

基于双向反射分布函数模型的结构光投影 自适应调制方法

张景瑜¹, 任杰骥¹, 李霏², 裴晓寒¹, 任明俊^{1*}

¹上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;

²中国航天科工集团第二研究院第二总体设计部, 北京 100854

摘要 金属结构件的三维形状测量是评定金属构件加工质量的基础, 基于结构光的三维重建方案受到金属构件中的高光反射影响, 存在着信噪比下降, 甚至数据缺失的问题。针对金属构件检测中的高光问题, 提出了一种自适应的条纹投影测量方案, 并将其应用到金属表面的形状尺度测量中。采用了结合阈值化方法和色彩空间变换的方法检测图片高光区域, 使用基于极线约束的投影-相机双视图搜索方法获取相机投影仪之间的变换关系, 提出了基于双向反射分布函数(BRDF)光学成像模型的条纹调制参数生成方案, 实现了投影条纹的像素级调制。实验结果表明, 所提方案在减少投影次数提高测量效率的同时, 高光区域测量结果的无效区域补偿率达 51.3%, 测量精度提升 77.4%。

关键词 测量; 相位测量; 高反光表面; 自适应条纹; 光度学

中图分类号 TP274

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0912001

Adaptive Structured Light Projection Modulation Method Based on BRDF Model

Zhang Jingyu¹, Ren Jieji¹, Li Fei², Pei Xiaohan¹, Ren Mingjun^{1*}

¹*School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;*

²*The Second System Design, The Second Research Academy, CASIC, Beijing 100854, China*

Abstract Measuring the three-dimensional (3D) shape of metal parts is essential for evaluating their processing quality. The 3D reconstruction scheme based on structured light is affected by the bright reflections from the metal parts, which lead to reduced signal-to-noise ratio and loss of data. To solve the highlighting problem in the detection of metal parts, an adaptive fringe projection measurement scheme is proposed herein and is applied to the measurement of shape and dimension of metal surface. The highlight area of the image is detected by a combined thresholding method and color-space transformation method. The transformation relationship between the camera and projector is obtained by a projection-camera dual-view search method based on an epipolar constraint. The modulation parameters are generated by a scheme based on the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) optical imaging model. The BRDF-based scheme realizes pixel-level modulation of the projection fringe. In addition to reducing the number of projections and improving the measurement efficiency, the compensation rate of invalid area obtained by the proposed method is 51.3% in the highlight area measurement results, and the measurement accuracy is improved up 77.4%.

Key words measurement; phase measurement; shiny surface; adaptive fringe; photometry

OCIS codes 120.5050; 120.5240; 120.5060

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-10-28; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 复杂产品智能制造系统技术国家重点实验室开放研究基金

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

1 引言

在加工制造领域,为提升产品的生产质量,往往需要对加工零件进行测量以实现质量控制,这一过程通常采用三坐标测量机完成。但是由于需要对工件表面进行逐点接触式测量,因此坐标测量机具有磨损工件表面、测量效率低下的缺点。近几十年来,非接触式三维形貌重建技术获得了长足的发展^[1-3],其中以条纹投影为代表的结构光测量技术由于具有非接触、大范围、高效率、高精度等特点,在诸如文物保护逆向工程、生产制造在线检测、虚拟现实等领域^[4]都有着广泛的应用。

金属构件表面的反光问题,是制约结构光系统应用的一个重要因素^[5]。在图像高光区域处,相机拍摄到的像素灰度接近饱和,造成时域或空域的编码图案信息发生局部缺失,进而给结构光传感器在图像解码的过程带来困难,造成重建结果中大量噪声的引入和局部区域数据的缺失。

针对如何在高亮表面实现三维测量这一问题,科学家展开大量研究,提出了众多高动态范围(HDR)技术。Zhang 等^[6]采用多重曝光技术对高光区域进行抑制,在相机拍摄图片层面,通过调整光圈值和曝光时间,采集多幅曝光量逐次递减的条纹图像,逐像素选择最亮且非饱和的像素灰度值合成最终的条纹图像,多幅条纹图像被用来完成相位解算,实现三维面型测量。但是这种方法需要采集众多曝光参数不同的图片(使用了 23 组曝光参数),因此测量效率方面存在不足。Babaie 等^[7]提出了一种针对高动态表面物体形貌的像素级调制方法,该方法通过建立采集图像与投影图案的单应性关系,并对饱和像素对应的图案区域进行递归相乘,实现了投射图案亮度的降低,最终得到稳定的欠饱和条纹图案。Zhang 等^[8]提出了一种基于自适应掩码的图案强度动态调整方案,自适应掩码基于测量单元的相机响应函数与点扩展函数生成,对物体高亮区起到一定的抑制作用。但是由于引入了编码解码特性并且需要对相机响应函数进行标定,因此在对不同物体测量时需要进行大量标定工作。彭广泽等^[9]基于卷积神经网络提出了一种高动态范围物体的条纹修复方法,通过输入两种不同曝光时间下的条纹图像,即可对过曝区域条纹进行修复。除上述解决高动态范围问题的方法外,还有添加偏振片的极化技术^[10-11]、基于双色反射模型分离反射分量的空洞修补方法^[12]、组合多种技术的综合方案^[13],但是这些

方法在一定程度上存在弱光的过度抑制、测量效率低等问题。

针对以上存在的问题,本文提出一种高效的自适应像素级调节方法,并搭建一套完整的金属结构件条纹投影测量方案。首先利用阈值化方法对过曝区域进行检测,实现相机中图像调制区域的定位;随后基于双视图中的极线约束原理,通过位姿标定实现相机投影仪系统像素坐标的对齐;再基于光学成像模型实现条纹过曝区域调制参数生成;最终生成自适应调制条纹并重新投射,利用条纹投影测量原理实现高亮金属面型的三维测量。

