

利用自由拍摄二维图像实现三维点云的纹理贴图

向卓龙, 张启灿*, 陈超文

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 让重建出的物体三维面形附着上物体本征的彩色纹理,使其具有真实感。为了得到纹理数据,在双目相机三维测量结构的基础上,额外添加一个彩色相机以获取纹理。在后续贴图的过程中,需要知晓双目系统及纹理相机的内参和外参,即对双目与纹理相机所组成的系统进行立体标定,若想获得不同角度下的物体纹理信息而改变纹理相机的位置,则应重新进行标定。针对该问题,提出一种增设标记点的方法,仅对系统进行一次初始标定,便可自由使用纹理相机,从而完成纹理相机在任意位置拍摄后的纹理贴图,实验验证该方法具有可行性。该方法减少了纹理相机的频繁标定过程,为点云数据纹理贴图提供便捷易行的实现手段。

关键词 成像系统; 三维成像; 纹理贴图; 双目视觉; 立体标定

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811018

Texture Mapping of 3D Point Clouds with Freely Recorded 2D Images

Xiang Zhuolong, Zhang Qican*, Chen Chaowen

College of Electronic Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract The three-dimensional surface of the reconstructed object is attached with the color texture of the object to make it realistic. In order to obtain texture data, on the basis of the three-dimensional measurement structure of the binocular camera, an additional color camera is added to obtain the texture. In the subsequent mapping process, it is necessary to know the internal and external parameters of the binocular system and the texture camera, that is, to carry out stereo calibration of the system composed of binocular system and texture camera. In order to obtain the texture information of the object at different angles, and change the position of the texture camera, it should be recalibrate. Aiming at this problem, a method of adding marker points is proposed. The texture camera can be used freely after the system is initially calibrated once, so as to complete the texture map after the texture camera shoots at any position. The experiment verifies the feasibility of this method. This method reduces the frequent calibration process of the texture camera and provides a convenient and easy way to implement point cloud data texture mapping.

Key words imaging systems; three-dimensional imaging; texture mapping; binocular vision; stereo calibration

OCIS codes 110.6880; 100.6890; 120.5050; 150.6910

1 引言

三维传感技术已成为目前的研究热点之一,其中光学三维传感的发展势头最猛,因其具有非接触、精度高和测量速度快等优点而获得业界各位学者的青睐。目前,光学三维传感在机器视觉、工业检测、文物保护^[1]、生物医学、影视特技和虚拟现实等领域

已得到广泛的应用^[2]。

双目立体视觉^[3-4]属于光学三维传感中的被动三维传感技术之一,其结构简单,操作便捷,不需要人为提供光照条件,仅需要两个摄像系统所获得的二维图像就可以完成三维面形的重建,然而在弱纹理区域匹配容易产生多义性,从而导致相关操作难以进行。为了解决这个问题,业内的科研学者提出

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-12; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(62075143)

通信作者: *zqc@scu.edu.cn

了主动传感与被动传感相结合的方法,即在双目立体视觉的条件下,使用结构光对被测物体进行照明^[5-7],这样即使在弱纹理区域,也可以通过相位信息来准确实现双目系统的匹配。

纹理贴图^[8]是人们对物体真实感的新需求之一。纹理映射的概念由 Catmull^[9]提出,用来表示以像素坐标 (u, v) 表示的纹理空间和以参数坐标 (x, y, z) 表示的三维空间之间的映射关系,随后 Blinn^[10]对纹理映射的概念进行了改进,使得纹理映射结果更加自然。随后 Bier 等^[11]提出了两步映射法,实验过程中引入中介曲面并将其作为中间映射媒介,从而构建从三维模型到纹理图像的映射关系。传统的纹理贴图大多是通过计算机来渲染添加到三维模型中,并不是物体在真实世界中所呈现的样子。随后所研究的纹理贴图主要是使用拍摄得到的彩色照片作为纹理图像,并通过重建点云与纹理图像的映射关系将纹理信息赋予给三维点云,从而构建出具有真实纹理的三维数据。张宗华等^[12]使用了白光数字莫尔三维成像系统并采用傅里叶变换方法来重建物体的三维点云,并对重建的三维点云进行纹理映射。孙士杰等^[13]通过彩色编码的正弦相移光栅实现了物体的三维重建并恢复了物体纹理。上述两个工作都是使用彩色相机来同时获取经过物体调制后的变形条纹信息和纹理信息,所以得到的纹理信息与三维点云数据同源,易配准贴图,但纹理图像单一且分辨率受限。为了解决这一问题,刘星明等^[14]在成像系统中额外增加了一个纹理相机并标定其内外参数,使其可以进行纹理映射;杜瑞建等^[15]通过增加一个长焦相机来获取高分辨率图像,并通过高分辨率图像与双目图像的特征匹配来建立映射关系。这一类额外增加纹理相机来拍摄场景图像并作为纹理图像的做法,科研人员需要知晓纹理相机与重建系统的相对位置关系,但特征匹配的方法对于弱纹理区域往往难以使用,这会造成映射关系的不准确。对于为了获取多视角纹理信息而移动的纹理相机而言,通过标定来确定其映射关系又显得十分繁琐耗时。胡戩^[16]在数据获取的过程中引入了反射片并作为标记物,采用图像处理的方法在纹理图像上来计算反射片的形心,设置阈值并采用算法来计算点云上反射片的形心,以此对所获得的三维点云与二维图像进行配准,该过程引入了大量的图像处理及算法,使得问题解决的成本过高。

本文在使用双目结构光技术重建物体的三维面形,以及事先通过标定得到纹理相机内参的前提条

件下,通过增设标记点的方法并利用标记点在世界坐标系、纹理相机图像像素坐标系和左相机图像像素坐标系上的坐标位置,得到了可自由移动的纹理相机和双目系统的相对位置关系,再根据成像模型得到三维点云与纹理像素的一一对应关系,将纹理图像中各像素的 RGB(Red, Green, Blue)值赋给所对应的点,即可完成自由纹理贴图,而且不存在移动纹理相机后的重新标定过程。

