

基于二值几何编码图案的高精度结构光系统 参数标定方法研究

曾 海^{1,2} 唐苏明² 田 野³ 刘映江¹ 宋 展²

¹(西南石油大学 成都 610500)

²(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

³(广东光阵光电科技有限公司 东莞 523660)

摘 要 该文提出了一种基于空间编码图案的结构光系统参数标定方法。与传统的基于棋盘格图案标定策略不同的是,该文采用结构光编码图案实现了系统的高精度标定,具体实施步骤包括:(1)根据编码图案的几何分布特性提出了一种编码特征点检测算子,基于检测出的编码特征点构建拓扑结构,利用仿射变换原理及双线性插值算法提取出编码几何元素图像;(2)将几何元素识别转化为监督分类问题,通过采集大量训练样本训练卷积神经网络,实现编码元素的准确识别和解码过程;(3)利用射影变换原理建立相机像平面与投影机像平面之间的对应关系,利用此对应关系将标定板上棋盘格角点在相机像平面上的坐标转换至投影机像平面,最终实现了对相机和投影仪内外部参数的同时标定。标定结果显示,该方法对投影仪的标定重投影误差不超过 0.3 像素;三维重建实验结果显示,与传统标定方法相比,该文方法能够显著提升系统的标定和三维重建精度。

关键词 二值几何编码; 结构光系统; 标定; 射影变换

中图分类号 TP 391 文献标志码 A

An Accurate Calibration Method for Structured Light System Using Binary Geometrical Pattern

ZENG Hai^{1,2} TANG Suming² TIAN Ye³ LIU Yingjiang¹ SONG Zhan²

¹(Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

²(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

³(Guangdong Lite Array Co., Ltd, Dongguan 523660, China)

Abstract In this paper, a binary geometrical pattern is used for the calibration of structured light system instead of conventional checkboard pattern. The pattern is designed based on pseudo-random coding theory, and the calibration procedure contains following steps. First, an accurate feature detector is proposed by utilizing the

收稿日期: 2017-09-06 修回日期: 2017-10-31

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103602); 深圳市 3D 内容生成技术工程实验室以及深圳市技术攻关项目(JSGG20141020103440413、JSGG20150925164740726)

作者简介: 曾海, 硕士研究生, 研究方向为计算机视觉三维重建; 唐苏明, 博士, 研究方向为结构光 3D 重建; 田野, 研发总监, 研究方向为光电相关产品研发; 刘映江, 硕士研究生, 研究方向为高性能计算和物联网通信协议; 宋展(通讯作者), 研究员, 博士生导师, 研究方向为计算机 3D 视觉, E-mail: zhan.song@siat.ac.cn。

geometric property of the pattern elements. It is show that, with the proposed feature detector, feature points can be robustly localized with sub-pixel precision. Based on the extracted feature points, a topological structure is constructed to separate all the pattern elements. The pattern elements are extracted with affine transformation theory and bilinear interpolation. Secondly, to identify the pattern elements, the convolutional neural network technique is adopted, which is trained by collecting a large number of pattern element samples. After the decoding stage, code words of the feature points can be computed. According to the projective transformation principle, pattern feature points in the camera image plane can be transformed to the projector image plane with the corresponding code word. Finally, both intrinsic and extrinsic parameters of camera and projector can be calculated. Experimental results show that the re-projector error of projector calibration results can be controlled within 0.3 pixels. In comparison with conventional calibration methods, both calibration and 3D reconstruction precision can be improved by the proposed approach.

Keywords binary shape coding; structured light system; calibration; projective transformation

1 引 言

编码结构光技术具有系统结构简单、三维测量精度高、扫描速度快等优点,已广泛应用于工业自动检测、机器人视觉引导、三维人体扫描、医学整形、虚拟与增强现实等领域^[1-5]。传统的结构光系统由单相机和单投影机构成。其中,从光学模型的角度看,投影机可被视为一个“逆向”相机。结构光系统的工作原理是:首先,利用投影机将编码图像投射至三维场景,采用相机记录被场景调制的光场信息;然后,通过解码获取相机与投影机之间像素点的对应关系,即对应性信息;最后,利用光学三角原理及系统标定参数将对应性信息转化为三维信息,由此实现三维测量。因此,在测量之前,需对系统进行标定,标定精度的高低直接影响系统的测量精度。系统标定旨在获取相机和投影机的内参数及两者之间的相对位置关系。

目前,针对相机的标定技术已相对成熟^[6-9]。由于投影机与相机具有相似的成像模型,因此可利用成熟的相机标定方法对其进行标定。然而,投影机是可编程光源而非成像设备,并不具备拍摄图像的功能,故难以获取三维空间特

