来拍摄并识别对应特征以建立投射中心-物体表面点-相机光心所构成的三角形,最后计算求得被测点的空间坐标。这两种方法在水平方向上的精度较高,但深度分辨率不足,因此不适用于重构精细的表面纹理。另外,条纹投影方法还要求物体表面接近漫反射,面对高亮金属表面会出现过曝缺失的现象。

光度立体视觉方法通过分析光的反射模型和相机的成像过程,可以构建不同光照方向下得到的图片像素值和被测物体表面法向量之间的关系,从而求出物体表面的法向量,进而通过积分法向量来重建出物体表面的三维形貌。该方法对物体表面的深度变化十分敏感,能够重构精细的表面纹理,采用高分辨率相机和大倍率镜头可以同时获得较大的测量范围和高采样密度,但是一般的光度立体视觉方法在处理高亮金属的过程中,法向量的恢复精度较低,导致重构出的表面纹理产生明显扭曲。

本文提出一种适用于高亮金属表面的大范围表面纹理重构方法,该方法通过固定的拍摄场景以及引入近平面假设,可以简化近场光度立体视觉方法的标定过程和计算复杂度。首先基于共位光源下的逆向反射模型构建适用于预测近场条件下金属表面法向量的神经网络,然后采用渲染的方法生成针对性的仿真数据集以训练神经网络,最后使用神经网络预测金属表面的法向量,进而积分重建出被测表面的三维形貌,除去形状后便可得到金属的表面纹理。实验结果表明,该方法重构得到的表面纹理相当接近白光干涉仪的测量结果。相比于白光干涉仪,光度立体视觉装置的测量范围更大,测量方式更

灵活,甚至可以安装在机器人的末端,能够实现大型金属构件表面纹理的全面重构和表面质量的评价,可以解决大型构件的测量难题。

2 基本原理

2.1 基本光度立体视觉方法

光度立体视觉方法利用不同光照方向下的像素值来恢复物体表面的法向量,并使用积分法向量来重建深度图。相机的成像过程是光度立体视觉方法的物理基础之一,该过程建立了某物体点的表面法向量与相机所记录的像素值之间的映射关系。假设共有 M 个不同的光照方向,在第 m 个光照方向 l_m 所对应的图像中,某个特定点的像素值 o_m 可表示为

$$o_m = tk_c E'_m f_{\text{BRDF}}(l_m, n, v) n^T l_m, \quad (1)$$

式中: v 为观测方向; n 为给定点的表面法向量; t 为曝光时间; k_c 为与镜头直径、镜头焦距以及相机响应相关的系数; E'_m 为第 m 个光源的光照强度; $f_{\text{BRDF}}(l_m, n, v)$ 为双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF),其描述了特定材料的光反射行为,函数值为特定条件下反射光的辐射强度 E 与入射光的辐照强度 I 的比例关系^[8],如图 1 所示。BRDF 通常为与表面法向量耦合的复杂非线性函数,光度立体视觉方法的核心研究点之一为如何有效处理该未知非线性函数。(1)式未考虑阴影和互反射。

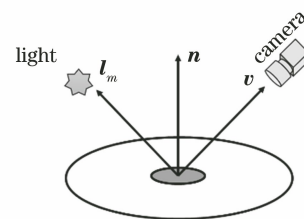


图 1 BRDF 的模拟示意图

Fig. 1 Schematic of BRDF simulation

早期的光度立体视觉方法^[9]假设 BRDF 为常数函数,即假设为朗伯体表面。为了简化对全场入射光线方向和光源强度的计算,早期的光度立体视觉方法还假设物体距离相机和光源非常远,此时入射光可近似为平行光,相机观测物体的过程可近似为正交投影。在该远场假设下, k_c 、 E'_m 、 l_m 和 v 在整张照片中均保持不变。在上述两个假设的条件下,只需最少三个光照方向即可求得照片中每个点的法向量。

2.2 近场光度立体视觉

为了满足远场假设,相机到物体的距离以及光源到物体的距离通常设为物体自身尺寸的 10 倍以

上,这限制了光度立体视觉方法在测量领域中的应用。当相机与光源距离被测物体较近时,即近场光度立体视觉场景中,被测物体由 Quasi 点光源^[10]照射并由透视投影相机成像,图像中各个像素所对应的 k_c 、 E'_m 、 I_m 和 ν 均互不相同。其中 k_c 可表示为

$$k_c = k \frac{\pi}{4} (d/f)^2 \cos^4 \alpha, \quad (2)$$

式中: k 为常数; d 为镜头的直径; f 为焦距; α 为 ν 与相机主光轴的夹角。近场光度立体视觉场景中,物体的成像光路如图 2 所示^[8]。

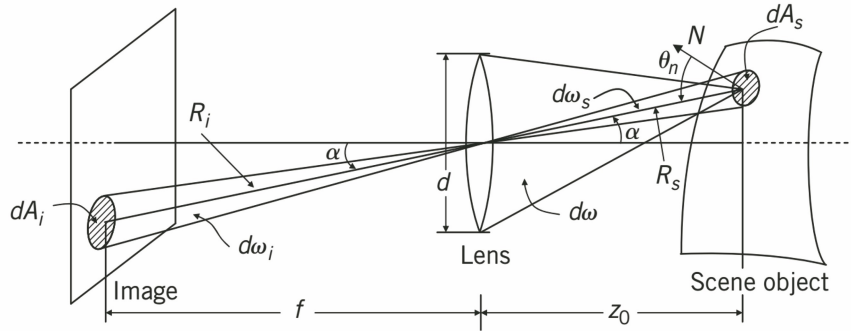


图 2 近场光度立体视觉场景中物体的成像光路^[8]

Fig. 2 Imaging path of object in near-field photometric stereo vision scene^[8]