2 自适应条纹投影系统基本原理

2.1 条纹投影系统测量原理

条纹投影系统通过捕捉投射的正弦条纹图案中的相位调制量进行深度的计算。在投影仪-相机系统中,投影仪投射的条纹图案被相机拍摄后,相机获取的条纹的像素坐标会随测量物体高度不同而改变。由于相位与投影图案中的像素坐标严格对应,因此相机图像中条纹的相位信息也将受到物体高度的调制,通过解相、相位展开等一系列处理,可以恢复得到相机条纹图的相位信息,进而通过分析相位变化,计算物体的深度。常见的单目条纹投影系统构成如图 1 所示。

按照条纹生成、解相、相位展开、深度计算的流程对待测物体进行重建。其中条纹生成主要用于生成绝对相位已知的条纹图案,以横向条纹图案为例,其像素表达式为

$$I(x, y) = \frac{\lambda(x, y) I_{\max}}{2} \left\{ \cos \left[\frac{2\pi N(x - x_{\text{mid}})}{w} + p \right] + 1 \right\}, \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 为像素坐标 (x, y) 处的灰度值; I_{\max} 为单个像素的最大灰度值,在 8 位灰度图中通常设置为 255; $\lambda(x, y)$ 为用于像素调制的参数; N 为一张投影图案上的条纹周期数; x_{mid} 为图案中间列所在的索引,该值将图案中心线设置为条纹零相位所在位置; w 为图案的宽度; p 为预设的相位偏移量。基于(1)式实现数字条纹的生成过程,生成条纹将通过投影仪投影至测量区域。

解相与相位展开属于相位分析方法,其中解相实现了从条纹图像序列到单周期相位(即包裹相位)的计算,相位展开实现了从包裹相位到全周期绝对相位(即解包裹相位)的计算。对于本文而

言,解相方法基于多步相移法^[14]实现;相位展开则采用多频外差法^[15],该方法基于最佳三条纹原理选取合适的 3 种不同周期条纹,通过条纹合成的

方式实现绝对相位的恢复。获得绝对相位信息后,即可从相位信息的改变量中计算得到对应位置的深度。

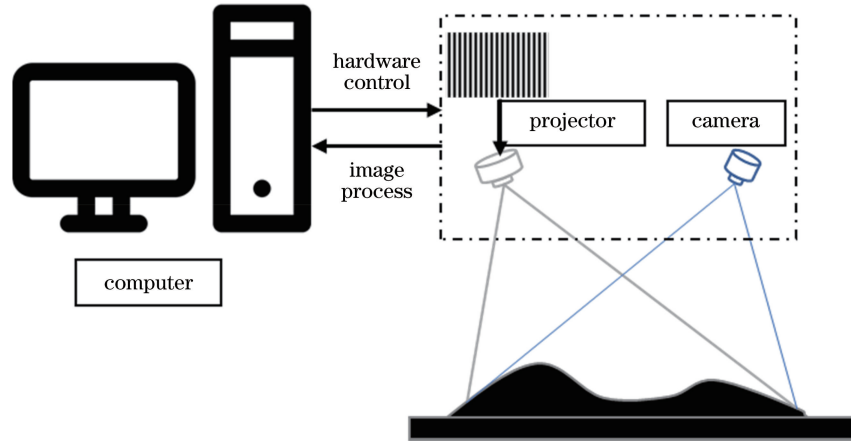


图 1 条纹投影系统示意图

Fig. 1 Schematic of fringe projection system

2.2 BRDF 光学成像模型

双向反射分布函数(BRDF)是一种基于物理模型描述物体表面光反射现象的模型表达。图 2 是简化的物体表面光反射示意图,其中 l 表示入射光线方向, v 表示反射光线方向, n 表示物体表面法向, h 表示 l 和 v 的半角方向。

$$f(l, v) = \frac{dL_o(v)}{dE(l)}, \quad (2)$$

BRDF 模型通常定义为式中: $dL_o(v)$ 为光线在 v 方向反射的微分辐射率; $dE(l)$ 为来自 l 方向的光线微分辐照度,该参数主要与光源本身的特性、光源到物体表面的距离有关。(2)式反映了经过微小表面作用前后光的能量变化。由光强生成相机图像像素值的描述公式^[16]可知,反射光线辐照度对图像灰度值的影响呈线性关系,因此可以基于模型的输出对图像中高亮区域的过饱和程度进行估计。

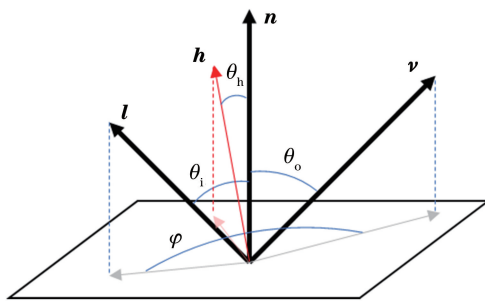


图 2 物体表面双向反射示意图

Fig. 2 Schematic of bidirectional reflection on object surface

由于采取的像素调制方法主要通过改变光源的辐照度来改善高反光带来的消极影响,因此在不考

虑光源本身特性的前提下,从光线在物体表面反射时的能量变化规律出发,对测量系统采集图像的像素点过饱和程度进行预测,便可制定有效的调制方案对光源的投射光强分布进行调节,即采取 BRDF 模型预测投影图案像素级调制参数是可行的。

3 基于 BRDF 的条纹投影像素调制

设计的基于 BRDF 模型像素调制的条纹投影系统方案如图 3 所示。其中初始化阶段用于载入相机参数、投影仪参数,相机投影仪相对位置关系等系统内置参数;过曝区域检测用于为后续的像素调制提供应用的区域范围,主要解决“缺失出现在哪”的问题;图像匹配与像素定位用于配准相机和投影仪之间在图像坐标系下的对应关系,主要解决“调整哪些位置”的问题;调制参数计算涉及 BRDF 模型的相关操作,最终用于生成投影条纹图案的补偿信息,从而解决“调整多少”的问题;条纹投影三维测量则用于实现测量原理,进而恢复深度信息。