2 原 理

2.1 双目立体视觉的测量原理

双目立体视觉是基于视差原理并根据物体上的一点在双目图像上两个对应像点的匹配关系来获取物体的三维几何信息。图 1 为平视双目立体视觉成像原理的模型,其中 C_l 和 C_r 分别为左右相机的光心, O_l 和 O_r 分别为左右相机的光轴与各自像平面的交点。点 P 为物体上的一点,点 P 与光心 C_l 和 C_r 的连线在左右像平面上的交点 P_l 和 P_r 分别为点 P 在左右像平面上像点的位置。 $C_l C_r$ 连线的距离 B 称为基线距。在平视双目立体视觉的情况下,左右像点 P_l 和 P_r 具有同样的图像 y 坐标,而图像 x 坐标分别为 x_l 和 x_r ,此时视差 $d = x_l - x_r$ 。随后,根据三角形相似原理即可计算得到点 $P(x_c, y_c, z_c)$ 在摄像机坐标系下的三维坐标,表达式为

$$\begin{cases} x_c = \frac{B \cdot x_l}{d} \\ y_c = \frac{B \cdot y}{d} \\ z_c = \frac{B \cdot f}{d} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: f 为校正后的焦距。由于在实际情况中很难将两个摄像机摆到理想的平视双目位置,因此需要对所得的待匹配左右图像进行极线校正^[17]。在摄

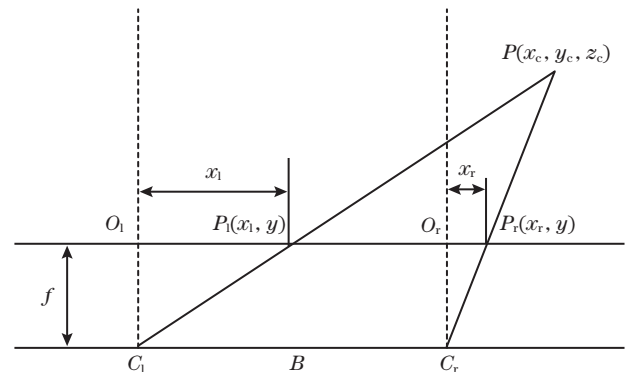


图 1 双目立体视觉成像模型

Fig. 1 Binocular stereovision imaging model

像机立体标定和图像校正以后,只要能够找到物体上所有点在左右像面上的对应匹配点,即可重建物体的三维点云,此时点云坐标在极线校正后的左相机坐标系中。

2.2 双目结构光方法

为了使左右像点的匹配更加高效精确,学者们采用了结构光投影与双目相结合的方法来完成三维测量,常用方法有相移法^[18-20]和傅里叶变换法^[21]等。其中相移法比傅里叶变换法有更高的测量精度,因此本文选用四步相移法作为获取相位的方法。四步相移法的基本思想:投影 4 幅等相位移动量的正弦光栅条纹图来计算相位,四步相移法的公式描述为

$$\begin{cases} I_1 = A(x, y) + B'(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I_2 = A(x, y) + B'(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi/2] \\ I_3 = A(x, y) + B'(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] \\ I_4 = A(x, y) + B'(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2] \end{cases}, \quad (2)$$

式中: (x, y) 为点的坐标; A 为背景光强; B' 为条纹的调制度; ϕ 为物体三维面形所决定的相位信息,通过(2)式可以解得截断相位,表达式为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right]. \quad (3)$$

由于 $\varphi(x, y)$ 是通过反正切函数来求解得到的,所以其值被截断在 $(-\pi, \pi]$ 之间且是不连续的,因此为了得到连续的相位,需要采用相位展开算法。相位展开算法主要分为两大类,第一类是空间相位展开算法^[22],该算法需要根据空间中的相邻点来指导待展开点进行相位展开,一旦空间中存在孤立的物体或是相位有局部展开错误,都会造成整个相位展开过程的错误,因此本文选择第二类展开算法,即时间相位展开算法^[23-24]。所谓时间相位展开算法,即是在投影不同周期数条纹的条件下,以低频条纹的相位来指导高频条纹对应点的相位展开,因此任意点的展开相位值均不会受到空间中其他点的影响。本文采用三频法的时间相位展开算法^[25],选择条纹频率分别为 1、1/10 和 1/100 的三组四步相移条纹,获得了条纹频率为 1/100 的展开相位并将其作为匹配基元。

2.3 摄像机的成像模型

为了完成三维重建,摄像机标定是其中必不可少的一步。根据空间中的某点及其在摄像机图像上对应点之间的关系,使用摄像机成像模型可以求解出摄像机的模型参数。理想的摄像机成像模型可以

看作线性针孔成像模型,即空间中的一点在图像中位于该空间点与光心连线在图像平面上的交点。整个成像模型包括 4 个坐标系的变换,分别为世界坐标系、摄像机坐标系、图像物理坐标系和图像像素坐标系,整体的变换关系为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{X}_w, \quad (4)$$

式中: (X_w, Y_w, Z_w) 为空间点的世界坐标; s 为一比例因子; (u, v) 为点在图像上的像素坐标; \mathbf{R} 为旋转矩阵; \mathbf{t} 为平移矩阵; (u_0, v_0) 为图像像素坐标系下的主点坐标; $\alpha_x = f/dx$ 和 $\alpha_y = f/dy$ 分别为 u 轴和 v 轴上的归一化焦距; $\mathbf{X}_w = [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T$; \mathbf{M}_1 为内参矩阵; \mathbf{M}_2 为外参矩阵。 \mathbf{M}_2 由 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 组成, \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 均为摄像机的外部参数。 \mathbf{M}_1 由 α_x 、 α_y 、 u_0 和 v_0 组成, α_x 、 α_y 、 u_0 和 v_0 均为摄像机的内部参数。确定某个摄像机内外参数的过程,即为摄像机标定过程。

