

doi:10.3788/gzxb20184711.1112002

基于单目视觉的曲面弧度测量方法

吴福培¹, 郭家华¹, 李昇平¹, 叶玮琳¹, 张宪民²

(1 汕头大学 机械电子工程系, 广东 汕头 515063)

(2 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘 要:针对异形件曲面弧度的测量问题,提出了一种基于单目视觉的曲面弧度测量方法.首先,用基于三色 LED 环形光源和 CCD 彩色相机组成的单目视觉系统采集单张包含被测曲面表面特性的彩色图像;其次,分析该图像的彩色分布特征、灰度变化规律和相邻区域特征的相关性,设计分割方法,完成目标曲面的分割;然后,基于单目视觉系统成像模型,结合材质与实验环境相关参量,推导出被测表面高度计算方程;最后,解出相邻像素点间的高度累加分量,进而还原被测点的高度,在此基础上,建立曲面弧度测量模型并完成曲面弧度测量.分别对 3D 打印曲面样品、螺钉螺纹、SIM 卡槽进行了曲面弧度测量实验,与激光三角法测量结果对比,所提方法误差小于 $\pm 3.6\%$,测量准确度为 0.0001 rad ,曲面弧度测量时长小于 0.6 s .实验结果表明,该方法对测量物体边缘、高度突变,高度渐变等类型的曲面都具有较好的适应性,在实现较高准确度测量的同时,具有较快的测量速度.

关键词:光学技术与仪器; 曲面弧度测量; 单目视觉; 视觉测量; 三维重建

中图分类号: TP391.4; TH142.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-4213(2018)11-1112002-11

Arc Measurement Method of Curved Surface Based on Monocular Vision System

WU Fu-pei¹, GUO Jia-hua¹, LI Sheng-ping¹, YE Wei-lin¹, ZHANG Xian-min²

(1 Department of Mechanical and Electronic Engineering, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China)

(2 School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A curved surface measurement method based on monocular vision system is proposed to measure the curved surface of the special-shaped parts. First, the monochromatic vision system which is composed of a tricolor LED ring structure light source and a three-color CCD color camera is used to collect a single color image that contains the surface characteristics of the measured surface. Secondly, the correlation of color distribution features of the images, the regular of gray level variation and characteristics of adjacent regions are analyzed, and the segmentation method is designed to complete the target surface segmentation. Then, the calculation equation of the measured surface height is derived based on the image model of the monocular vision system and the related parameters of the material and the experimental environment. Finally, the height of the measured points is reduced by solving the height accumulation component between adjacent pixels. On this basis, the surface curvature measurement model is established and the curved surface is measured. The surface curvature measurement experiments respectively for 3D printing surface samples, screw thread and SIM card slot are carried out based on the proposed method. Comparing with the laser triangulation measurement method results, it shows that the

基金项目:国家自然科学基金(No.61573233),广东省教育厅(No.2015KCXTD018)和广东省自然科学基金(No.2018A0303130188)资助

第一作者:吴福培(1980-),男,副教授,博士,主要研究方向为机器视觉和三维测量.Email:fpwu@stu.edu.cn

通讯作者:李昇平(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为机器视觉与自适应控制.Email:spli@stu.edu.cn

收稿日期:2018-05-21;录用日期:2018-09-13

errors are all less than 3.6%, the measurement accuracy is 0.000 1 rad, and the time length of measuring is less than 0.6 s. The experimental results show that the proposed method has good adaptability for measuring object edge, height abrupt change, height gradual change and other types of surface. It can achieve high precision measurement and fast measurement speed.

Key words: Optical technology and instrument; Curvature measurement of curved surface; Monocular vision; Visual measurement; 3D reconstruction

OCIS Codes: 120.0120; 240.0240; 150.0150; 100.3020

0 引言

随着现代工业的发展,电子产品的微小化、机械零部件加工的精密化和生产过程的自动化,对精密测量技术提出了新的要求.传统的接触式曲面弧度测量方法已难以满足当前生产需求^[1],并且,接触式测量法易损伤待测件表面,对机械结构设计准确度要求高,易产生测量误差和适应性差等缺点^[2],现代工业对非接触式三维测量方法的需求显得尤为迫切^[3-4].目前,国外常用的非接触式曲面弧度测量法是三坐标扫描测量法,将物品放置在特制的测量平台,通过对空间点的标记测量曲面弧度,该方法易出现运动累积误差,对部分角度的测量准确度不高,并且测量成本较高^[5].国内先进的弧度测量方法是基于计算机图像处理技术^[6],对目标曲面沿同一方向,按一定间距连续采集图像,通过对标记点进行曲线拟合反向测量曲面弧度,该方法对机械结构的准确度提出较高的要求,并且处理对象为二维图像,三维物体投影到二维图像过程中会丢失部分信息,限制了弧度测量的准确度,对于微小器件,若采用的间距不合理,会产生较大误差,适应性较低.

针对异形件曲面弧度的测量问题,本文基于 CCD 彩色相机和三色 LED 环形光源组成的单目视觉系统,用其采集单张彩色曲面图像,根据图像中曲面彩色分布规律、表面特征的关联性和三通道图像上的灰度信息,结合单目视觉系统的成像模型提出一种曲面弧度测量方法.该方法可快速复原被测表面三维形貌并获取其表面的高度信息,进而可精确地测量出被测曲面弧度.

1 测量系统分析

图 1 所示为单目视觉图像采集系统,三色环形光源由红、绿、蓝 LED 环形光组成,光源的出射光与进入相机的光遵循光学成像规律,LED 光源光强与距离的关系可近似朗伯分布^[7].为达到所需的均匀光照条件和获取表面的清晰图像,须对 LED 的透镜照明系统进行二次光学设计,三个 LED 阵列环形光源按一定距离由上至下分层环布于半球形结构内,三色 CCD 彩色相机位于三色环形光源中心正上方^[8].三色环形光分别从不同角度均匀入射到被测曲面表面.由于三色光的入射角以及波长不同,而相机的位置相对固定,因此,曲面彩色图像上的色彩分布特征和三通道图的灰度梯度变化关系与其高度信息和弧度信息存在内在的映射规律^[9-10],分析其内在映射规律可获得可视曲面所有点的高度和弧度信息.