3.1 过曝区域检测与定位

3.1.1 过曝区域检测

过曝区域检测的目标是在相机获取的图像中提取图像中的过曝区域。传统的过曝区域检测方法大多通过检测灰度图像中的像素灰度大于某个阈值(如 8 位图中的 255)的区域,作为图像的过曝区域,这种方法非常直观,但对从过曝到非过曝的渐变区域不能进行有效的处理。参考 Guo 等^[17]在修复摄影中过曝现象的方案中所采取的过曝区域检测方法,将相机采集的彩色图像转换到 CIELAB 颜色空

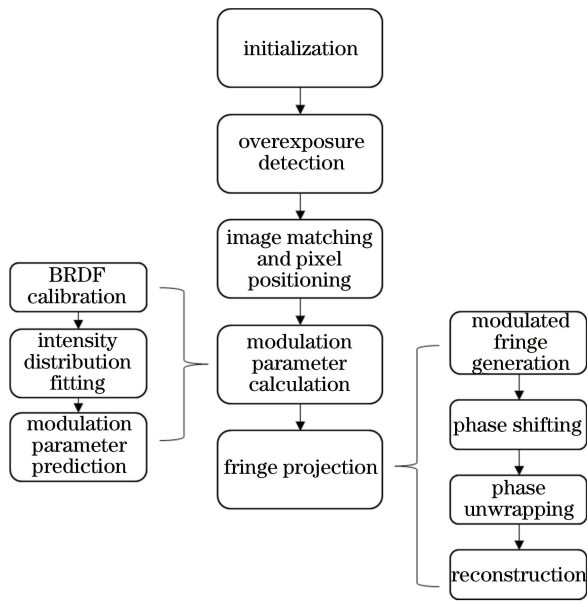


图 3 系统流程

Fig. 3 Flowchart of the system

间,用 L_i 、 C_i 表示图像第 i 个像素的亮度信息和颜色信息。具体的过曝判别参数表达式为

$$M_i = \frac{1}{2} \left\{ \tanh \left\{ \frac{1}{60} [(L_i - 80) + (40 - \|C_i\|_2)] \right\} + 1 \right\}, \quad (3)$$

式中: M_i 为过曝图中第 i 个像素值,反映对应像素的过曝程度。通过阈值分割对 M_i 进行处理,可以提取出感兴趣的过曝区域,进而将其用于过曝区域的补偿。

3.1.2 图像匹配

由于相机获取图像与投影仪投影图像的像素坐标关系未知,为了在投影仪图像上进行亮度调制,需要利用图像匹配方法,实现相机图像和投影仪图像之间像素坐标的对应。

在一些高动态测量方案中,实现图像匹配的方法有投影横竖条纹法^[18]、基于格雷编码的分区投射方法^[19]、构造相机与投影仪像素平面单应性的方法^[7,20]。横竖条纹法通过对原始条纹序列及相机拍摄条纹序列分别进行解相,获取图像中每个像素在横竖两个方向的绝对相位信息,进而通过比较绝对相位值,得到投影仪与相机在像素坐标上的对应。这种方法通常能获得较为精确的坐标对应关系,但是由于其需要拍摄两组不同条纹,即使使用条纹数较少的四步相移、三个频率进行展开,也需要采集并处理至少两组共 24 张图片,因此效率较低。分区投射法利用格雷编码对投影场景进行区域划分,导致

饱和区域定位以编码区域为最小单位而非像素,因此在定位精度上有所欠缺。对于平面单应性方法,由于双视图(双相机或相机投影仪系统)下两个像素平面的单应性只能由世界平面诱导,而测量工件通常为非平面,所以无法准确获取双视图间准确的像素对应关系,而仅仅只能获得对应关系的近似,在测量工件表面形状复杂时甚至会出现错误的对应关系。

考虑到过曝区域检测在区域匹配的精度上相比深度计算过程要求不是十分严格,本文采取双目立体视觉中常用的图像匹配思想,将像素坐标的二维搜索问题转换为一维搜索问题,在保证一定对应精度下,减少投影与采图次数,提升匹配的 efficiency。

在图像立体匹配过程中,首先需要进行相机图像与投影仪图像的立体校正,即将相机与投影仪的成像平面严格对齐,如图 4 所示。固定相机和投影仪的原点位置,将两者的 x 轴调整至与基线平行(提供 2 个约束),并严格保持 z 轴在同一平面(提供 1 个约束),通过 3 个约束,可以建立从校正前坐标系到校正后坐标系的旋转矩阵,实现两个坐标系在旋转上的严格对齐,对齐后图像平面便被调整至重合状态。

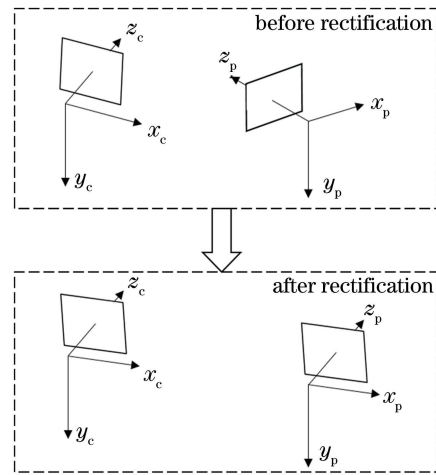


图 4 图像立体校正

Fig. 4 Image stereo rectification

以校正相机图像为例,首先根据 Moreno 等^[21]的方法,实现包括相机内参 K_c 、投影仪内参 K_p ,相应的畸变参数及相机投影仪相对位置关系 R, t 的标定。其中 R 表示从相机坐标系到投影仪坐标系的旋转矩阵, t 表示对应的平移量。定义旋转矩阵 R 的逆矩阵为 R_{inv} ,同时令相机坐标系下的投影仪原点坐标 $t_{inv} = (t_1 \ t_2 \ t_3)^T = -R_{inv}t$ 。于是相机姿态的调整矩阵为

$$\mathbf{R}_{\text{cam}} = \begin{pmatrix} t_1 & t_1 \sqrt{\frac{1}{t_1^2 + t_3^2} - 1} & \frac{t_3}{\sqrt{t_1^2 + t_3^2}} \\ t_2 & \sqrt{1 - t_2^2} & 0 \\ t_3 & t_3 \sqrt{\frac{1}{t_1^2 + t_3^2} - 1} & \frac{t_1}{\sqrt{t_1^2 + t_3^2}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_{cam} 反映校正后相机坐标系到校正前坐标系的旋转关系。