实际的相机模型往往不是理想的针孔模型,由于相机镜头存在畸变,若想得到正确的三维空间点与二维像素点的一一对应关系,则必须对畸变系数进行求解。目前常用的畸变模型是 Brown 模型,其主要包含两种畸变模型,分别为径向畸变模型和切向畸变模型。记无畸变的理想图像坐标为 $[x \ y]^T$,实际图像坐标为 $[x_d \ y_d]^T$,坐标之间的关系可表示为

$$\begin{cases} x_d = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_d = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy] \end{cases}, \quad (5)$$

式中: k_1 、 k_2 和 k_3 为径向畸变系数; p_1 和 p_2 为切向畸变系数; $r^2 = x^2 + y^2$ 。相机的畸变系数同样属于相机内参数。空间点在世界坐标系中经过刚体变换和透视投影变换得到该点在图像上的物理坐标后,需要将其先代入(5)式中得到实际坐标,才能得到真实的像素坐标位置。

2.4 自由纹理映射

所谓自由纹理映射,就是在保持焦距不变条件下,纹理相机可以自由移动和摆放,通过拍摄得到的纹理图片即可完成纹理贴图过程。若要完成自由纹理映射,就是要在纹理相机位置发生改变时,也能找到其与双目系统的外方位参数。对于所提方法,需要事先标定得到纹理相机的内部参数,当纹理相机任意移动进行拍图时,可以同时获得被测物体纹理和标记点信息,通过标记点可以及时反映纹理相机的当前位置姿态。利用标记点在世界坐标系、纹理相机图像像素坐标系和双目左相机图像像素坐标系中的坐标位置变换关系,可以完成自由移动的纹理相机和双目系统的坐标位置转换,再根据成像模型可以得到三维点云与纹理像素的对应关系,最终完成自由纹理的贴图。

为了阐述所提方法,当空间点位于世界坐标系的 x - y 平面上时,可将(4)式^[26-27]改写为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{H} = \lambda \mathbf{A} [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{t}]$ 为单应性矩阵,其中 λ 为一常数因子, \mathbf{A} 为相机的内参数, \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 分别为旋转矩阵 \mathbf{R} 的前两个列向量。记 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3]$,其是一个 3×3 的矩阵,但表述的是二维图像点之间的关系,二维图像点在此都是使用齐次坐标来表示。单应性矩阵的9个变量中存在一个尺度问题,所以其实则是一个自由度为8的矩阵。每给出一组对应的二维图像点,即可获得关于二维坐标的两个方程,因此至少需要4组二维图像对应点才能求出单应性矩阵。在已知摄像机内参的条件下,通过

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{t} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3 \end{cases} \quad (7)$$

即可求出外参。式中: $\lambda = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1\|_2 = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2\|_2$ 。本文正是通过这种思路,采用4个已知空间位置的标记点,并通过提取角点的方法来得到其在纹理图像及左相机图像上的像素坐标,以此指导完成自由纹理在双目结构光测量结果上(三维点云数据)的贴图过程。

所提方法的贴图过程如图2所示。将左上角的标记点作为世界坐标系的原点, j 为每个方格的长度。求出附着标记点的世界坐标系 $X_w Y_w$ 平面

与纹理图像的单应性矩阵 \mathbf{H}_2 ,以及该平面与双目左相机图像的单应性矩阵 \mathbf{H}_1 后,根据已知的左相机内参 \mathbf{A}_{lc} 和纹理相机内参 \mathbf{A}_{tc} 可以分别求出世界坐标系相对于双目左相机和纹理相机的外参 $(\mathbf{R}_1, \mathbf{t}_1)$ 和 $(\mathbf{R}_2, \mathbf{t}_2)$,从而可以得到左相机与纹理相机间的外参数 (\mathbf{R}, \mathbf{t}) 。双目结构光三维测量系统所获得的三维点云实际上是在校正后的左相机坐标系中,因此需要将点云转换到校正前的左相机坐标系中,而极线校正的过程,实则是对左相机进行了两次旋转。通过点云乘上旋转矩阵的逆即可将点云转换到校正前的左相机坐标系中,再利用校正前左相机与纹理相机的外参,即可得到点云与纹理图像像素的一一对应关系,再通过双线性插值可以得到纹理图像像素的 RGB 值,从而完成纹理贴图。

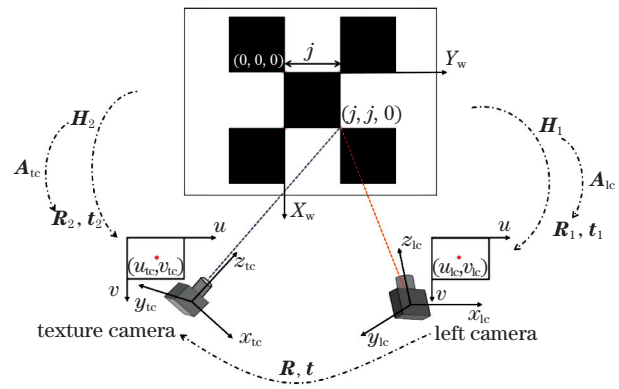


图2 所提方法的贴图过程

Fig. 2 Mapping process of proposed method

3 实验

为了验证所提方法的可行性,搭建的系统如图3所示。由两台 Imageware 公司生产的 IDS UI-2250SE 型相机和一台福州巨维达生产的 PDC03 型投影仪构成双目结构光三维测量系统,使用手持可