CCD 彩色相机在三色环形光下采集的图像,除了被测曲面外,还可能包含复杂背景信息和难以避免的噪音^[11].对于测量系统,噪音的干扰程度决定了系统的测量准确度.针对局部小区域氧化变色的金属物体,为还原物体高度对应图像中的实际灰度值,提高测量准确度,可以采用基于相邻区域特性对缺陷区域像素补偿的方法来优化图像.事实上,将目标曲面从噪音和复杂背景信息中分割出来是一个欠约束问题,难以实现理想的分割,本文采用相邻区域特性对缺陷区域像素补偿的方法来处理图像,在尽可能保留图像纹理结构的前提下,完成目标区域与背景区域的分割.目标曲面分割流程如图 2 所示.

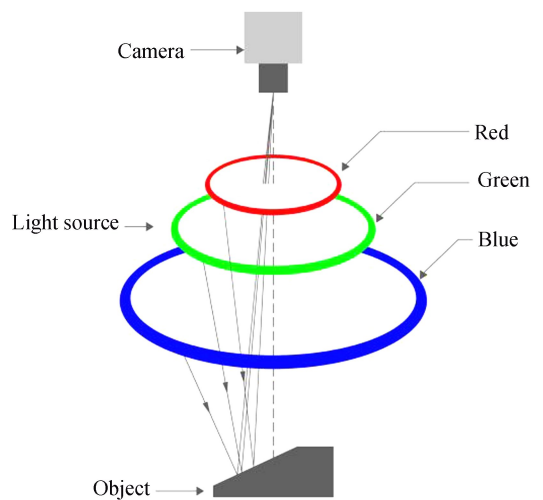


图 1 单目视觉系统示意图

Fig.1 The diagram of monocular vision system

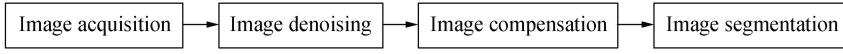


图2 图像预处理流程

Fig.2 The flowchart of image preprocessing

2 弧度测量方法

实际测量的曲面具有多样性,如波浪形曲面、渐变型曲面、突变型曲面等.由于曲面各点所处的高度、表面形状差异以及距相机和光源距离相异,不同角度入射的红、绿、蓝三色环形光的入射角不同,待测曲面上各点将响应相对应的灰度值和红绿蓝颜色特征^[12-13].本文提出的曲面弧度测量方法首先对图像采集系统采集的彩色图像进行处理,完成目标曲面的分割;其次,通过灰度标定实验获取待测曲面材质对三色环形结构光源响应的相关参量,并求解标定模型中的不确定参量;然后,基于单目视觉成像模型和通过实验所得的相关参量推导高度计算方程计算初始点高度,并对高度计算方程求导,获取相邻像素点间的高度累加分量;最后,根据初始点高度和累加分量计算待测曲面所有像素点高度,将曲面上点的高度值代入曲面弧度计算模型,完成曲面弧度的测量.

2.1 建立被测高度计算模型

基于单目视觉的曲面弧度测量方法中,根据光学成像规律建立成像模型,并建立入射角、已知参量、未知参量和实际高度之间的函数关系,从而计算待测表面像素点的实际高度.

实际情况下,进入相机聚焦在像元面成像的光线有镜面反射光和包含反射光和折射光的散射光,该散射光是由于光线照射物体表面后,经不均匀介质多次反射和折射后进入相机的^[14].假设介质均匀分布,散射光向各个方向均匀辐射,图像上像素面积为 dB_p 的散射光光辐射照度为 L_i ,对应实际物体表面积 dB_0 的光辐射照度为 L_r , L_i 和 L_r 之间的关系可表示为

$$L_i = \frac{\pi}{4} L_r (d/f)^2 (\cos \theta)^4 \quad (1)$$

式中, d 为透镜直径, f 为图像平面与摄像机光心之间的垂直距离, θ 为与相机视角有关的参量, $\cos \theta$ 可视为1.

物体表面散射光光辐射照度与物体表面光辐射照度的关系可表示为

$$L_r = r_d L_e \quad (2)$$

式中, r_d 为散射光的反射系数,与物体材质有关,通常 $r_d < 1$.

点光源辐射模型如图3所示,照射物体的光源可以视为无数点光源照射的叠加,点光源照射在物体上的面元为 dB , dB 与点光源圆心 S_0 组成的锥面对应单位球上的面元为 dB_s , dB_s 与 dB 和 S_0 组成的立体角 $d\omega$ 相等.则 $d\omega$ 可表示为

$$d\omega = \frac{dB \cos \alpha}{r^2} \quad (3)$$

式中, θ 为点光源方向与 dB 面法线之间的夹角, r 是点光源与接受面之间的距离, dB 接受到点光源发出的能量流 ϕ_e 为

$$\phi_e = I_i d\omega = \frac{I_i \cos \alpha}{r^2} dB \quad (4)$$

联立式(1)~(4)可知,图像上像素面积为 dB_p 的散射光光辐射照度 L_i 为

$$L_i = \frac{I_i r_d d^2 \pi}{4 f^2 r^2} \cos \alpha \quad (5)$$

式中, I_i 为点光源强度, α 为入射角, r 为点光源与接收面之间的距离.

由于图像上各接收点的亮度值 I_p 与物体表面对应点的散射光辐射照度 L_i 有关,考虑表面反射仅由散射光引起的情况下,假设图像上任一接收点的亮度 I_p 为

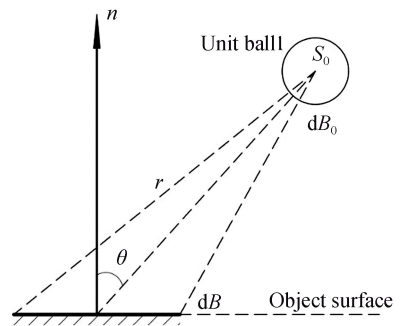


图3 点光源辐射图

Fig.3 Point light source radiation diagram

$$I_p = k_d \times \cos \alpha \quad (6)$$

式中, $k_d = I_i r_d \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2}{f^2 \cdot r^2}$. 由此可知, 物体表面各点对应的图像亮度 I_p 与光源强度、光源距离、摄像机相关参量和物体材质的相关参量有关, α 受物体表面形状影响.

除了物体内部介质的折射和反射引起的散射光外, 物体表面亮度还与物体表面的镜面反射有关, 理想情况下, 由镜面反射引起的图像上物体亮度 I_{s1} 可表示为

$$I_{s1} = k_{s1} \delta(\phi_x - \alpha_x) \cdot \delta(\phi_y - \alpha_y) \quad (7)$$

式中, $\delta(x)$ 为单位脉冲函数, $\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases}$, k_{s1} 与光源强度、表面材料性质以及相机内部参量有关, α_x 、 α_y 为入射光线与 x 、 y 夹角, ϕ_x 、 ϕ_y 为进入相机的反射线与 x 、 y 轴夹角. 当且仅当 $\alpha_x = \phi_x$ 、 $\alpha_y = \phi_y$ 时, 相机才能接收到镜面反射光.