之后建立校正图像与原图像的映射关系, 定义 $\mathbf{m}_{\text{ap}}(u, v) = (m_1 \ m_2 \ 1)^T$, 其元素说明位于校正后图像上的像素坐标 (u, v) 对应于原图的 (m_1, m_2) , 通过不同像素 (u, v) 计算相应的 $\mathbf{m}_{\text{ap}}(u, v)$, 即可建立完整的校正图像与原图像的映射关系, 具体公式为

$$\mathbf{m}_{\text{ap}}(u, v) = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}_c d_{\text{ist}} \left[\mathbf{R}_{\text{cam}} \mathbf{K}_{\text{new}}^{-1} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \right], \quad (5)$$

式中: $d_{\text{ist}}(\cdot)$ 描述图像的畸变, 使去畸变的图像与原始图像正确对应。对投影仪进行相同的处理, 最终实现了相机和投影仪在图像平面上的对齐, 从而将二维搜索问题转换为一维搜索问题。之后通过线性插值将过曝导致的相位缺失区域补全, 并在一个方向上寻找相机和投影仪绝对相位相同的值, 即可在投影仪图像与相机图像之间实现像素坐标的匹配。

由上述分析可知, 校正图像与原图像的映射关系在相机及投影仪固定的情况下唯一, 因此只需进行一次标定即可。与前文提到的横竖条纹法相比, 所提方法避免了条纹在横竖两个不同方向上的重复投射以及相机图像与投影仪图案在两个方向上的相同相位值搜索, 使得匹配问题的求解规模降低, 因此在匹配效率方面有所提升。

3.2 像素调制参数计算

3.2.1 投影光强像素级调制策略

像素调制参数计算的难点在于, 由于图像中过曝区域信息的缺失, 难以对区域像素的过曝程度进行可靠估计, 因此难以反推投影图案中对应像素的调制量。

采取 BRDF 光学成像模型对过曝区域的光强分布进行预测, 从而计算得到相应的调制量。以简单表面为例, 认为表面过曝区域的辐射率分布与 BRDF 数值在平面(或一些缓变面)上有相同的变化趋势。首先自定义测量场景, 通过定义平面模型, 并设置相应的相机与投影仪光心位置, 可以计算平面上每个点的法向量与入射出射光线方向信息, 这些

信息作为 BRDF 的输入参数, 从而计算出 BRDF 数值在平面上的分布; 之后通过高次曲面拟合对 BRDF 中数值较高的区域进行近似, 得到实际图像在过曝区域光强分布的近似; 利用该近似, 计算投影仪在过曝区的最适光强, 实现条纹的像素级调制。

3.2.2 BRDF 模型选择与计算

根据微表面理论^[22], BRDF 模型被建立为

$$f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{F(\mathbf{l}, \mathbf{h})G(\mathbf{l}, \mathbf{v})D(\mathbf{h})}{4(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})}, \quad (6)$$

式中: $F(\mathbf{l}, \mathbf{h})$ 为非涅耳反射项, 反映光线经过表面的反射与折射比例; $G(\mathbf{l}, \mathbf{v})$ 为几何方程, 描述表面反射时光线未被遮挡的比例; $D(\mathbf{h})$ 为法线分布函数, 描述朝向为 \mathbf{h} 的微表面的比例。三者共同描述了表面的光反射性质。

对于 F, G, D 函数的选择, 参考文献[23-24]中在物理渲染时使用的模型, 简化后得到如下具体表达形式

$$F(\mathbf{v}, \mathbf{h}) = F_0 + (1 - F_0) 2^{-5.55473(\mathbf{v} \cdot \mathbf{h}) - 6.98316} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{h}), \quad (7)$$

$$G(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = G_1(\mathbf{l})G_1(\mathbf{v}) = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})(1 - k) + k} \times \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})(1 - k) + k}, \quad (8)$$

$$D(\mathbf{h}) = \frac{\alpha}{\pi [(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^2 (\alpha^2 - 1) + 1]^2}, \quad (9)$$

式中: $k = \frac{(r+1)^2}{8}$, $\alpha = r^2$, r 反映物体表面的粗糙程度; F_0 为光垂直入射时的镜面反射率。设定尺寸为 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的平面, 并将相机和投影仪光心置于距平面 200 mm 位置处, 可得到仿真的表面 BRDF 分布, 如图 5 所示, 进而进行调制参数的计算。

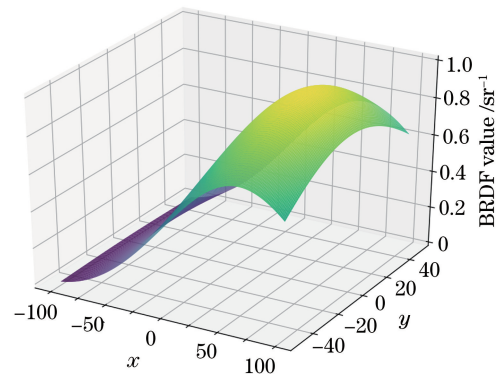


图 5 自定义参数下平面的 BRDF 参数分布
Fig. 5 BRDF parameter distribution of plane under custom parameters

3.2.3 光反射强度分布拟合

根据泰勒公式, 可以利用多项式对 BRDF 在过

曝区域的分布进行近似,构建的二元 n 次多项式为

$$B_{\text{BRDF}}(x, y, n) = \sum_{k=0}^n \sum_{j=0}^k a_{k,j} x^j y^{k-j}, \quad (10)$$

式中: $a_{k,j}$ 为待拟合参数。截取图 5 中高反光区域后进行归一化处理,利用最小二乘法进行多项式参数拟合,得到图 6 所示的近似分布及误差分布。实际测量中即可通过提取相对坐标信息,利用(10)式得到对应像素光强预测分布,最终得到对应像素合