在 Quasi 点光源的照射范围内,某个物体点受到的光照强度 E_{light} 可表示为

$$E_{\text{light}} = \frac{I_{\text{max}} \cdot \cos \theta}{L^2}, \quad (3)$$

式中: I_{max} 为该点光源的最大光照强度; θ 为光照方向 \mathbf{l} 与主光源照射方向的夹角; L 为该空间点到光源的距离。Quasi 点光源向任意方向发射的光路如图 3 所示。

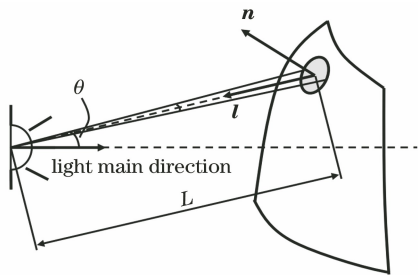


图 3 Quasi 点光源向任意方向发射的光路

Fig. 3 Quasi point source emitting light in any direction

将(2)式和(3)式代入(1)式,则第 m 个光源的像素值可改写为

$$o_m = tk \frac{\pi}{4} (d/f)^2 \cos^4 \alpha \frac{I_m \cdot \cos \theta_m}{L_m^2} f_{\text{BRDF}}(\mathbf{l}_m, \mathbf{n}, \nu) \mathbf{n}^T \mathbf{l}_m. \quad (4)$$

对于固定的近场场景(相机内参固定的场景),虽然图像中各个像素点所对应的 ν 各不相同,但某一个特定像素点所对应的 ν 是固定不变的,则对应的 α 值也固定不变。然而, θ_m 、 I_m 和 L_m 与物体点的深度 z 非线性耦合在一起,这是近场光度立体视觉的核心科学问题之一。

3 基于近平面近场光度立体视觉的高亮金属表面纹理重构方法

基于近平面近场光度立体视觉的金属表面纹理重构流程如图 4 所示,其基本思想是利用近平面的条件来消除场景中的光源参数与深度非线性耦合的

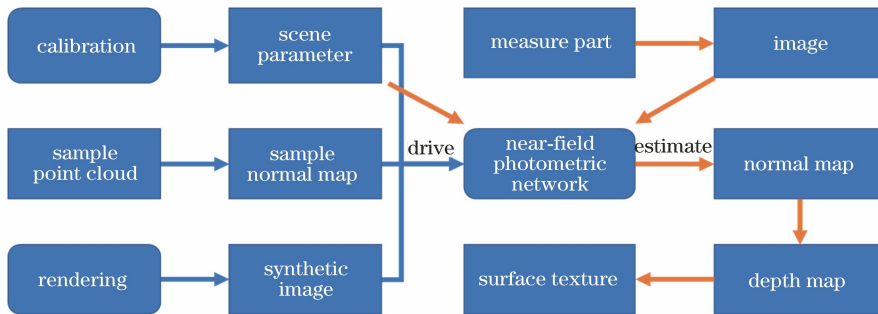


图 4 基于近平面近场光度立体视觉的金属表面纹理重构流程

Fig. 4 Metal surface texture reconstruction process based on near-plane near-field photometric stereoscopic vision

问题,并利用与真实场景接近的仿真数据集来针对性地训练基于共位光源的非朗伯光度立体视觉深度学习模型。首先标定相机内参、光源位置和光照强度分布等拍摄场景参数,并使用白光干涉仪来获取高精度的表面点云和法向量。然后利用场景参数和样品法向量渲染得到的仿真数据集来训练基于共位光源的非朗伯光度立体视觉深度学习模型。最后将被测物体在不同光源下拍摄得到的系列图像与场景参数一起输入到神经网络中,从而预测出物体表面的法向量并积分重建获得深度图,再使用高通滤波器去除形状以获取物体的表面纹理。

3.1 近平面假设

为了有效重构金属表面的精细纹理,成像系统的水平分辨率需小于 $25 \mu\text{m}$,此时成像系统的景深通常不超过 3 mm ,即被测物体表面的深度变化不可超过 3 mm 。该深度变化范围远小于物体到光源及相机的距离,这样的物体表面可以视作一个近平面,从而简化场景光源参数的计算。

在近平面假设的条件下,被测物体表面上每个点的深度均近似等于成像系统焦平面到光心的距离,变化范围较小。此时与深度相关的参数 θ_m 、 I_m 和 L_m 可用固定值 $\hat{\theta}_m$ 、 \hat{I}_m 和 \hat{L}_m 近似表示,则(4)式可简化为

$$o_m = t\hat{k}_m f_{\text{BRDF}}(\hat{\mathbf{l}}_m, \mathbf{n}, \mathbf{v}) \mathbf{n}^\top \hat{\mathbf{l}}_m, \quad (5)$$

式中: \hat{k}_m 为某个像素点在第 m 个光源下的近似强度因子,可表示为

$$\hat{k}_m = k \frac{\pi}{4} (d/f)^2 \cos^4 \alpha \frac{I_m \cdot \cos \hat{\theta}_m}{\hat{L}_m^2}. \quad (6)$$

针对某一个特定的像素点,其在第 m 个光源下的 $\hat{\mathbf{l}}_m$ 和 \hat{k}_m 均是常数,而且与深度 z 不再耦合,此时(5)式就近似于远场假设下的(1)式。对于不同的像素点, $\hat{\mathbf{l}}_m$ 和 \hat{k}_m 均为不同的常数,这是与远场光度立体视觉最大的不同。需要注意的是,近平面假设仅用于解耦场景中的光源参数和深度 z ,并不适用于后续的法向量积分重建深度图这一过程。