真实物体表面一般不是理想平滑表面, 其通常包含粗糙的部分. 因此, 物体表面可视为无数小的理想镜面组成, 这些小的理想镜面的法向分布可以用高斯函数来描述, 在一个特定的小区内, 镜面法向与法向 n 的偏离角为 α 的小镜面的概率密度函数可表示为

$$P(\alpha) = \frac{1}{m} \cdot \exp\left(-\frac{\phi^2}{2\delta^2}\right) \quad (8)$$

式中, m 为归一化常量, δ^2 为方差, 表示物体表面粗糙度, ϕ 为观察方向与理想镜面反射方向偏离角.

在此镜面模型假设下, 镜面反射引起的图像上物体亮度 I_{s2} 为

$$I_{s2} = k_{s2} \cdot \exp\left(\frac{\phi^2}{2\delta^2}\right) \quad (9)$$

式中, k_{s2} 为与光源强度、表面材料性质以及摄像机内部参量有关的参量.

联立式(6)、(7)、(9), 可得图像上物体亮度方程为

$$I = I_p + I_{s1} + I_{s2} = k_d \cos \theta + k_{s1} \delta(\phi_x - \alpha_x) \cdot \delta(\phi_y - \alpha_y) + k_{s2} \exp\left(-\frac{\phi^2}{2\delta^2}\right) \quad (10)$$

分别对彩色图像进行三通道处理, 对应红、绿、蓝灰度图像. 红、绿、蓝三个分量对应的物体亮度方程可表示为

$$I = k_d \cos \theta \begin{bmatrix} r_d \\ g_d \\ b_d \end{bmatrix} + k_{s1} \begin{bmatrix} r_s \\ g_s \\ b_s \end{bmatrix} \delta(\phi_x - \alpha_x) \cdot \delta(\phi_y - \alpha_y) + k_{s2} \begin{bmatrix} r_s \\ g_s \\ b_s \end{bmatrix} \exp\left(-\frac{\phi^2}{2\delta^2}\right) \quad (11)$$

通过以上分析可知, 图像上物体的亮度主要取决于散射光. 由于镜面反射光的成分较少, 但会影响进入相机的反射光, 为此, 引入常量 k_{sr} 和 S_r 代表镜面反射光进入相机的反射光的部分, k_{sr} 为入射角 α 的系数, S_r 为偏移量, 整理得图像上物体表面光照模型为

$$I = k_d \cdot \cos(k_{sr} + S_r) = I_i r_d \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2}{f^2 r^2} \cdot \cos(k_{sr} + S_r) \quad (12)$$

求解式(12), 可得入射角方程为

$$\alpha = \frac{I}{k_{sr}} \cdot \arccos\left(\frac{I}{k_d}\right) - \frac{S_r}{k_{sr}} = \frac{I}{k_{sr}} \cdot \cos^{-1}\left(\frac{4 f^2 r^2 I}{\pi d^2 I_i r_d}\right) - \frac{S_r}{k_{sr}} \quad (13)$$

进入相机的反射光线, 其斜率和物体所处视场位置有关, 在视场左侧和右侧区域分别建立光照反射模型进行分析, 以左侧为例进行阐述, 视场左侧反射模型如图 4 所示.

由图可知, 其入射光线方程为

$$z - n_0 = -\tan \alpha_1 \cdot (x - m_0) \quad (14)$$

式中, m_0 为点光源与相机中心线的水平距离, n_0 为点光源与载物台的竖直距离.

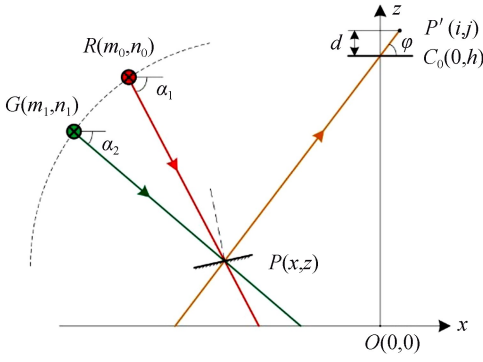


图4 视场左侧区域物体反射图

Fig.4 The reflection map of the object in the left area of field of view

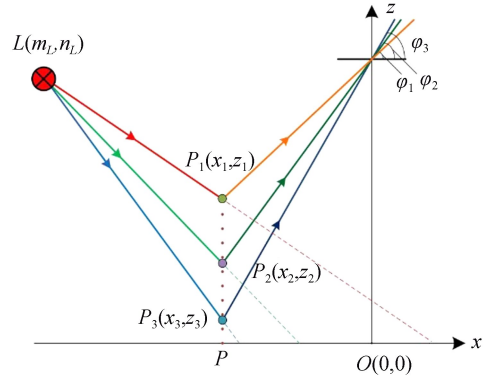


图5 同一位置不同高度物体反射图

Fig.5 The reflection map of the different heights' objects in the same position

对同一 (x, y) 位置而言,当被测物体高度发生变化时,物体上对应点进入相机的反射线斜率也会产生相应改变,同一位置不同高度被测点的光照反射模型如图5所示.假设从高到低三点 P_1 、 P_2 、 P_3 对应的反射线的反射角的余角分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 ,相应地, $\phi_1 < \phi_2 < \phi_3$,被测点高度越高,对应的反射角的余角越小,反射线的斜率越小,即反射线的斜率与同一位置物体的高度成反比关系^[15].在反射线斜率的计算中,分母部分可引入一个与高度相关的变量 $k_h \cdot z$,而高度影响参量 k_h 为与被测物材质相关的系数,可通过灰度标定实验获得.根据以上分析,反射光线方程可表示为

$$z - h = \frac{d}{(\tau w - i) \times s_x + k_h \times z} \times (x - 0) \quad (15)$$

联立式(14)、(15)计算高度 z ,整理得

$$\frac{k_h \tan \alpha}{d} \times z^2 + \left[\frac{\tan \alpha}{d} \times (W_0 s_x - i s_x - k_h h) + 1 \right] \times z + \frac{\tan \alpha}{d} \times h i s_x - \frac{\tan \alpha}{d} \times W_0 s_x h - m \tan \alpha - n = 0$$

求解可得

$$z = \frac{1}{2 k_h} (i s_x + k_h h - W_0 s_x - \frac{d}{\tan \alpha} + \sqrt{\Delta}) \quad (16)$$

式中, $\Delta = W_0^2 s_x^2 + i^2 s_x^2 + k_h^2 h^2 - 2 W_0 i s_x^2 + 2 k_h \tau w_0 s_x h - 2 k_h h i s_x + \frac{2d}{\tan \alpha} (W_0 s_x - i s_x - k_h h + 2 k_h + 2 k_h m \tan \alpha + 2 k_h n) + \frac{d^2}{\tan \alpha^2}$, $P(x, z)$ 为被测点坐标; $R(m, n)$ 为光源坐标; $P'(i, j)$ 为被测点在图像上坐标; α 为入射光线与水平方向夹角; $C(0, h)$ 为相机光心坐标; d 为光心到成像平面的距离; W 为成像照片宽度, $W_0 = W/2$, (s_x, s_y) 为被测点在图像中像素尺寸坐标; k_h 为与材质有关的高度影响参量.