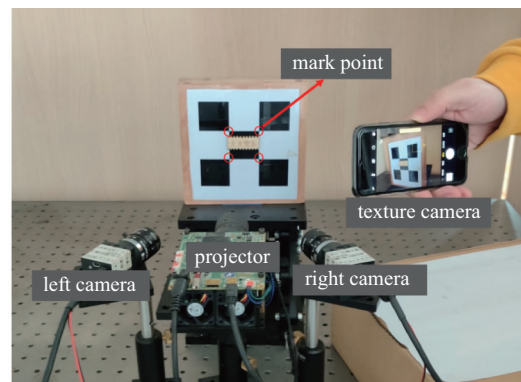


图3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

自由移动的苹果 iPhone 7 手机作为纹理相机。IDS 相机的分辨率为 1600 pixel×1200 pixel, 投影仪的分辨率为 1280 pixel×800 pixel, 手机(纹理相机)的分辨率为 4032 pixel×3024 pixel。双目的公共视场为 50 mm×50 mm。所用标记点为一个 3×3 棋盘格的 4 个角点, 棋盘格每格的边长已知。

首先对系统进行立体标定, 可以得到双目系统的内外参数; 然后使用投影仪来投影三组条纹频率分别为 1、1/10、1/100 的四步相移条纹图(共 12 张)于视场中, 并使用双目系统来捕获受到物体调制的变形条纹图。根据四步相移所得到的截断相位, 采用三频法来获得展开相位并将其作为匹配基元, 对展开相位图进行极线校正, 可以使匹配点在图像的同一行上。根据相位值来完成匹配, 获得视差图后再通过(1)式可以得到三维点云数据。

对纹理相机进行标定, 可以得到其内参。首先在保持手机焦距不变的情况下自由移动手机,

可以获得期望的且不同角度的纹理图像; 然后提取纹理图像中的角点, 可以得到 4 个标记格子角点在左相机图像平面和手机图像平面上的坐标, 从而计算世界坐标系分别与左相机坐标系和纹理相机坐标系之间的外方位参数, 进而可推出左相机与手机之间的外方位参数。将三维点云数据转换到校正前左相机坐标系中并进行反投影, 可以找到每一个空间点在纹理图像上的对应点并进行双线性插值, 将该点的 RGB 数据赋予给空间点, 即可完成纹理贴图, 获得带有真实彩色纹理的三维数据结果。

3.1 双目系统的精度评价

通过对陶瓷材料的标准球进行测量, 可以评价双目系统的精度, 结果如图 4 所示。标准球的直径为 25.3988 mm, 实验重建其三维点云并对其进行球面拟合, 得到的拟合直径为 25.4189 mm, 其标准偏差(Standard Deviation, STD)为 0.011486 mm, 与实际直径的偏差为 0.0201 mm。

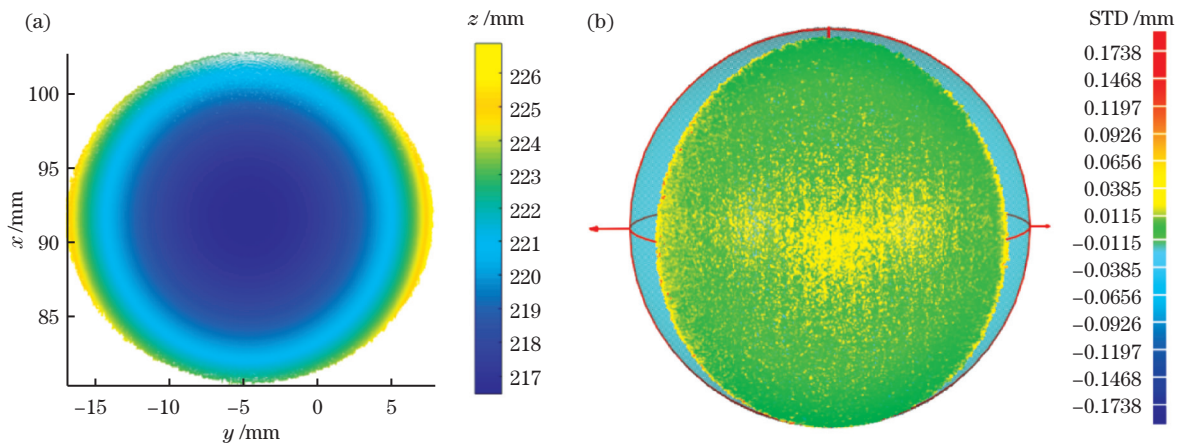


图 4 标准小球的精度评价结果。(a) 标准球重建后的三维点云; (b) 球面拟合的偏差分布

Fig. 4 Accuracy evaluation results of standard ball. (a) 3D point clouds reconstructed from standard sphere; (b) deviation distribution of spherical fitting

3.2 贴图精度的实验分析

为了对所提方法的精度进行定量分析, 选择一个每格边长为 3.2868 mm 的 10×10 棋盘格标靶作为待测物体, 使用已知内参的双目系统和纹理相机对该棋盘格标靶拍摄一幅图片, 根据已知的角点信息与左相机内参来计算出该标靶与左相机的外参数, 并将角点的世界坐标转换到左相机坐标系中。通过所提方法可以将棋盘格标靶的 4 个角点作为标记点, 用来计算左相机与纹理相机的外参矩阵, 再将左相机坐标系中的角点重投影到纹理图像上, 结果如图 5 所示。