3.2 近平面假设下的拍摄场景标定

拍摄场景如图 5 所示,其中 P_m 为第 m 个光源的位置, D 为被测物体所在的工作平面(即焦平面)到相机坐标系原点的距离, $P'_{(u,v)}$ 为某个坐标为 (u, v) 的特定像素点, $P_{(u,v)}$ 为该像素点在工作平面上对应的空间点, $\mathbf{v}_{(u,v)}$ 为该像素点对应的观测方向, $\hat{\mathbf{l}}_{m(u,v)}$ 为该像素点在第 m 个光源下的近似光照方向。通过标定拍摄场景中的相机内参、 D 和 P_m ,可以求出每个像素点 $P'_{(u,v)}$ 所对应的 $\mathbf{v}_{(u,v)}$ 和 $\hat{\mathbf{l}}_{m(u,v)}$;再借助白板可以标定各像素点在第 m 个光源下的近似强度因子 $\hat{k}_{m(u,v)}$ 。将图像中的像素值除以 $t\hat{k}_m$ 可以得到归一化的像素值 \tilde{o}_m ,方便后续求解法向量 \mathbf{n} 。本文约定相机坐标系为世界坐标系,所有空间点坐标和方向矢量均置于相机坐标系中。

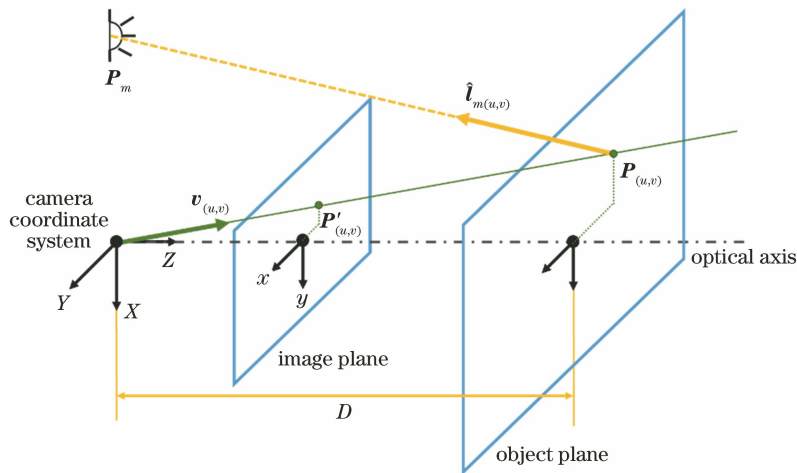


图 5 拍摄场景示意图

Fig. 5 Diagram of shooting scene

相机内参由经典的张正友方法^[11]来获得,工作平面距离 D 可由外参来获得,此时每个像素点所对应的观测方向 \mathbf{v} 可表示为

$$\mathbf{v}_{(u,v)} = - \left(\frac{u - c_u}{f_x}, \frac{v - c_v}{f_y}, 1 \right), \quad (7)$$

式中: (c_u, c_v) 为主点坐标; f_x 和 f_y 分别为 x 方向

和 y 方向标定所得的焦距。根据该观测方向与工作平面之间的距离,即可求得每个像素点所对应的工作平面空间点在相机坐标系下的三维坐标,表达式为

$$\mathbf{P}_{(u,v)} = -\mathbf{v}_{(u,v)} D. \quad (8)$$

实验采用聂颖^[10]提出的标定方法来标定光源位置,该方法利用多个球在点光源照射下的高光点和球边缘轮廓的图像坐标,并根据透视关系来求得球心和高光点的空间坐标,进而根据镜面反射原理可以求出点光源的空间位置 \mathbf{P}_m 。此时,各像素点所对应的近似光照方向可表示为

$$\hat{\mathbf{l}}_{m(u,v)} = \frac{\mathbf{P}_{(u,v)} - \mathbf{P}_m}{\|\mathbf{P}_{(u,v)} - \mathbf{P}_m\|}. \quad (9)$$

利用标准白板来标定光强分布,即标定每个像素点的近似强度因子 \hat{k}_m 。标准白板可视作标准朗伯体,即 BRDF 值为 $1/\pi$,将其平放于工作平面,假定其表面法向量为 $\mathbf{n}_w = [0 \ 0 \ -1]$ 。根据(5)式,图像中各像素点的像素值为

$$o_{w,m(u,v)} = t_w \hat{k}_{m(u,v)} \frac{1}{\pi} \mathbf{n}_w^T \hat{\mathbf{l}}_{m(u,v)}, \quad (10)$$

式中: t_w 为拍摄白板的曝光时间; $\hat{k}_{m(u,v)}$ 为各像素点的近似强度因子; $\hat{\mathbf{l}}_{m(u,v)}$ 为各像素点的近似光照方向。除了 $\hat{k}_{m(u,v)}$ 以外,所有符号均为已知量,此时可求得每个像素点的近似强度因子。为了排除光源强度的影响,在法向量的预测过程中,实际图像均要除以 $\hat{k}_{m(u,v)}$,即可得到归一化的像素值 $\tilde{o}_{m(u,v)}$ 。

3.3 基于共位光源的逆向反射模型

高亮的金属表面反射为典型的非朗伯反射,其镜面反射强度与漫反射强度差异大,即高亮区域极亮,昏暗区域极暗。Wang 等^[12-13]提出的基于共位光源的逆向反射模型能够较好地描述非朗伯反射现象,并在光源数量较少的条件下求得较高精度的表面法向量,满足测量要求。

基于共位光源的逆向反射模型可以表示为

$$\mathbf{n}^T \hat{\mathbf{l}}_m = G(\tilde{o}_m, \tilde{o}_0, \hat{\mathbf{l}}_m^T \mathbf{v}), \quad (11)$$

式中: \tilde{o}_0 为共位光源照射下图像中的归一化像素值,共位光源是指与相机距离很近的光源; $G(\cdot)$ 为逆向反射模型。(11)式实现了表面法向量 \mathbf{n} 与反射模型的解耦,即公式右侧仅包含一个未知量 G ,而未知法向量 \mathbf{n} 在公式左侧。假设已知某材料的逆向反射模型 G ,除了共位光源以外,给定另外至少三

个光源方向即可求得高精度的法向量,表达式为

$$\mathbf{n} = [[\hat{\mathbf{l}}_1 \ \hat{\mathbf{l}}_2 \ \cdots \ \hat{\mathbf{l}}_M]^T]^\dagger [G_1 \ G_2 \ \cdots \ G_M]^T, \quad (12)$$