适的灰度调制信息。调制信息的计算公式为

$$\lambda(x, y) = \frac{t}{B_{\text{BRDF}}(x, y)}, \quad (11)$$

式中: t 为自定义的调制强度参数,目的是对调制参数进行归一化,将调制参数限制在 0 到 1 之间,计算结果反映了像素对应位置的投射光强调制程度。将计算得到的参数应用于(1)式中,得到调制后的条纹图。

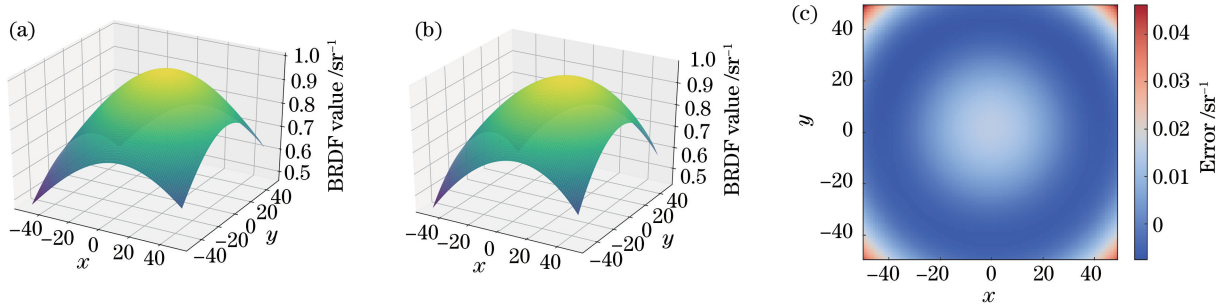


图 6 BRDF 分布拟合过程。(a)高亮区域 BRDF 分布;(b)高亮区域 BRDF 高次曲面拟合分布;(c)拟合误差分布

Fig. 6 BRDF distribution fitting process. (a) BRDF distribution in highlight area; (b) BRDF high-order surface fitting distribution in highlight area; (c) fitting error distribution

3.3 自适应调制系统测量方案

实际测量系统的测量方案主要分为以下几个步骤。

1)对搭建测量硬件系统中的一些固定参数进行标定设置,主要包括:相机内参与畸变、投影仪内参与畸变、相机投影仪位姿关系,为测量系统提供相机图像和投影仪图像的畸变校正和立体校正参数;完成条纹投影系统相位-深度标定,为条纹测量时从相位恢复深度提供必要参数;BRDF 模型参数。

2)系统每次启动时的必要初始化,主要包括:载入立体校正参数和深度标定参数;由立体校正参数,计算相机图像与投影仪图像的映射矩阵,映射矩阵对获取的相机图像与投影仪图像进行像素坐标分布,得到严格对齐的校正后相机与投影仪图像。

3)投影仪投射均匀白光并用相机拍摄,基于 3.1.1 节中的方法对获取图像进行过曝区域检测,提取图像中的像素调制区域。

4)将未经过修正的原始条纹图案投射至测量工件表面并使用相机拍摄,对相机拍摄的图像进行解相与展开后得到场景的相位展开图(此时由于过曝,部分相位数据缺失),利用映射矩阵进行图像校正后,在对齐图像中一维搜索相位相同的值(相位缺失的位置通过线性插值搜索),实现两图像之间像素坐标的匹配。

5)利用步骤 4)的定位关系将步骤 3)中得到的

调制区域映射到投影仪像素坐标下,并使用 3.2 节中的方法计算调制区域每个像素的调制参数 $\lambda(x, y)$ 。

6)将 $\lambda(x, y)$ 代入(1)式中调制原始条纹,生成调制后条纹图案序列,对图案序列进行重新投影、解相展开、深度计算处理,最终得到目标工件的三维信息。

步骤 1)在系统搭建后只需计算一次,步骤 2)在系统启动后执行一次,步骤 3)~6)是实际测量时的主要环节,按序执行后可得到当前测量工件的三维数据,实现目标工件的测量。

4 实验结果与分析

为了验证所设计的 BRDF 模型在条纹投影系统中的像素调制效果,搭建了一套条纹投影测量装置,进而利用该系统验证图像立体匹配及 BRDF 参数分布的有效性。最终在实际工件上进行投影重建,通过对比调制前条纹投影方案与自适应条纹投影方案的测量结果,验证所提方法的有效性。

实验条件:使用基于单相机单投影仪的测量系统,其中相机采用大恒图像 MER-503-36U3C 型号相机,分辨率为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,投影仪为 SK-telecom 的 SK-L-NX 型号投影仪,分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$ 。

实验采用八步相移法,使用三个不同周期的条

纹进行相位展开,因此单次投影需投射 24 幅图像,为了对比效率上的差别,所有实验均基于相同的条纹投影与计算方法进行。

4.1 验证实验

4.1.1 图像匹配验证

通过实验验证图像匹配的有效性,首先在投影仪与相机视场下摆放一个缓变的加工件,构建非平面的真实测量场景,之后将一幅特征丰富的图像投影到真实场景中,并用相机拍摄真实场景中的图像,

对原始图像与相机拍摄图像进行校正,观察是否得到严格对齐的图像。验证实验如图 7 所示,通过将图 7(a)投影到自由曲面表面,用相机拍摄得到图 7(b),并构建了如图 7(c)所示的测量场景。经过校正后得到的图像在水平方向上严格对齐,将两幅图像绘制在同一幅图像中,得到图 7(d),由图像可知,相同的特征均位于同一条水平线上。实验结果体现了匹配方法的有效性,为像素对应关系的降维搜索提供了条件。