征点的图像,进而无法采取相机标定方法直接对其进行标定。目前,常见的标定方法是通过投射特定图案,利用相机捕获图像,进而计算出三维特征点在投影机图像上的坐标,从而实现投影机的标定。因此,获取空间三维特征点在投影机图像坐标系上的坐标是结构光系统标定的关键。现有的方法主要分三类:(1)借助已标定的相机内外参数,利用投射特征点在相机图像坐标系上的坐标,计算其对应的三维空间坐标,进而获得投射特征点与其三维空间坐标的对应关系,最后利用成熟的相机标定方法实现投影机的标定^[10-12];(2)利用相位匹配手段建立投影机像平面和相机像平面之间的对应关系,将三维空间点在相机图像上的坐标转换至投影机图像上,进而实现投影机的标定^[13-15];(3)通过投射特征点,利用射影变换下的交比不变性获取投影机像平面和相机像平面之间的对应关系,利用此对应关系计算三维空间点在投影机图像上的坐标,由此标定投影机^[16]。其中,方法(1)简单便捷,但投影机标定过程中容易引入相机的标定误差,导致整体误差较大;方法(2)比方法(1)具有更高的标定精度,但在获取每个位置的对应关系时需投射多幅图像,

相位匹配过程过于复杂, 且易受环境因素影响; 方法(3)通常通过投射圆点、黑白棋盘格来实现系统标定, 标定精度依赖于特征点的检测精度, 而在计算特征点坐标时, 其精度易受镜头畸变因素影响。此外, 以上 3 种标定方法均只适合对能够编码的投影机进行标定, 而不适用于基于物理光栅的结构光系统。

针对上述问题, 在方法(3)原理基础上, 本文提出一种基于射影变换原理的伪随机编码结构光系统标定方法。该方法的标定原理是: 首先, 利用伪随机编码原理生成一幅鲁棒性强、编码容量高、窗口尺寸小的二值几何空间编码图案; 其次, 利用投影机投射编码图案至棋盘格标定板, 相机分别拍摄编码图案与标定板图案; 再次, 通过提取编码特征点在相机像平面上的坐标, 结合编码特征点在投影机像平面上的坐标, 利用射影变换原理建立相机像平面与投影机像平面之间的对应关系, 利用此对应关系将标定板上特征点在相机像平面上的坐标转换至投影机像平面; 最后, 采用已有的相机标定方法对相机与投影机同时进行标定, 计算系统外参数, 将标定板上的特征点视为数据源对系统标定参数进行整体优化, 从而实现系统标定。该方法所投射的图案既可用于实现结构光系统标定, 也可作为实现三维测量的编码图案, 尤其适用于基于物理投影光栅的结构光系统标定。

2 结构光系统标定模型

从相机工作原理来看, 在不考虑畸变的情况下, 摄像机的模型可视为理想的透视投影模型。由于投影机可被视为一个“逆向”相机, 因此其具有与相机相似的模型, 从而一个基本的结构光系统标定模型如图 1 所示。根据透视投影原理可得到点在三维空间与相机像平面之间的对应关系, 如下式所示:

$$s_c \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x & f_x \tan \alpha & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_c \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c & \mathbf{T}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, (x_w, y_w, z_w) 为三维空间点 T_w 的世界坐标; (u_c, v_c) 为点 T_w 在相机像平面上的坐标; s_c 为尺度因子; \mathbf{K}_c 为相机的内参数矩阵, 包括: 图像的主点坐标 (u_0, v_0) 、图像两坐标轴方向上的尺度因子 $[f_x, f_y]$ 以及图像两坐标轴之间的倾斜因子 $f_x \tan \alpha$; $[\mathbf{R}_c \ \mathbf{T}_c]$ 为相机的外参数矩阵。

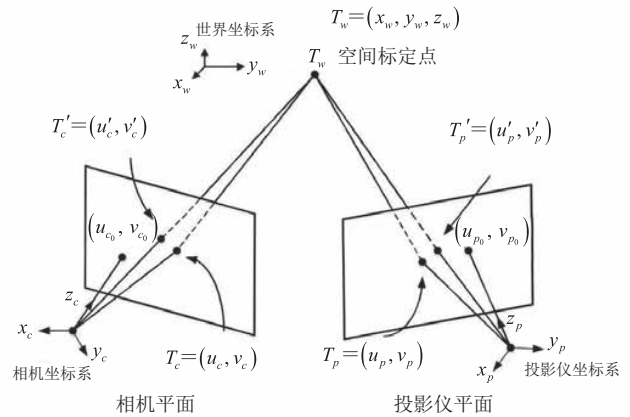


图 1 结构光系统标定模型

Fig. 1 Schematic diagram of the structured light system model

同理, 可得到点在三维空间与投影机图像平面的对应关系, 将其简写成:

$$s_p \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_p \begin{bmatrix} \mathbf{R}_p & \mathbf{T}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, (u_p, v_p) 为空间点 T_w 投影机图像平面上的坐标; s_p 为尺度因子; \mathbf{K}_p 与 $[\mathbf{R}_p \ \mathbf{T}_p]$ 为投影机的内参数矩阵与外参数矩阵。