式中: \dagger 为厄米特共轭符号。为了使基于共位光源的逆向反射模型能够适应多种金属材料并增强其抗噪能力,引入邻域信息并设计图 6 的深度学习模型来模拟光度立体视觉过程以求解表面法向量,其中 ReLU 为线性整流函数。该网络的输入为 $(\tilde{o}_m, \tilde{o}_0, \hat{\mathbf{l}}_m, \mathbf{v})$,其中 \tilde{o}_m 为以待测像素点为中心,在 3×3 的邻域区域内由 RGB(Red, Green, Blue)像素区间组成的像素值向量, \tilde{o}_0 为对应的共位光源像素值向量。将输入堆叠起来形成 108 维的输入,网络先将该不同入射光线方向下的输入映射为 512 维的高维向量,随后利用最大池化将不同入射光线方向下的高维特征融合起来,最后将融合特征映射为表面法向量。

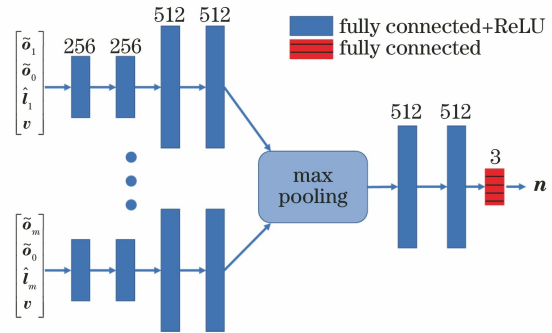


图 6 基于共位光源的近场非朗伯光度立体视觉网络
Fig. 6 Near-field non-Lambert photometric stereo vision network based on co-location light source

3.4 特定场景下的仿真数据集渲染

为了提高基于共位光源的近场非朗伯光度立体视觉网络对金属表面法向量的预测精度,设计一种针对特定场景的仿真数据集渲染策略,即获取带明显纹理的金属工件表面的高精度三维点云。利用标定的相机内参、光源位置与光源强度参数,以及 MERL(Mitsubishi Electric Research Laboratories)数据库^[14]中的金属材料反射模型渲染仿真数据集来训练网络,能够极大地提高金属表面法向量的预测精度。

为了进一步增强神经网络的泛化性和抗噪能力,在渲染流程中加入如下随机变化。一是光源位置处加入随机噪声,用于解决光源位置标定不准确的问题,然后重新计算光照方向;二是强度因子乘以随机噪声,用于弥补光源强度的微小变化;三是随机旋转三维点云,用于丰富表面法向量的信息。

4 实验结果与分析

搭建一套近场光度立体视觉装置,通过仿真模拟和真实实验来验证所提方法的有效性。近场光度立体视觉装置的原理如图 7 所示,该装置有 22 个 LED(Light Emitting Diode)光源,其中两个光源非常靠近镜头,可视为共位光源,另外 8 个和 10 个光源分别分布在两个环绕装置中心的圆上,两个圆的直径分别为 280 mm 和 400 mm,所有光源的主光轴都基本对准工作平面的中心。值得一提的是,相机和镜头并没有像常规光度立体视觉装置一样放在装置中心,而是与装置中心偏离 80 mm,从而使系列光源能够提供更丰富的入射光线仰角变化。相机采用大恒图像 MER-2000-19U3C,分辨率为 $5496 \text{ pixel} \times 3672 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $2.4 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$ 。镜头采用富士能 CF50ZA-1S,焦距为 50 mm。工作平面距离相机光心 348.8 mm,拍摄范围为 $89.3 \text{ mm} \times 59.7 \text{ mm}$,物方像元尺寸为 $16.25 \mu\text{m} \times 16.25 \mu\text{m}$,即每 1 mm 可采样 61.5 个。当光圈值为 8 时,成像系统的景深为 1.75 mm。为了使图片不出现明显的模糊现象,工件的深度变化范围不应超过 3 mm。

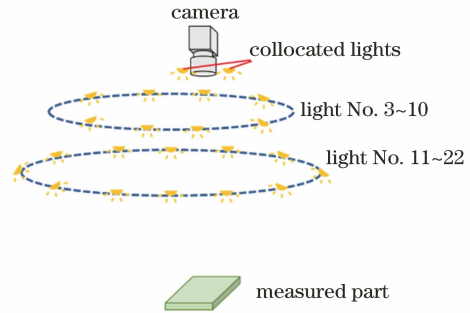


图 7 近场光度立体视觉装置的原理示意图
Fig. 7 Schematic of near-field photometric stereo vision device

4.1 仿真模拟精度分析

为了测试所提方法对金属表面法向量的预测精度以及对表面纹理的重构精度,首先生成 48 个带有不同周期性纹理的平面,然后运用 3.4 节提及的渲染方法来生成仿真图像,最后采用所提方法进行测量。周期性纹理的波形有正弦波、等角三角波、不等角三角波[(13)式]和梯形波[(14)式]4 种,波长范围为 $0.15 \sim 1.00 \text{ mm}$,振幅范围为 $2.5 \sim 12.0 \mu\text{m}$,渲染过程中采用的表面材料是铝。不等角三角波和梯形波的具体波形可表示为

$$z_{\text{triangle}} = \begin{cases} a \left[\frac{2}{0.7\lambda} (x - x_0) - 1 \right], & x \in (x_0, x_0 + 0.7\lambda] \\ a \left[-\frac{2}{(1-0.7)\lambda} (x - x_0 - 0.7\lambda) + 1 \right], & x \in (x_0 + 0.7\lambda, x_0 + \lambda] \end{cases}, \quad (13)$$

$$z_{\text{trapezoid}} = \begin{cases} -a, & x \in \left(x_0, x_0 + \frac{1}{6}\lambda\right] \\ a \left[\frac{6}{\lambda} \left(x - x_0 - \frac{1}{6}\lambda\right) - 1 \right], & x \in \left(x_0 + \frac{1}{6}\lambda, x_0 + \frac{1}{2}\lambda\right] \\ a, & x \in \left(x_0 + \frac{1}{2}\lambda, x_0 + \frac{2}{3}\lambda\right] \\ a \left[-\frac{6}{\lambda} \left(x - x_0 - \frac{2}{3}\lambda\right) + 1 \right], & x \in \left(x_0 + \frac{2}{3}\lambda, x_0 + \lambda\right] \end{cases}, \quad (14)$$