采用所提方法计算得到纹理图像上所有的角点

坐标与真实坐标之间的差异, 结果如图 6 所示。将

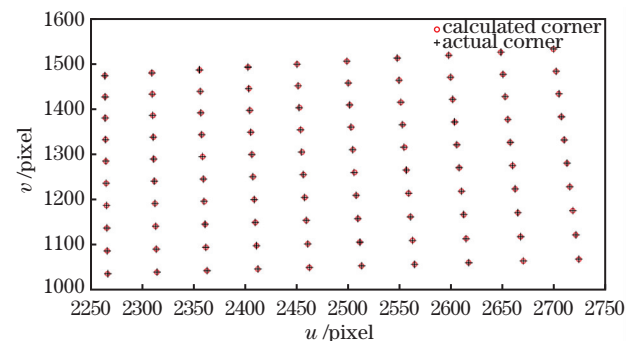


图 5 纹理图像上的角点坐标与计算得到的角点坐标

Fig. 5 Corner coordinates on texture image and calculated corner coordinates

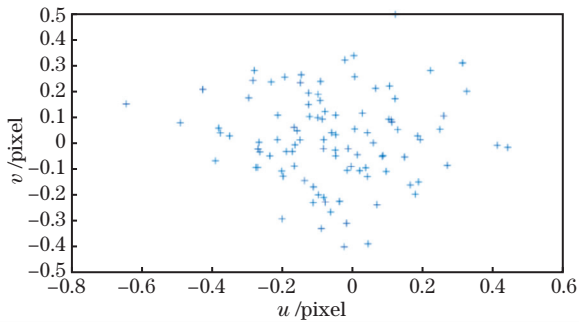


图 6 棋盘格角点与贴图计算点的坐标误差分布

Fig. 6 Coordinate error distribution between checkerboard corners and map calculated points

结果取平均,可以得到所提方法的平均误差为 0.24 pixel.

3.3 刻字木块的三维重建和纹理贴图实验

被测物体是一个带有文字刻痕的木块,通过双目立体视觉来重建其三维点云,并使用纹理相机在 4 个不同位置处进行拍摄,可以获得 4 幅纹理图像,分别对每幅纹理图像进行纹理映射。不同视角下木板的重建三维点云如图 7 所示。纹理相机在不同位置处获得刻字木块的 2D 纹理及其映射结果如图 8 所示。

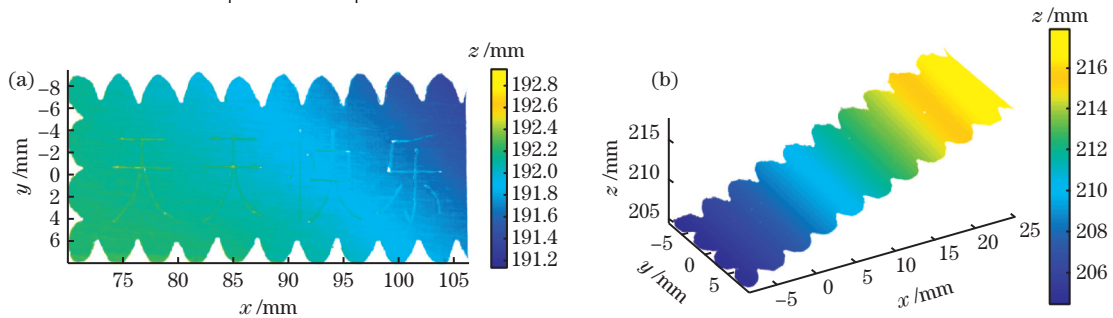


图 7 不同视角下木板的重建三维点云。(a)平视视角下的点云;(b)倾斜状态下的点云

Fig. 7 Reconstructed 3D point clouds of board from different perspectives.

(a) Point cloud in head-up perspective; (b) point cloud in tilt state

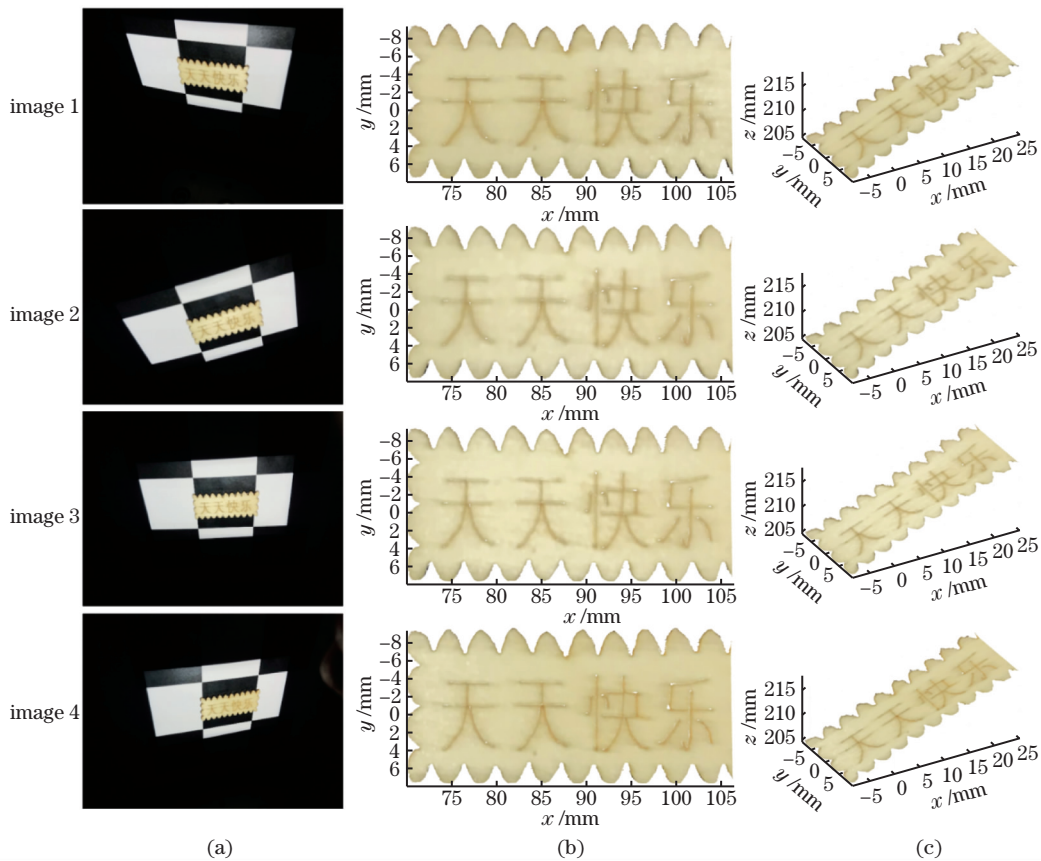


图 8 纹理相机在不同位置处获得的刻字木块 2D 纹理及其映射结果。(a)纹理图像;(b)纹理映射结果;(c)图(b)的其他视角

(a) Texture images; (b) texture mapping results; (c) other perspectives of Fig. (b)