由于镜头畸变的存在, 若使用相机和投影

机按照理想的透视投影模型成像进行标定, 则会给标定带来较大误差。因此, 在计算相机和投影机像平面上的理想坐标 $[u', v']$ 标定过程中, 需考虑镜头畸变所产生的误差, 其计算过程如公式(3)所示。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_d + \delta_u \\ v_d + \delta_v \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_r r^2 & u_r r^4 \\ v_r r^2 & v_r r^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3u_r^2 + v_r^2 & 2u_r v_r \\ 2u_r v_r & u_r^2 + 3v_r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, (u_d, v_d) 为实际图像坐标; (u_r, v_r) 为相对图像坐标, 且 $u_r = u_d - u_0$, $v_r = v_d - v_0$, $r^2 = u_r^2 + v_r^2$; 设 $\theta = [k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2]$ 表示径向畸变系数和切向畸变系数。

3 结构光系统标定

本文提出的结构光系统标定方法大致分三步: (1) 生成伪随机编码图案; (2) 提取特征点坐标, 利用投影机向标定板投射编码图案, 获取至少多组(至少 3 组)标定图像, 对棋盘格图像及投影编码图像进行角点检测, 提取角点坐标; (3) 标定系统内外参数, 通过解码编码图像, 并利用射影变换原理获取相机像平面与投影机像平面之间的对应关系, 利用此对应关系将标定板上特征点在相机像平面上的坐标转换至投影机像平面上, 从而采用成熟的相机标定方法对相机与投影机同时进行标定, 进而实现系统标定。

3.1 伪随机编码图案的生成

伪随机阵列是一种具有窗口唯一特性矩阵, 可通过本原多项式生成伪随机序列, 再利用折叠原理折叠而获得。本文根据 Lin 等^[17]所生成的伪随机阵列, 设计 8 个结构简单及形态各异的二值几何基元(图 2)代表阵列中的码字, 同时设计由垂直相交直线形成的栅格作为特征图形, 将几何基元嵌入特征图形内, 并选择黑色作为背景色, 由此生成一幅黑白二值几何编码图案(图 3)作为

投影图像。定义两垂直相交直线的交点为编码特征点, 简称为角点。



图 2 8 种码字图形

Fig. 2 Eight kinds of feature pattern elements

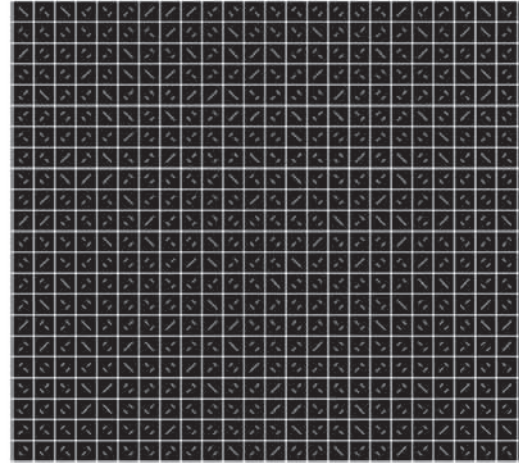


图 3 二值几何编码图案

Fig. 3 Binary shape coding pattern

3.2 编码特征点坐标的提取

首先, 将棋盘格标定板置于相机及投影机视域内, 利用相机捕获标定板上的棋盘格图案; 然后, 固定标定板位置, 利用投影机投射伪随机编码图案至标定板, 再次利用相机捕获投影图案; 最后, 变换标定板位置, 利用相机拍摄至少 3 组的棋盘格图像和投影图像。

由于伪随机编码图案通过投影机投射至带有棋盘格图案的标定板上时, 受棋盘格图案的调制, 相机捕获的伪随机编码图像中的特征图形与棋盘格图案交叠在一起, 导致传统的角点检测方法不适用于对其进行角点提取。为了准确提取编码特征点坐标, 本文提出了一种十字模板角点检测算法, 其基本检测算子可用公式(4)表示。

$$\begin{aligned} H = & \sum_{\alpha=-w}^w \sum_{\beta=-w}^w I(i+\alpha, j+\beta) - \\ & \sum_{\gamma=0}^l \sum_{\eta=0}^l \left[I(i-w+\gamma, j-w+\eta) + I(i-w+\gamma, j+w-\eta) \right. \\ & \left. + I(i+w-\gamma, j-w+\eta) + I(i+w-\gamma, j+w-\eta) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

其中, I 表示图像亮度; w 表示十字检测模板的半径; l 为 $w/3$ 。根据上式, 通过设定合适的阈值 H , 即可检测出候选特征点。由于编码图案中特征点具有旋转 90、180 度对称不变, 因此, 利用此特性剔除候选特征点中的错误特征点, 便可获得正确特征点的坐标。