式中: a 为波形的振幅; λ 为波形的波长; x_0 为该周期起始坐标。

图 8 为正弦纹理的波长为 0.6 m 和振幅为 $5.5 \mu\text{m}$ 的平面测量结果。图 8(a)~8(c)分别为表面法向量的真值、预测值和误差,图 8(d)~8(f)分别为表面纹理的真值、重构值和误差,图 8(g)和图 8(h)分别为表面纹理的真值和重构值图像中沿虚线的截面,表面纹理由法向量积分所得的深度图经过截止波长为 2.5 mm 的高通样条滤波器滤波获得。从图 8 可以看到,所提方法预测得到的

法向量与真值非常接近,最大误差不超过 1.2° ;重构得到的表面纹理同样接近真值,最大误差不超过 25% 。

图 9 为 48 个平面的测量结果统计值。图 9(a)中的横坐标为表面周期性纹理的波长,纵坐标为表面法向量的平均角度误差(Mean Angular Error, MAE),三条折线代表表面周期性纹理的三种振幅。从图 9(a)可以看到,所提方法能够预测出高精度的金属表面法向量,平均角度误差小于 0.9° ;表面纹理的波长越长和振幅越小,则预测得

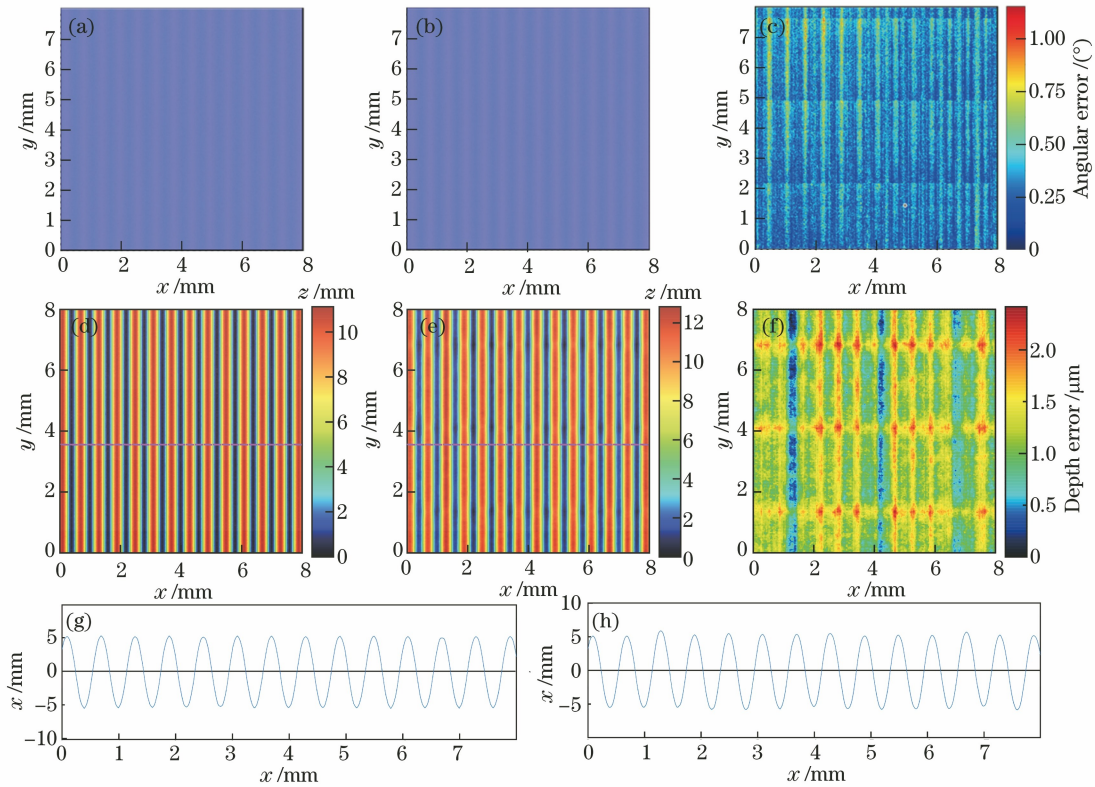


图 8 仿真模拟结果。(a)法向量真值;(b)法向量预测值;(c)法向量角度误差;(d)表面纹理真值;(e)表面纹理重构值;(f)表面纹理误差;(g)从图(d)提取的截面轮廓;(h)从图(e)提取的截面轮廓

Fig. 8 Simulation results. (a) True value of normal vector; (b) predicted value of normal vector; (c) angle error of normal vector; (d) truth value of surface texture; (e) surface texture reconstruction value; (f) surface texture error; (g) sectional profile extracted from Fig. (d); (h) sectional profile extracted from Fig. (e)