2.2 灰度标定实验

通过灰度标定实验获取待测曲面材质对三色环形结构光源响应的相关参量,并求解标定模型中的不确定参量.首先,选取高度已知且和待测曲面材质一致的标定物;其次,根据光学成像规律建立数学模型并建立三色光入射角和未知参量之间的表达式;然后,分别以同一入射角照射标定物上预设的一系列点并以不同入射角照射标定物上同一点,可得两组图像;最后,通过分析两组图像上的数据,拟合函数方程式求解未知参量.

一方面,在标定物上的预设位置选取一标定点,三色光红、绿、蓝分三组分别以不同入射角照射.式(16)中,参量 r_d 、 k_{sr} 、 s_r 与被测光照环境以及焊点材质有关,无法通过计算或测量获得.通过将同一单色点光源 L 以不同入射角照射焊锡标定物,获取一组图像序列.由于光源位置、标定点灰度值(亮度)、标定点位置、入射角已知,分析图像序列中同一标定点的灰度变化规律,通过实验数据可拟合出灰度值 I 和入射角 α 的函数方程,从而确定各参量值.图6为点光源以不同入射角照射标定物的光照反射模型.

另一方面,图7为同一入射角位置照射一系列标定点的光照反射模型.固定位置的点光源分红、绿、蓝三色分别照射在标定物上一系列已知位置的标定点上.式(16)中,参量 k_h 可通过已知高度的焊锡材质标定物进

行实验获得.首先,通过位置固定的点光源照射在已选取一系列已知位置的标定点上,获得一组灰度序列;然后,由于光源位置、标定点位置、入射角、标定点高度均已知,通过实验数据可拟合出灰度值 I 和标定点位置 (x, y) 的函数方程,从而确定参量 k_h .

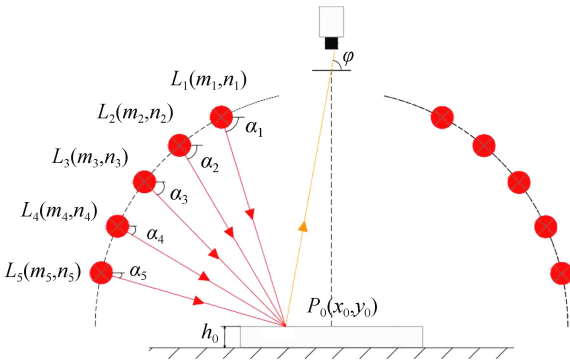


图6 光源处于不同位置时标定物反射图

Fig.6 Reflection image of calibrated light source at different positions

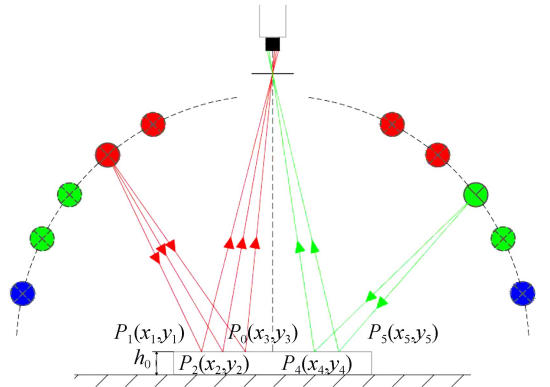


图7 标定物上多个标定点的反射图

Fig.7 Reflection image of multiple points on the calibration object

2.3 迭加分量求解方法

灰度迭加法根据当前点的高度累加一个高度分量来计算其相邻点的高度,不仅可以增加各计算点之间的约束,还可避免因所有像素点均通过高度求解方程所重构的表面存在毛刺、凸起、凹陷或变形等情况.

灰度迭加分量 d_{hl} 由 z 对坐标分量 i 求偏导数后取绝对值得到,整理得 d_{hl} 为

$$d_{hl} = \left| \frac{\partial z}{\partial i} \right| = \left| \frac{s_x}{2k_h} + \frac{\tan \alpha (s_x^2 i - W_0 s_x^2 - k_h h s_x) - ds_x}{2k_h \tan \alpha \sqrt{\Delta}} \right| \quad (17)$$

对于同一视场中的物体,如果物体表面高度变化平缓,则同一材质的物体表面越高,接收来自光源能量越多,图像中对应像素点的亮度值越大,综合考虑像素梯度变化对高度计算的影响规律,根据图像中相邻像素点之间的关系,设基准点坐标为 (i, j) ,灰度值为 $g(i, j)$,高度为 $z(i, j)$,基准点坐标高度 $z(i, j)$ 由式(16)求解得出,则水平方向上相邻像素点的高度计算方程为

$$\begin{cases} z(i-1, j) = z(i, j) - d_{hl} & g(i-1, j) < g(i, j) \\ z(i-1, j) = z(i, j) + d_{hl} & g(i-1, j) > g(i, j) \\ z(i-1, j) = z(i, j) & g(i-1, j) = g(i, j) \end{cases} \quad (18)$$

垂直方向的求解与水平方向相同,不再赘述.在计算过程中,结合焊点表面彩色分布与高度之间的关系以及图像灰度梯度大小,将属性相近的像素归为同一子区域并赋予相同高度值,可避免逐点运算,节省三维重构的时间,提高计算效率.

2.4 曲面弧度测量

基于单目视觉的曲面弧度测量方法通过视觉法恢复曲面的三维表面形状后,求曲面上任意点的弧度,步骤为:首先,过待测点选定方向,在三维表面待测点两端等距离选取弧度测量的起点 A 和终点 B ;其次,通过待测点、 A 点和 B 点作包含三点的圆,垂面与曲面相交于一条曲线;然后,在相交曲线上选取一系列点坐标拟合得到一个圆,并求解该圆的圆心 O 及半径 r ;最后,计算起点 A 点与终点 B 之间的直线距离 a ,待测点与弦的距离 b ,即为圆弧弦长,通过半径及弦长可求得所选两点间对应曲面圆弧的弧度.曲线弧度计算示意图如图8所示.