3.3 基于深度学习框架的几何元素识别

由于每个几何元素具有 4 个角点, 因此根据各几何元素及其角点即可构建拓扑结构, 通过利用仿射变换原理和双线性插值法便可提取到栅格内的几何元素, 将其规范化为 28×28 的图像, 这一过程可用公式(5)表示。

$$\begin{bmatrix} u_{pt} \\ v_{pt} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{im} \\ u_{im} \\ \mu \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, (u_{pt}, v_{pt}) 表示角点坐标; (u_{im}, v_{im}) 表示图像归一化后的 4 个角点 $(0, 0)$ 、 $(a, 0)$ 、 (a, b) 、 $(0, b)$ 。投射的伪随机编码图案由于受到棋盘格图案的调制, 导致拍摄的编码图像中几何元素的亮度发生剧烈变化, 使得难以利用图像分割算法及模板匹配算法对其进行识别。事实上, 几何元素识别本质上是一个分类问题。与非监督分类法相比, 监督分类法通过采集每类样本数据, 再经过学习训练实现分类, 更适合几何元素识别。卷积神经网络 (Convolutional Neural Network) 是一种前馈神经网络, 其人工神经元可以响应一部分覆盖范围内的周围单元, 对大型图像处理具有出色的效果。另外, 由于本文中的几何元素识别问题与著名手写体识别问题极为相似。因此, 本文采用卷积神经网络 Lenet-5^[18] 实现几何元素的识别。

在几何元素识别前, 通过投射由单个几何单元及特征图形构成的图案, 之后变换标定板位置, 并根据前述的几何元素提取方法采集深度学习的训练样本。然而, 单次投影编码图像所采集的样本数量有限。为此, 本文采用以下 4 个

操作来扩大样本数量:

- (1) 添加高斯噪声;
- (2) 添加随机黑白线;
- (3) 执行仿射变换;
- (4) 执行高斯滤波。

选取多种具有不同表面特性的物体作为样本采集的目标物体, 包括彩色玩具、皮球、衣服、纸张、塑料模型、木板、石膏像、脸和人手等。首先, 将每一幅仅含单一几何图形的投影图案分别投射至目标物体上, 以此建立数量为 80 000 的样本库; 然后, 根据上述 4 个操作将样本数量扩大至 300 000, 由此训练出高鲁棒性的卷积神经网络 Lenet-5。利用已训练的网络对几何元素进行识别, 从而确定编码特征点的码字。由于伪随机阵列具有窗口唯一特性, 因此, 根据局部一致性假设将投射图像与拍摄图像中编码特征点的码字信息进行匹配, 由此获得相机像平面和投影机像平面之间特征点的码字对应关系。

3.4 基于射影变换原理的结构光系统标定

根据计算机视觉中的多视角几何原理可知, 从投影机的投射图像 \rightarrow 标定板 \rightarrow 相机的拍摄图像的过程可视为 2 个图像平面的射影变换^[19]。因此, 通过射影变换原理可求得三维空间中标定板上的棋盘格角点在投影机图像上的坐标, 其计算过程如公式(6)所示。

$$m_p = \sigma H m_c \quad (6)$$

其中, m_p 为投影机图像上编码特征点的齐次坐标; m_c 为相机图像上编码特征点的齐次坐标; σ 是非零比例因子; H 是单应性矩阵, 可采用相机像平面和投影机像平面之间 $l(l \geq 4)$ 对码字关系对应且非共线的编码特征点坐标结合最小二乘法求得。

采用张正友平面标定法, 使用已获得的棋盘格角点分别在相机像平面和投影机像平面上的坐标即可实现对相机和投影机的同时标定, 从而获得相机与投影机的内参数和外参数。利用相机与

投影机的外参数计算系统的外参数, 包括平移矩阵 T_s 和旋转矩阵 R_s , 其计算如公式(7)所示。

$$\begin{cases} R_s = R_c R_p^{-1} \\ T_s = T_c - R_s T_p \end{cases} \quad (7)$$

其中, $[R_c \ T_c]$ 与 $[R_p \ T_p]$ 分别表示相机和投影机的外参数。上述步骤并没有考虑到误差的影响, 直接使用公式(7)计算出的系统外参数具有较大误差, 可根据相机标定的反向投射误差原理对标定参数进一步进行优化^[19]。

4 实验与结果

为了验证所提出的标定方法的正确性, 搭建了一套结构光系统, 实验装置主要由高清投影机(分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 080$ 像素)和单反相机(分辨率为 $5\ 184 \times 3\ 456$ 像素)组成, 如图 4 所示。在实验中, 采用一个 13×7 的棋盘格标定板用于相机参数标定, 其中每个棋盘格大小为 $15\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ 。此外, 为了验证本文提出方法的有效性, 采用两种标定方法。第一种方法是本文所提出的方法(简称“本文方法”), 将棋盘格标定板置于相机及投影机视域内, 利用相机捕获标定板上的棋盘

格图案; 固定标定板位置, 利用投影机投射伪随机编码图案至标定板, 再次利用相机捕获投影图案, 并变换标定板位置; 如此利用相机反复分别在 15 个不同位置获取 15 组棋盘格 & 投影编码图像进行标定实验。第二种方法是传统标定方法(简称“传统方法”), 将投射的图案由伪随机编码图案换为传统的棋盘格图案, 采用同样的方法获取 15 组棋盘格 & 投影棋盘格图像进行标定实验。