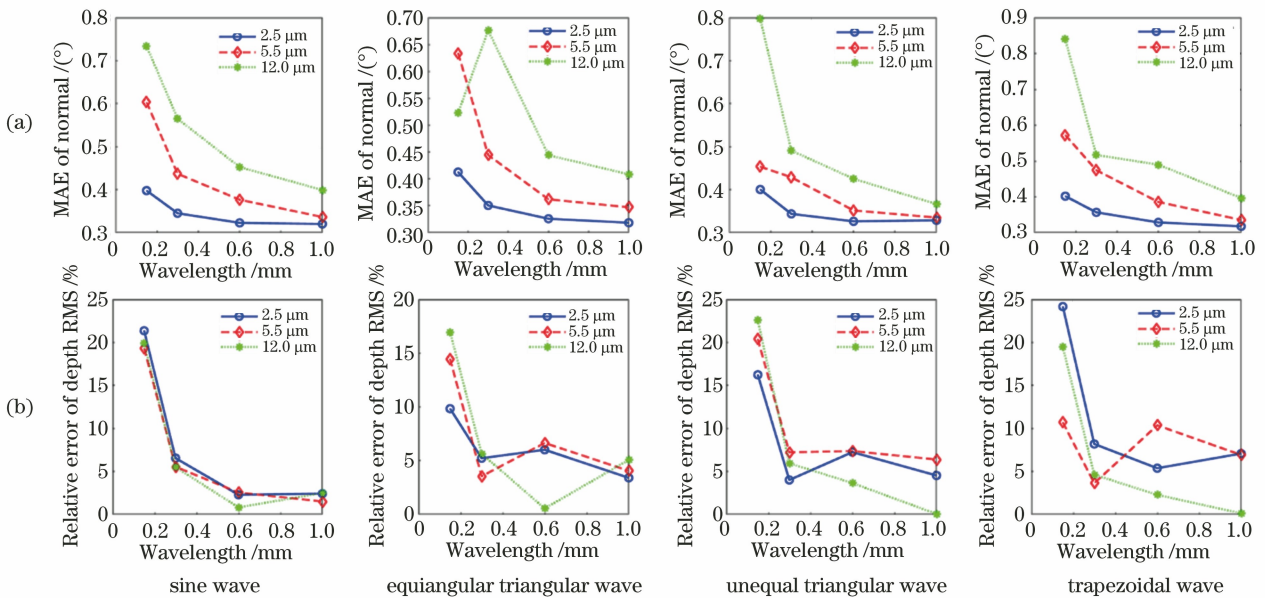


图 9 仿真模拟结果的误差统计值。(a)表面法向量的 MAE;(b)表面纹理深度值 RMS 相对误差

Fig. 9 Error statistics of simulation results. (a) MAE of surface normal vector; (b) RMS relative error of surface texture depth value

到的法向量精度越高。图 9(b)中的纵坐标是重构所得表面纹理深度值方均根(Root Mean Square,

RMS)的相对误差,表面纹理的波长越长,重构得到的表面纹理深度值精度越高,而振幅的影响不

明显。不计波长为 0.15 mm 的平面,所提方法重构得到的表面纹理深度值 RMS 相对误差小于 11%。

4.2 真实实验精度分析

为了验证所提方法对真实金属工件的有效性,选取三个不同波纹度的不锈钢(Stainless Steel, SS)切削平面、三个不同波纹度的不锈钢端铣平面和三个不同波纹度的铝合金(Aluminum Alloy, AA)端铣平面进行测试,并与 ZYGO Nexview 2 白光干涉仪测得的结果进行对比。白光干涉仪的测量范围为 6 mm×6 mm,远小于实验装置的测量范围。为了对比结果的可靠性,选取样品表面

7 mm×10 mm 的区域作为两种方法的共同测量区域。白光干涉仪需测量 4 次再拼接成该区域的测量结果;所提方法则从测量结果中截取对应的区域。

图 10 和图 11 分别为不锈钢端铣 1 号样品和铝合金端铣 2 号样品的表面纹理测量结果。与仿真模拟结果相同,表面纹理由重建得到的表面形貌通过截止波长为 2.5 mm 的高通样条滤波器滤波获得。从图 10(e)和图 10(f)以及图 11(e)和图 11(f)的对比结果可以看出,重构的表面纹理的周期分布与白光干涉仪的结果几乎完全一致,波形也基本相同,但振幅分布上的噪声较为明显。

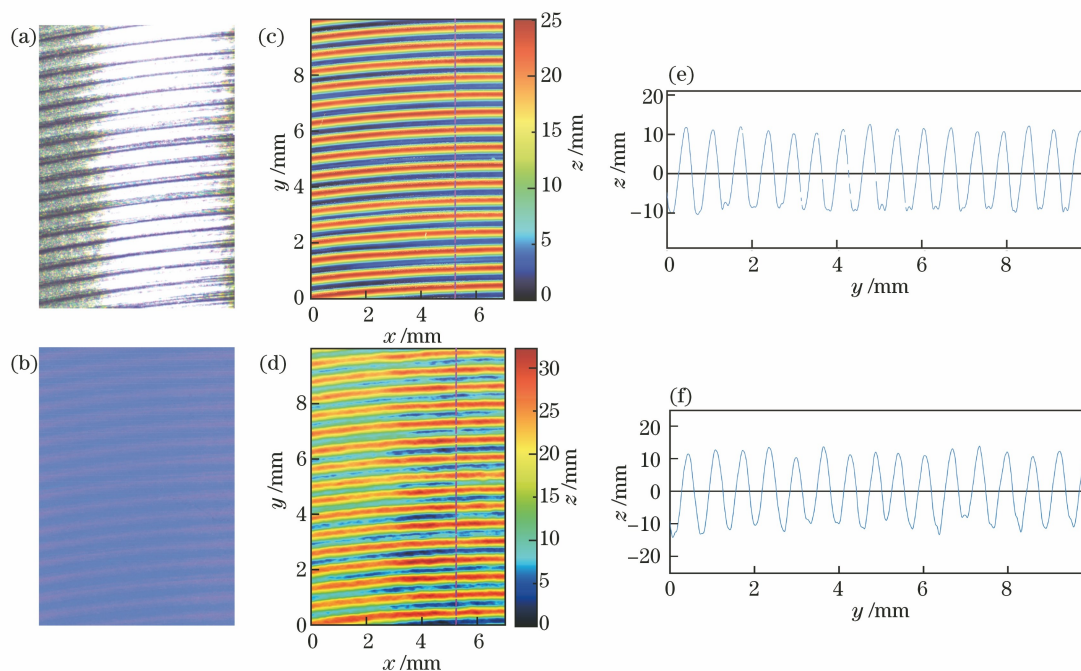


图 10 不锈钢端铣 1 号样件的实验结果。(a)样品照片;(b)法向量图;(c)白光干涉仪测得的表面纹理;