3.4 唐老鸭模型

被测物体是一个纹理信息较为丰富的唐老鸭冰箱贴,同样通过双目系统来获得其点云数据,使用纹理相机来拍摄 4 个不同角度下的纹理后分别进行纹

理映射。不同视角下的唐老鸭重建三维点云如图 9 所示。纹理相机在不同位置处获得的唐老鸭 2D 纹理及其映射结果如图 10 所示。

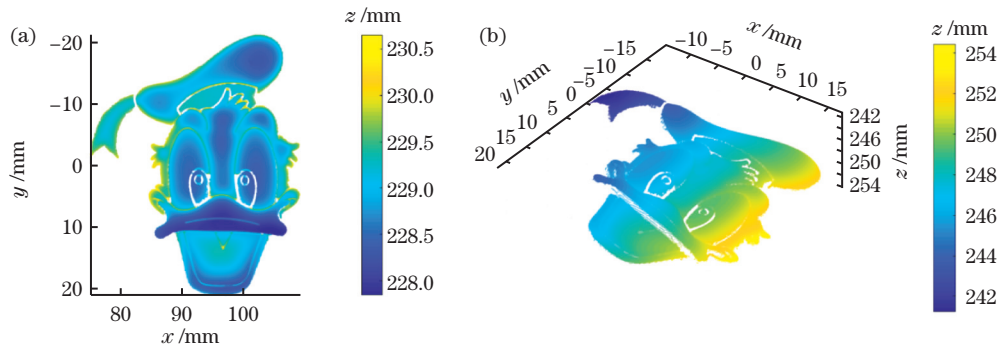


图 9 不同视角下唐老鸭的重建三维点云。(a)平视视角下的点云;(b)倾斜状态下的点云

Fig. 9 Reconstructed 3D point cloud of Donald Duck from different perspectives.

(a) Point cloud in head-up perspective; (b) point cloud in tilt state

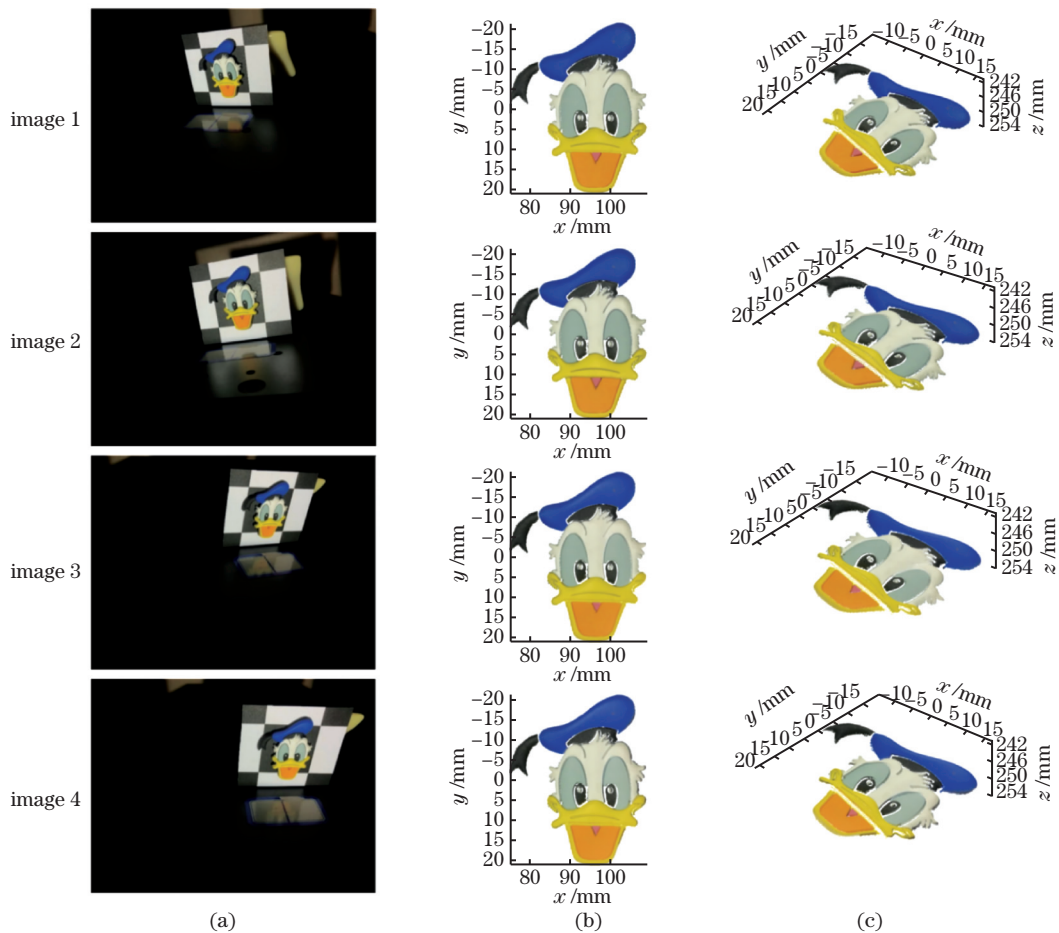


图 10 纹理相机在不同位置处获得的唐老鸭 2D 纹理及其映射结果。(a)纹理图像;(b)纹理映射结果;(c)图(b)的其他视角

Fig. 10 2D textures of Donald Duck obtained from different positions by texture camera and their mapping results.