图 4 本文的实验设备

Fig. 4 The experimental setup

分别采用本文方法、传统方法对该结构光系统进行标定, 表 1 与表 2 分别列出了结构光系统的标定结果, 即: 内参数和外参数。为了分析标

表 1 结构光系统内参数

Table 1 Calibration results of intrinsic parameters of the structured light system

| 设备 | 内参数 | | | | | | | |
|-----------|------------|------------|------------|------------|----------|---------|-----------|-----------|
| | f_u (像素) | f_v (像素) | u_0 (像素) | v_0 (像素) | k_1 | k_2 | p_1 | p_2 |
| 相机 | 11 997.68 | 12 043.56 | 2 551.71 | 1 534.49 | 0.789 20 | -25.100 | -0.015 70 | -0.002 73 |
| 投影机(本文方法) | 4 386.26 | 4 387.67 | 914.91 | 893.91 | 0.015 89 | 11.702 | -0.005 26 | -0.023 08 |
| 投影机(传统方法) | 4 402.35 | 4 398.47 | 925.84 | 904.21 | 0.021 56 | 12.307 | -0.008 56 | -0.079 46 |

表 2 结构光系统外参数

Table 2 Calibration results of extrinsic parameters of the structured light system

| 标定方法 | 外参数 | | | | | |
|------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|
| | r_1 | r_2 | r_3 | t_1 | t_2 | t_3 |
| 本文方法 | -0.026 65 | -0.305 83 | 0.024 61 | 299.859 5 | -74.413 5 | 65.790 7 |
| 传统方法 | -0.025 56 | -0.304 23 | 0.023 52 | 302.458 9 | -72.435 4 | 64.894 4 |

定参数的准确性, 分别计算相机与投影机的反向投射误差, 如图 5 所示。从图 5(a) 可看出, 摄像机反向投射误差在 0.2 像素之内; 从图 5(b)、5(c) 可以看出, 使用本文方法标定的投影仪反向误差在 0.3 像素以内, 而使用传统方法的投影仪反向误差在 0.4 像素以内。为了进一步分析误差, 分别计算摄像机与投影机的反向投射误差的平均误差和标准差。结果显示, 摄像机平均误差为 0.25 像素, 标准差为 0.16 像素; 两种方法求得的投影仪反向投影误差的平均误差分别为 0.28 像素与 0.35 像素, 标准差的结果分别为 0.19 像素与 0.25 像素。从实验结果可以看出, 由于投影编码图案特征点数量大于投影棋盘格特征点数量, 以此求取的单应性矩阵更加准确, 所以采用

传统的投影棋盘格法求得的摄像机反向投影误差较本文方法偏大, 本文所提出的标定方法能将相机与投影机的反向投射误差控制在 0.3 像素以内, 较传统方法有显著提升。

为了进一步验证标定结果的准确性, 选择 3 个物体作为实验对象, 分别是具有良好平整度的标准平板、球体及满足漫反射条件的石膏模型, 具体如图 6(a)、7(a)、8(a) 所示。由于本文所设计的编码图案既可用于系统标定, 也可作为空间编码结构光的投影图案, 因此利用所设计的编码图案作为空间编码结构光的投影图案, 分别采集 3 个物体的重建图像, 并对其进行角点检测, 检测结果分别如图 6(b)、7(b)、8(b) 所示。利用已训练的深度学习对 3 个物体的几何元素进行