(d)所提方法测得的表面纹理;(e)图(c)的截面轮廓;(f)图(d)的截面轮廓

Fig. 10 Experimental results of stainless steel end milling sample No. 1. (a) Sample photographs; (b) normal vector graph; (c) surface textures as measured by white light interferometer; (d) surface texture measured by proposed method; (e) sectional profile from Fig. (c); (f) sectional profile from Fig. (d)

表 1 为 9 个样件的表面纹理深度 RMS 值。从表 1 可以看到,除了不锈钢端铣 3 号样件以外,所提方法测得的 RMS 值相对误差均小于 15%,这验证了所提方法的有效性,原因在于不锈钢端铣 3 号样件的端铣纹路空间波长仅为 0.08 mm,测量过程中一个周期内仅有不到 5 个采样点,所以测量结果偏差较大,另外所提方法对切削纹路的测量精度比端铣纹路高。

为了验证视场内各个区域测量精度的一致性,将不锈钢切削 1 号样件放在视场内不同区域并进行

5 次测量,将其与白光干涉仪测得的结果进行对比,结果如图 12 所示。从图 12 可以看到,各个区域测得的刀纹形状和分布较为一致。

表 2 为不锈钢切削 1 号样件在 5 个区域内分别测得的表面纹理深度 RMS 值,仍选取白光干涉仪测得的 6.65 μm 作为 RMS 的参考标准。从表 2 可以看到,所提方法在视场内不同区域测得的 RMS 的标准差为 0.12 μm ,优于 2%,可见所提方法在不同区域的精度一致性较好。

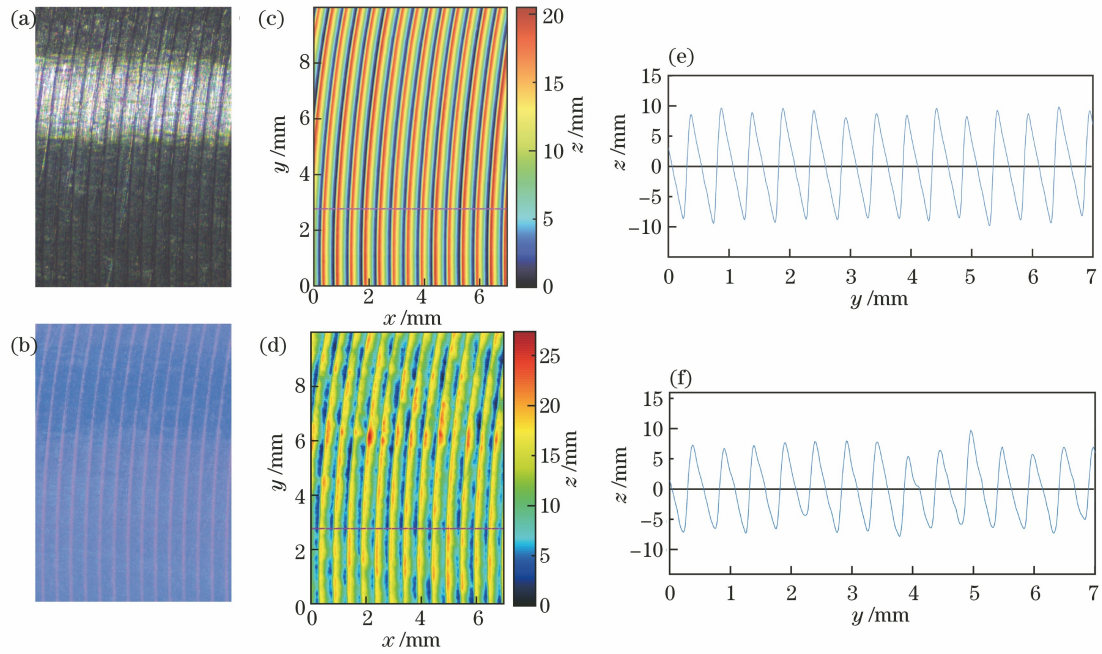


图 11 铝合金端铣 2 号样件的实验结果。(a) 样品照片；(b) 法向量图；(c) 白光干涉仪测得的表面纹理；
(d) 所提方法测得的表面纹理；(e) 从图(c)的截面轮廓；(f) 图(d)的截面轮廓

Fig. 11 Experimental results of aluminum alloy end milling sample No. 2. (a) Sample photographs; (b) normal vector graph; (c) surface textures as measured by white light interferometer; (d) surface texture measured by proposed method; (e) sectional profile from Fig. (c); (f) sectional profile from Fig. (d)