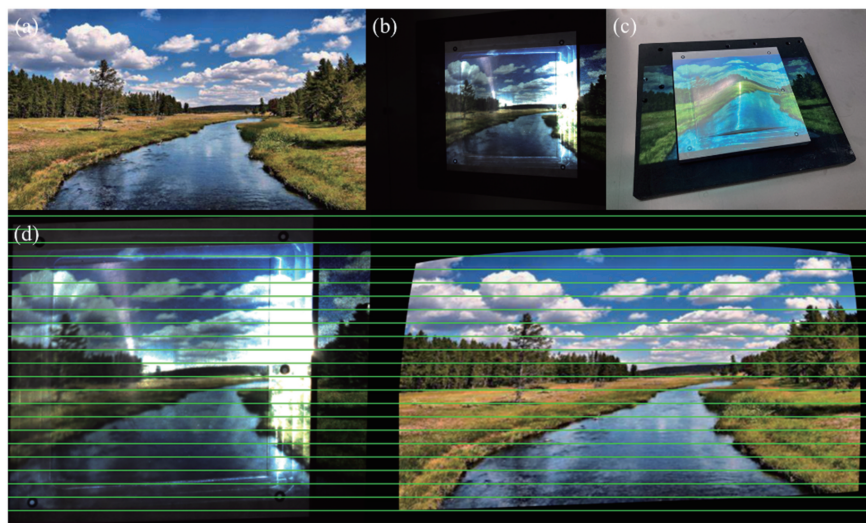


图 7 图像匹配过程。(a)投影原图;(b)相机拍摄原图;(c)真实场景下的图像;
(d)匹配校正后相机与投影仪之间的一维对齐图像

Fig. 7 Image matching process. (a) Original projected image; (b) original image taken by camera; (c) image in real scene; (d) one-dimensional alignment image between camera and projector after matching and correction

4.1.2 光强分布验证

利用高动态范围合成的方法,分析采集图片的像素分布和 BRDF 下生成的参数分布的差别,并进行 BRDF 模型可靠性的验证。

将灰度值为 128 的单体图像投影在金属表面,选取多个曝光时间(50, 200, 400, 600, 1000 ms),拍摄得到如图 8(a)所示的条带。将不同曝光时间下的条带合成后,得到对应的合成图像,取合成图像及 400 ms 曝光下图像中某一行的像素值序列,进行均值滤波处理并归一化后,与平面 BRDF 分布图像中的数值进行对比,得到图 8(b)所示的分布规律。观察图像可知,实测结果与 BRDF 仿真结果在单方向的分布上有明显的一致性,400 ms 曝光的图像结果中的过曝区域因为信息的损失,变化为一条接近水平的直线,而在此区域的 BRDF 分布与高动态范围(HDR)合成图像的曲线分布基本一致,这种现象说明可利用 BRDF 仿真曲线对该区域的灰度分布进行预测,这验证了利用 BRDF 分布反向调制原始投

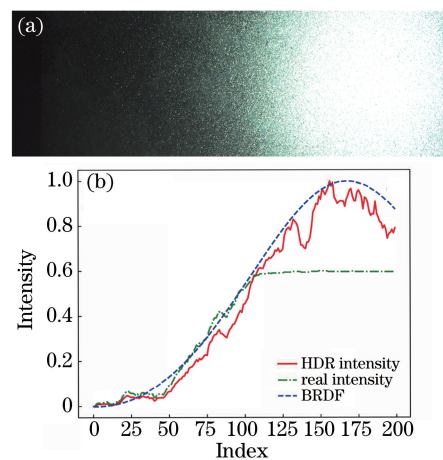


图 8 BRDF 与真实光强对比。(a)真实场景下的金属表面图像;(b) BRDF 分布与真实光强分布对比

Fig. 8 Comparison between BRDF and real light intensity. (a) Metal surface image under real scene; (b) comparison between BRDF distribution and real light intensity distribution

影仪的投影图案强度的合理性。

4.2 系统性能实验结果与分析

本实验中选取如图 9 所示的工件进行系统性能分析。主要从完整性、效率以及精度三个角度进行比较。

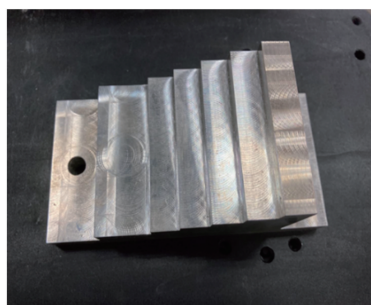


图 9 实验工件

Fig. 9 Experience part

4.2.1 测量结果完整性分析

在整套系统上对所提条纹调制方法的应用进行验证。通过固定系统与工件的相对位置,固定相机曝光参数,分别使用未经过优化的条纹图案(对应测量方案简称为未调制方案)以及经所提自适应方法调制过的条纹图案对目标工件进行深度恢复。对于不同方式拍摄得到的图像,在相位解算与深度重建后,经过形态学梯度滤波处理,得到去除噪声的相位

图和深度图。

由于条纹调制是针对测量完整性角度进行研究的,因此重点对测量结果中的无效区域大小进行统计。具体来说就是在同一感兴趣区域内,统计无效像素的个数,来验证完整性提升的情况。实验过程如图 10 所示。截取图 10(a)中自下而上第二、三层平面(框选区域)作为感兴趣区域,对像素个数进行统计,结果如表 1 所示,对于目标工件,感兴趣区域有效像素百分比从 60.2% 提升到 80.6%,无效像素个数由 63536 降低至 30934,点数补偿百分比约 51.3%。

但调制后测量结果中仍有大量点云缺失,造成这种现象的原因主要是相机的动态范围无法完全覆盖高亮金属表面动态范围,尤其是金属表面类似镜面反射区域的动态范围变化剧烈,即使将投影仪亮度限制在较低水平,相机图像仍呈现饱和状态,从而引起测量数据的缺失。图 10(c)中经投影仪投射的正弦条纹,其暗条纹对应投影仪投射的低亮度区域,但是在相机拍摄图像的过曝区域中,暗条纹区域像素灰度仍然表现为饱和,体现了相机动态范围的限制,实际上这也是大多像素调制法处理高动态问题时存在的客观问题。