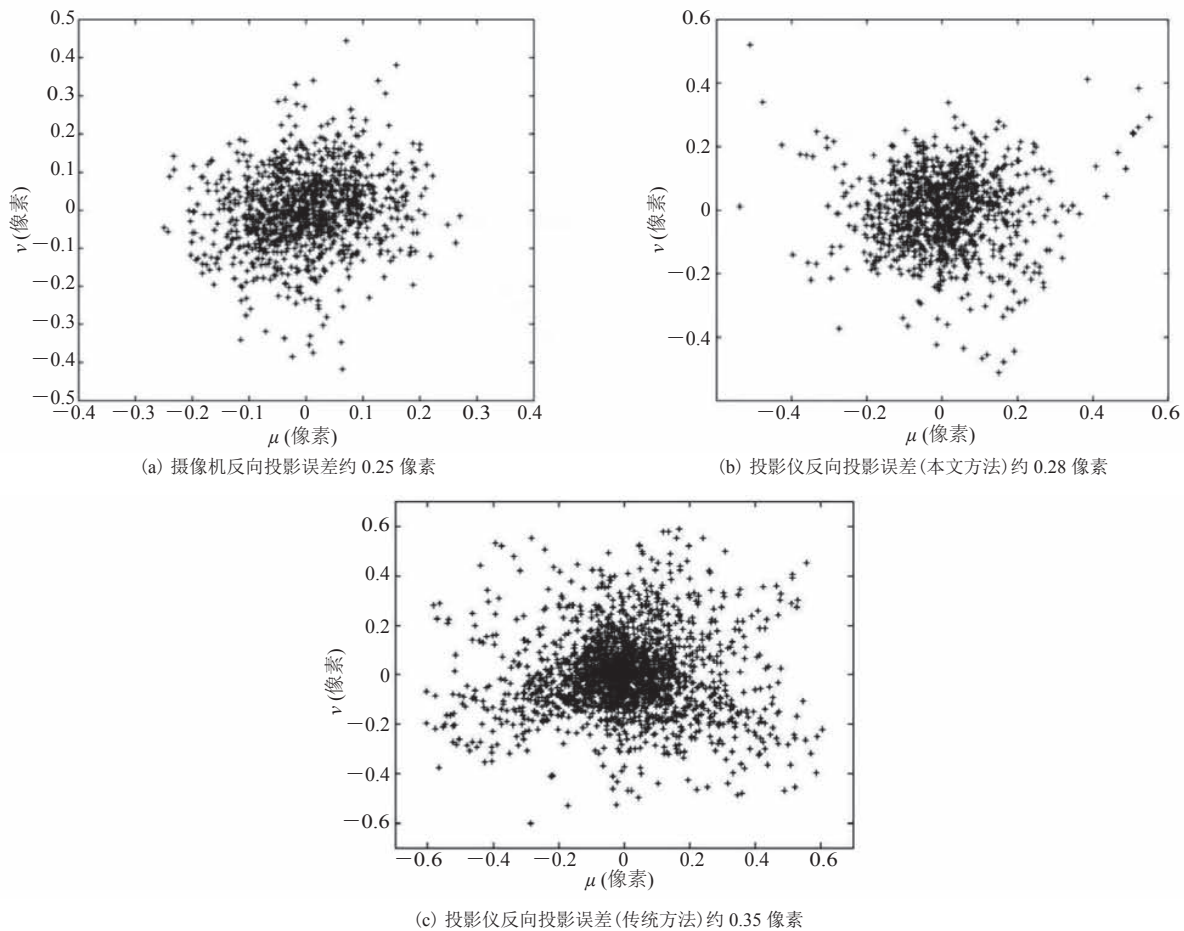


图 5 结构光系统反向投射误差

Fig. 5 The reverse projection error of system calibration

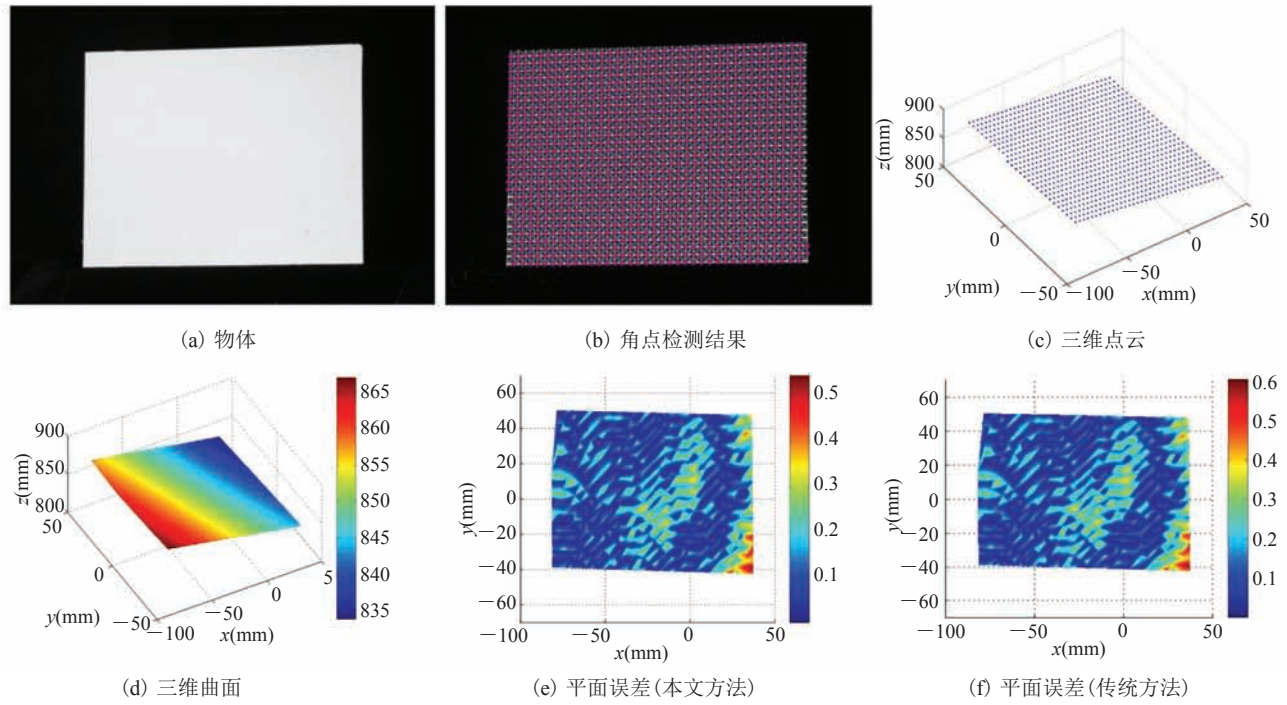


图6 标准平板的三维重建

Fig. 6 3D reconstruction of a standard plane

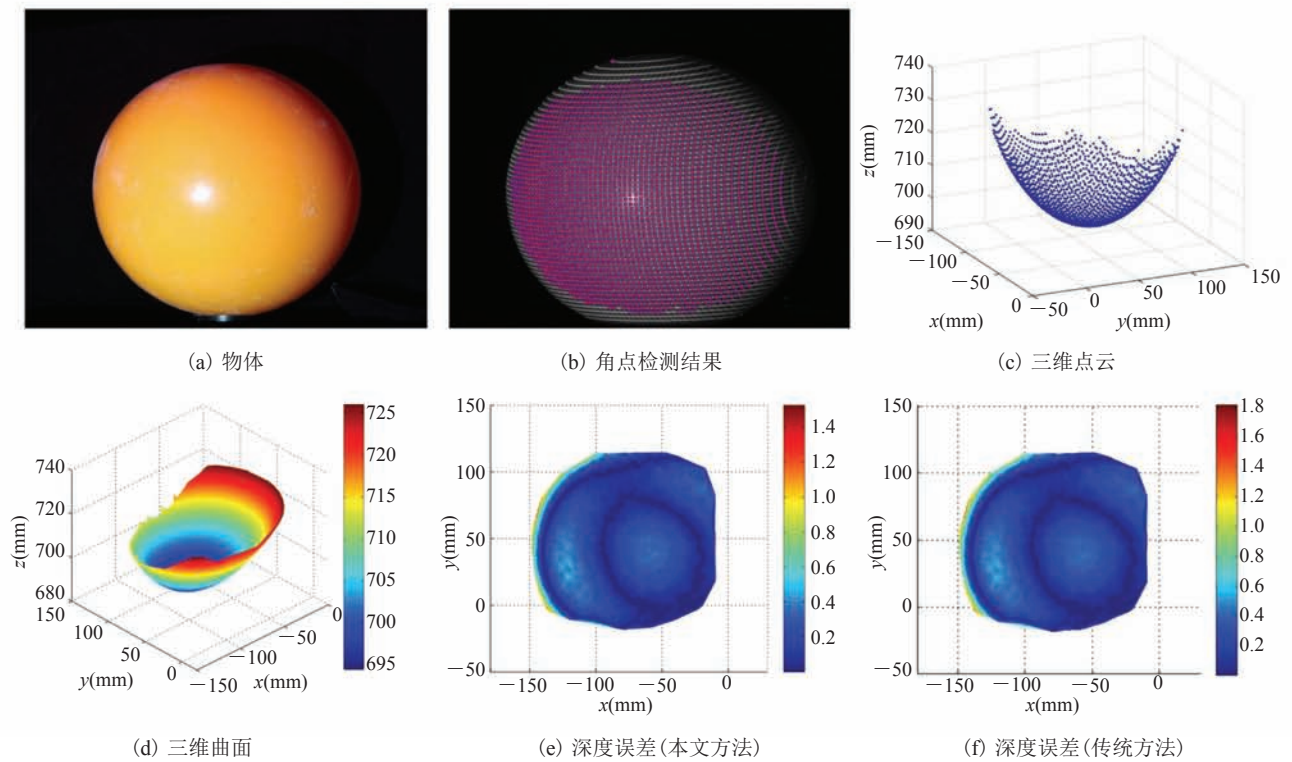


图7 球体的三维重建

Fig. 7 3D reconstruction of a standard sphere

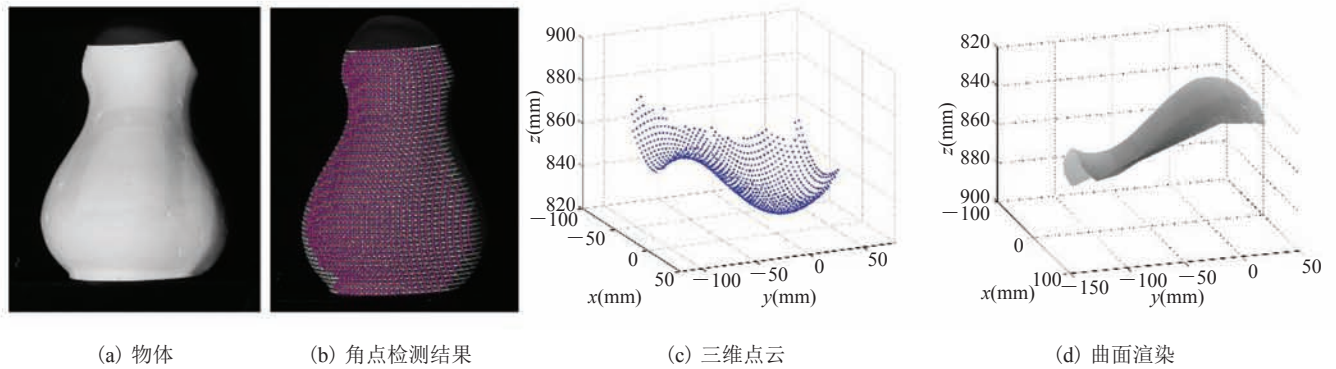


图8 石膏壶的三维重建

Fig. 8 3D reconstruction of a plaster bottle

识别, 完成解码获得对应性信息。根据光学三角测量法及上文的标定结果将对应性信息转化为三维信息, 分别如图 6(c)、7(c)、8(c)所示。由于图中的点云过于稀疏, 因此利用双线性插值法对点云插值获取密集点云。图 6(d)与 7(d)所示为平面与球体插值后的密集点云。首先, 采用本文方法, 根据密集点云分别计算平板的平面误差及球体的深度误差, 误差结果分别如图 6(e)与 7(e)所示, 二者平均误差分别为 0.113 mm 和 0.182 mm; 然后, 采用传统方法, 计算平面误差及深度误差, 结果如 6(f)与 7(f)所示, 二者平均误差分别为 0.142 mm 和 0.231 mm; 图 8(d)所示为石膏壶的三维曲面渲染结果。