(a) Texture images; (b) texture mapping results; (c) other perspectives of Fig. (b)

3.5 陶瓷猫脸模型

第三个被测物体是一个表面高度起伏较大的陶瓷猫脸,同样通过双目系统来获得其点云数据,使用纹理

相机进行自由纹理映射。不同视角下的陶瓷猫脸重建三维点云如图 11 所示。纹理相机在不同位置处获得的陶瓷猫脸 2D 纹理及其映射结果如图 12 所示。

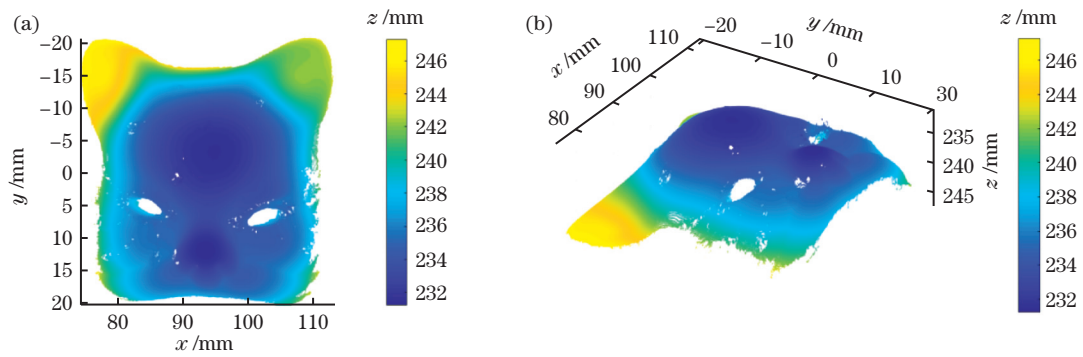


图 11 不同视角下陶瓷猫的脸重建三维点云。(a)平视视角下的点云;(b)倾斜状态下的点云

Fig. 11 Reconstructed 3D point cloud of ceramic cat face from different perspectives.

(a) Point cloud in head-up perspective; (b) point cloud in tilt state

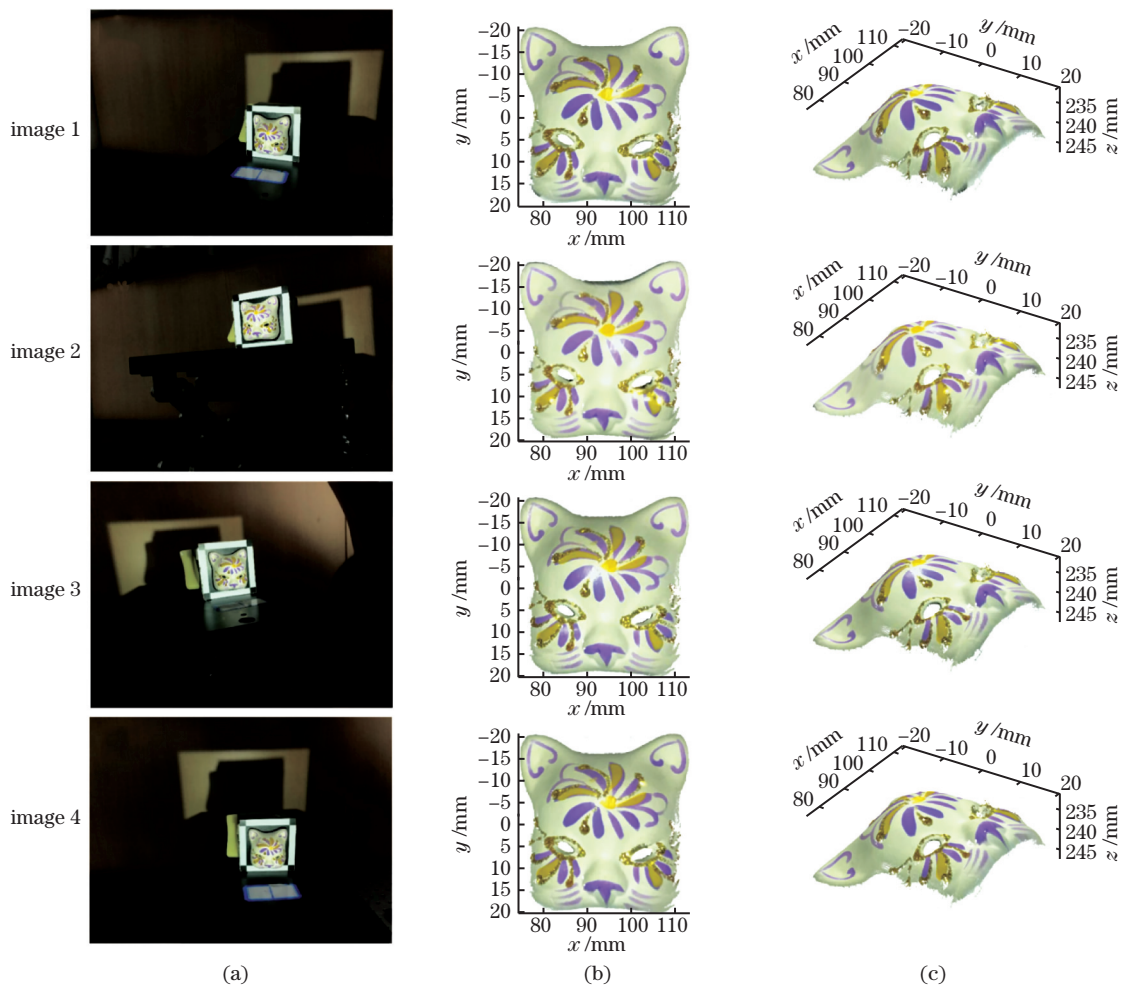


图 12 纹理相机在不同位置处获得的陶瓷猫脸 2D 纹理及其映射结果。(a)纹理图像;(b)纹理映射结果;
(c)图(b)的其他视角

Fig. 12 2D textures of ceramic cat face obtained from different positions by texture camera and their mapping results.