通过两 endpoints、待测点及一系列选定点拟合的圆弧,已知弦长为 a ,待测点 T 距离弦的距离为 b .半径 r 计算公式为

$$\left(\frac{1}{2}a \right)^2 + (r-b)^2 = r^2 \quad (19)$$

圆心角 α 计算公式为

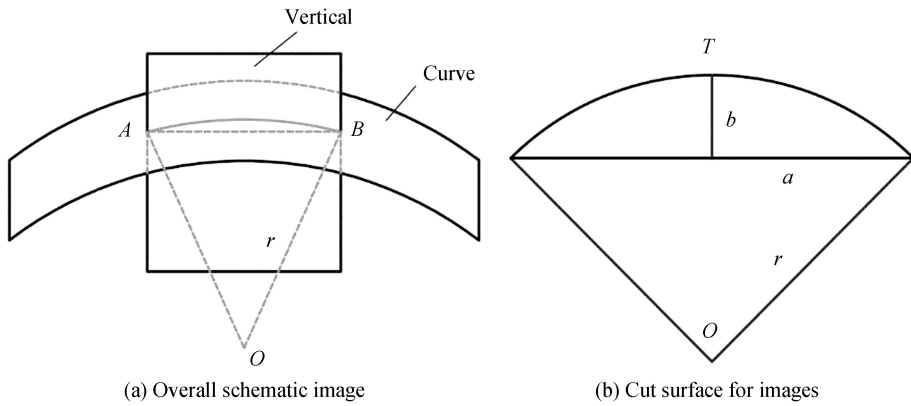


图8 弧线计算示意图
Fig.8 Schematic diagram of arc line calculation

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{a}{2r} \quad (20)$$

待测点 T 的弧度 l 计算公式为

$$l = 2\pi\alpha / 360 \quad (21)$$

联立式(19)~(21),待测点 T 的弧度 l 测量方程为

$$l = \frac{\pi \arcsin \left(\frac{4ab}{a^2 + 4b^2} \right)}{90} \quad (22)$$

由式(22)可知,待测点弧度只与弧的弦长及待测点到弦的垂直距离有关.通过对曲面三维形貌的恢复过程可知,每个点的实际高度均已知,因此,采用该方法可实现曲面弧度的精确求解.

3 实验结果与分析

为检验所提方法的准确性和实时性,针对曲面3D打印样品、螺钉螺纹和SIM卡槽在作者团队研制的实验平台上(如图9)进行曲面弧度测量实验并对曲面弧度测量时间进行统计.3D打印样品结构尺寸均已知,对于螺纹和SIM卡槽,以技术较为成熟的激光三角法所测弧度为参照值^[16],并将基于单目视觉测量曲面弧度的结果与激光三角法所测弧度结果进行对比分析.表1~3中Error rate定义为单目视觉测量弧度结果减去实际弧度或减去激光三角法测量弧度后,与实际弧度或激光三角法测量弧度之比.比值为0,表示单目视觉法所测弧度值准确,比值为正数,表示单目视觉法所测弧度偏大,比值为负数,表示单目视觉法所测弧度偏小.

3D打印样品在纵向方向高度相同,采用单方向灰度迭加即可恢复曲面形貌,试验中采用横向迭加的方法进行三维重建.3D打印样品的曲面可视为柱面一部分,任意横向垂直面与曲面相交结果都为同一形状曲线,测量该曲线的弧度即为曲面3D打印样品的弧度.基于单目视觉法测量的3D打印曲面样品三维重建图及其所切曲线与实际高度曲线对比如图10所示,3D打印曲面样品为凹形曲面,重建形状与实际情况一致,但测量结果总体略高于实际情况.其原因在于:测量曲面为凹形曲面,光源照射在表面上的光线相比平面标定物,待测点位置会得到更多来自相邻区域的散射光,使得曲面物体相比同位置、同高度的灰度标定物有更大的灰度值,根据式(16)可知,同一位置处,灰度值

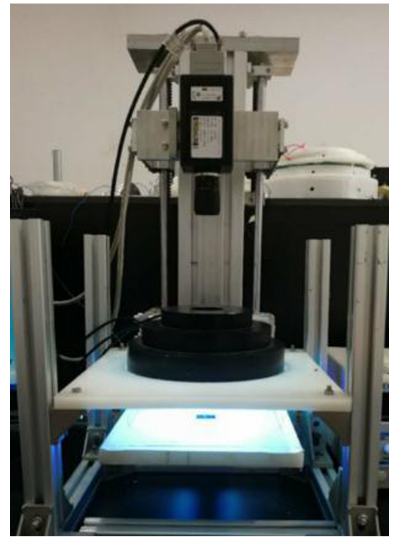


图9 单目视觉系统
Fig.9 Monocular vision system

与该位置高度成正比,从而使所测高度值偏大.该 3D 打印曲面样品曲面弧度测量时长为 0.24 s.为进一步检验测量结果,将基于单目视觉法测量的曲面曲线与 3D 打印样品的实际曲线对比,并等距离选取 10 个点,以选取点左右各 3 个像素点拟合圆弧,根据式(22)测量其弧度并与实际弧度进行对比.结果如表 1 所示,分析实验数据表明,3D 打印曲面样品的曲面弧度测量准确度为 1×10^{-4} rad,被测点最大误差为 3.47%.