上述实验结果表明, 本文所提出的编码结构光方法可以同时实现投影仪参数的标定和三维重建两种功能。与传统基于棋盘格的投影参数标定方法相比, 利用本文所提出的标定方法及所设计的编码图案进行三维重建, 可以获得更高的三维重建精度。

另外, 与本文前言部分提到的 3 类结构光系统标定方法相比来看, 本文方法同样具有一定优势。其中, 与第(1)类利用相机标定参数求取对应三维坐标的标定方法^[10-12]相比, 本文方法精度更高; 与第(2)类使用相位匹配的标定方法^[13-15]相比, 本文方法精度略低; 与第(3)类相

关投影仪标定方法^[16]相比, 二者精度相当。但是, 本文方法没有第(1)方法中对于相机标定参数的依赖性, 也没有第(2)方法中相位匹配的复杂性, 也不会像其他, 如第(3)类方法使用特殊的标定设备或者标定图像。综上所述, 本文方法相较于现有的方法, 标定速度、精度更高, 且简单易行。

5 结论

本文首先利用伪随机原理结合设计的几何图形生成二值几何编码图案; 然后, 针对该编码图案设计了一种特征点检测算子, 并提出了一种基于深度学习框架的几何元素识别算法用于获取投影编码特征点与拍摄编码特征点之间的对应关系, 进而利用射影变换原理建立相机像平面与投影机像平面之间的对应关系; 最后, 利用此对应关系将棋盘格标定板角点在相机图像上的坐标转换至投影机图像坐标上, 从而将投影机视为一个“逆向”相机, 进而可基于传统标定方法实现相机和投影仪内外部参数的标定过程。标定结果显示, 该方法对投影仪的标定重投影误差不超过 0.3 像素。三维重建实验结果显示, 与传统标定方法相比, 本文方法能够获得更高的三维重建精度。

参 考 文 献

- [1] D'Apuzzo N. Overview of 3D surface digitization technologies in europe [C] // Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2006, 6056: 605605.
- [2] 刘辉, 王伯雄, 李鹏程, 等. 双向扫描投影双目结构光编码设计 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1862-1867.
- [3] Zhang S, Yau ST. High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method [J]. Optics Express, 2006, 14(7): 2644 - 2649.
- [4] 张维光, 韩军, 周琦. 线结构光多分辨率测量系统数据拼接方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1441-1447.
- [5] Sitnik R, Krzeslowski JF, Maczkowski G. Archiving shape and appearance of cultural heritage objects using structured light projection and multispectral imaging [J]. Optical Engineering, 2012, 51(2): 021115.
- [6] Zhang ZY. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [7] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55.
- [8] 刘顺涛, 骆华芬, 陈雪梅, 等. 结构光测量系统的标定方法综述 [J]. 激光技术, 2015, 39(2): 252-258.
- [9] Wei GQ, Ma SD. A complete two-plane camera calibration method and experimental comparisons [C] // The 4th International Conference on Computer Vision, 1993: 439-446.
- [10] Zhang X, Zhu LM. Robust calibration of a color structured light system using color correction [C] // The 2nd International Conference on Intelligent Robotics and Application, 2009: 936-946.
- [11] Huang JH, Wang Z, Gao ZH, et al. A novel color coding method for structured light 3D measurement [C] // Proceedings of the SPIE, 2011: 808512.
- [12] Yamauchi K, Saito H, Sato Y. Calibration of a structured light system by observing planar object from unknown viewpoints [C] // The 19th International Conference on Pattern Recognition, 2008: 1-4.
- [13] Chen XB, Xi JT, Jin Y, et al. Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(3-4): 310-319.
- [14] Zhang S, Huang PS. Novel method for structured light system calibration [J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 083601.
- [15] Yin YK, Peng X, Li A, et al. Calibration of fringe projection profilometry with bundle adjustment strategy [J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 542-544.
- [16] 施天敏, 李锋, 徐鸣华. 基于双目视觉测量系统的投影仪标定方 [J]. 电子设计工程, 2016, 24(1): 12-15.
- [17] Lin HB, Nie L, Song Z. A single-shot structured light means by encoding both color and geometrical features [J]. Pattern Recognition, 2016, 54: 178-189.
- [18] Lecun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [C] // Proceedings of the IEEE, 1998: 2278-2324.
- [19] 唐苏明, 张旭, 屠大维. 伪随机编码结构光系统的标定 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1354-1362.