(a) Texture images; (b) texture mapping results; (c) other perspectives of Fig. (b)

由上述三组实验可知,从 4 个不同角度拍摄的纹理都与三维点云进行了较好的映射,未出现纹理走样和伪像等情况,而且能够有效表达由不同角度带来的纹理之间差异,如亮度不同及反光点移位等都很好地体现在纹理映射的结果上,实验结果验证

了所提方法的可行性。

4 结 论

在双目结构光测量系统以及纹理相机完成标定且成功重建物体三维点云的条件下,本文提出采用

附加标记点坐标来传递转换完成自由纹理贴图的方法。该方法在测量视场中设置了 4 个共面标记点以构成一个世界坐标系的 XY 平面,通过分析标记点分别在该平面、左相机图像像素坐标系和纹理图像像素坐标系下的坐标位置关系,得到左相机与可自由移动纹理相机的相对位置关系,也得到了三维点云与自由纹理像素的一一对应关系,进而能够完成自由纹理贴图。实验结果表明,在每次任意移动纹理相机而获得不同角度纹理后,都能够较好地完成纹理贴图,获得真实感强烈的三维重建结果。

所提方法只需在双目结构光测量场景中附加少量(4 个或 4 个以上)的参考标记点,便可使用已知内参的其他成像设备来任意拍摄和记录数字化场景中的彩色纹理,准确且迅速地完成任务贴图,从而获得具有真实感的三维场景数据,该方法为文物数字化和影视娱乐等三维建模应用需求中的纹理贴图提供一个简单易行的实现手段。

当采用所提方法对较大视场中的物体进行测量时,使用的棋盘格尺寸将会变大,后续考虑对标记点的设置方式进行改进,使用空间位置已知的圆点或者圆斑作为标记点,以期更好地投入实际应用中。

参 考 文 献

- [1] Qiu Z W, Zhang T W. Key techniques on cultural relic 3D reconstruction[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2423-2427.
邱兆文, 张田文. 文物三维重建关键技术[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2423-2427.
- [2] Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age?: an introduction to 3D structured-light sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303001.
左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D 真的来了吗?: 三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303001.
- [3] Zhang G J. Visual measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008.
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] He J Y, Liu X L, Peng X, et al. Integer pixel correlation searching for three-dimensional digital speckle based on gray constraint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0404003.
何进英, 刘晓利, 彭翔, 等. 基于灰度约束的三维数字散斑整像素相关搜索[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0404003.
- [5] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- [6] Zhang J L, Guo W B, Wu Z J, et al. 3D shape measurement using speckle-embedded fringes and lookup table[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0512003.
张嘉玲, 郭文博, 吴周杰, 等. 利用散斑嵌入条纹和查找表进行三维面形测量[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0512003.
- [7] Guo Z N, Liu X H, Zhang Z H. Simulation and verification of three-dimensional shape measurement method for composite surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 191202.
郭志南, 刘小红, 张宗华. 复合表面三维形貌测量方法的仿真与验证[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 191202.
- [8] Wu J C, Cao L C, Chen H L, et al. Research progress of texture reconstruction in color three-dimensional scanning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110004.
吴佳琛, 曹良才, 陈海龙, 等. 彩色三维扫描中纹理重建技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110004.
- [9] Catmull E. A subdivision for computer display of curved surfaces[D]. Salt Lake City: The University of Utah, 1974.
- [10] Blinn J F. A scan line algorithm for displaying parametrically defined surfaces[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1978, 12(3): 27.
- [11] Bier E A, Sloan K R. Two-part texture mappings [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1986, 6(9): 40-53.
- [12] Zhang Z H, Peng X, Hu X T. A new color 3-D optical imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 994-998.
张宗华, 彭翔, 胡小唐. 一种新型彩色三维光学成像系统[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 994-998.
- [13] Sun S J, Zhai A P, Cao Y P. A fast algorithm for obtaining 3D shape and texture information of objects [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0312001.
孙士杰, 翟爱平, 曹益平. 一种快速获取物体三维形貌和纹理信息的算法[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0312001.
- [14] Liu X M, Liu X L, Yin Y K, et al. Texture blending of 3D photo-realistic model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(11): 1440-1446.
刘星明, 刘晓利, 殷永凯, 等. 真实感三维模型的纹理融合[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(11): 1440-1446.

- [15] Du R J, Ge B Z, Chen L. Texture mapping of multi-view high-resolution images and binocular 3D point clouds[J]. Chinese Optics, 2020, 13(5): 1055-1064. 杜瑞建, 葛宝臻, 陈雷. 多视高分辨率纹理图像与双目三维点云的映射方法[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1055-1064.
- [16] Hu J. The registration of texture image and point cloud in 3D laser scanning technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. 胡戡. 三维激光扫描技术中纹理图像与点云的配准[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [17] Zhou J L. Research on binocular stereo vision and reverse engineering [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 周佳立. 双目立体视觉及三维反求研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [18] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105.
- [19] 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.
- [20] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001. 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
- [21] Zhang Q C, Su X Y. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010001. 张启灿, 苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010001.
- [22] Su X Y, Chen W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 42(3): 245-261.
- [23] Huntley J M, Saldner H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. Applied Optics, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [24] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 84-103.
- [25] Xu Z H, Su X Y. An algorithm of temporal phase unwrapping [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008, 45(3): 537-540. 徐珍华, 苏显渝. 一种时间相位展开算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008, 45(3): 537-540.
- [26] Lu X D, Xue J P, Zhang Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304008. 卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304008.
- [27] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.