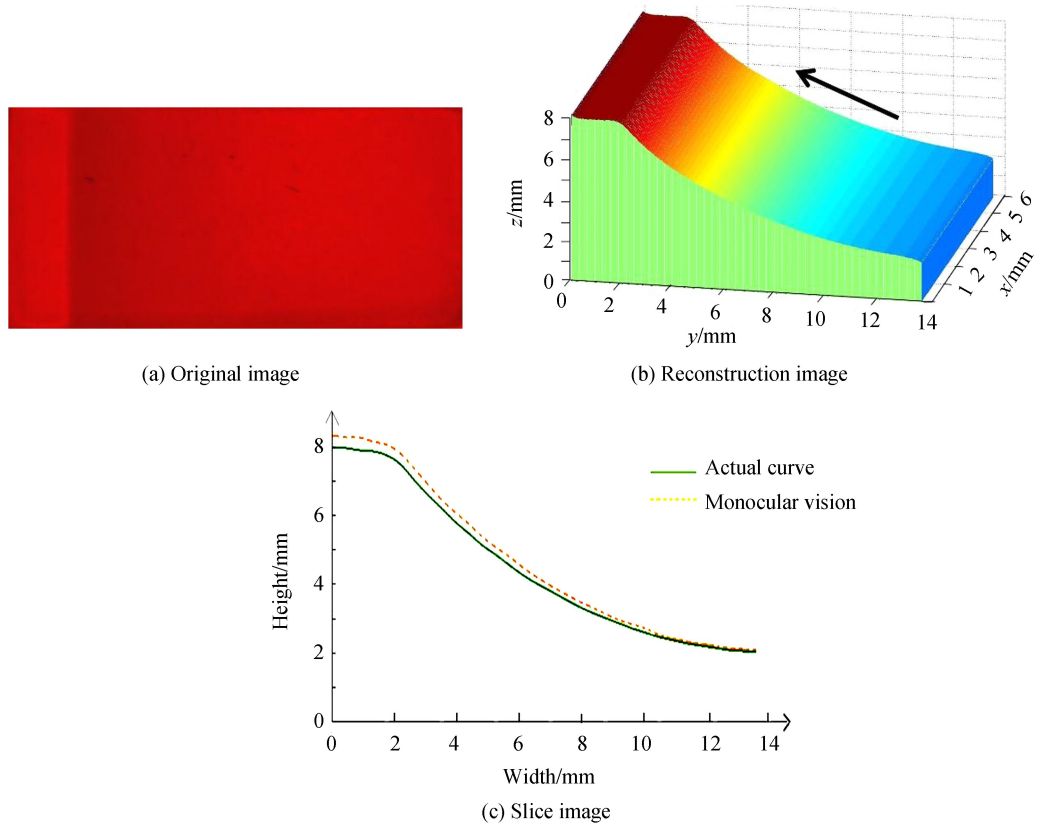


图 10 3D 打印样品的三维重建结果与实际结果对比

Fig.10 Comparison of 3D reconstruction results and actual results of 3D printed samples

表 1 曲面 3D 打印样品弧度测量结果

Table 1 Radian measurement results of curved surface 3D printing samples

Sample	0	1	2	3	4
Monocular vision/rad	-1.49×10^{-5}	-1.36×10^{-4}	-2.14×10^{-4}	-3.74×10^{-4}	-2.95×10^{-4}
Actual curve/rad	-1.44×10^{-5}	-1.32×10^{-4}	-2.09×10^{-4}	-3.71×10^{-4}	-2.93×10^{-4}
Error rate	3.47%	2.94%	2.34%	0.80%	0.68%
Sample	5	6	7	8	9
Monocular vision/rad	-2.92×10^{-4}	3.01×10^{-4}	-2.24×10^{-4}	-1.85×10^{-4}	-1.47×10^{-4}
Actual curve/rad	-2.88×10^{-4}	2.97×10^{-4}	-2.21×10^{-4}	-1.84×10^{-4}	-1.46×10^{-4}
Error rate	1.37%	1.33%	1.34%	0.54%	0.68%

重建螺钉螺纹三维形貌实验中,首先在两个对立面分别采集一张螺纹图像,两图合成后可得到螺纹整体图像.由于螺纹为金属材质,易被氧化产生黑斑,使用本文所提的像素补偿法进行像素补偿与修正,然后对其进行三维形貌恢复.根据螺纹的纹理分布,其表面形状在 X 方向和 Y 方向均按规律变化,实验中采取 X 方向和 Y 方向分别迭加,再对两个方向的结果取平均值,最后将两张图像得到的三维图像进行图像拼接,即可获得螺钉螺纹三维全貌图.该螺纹曲面弧度测量时长为 0.58 s.图 11(a)中螺纹最高水平曲线的测量结果为图 11(e)中 Monocular vision-1,激光三角法所测同一曲线结果为图 11(e)中 Triangulation.从图 11(c)、(d)可知,螺纹三维重构图像形貌符合实际形貌.为进一步检验测量结果,选取螺纹三维重构图表面最高位置处的一系列点,拟合其表面轮廓曲线,在该条轮廓线上等距离选取 10 个点,根据被选定点左右各 3 个点,拟合得到待测曲线,测量该曲线弧度,并与激光三角法测量的结果相比较.实验结果如表 2,可知螺钉螺纹曲面弧度

测量准确度为 1×10^{-4} rad,被测点最大误差为 3.6%。

为检验所提方法的稳定性和可重复性,将所测螺纹水平向右移动 0.5 mm 后,在单目视觉环境下采集图像,如图 11(b),图像右边界为视场边界,相比图 11(a),右端有 0.5 mm 长度螺纹缺失,最高曲线高度测量结果如图 11(e)中曲线 Monocular vision-2,与激光三角法测量结果的对比如图 11(e)和表 2 所示,可知测量螺纹整体形状基本一致,曲面弧度测量最大误差为 2.88%,表明此方法具有较强的稳定性和可重复性。