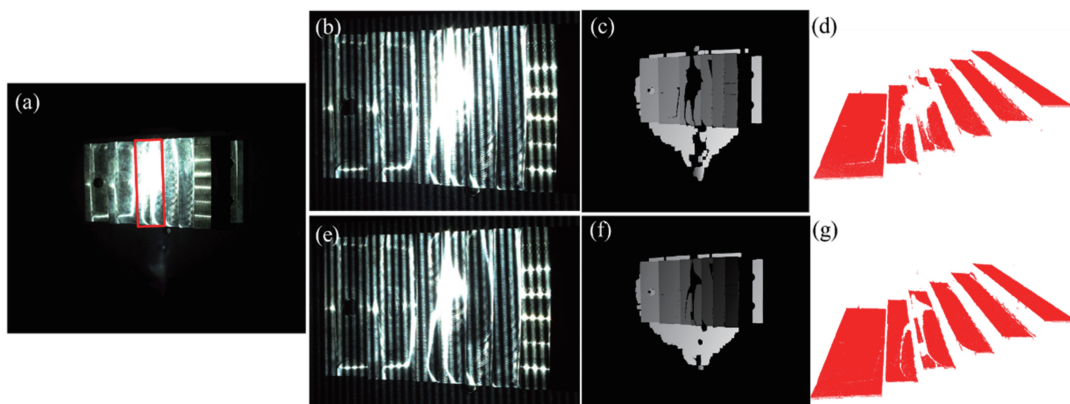


图 10 系统实验。(a)原图;(b)未调制条纹图案;(c)未调制深度图;(d)未调制三维点云数据;
(e)调制条纹图案;(f)调制深度图;(g)调制三维点云数据

Fig. 10 System experiment. (a) Original image; (b) unmodulated fringe pattern; (c) unmodulated depth diagram; (d) unmodulated point clouds; (e) modulated fringe pattern; (f) modulated depth diagram; (g) modulated point clouds

表 1 深度图像素完整性分析

Table 1 Completeness analysis of pixels in depth map

Scheme	Total number of pixels	Number of valid pixels	Number of invalid pixels	Valid pixel percentage / %
Unmodulated	159735	96199	63536	60.2
Modulated	159735	128801	30934	80.6

4.2.2 系统效率分析

在效率方面,所提方法需要建立拍摄原图与校正图之间的映射矩阵,但是由于该步骤在应用过程

中只需在初始化阶段进行一次计算,因此在实际测量时映射矩阵的计算时间可以忽略。

对实际测量过程中各个步骤所耗的时间进行统

计,并计算每个步骤与“调制参数计算”阶段所耗时间的比值,得到如表 2 所示的数据。在不考虑初始化的情况下,在本条纹投影测量系统中,主要的耗时

阶段为条纹的投影过程及相位分析阶段,因此减少投影的次数是提升效率的关键。

表 2 条纹投影各阶段计算时长

Table 2 Calculation time of each stage of fringe projection

Parameter	Initialization	Fringe generation	Fringe projection	Phase analysis	Reconstruction	Modulation parameter calculation
Time /s	8.96615	0.499453	9.16511	1.55931	1.13660	0.377363
Proportion	21.8	1.32	24.3	4.13	3.01	1

高动态方法需要在不同曝光参数下采集条纹,因此需要进行多次的条纹投射,效率极低;对于基于横竖条纹法的系统^[18]来说,由于需要分别投射横竖双方向的条纹,因此在对图案进行调制前,需要投影 2 次不同图案,假设只进行一次调制而不进行迭代,也需要再对调制后的条纹进行 1 次投射,因此至少需要 3 次投影过程,并且每次投影都对应 1 次相位分析过程;对于基于单应性构造像素对应关系的系统,如文献[20],需要在寻找对应关系时投影 1 次,加上生成调制参数需要建立相机响应函数,并需要额外投射一系列均匀灰度图,进一步增加了投影时间,因此完成同样的重建至少需要进行 2 次条纹投影加上一定数量的灰度图的投影;对于所提方法,在求解相机图像与投影仪图案之间像素

坐标的对应关系时需进行 1 次条纹投影,同时需要投射 1 张均匀灰度图,因此只需要 2 次条纹投影过程并投射 1 张均匀图像即可,极大提升了效率。

4.2.3 系统精度分析

为了验证所提条纹测量方案的精度,选择如图 9 所示的阶梯标准件进行精度验证。首先通过点自动对焦 3D 形状测量机(标称测量精度小于 2500 nm)对阶梯件台阶高度进行测量,得到台阶相对高度的标准值;随后通过条纹投影系统计算生成阶梯件三维点云,如图 11(a)所示,对点云中各个台阶进行平面拟合,求得参数后计算平面间距离,如图 11(b)所示。表 3 记录了高亮区域台阶(第一至第四台阶区域)调制前后平面间的距离和点云在平面附近的统计学分布信息。分析数据可以得出:

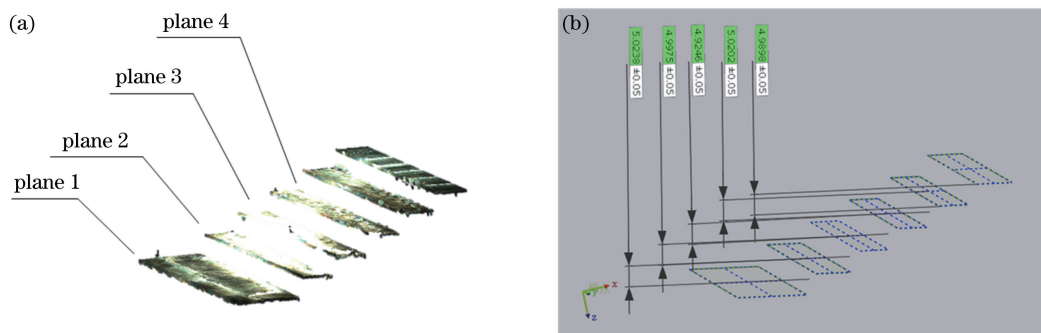


图 11 精度验证实验。(a)台阶点云数据;(b)平面拟合及台阶间距离

Fig. 11 Accuracy verification experiment. (a) Step point clouds; (b) Plane fitting and distance between steps