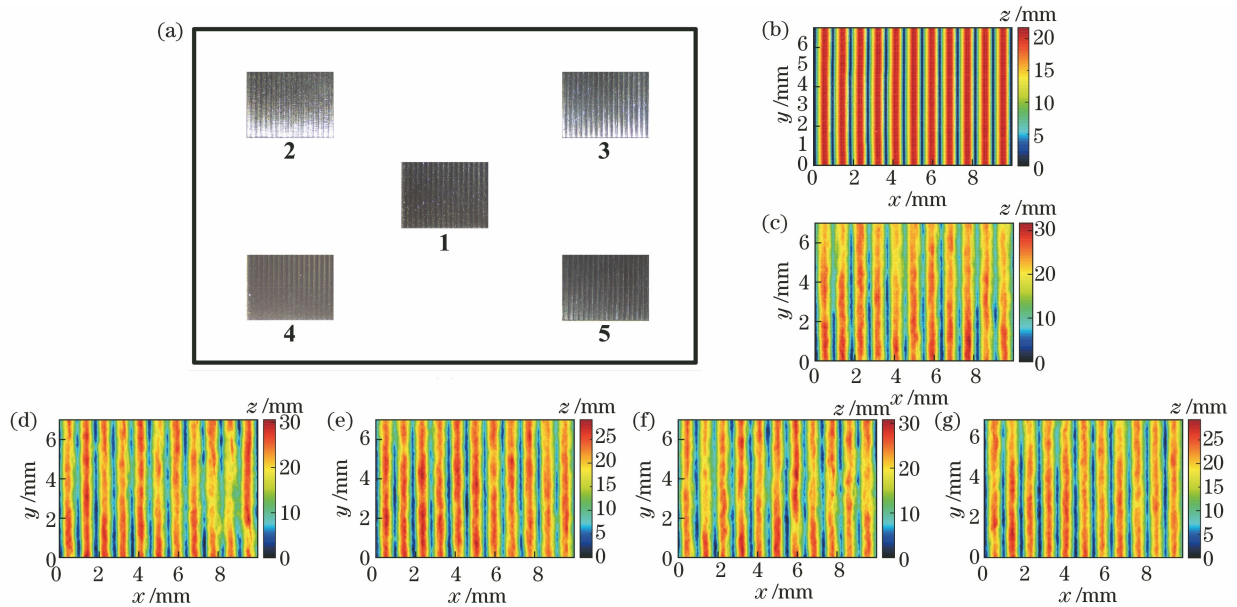


图 12 视场内不同区域的实验结果。(a) 测量区域分布；(b) 白光干涉仪测得的表面纹理；所提方法在(c)区域 1，
(d) 区域 2，(e) 区域 3，(f) 区域 4，(g) 区域 5 测得的表面纹理

Fig. 12 Experimental results in different areas of field of view. (a) Measurement of regional distribution; (b) surface textures as measured by white light interferometer; surface textures measured by proposed method in (c) region 1, (d) region 2, (e) region 3, (f) region 4, and (g) region 5

表 1 不同样件测量结果的统计值

Table 1 Statistics of different measurement results

Part name	RMS of white light interferometer / μm	RMS of proposed method / μm	Relative error /%
SS planning 1	6.65	6.52	1.95
SS planning 2	3.47	3.30	4.90
SS planning 3	1.98	1.99	0.51
SS milling 1	6.95	6.53	6.04
SS milling 2	3.22	2.91	9.63
SS milling 3	0.98	1.27	29.59
AA milling 1	5.92	6.10	2.94
AA milling 2	5.61	4.95	11.67
AA milling 3	3.63	3.14	13.27

表 2 不同区域测量结果的统计值

Table 2 Statistics of measurement results in different areas

Area No.	RMS of proposed method / μm	Relative error /%
1	6.52	1.95
2	6.61	0.55
3	6.57	1.17
4	6.74	1.30
5	6.41	3.56

5 结 论

本文提出一种基于光度立体视觉的高亮金属表面纹理重建方法。相比于一般的光度立体视觉方法,提出的基于共位光源的近平面近场光度立体视觉方法能够预测出高精度的金属表面法向量,平均角度误差小于 0.9° 。通过与白光干涉仪测得的数据进行对比,可以验证所提方法重构得到表面纹理的准确性,表面纹理深度的 RMS 值相对误差不超过 15%。

参 考 文 献

- [1] Li B, Zhou D J, Xu W B, et al. Effect of surface waviness on stability of hydrodynamic journal bearing systems [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(19): 51-59.
李冰, 周德俭, 徐武彬, 等. 表面波纹度对滑动轴承转子系统稳定性的影响 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(19): 51-59.
- [2] Chen S S. Theoretical modelling and experimental investigation of surface micro-waviness generation in parallel grinding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
陈杉杉. 平行法磨削加工表面微波纹形成的理论建模与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] Xie F G, Mei B, Liu X J, et al. Novel mode and

equipment for machining large complex components [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(19): 70-78.

谢福贵, 梅斌, 刘辛军, 等. 一种大型复杂构件加工新模式及新装备探讨 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(19): 70-78.

- [4] de Groot P. Coherence scanning interferometry [M]// Leach R. *Optical measurement of surface topography*. Heidelberg: Springer, 2011: 187-208.
- [5] Wang Z Y, Gao N, Zhang Z H. Three-dimensional shape measurement based on parallel four color channels fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815022.
王张颖, 高楠, 张宗华. 基于并行四颜色通道条纹投影的三维测量术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815022.
- [6] Zhang X, Gai S Y, Da F P. Fast three-dimensional measurement based on three channel binary fringe defocused projection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 231201.
张鑫, 盖绍彦, 达飞鹏. 基于三通道二值条纹离焦投影的快速三维测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 231201.
- [7] Yan G X, He S X. Measurement of small workpiece based on monocular portable laser scanning [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(2): 315-322.
闫光绪, 贺赛先. 基于单目便携式激光扫描的小工件测量 [J]. *应用激光*, 2020, 40(2): 315-322.
- [8] Argyriou V, Petrou M. Chapter 1 photometric stereo: an overview [J]. *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2009, 156: 1-54.
- [9] Woodham R J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images [J]. *Optical Engineering*, 1980, 19(1): 191139.
- [10] Nie Y. Photometric stereo with near-field quasi point light sources [D]. Shenzhen: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 17-24.
聂颖. 基于近场非标准点光源的光度学三维重建问

- 题研究[D]. 深圳: 中国科学院大学, 2016: 17-24.
- [11] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [12] Wang X, Jian Z X, Ren M J. Non-lambertian photometric stereo network based on inverse reflectance model with collocated light [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 6032-6042.
- [13] Fu L, Hong H B, Wang X, et al. Non-lambertian photometric stereo vision based on inverse reflectance model [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0520001.
付琳, 洪海波, 王晰, 等. 基于逆向反射模型的非朗伯光度立体视觉 [J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0520001.
- [14] Matusik W, Pfister H, Brand M, et al. A data-driven reflectance model [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 759-769.