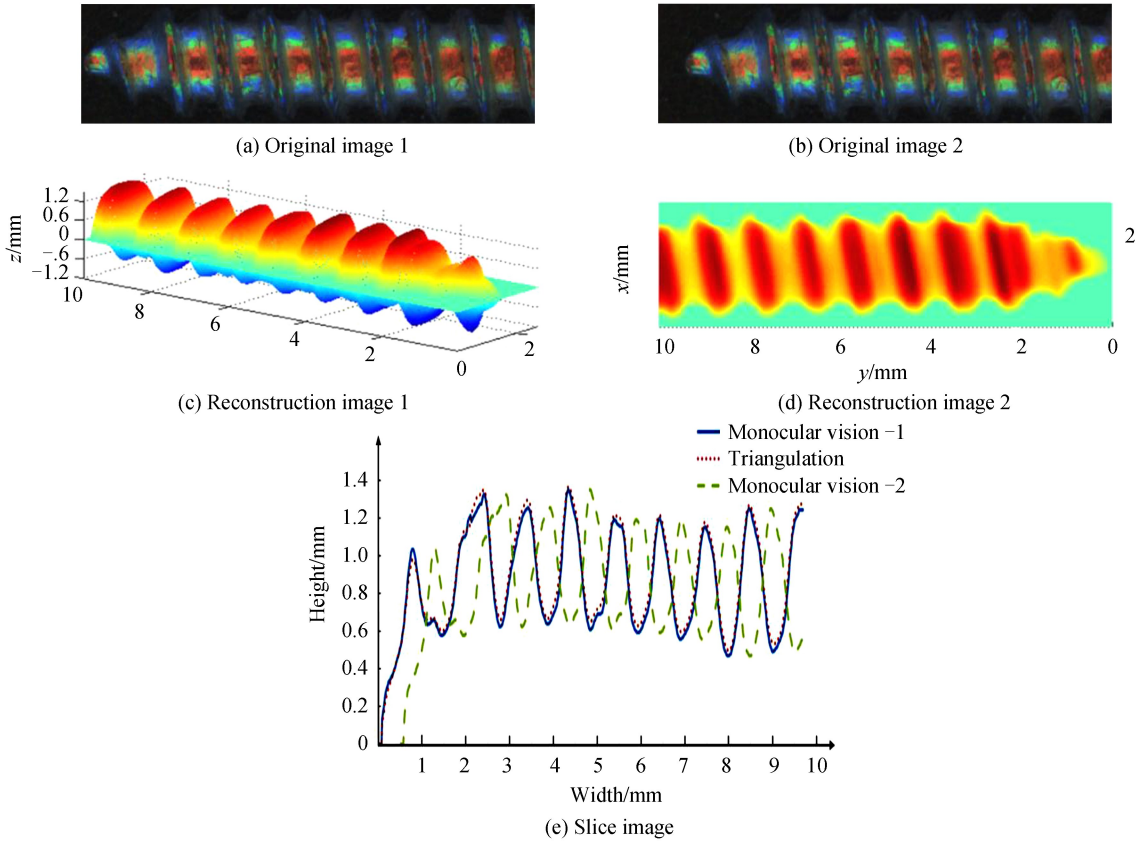


图 11 螺纹的三维重建结果与激光三角测量结果对比

Fig.11 Comparison of 3D reconstruction results and laser triangulation results of thread

表 2 螺纹弧度测量结果

Table 2 Radian measurement results of screw threads

Sample	0	1	2	3	4
Monocular vision-1/rad	1.15×10^{-4}	4.52×10^{-4}	-3.34×10^{-4}	5.96×10^{-4}	8.39×10^{-4}
Triangulation/rad	1.11×10^{-4}	4.56×10^{-4}	-3.39×10^{-4}	5.91×10^{-4}	8.44×10^{-4}
Monocular vision-2/rad	1.14×10^{-4}	4.58×10^{-4}	-3.31×10^{-4}	5.99×10^{-4}	8.44×10^{-4}
Error rate-1	3.60%	-0.88%	-1.50%	1.24%	-0.59%
Error rate-2	2.70%	0.44%	-2.36%	1.35%	0.00%
Sample	5	6	7	8	9
Monocular vision-1/rad	4.37×10^{-4}	-1.41×10^{-4}	5.98×10^{-5}	1.65×10^{-4}	-6.52×10^{-5}
Triangulation/rad	4.40×10^{-4}	-1.39×10^{-4}	5.88×10^{-5}	1.69×10^{-4}	-6.64×10^{-5}
Monocular vision-2/rad	4.33×10^{-4}	-1.43×10^{-4}	6.00×10^{-5}	1.70×10^{-4}	-6.49×10^{-5}
Error rate-1	-0.60%	1.42%	1.70%	-2.42%	-1.84%
Error rate-2	-1.59%	2.88%	2.04%	0.60%	-2.26%

SIM 卡槽的曲面形式呈现多样性特征,包括波浪形曲面、渐变型曲面以及突变型曲面,为提高曲面弧度测量准确度,将该图像分成左右两个球面分别进行重构,再进行图像拼接.两区域均采用 x - y 方向灰度迭加实验,即从 x 和 y 两个方向上对 SIM 卡槽进行迭加运算.假设 SIM 卡槽图像初始点高度值为 $z(i, j)$,其中 i 和 j 分别代表 x 方向和 y 方向上的坐标值, x 方向累加分量为 dh_x , y 方向累加分量为 dh_y ,累加权值分别为

w_x 和 w_y ,且 $w_x + w_y = 1$,对角像素点的高度计算方程为

$$z(i=1, j+1) = z(i, j) \pm (w_x \cdot dh_x + w_y \cdot dh_y) \quad (23)$$

根据球形曲面形状,实验中权值 w_x 、 w_y 均取值0.5,该SIM卡槽曲面弧度测量时长为0.43 s,其重构结果及与激光三角法测量结果对比如图12所示.SIM卡槽重构图形形貌与实际情况基本一致,其中凸起部分精确度比凹陷部分高.分析发现,三色光照射凹陷部分时,由于曲面内凹,凹陷部分散射光更加密集且复杂,从而使表面灰度值增加,导致测量高度比实际高度偏大.为进一步检验弧度的测量结果,在SIM卡槽三维重构图表面选取图中截面,轮廓线上等距离选取10个点,拟合其表面轮廓曲线,在该条曲线上等距离选取10个待测点,根据被选定点左右各3个点,根据待测点及其左右6个点,拟合弧线计算弧度即为该待测点表面弧度.与激光三角法测量的结果对比如表3,可知第10个点处曲面弧度为0,即该点处曲线拟合结果为直线, SIM卡槽曲面弧度测量准确度为 1×10^{-4} rad,被测点最大误差为3.57%.

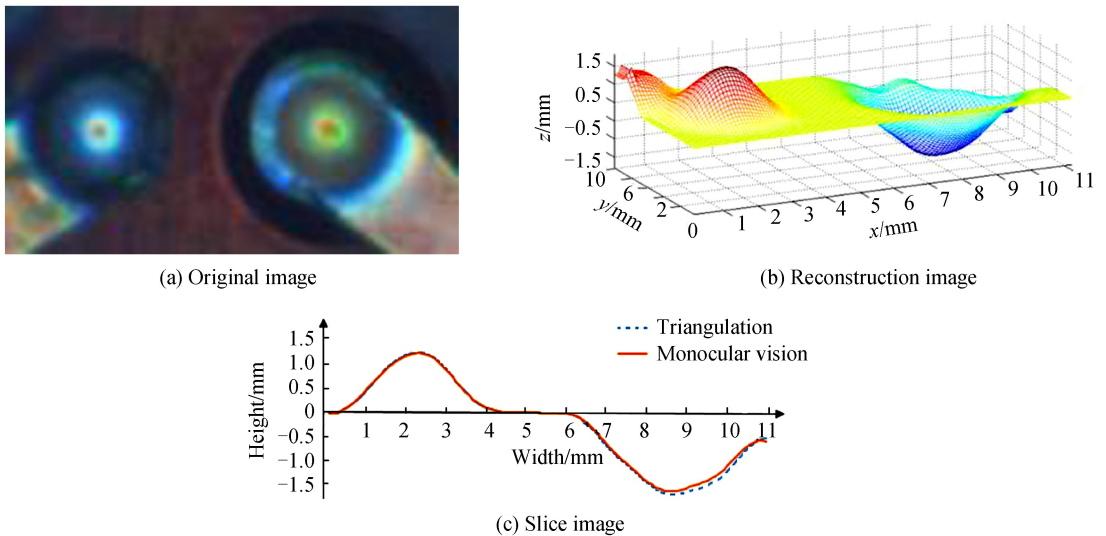


图12 SIM卡槽的三维重建结果与激光三角法测量结果对比

Fig.12 Comparison of 3D reconstruction results and laser triangulation results of SIM card slot