表 3 精度验证实验数据

Table 3 Accuracy verification experimental data

Plane	Refence distance /mm	Distance between adjacent planes				RMS of point distribution		
		Unmodulated scheme		Modulated scheme		Refence value /mm	Measured value by unmodulated scheme /mm	Measured value by modulated scheme /mm
		Measured distance /mm	Error /mm	Measured distance /mm	Error /mm			
Plane 1						0.0128	0.0347	0.0372
Plane 2	4.9960	4.9527	0.0433	5.0238	0.0278	0.0146	0.0768	0.0495
Plane 3	4.9897	5.1795	0.1898	4.9975	0.0078	0.0135	0.1203	0.0590
Plane 4	4.9857	5.2780	0.2923	4.9246	0.0611	0.0133	0.0478	0.0376

1) 调制前后台阶间距离最大误差均发生在第三、四台阶之间, 分别为 0.2923 mm 和 0.0611 mm, 同时调制前后平面拟合均方根(RMS)的最大值同样出现在第三台阶处, 分别为 0.1203 mm 和 0.0590 mm, 观察图 11(a)可知, 当前测量点云的过曝区域集中在第三台阶处, 说明过曝现象引入噪声, 降低了台阶测量的精度;

2) 从测量结果来看, 调制前后台阶距离测量误差最大值由 0.2923 mm 降低至 0.0611 mm, 精度提升达 77.4%, 同时平面拟合 RMS 最大由 0.1203 mm 降低至 0.0590 mm, 精度提升达 51.0%, 认为所提方案在精度方面有显著提升。

5 结 论

提出了一种自适应像素级调制的条纹投影方法, 该方法可对高亮金属表面形状进行有效测量。重点研究了像素级调制过程中投影仪与相机之间像素坐标对应关系的建立方法, 及 BRDF 模型引导条纹像素调制过程的测量方案。与传统像素调制方案相比, 所提条纹投影解决方案一方面通过新的图像匹配方法减少了条纹投影的次数; 另一方面通过近似 BRDF 函数计算调制参数, 仅需投射一张均匀灰度图像即可实现条纹调制参数的生成, 因此在测量效率方面有明显改善。对于测量完整性与精度提升方面, 所提方法的过曝区域无效点云补偿率达 51.3%, 同时测量精度由 0.2923 mm 提升至 0.0611 mm, 提升幅度为 77.4%, 大幅度改善了条纹投影结构光测量系统的性能。

参 考 文 献

- [1] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 18-31.
- [2] Zhang S. High-speed 3d imaging with digital fringe projection techniques[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2018: 1-14.
- [3] Xu Y J, Gao F, Jiang X Q. A brief review of the technological advancements of phase measuring deflectometry[J]. *PhotonIX*, 2020(1): 14.
- [4] Li C H, Xue J P, Lang W, et al. Method for interpolation of missing point cloud based on phase mapping in binocular vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111019.
李承杭, 薛俊鹏, 郎威, 等. 基于相位映射的双目视觉缺失点云插补方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111019.
- [5] Zhang Z H, Yu J, Gao N, et al. Three-dimensional shape measurement techniques of shiny surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303006.
张宗华, 于瑾, 高楠, 等. 高反光表面三维形貌测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303006.
- [6] Zhang S, Yau S. High dynamic range scanning technique[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [7] Babaie G, Abolbashari M, Farahi F. Dynamics range enhancement in digital fringe projection technique[J]. *Precision Engineering*, 2015, 39: 243-251.
- [8] Zhang C, Xu J, Xi N, et al. A robust surface coding method for optically challenging objects using structured light [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(3): 775-788.
- [9] Peng G Z, Chen W J. Fringe pattern inpainting based on convolutional neural network denoising regularization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1810002.
彭广泽, 陈文静. 基于卷积神经网络去噪正则化的条纹图修复[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1810002.
- [10] Nayar S K, Fang X S, Boulton T. Separation of reflection components using color and polarization [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 21(3): 163-186.
- [11] Salahieh B, Chen Z, Rodriguez J J, et al. Multi-polarization fringe projection imaging for high dynamic range objects[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 10064-10071.
- [12] Yang P B, Deng L J, Chen Y, et al. Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on structured light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204004.
杨鹏斌, 邓林嘉, 陈元, 等. 基于结构光的高反物体三维形貌测量方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0204004.
- [13] Feng S J, Zhang Y Z, Chen Q, et al. General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 59: 56-71.
- [14] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [15] Towers C E, Towers D P, Jones J D C. Absolute fringe order calculation using optimized multi-frequency selection in full-field profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(7):

- 788-800.
- [16] Argyriou V, Petrou M. Chapter 1 photometric stereo: an overview [J]. *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2009, 156: 1-54.
- [17] Guo D, Cheng Y, Zhuo S J, et al. Correcting over-exposure in photographs [C] // 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 13-18, 2010, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 515-521.
- [18] Wang L, Chen C, Gao N, et al. Three-dimensional shape measurement of high reflective objects based on adaptive fringe-pattern projection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 373-378.
王柳, 陈超, 高楠, 等. 基于自适应条纹投影的高反光物体三维面形测量 [J]. *应用光学*, 2018, 39(3): 373-378.
- [19] Liu F, He C Q, Shen A M, et al. Optimized compensation method of divisional projection for saturated region of structured light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0612001.
刘飞, 何春桥, 申爱民, 等. 结构光饱和和区域分区投射优化补偿方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0612001.
- [20] Lin H, Gao J, Mei Q, et al. Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7703-7718.
- [21] Moreno D, Taubin G. Simple, accurate, and robust projector-camera calibration [C] // 2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, October 13-15, 2012, Zurich, Switzerland. New York: IEEE Press, 2012: 464-471.
- [22] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1982, 1(1): 7-24.
- [23] Schlick C. An inexpensive BRDF model for physically-based rendering [J]. *Computer Graphics Forum*, 1994, 13(3): 149-162.
- [24] Walter B, Marschner S R, Li H, et al. Microfacet models for refraction through ROUGH surfaces [C] // Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques, June 24-28, 2007, Grenoble, France. [S. l.: s. n.], 2007: 195-206.