表3 SIM卡槽弧度测量结果

Table 3 Radian measurement results of SIM card trough

Sample	0	1	2	3	4
Monocular vision/rad	1.76×10^{-4}	2.57×10^{-4}	3.27×10^{-4}	4.90×10^{-4}	1.82×10^{-4}
Triangulation/rad	1.68×10^{-4}	2.51×10^{-4}	3.20×10^{-4}	4.84×10^{-4}	1.87×10^{-4}
Error rate	3.57%	2.39%	2.19%	1.24%	-2.67%
Sample	5	6	7	8	9
Monocular vision/rad	-3.21×10^{-4}	-4.52×10^{-4}	-4.97×10^{-4}	-6.40×10^{-4}	0
Triangulation/rad	-3.17×10^{-4}	-4.50×10^{-4}	-4.91×10^{-4}	-6.21×10^{-4}	0
Error rate	1.26%	0.44%	1.22%	3.06%	0

4 结论

本文基于单目视觉系统,提出了一种基于图像灰度梯度变化进行灰度迭加运算重构曲面三维形貌并测量其曲面弧度的方法.该方法基于构建的单目视觉系统,只需采集单幅图像,即可快速重构视场内所有物体可视表面的三维信息并测量曲面弧度,克服传统剪影建模法反向恢复表面形貌时求解的不确定性、慢收敛性问题和基于多目视觉测量的相机位置标定、算法测量过程的立体匹配问题.

采用该方法计算待测曲面上所有像素点的高度信息,灰度迭加可以使当前点的高度计算在已知高度的相邻点的基础上进行,通过增加相邻点之间的约束,改善了因硬件导致的毛刺和凸凹点的情况,体现其曲面平滑的特征,提高了弧度测量的准确度.

与激光三角法的对比实验结果表明,该方法能精确恢复被测表面形貌并通过弧度测量模型准确测量任

意点弧度;对实验样品采样点处的曲面弧度测量准确度为 1×10^{-4} rad,误差均小于 $\pm 3.6\%$,验证了其有效性;对螺纹样品的第二次测量最大误差未超过第一次测量最大误差,验证了其稳定性。

参考文献

- [1] WU Fu-pei, ZHANG Xian-min. An inspection and classification method for chip solder joints using color grads and Boolean rules[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2014, **30**(5): 517-526.
- [2] ALESSANDRO Z. Broad frequency band full filed measurements for advanced applications: Point-wise comparisons between optical technologies[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, **98**: 968-999.
- [3] OLEJNIK K, PAWEL P, MONIKA B, *et al.* Optical measurement of the hydrophobic properties of paper products[J]. *Measurement*, 2018, **115**: 52-63.
- [4] VINICUS L J, RAUL G, AMERICO S. Active power measurement in arc welding and its role in heat transfer to the plate[J]. *Welding in the World*, 2017(61): 847-856.
- [5] QU Yu-fu, PU Zhao-bang, ZHAO Hui-jie. 3D coordinate measurement of free-form surface based on monocular vision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(10): 1318-1322.
屈玉福,浦昭邦,赵慧洁. 基于单目视觉的自由曲面三维坐标测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(10): 1318-1322.
- [6] ZHOU Jing-bo, LI Zeng-qiang, WANG Ya-qi, *et al.* Tool Tip arc measurement and characterization of micro-arc diamond tools[J]. *Nanotechnology & Precision Engineering*, 2013, **11**(4): 334-340.
- [7] YANG Jia, JIA Shu-hai. A novel method of three dimensional profile measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 972-975.
杨佳,贾书海. 一种新的三维轮廓测量方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):972-975.
- [8] WU F P, LI S P, ZHENG X M, *et al.* A design method for LEDs arrays structure illumination[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, **12**(10): 1177-1184.
- [9] CHEN Feng, TONG G Q, YUE X K, *et al.* Multi-performance optimization of small-scale resistance spot welding process parameters for joining of Ti-1Al-1Mn thin foils using hybrid approach [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, **89**(9-12): 3641-3650.
- [10] CHEN Y B, TAO W, LI L Q, *et al.* Visual sensing and morphological image processing of weld pool in laser spot welding[J]. *China Welding*, 2010, **19**(2): 70-74.
- [11] LIU Bin, WANG Peng, ZENG Yong, *et al.* Measuring method for micro-diameter based on structured-light vision technology[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(7): 666-669.
刘斌,王鹏,曾勇,等. 一种基于结构光视觉技术的微小直径测量方法[J]. *光学学报*, 2010, **8**(7):666-669.
- [12] HYUNG T K, KIM S, YOUNG J C. Quick and efficient light control for conventional automatic inspection (AOI) systems[J]. *Internation Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, **16**(2): 247-254.
- [13] TRONG H D, MYUNG SIK Y. Visible light communication based vehicle positioning using LED street light and rolling [J]. *Optics Communications*, 2018, **407**: 112-126.
- [14] ZHANG Y N, TANG J L, WANG J Y, *et al.* Adjustable beam lighting with LED matrix and lens array[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2017, **25**(8): 496-503.
- [15] LU Ke-qing, WANG Wen, ZHANG Min, *et al.* Digitization of surface boundary based on coaxial stereo vision photogrammetry in reverse engineering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(2): 0212002.
卢科青,王文,张敏,等. 逆向工程中基于共轴立体视觉的曲面边界测量 [J]. *光子学报*, 2017, **46**(2):0212002.
- [16] LI S, JIA X, CHEN M, *et al.* Error analysis and correction for color in laser triangulation measurement[J]. *Optik*, 2018, **168**:165-173.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 61573233), Major Scientific Research Projects in Universities in Guangdong Province (No. 2015KTSCX038) and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.2018A0303130188)

引用格式: WU Fu-pei, GUO Jia-hua, LI Sheng-ping, *et al.* Arc Measurement Method of Curved Surface Based on Monocular Vision System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1112002

吴福培,郭家华,李昇平,等.基于单目视觉的曲面弧度测量方法[J].*光子学报*,2018,**47**(11):1112002