

引文格式:

石础, 谌海云, 宋展. 远心结构光三维系统研究 [J]. 集成技术, 2019, 8(4): 32-41.

Shi C, Chen HY, Song Z. On the 3D telecentric structured light systems [J]. Journal of Integration Technology, 2019, 8(4): 32-41.

远心结构光三维系统研究

石 础^{1,2} 谌海云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)

摘 要 结构光三维重建技术已广泛应用于工业检测领域, 随着工业检测需求的不断提高, 工业检测技术的需求也愈发向微小化和高精度化方向发展。其中, 远心镜头具备透视误差小、镜头畸变小、成像失真少等优秀特性, 获得越来越多的关注。该文投影仪采用传统镜头, 将传统结构光系统中的相机镜头替换为远心镜头, 通过对传统两步标定法的改进, 对相机的仿射模型进行标定, 随后用已标定的相机对投影仪进行参数标定。实验结果显示, 所开发的远心结构光系统具备能够实现小视野范围的高精度、高分辨率三维重建, 并具有加大的测量景深, 可用于半导体器件及微型零部件等目标的高精度三维检测。

关键词 微小视野; 远心镜头; 结构光系统; 标定

中图分类号 TP 391 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20190419001

On the 3D Telecentric Structured Light Systems

SHI Chu^{1,2} CHEN Haiyun¹ SONG Zhan²

¹(Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

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

Abstract Structured light 3D reconstruction technology has been widely used in industrial detection. Nowadays, the more miniaturized and higher-precision industrial detection technology is becoming more important. The telecentric lens has many excellent characteristics, such as small perspective error, small lens distortion, less imaging distortion, and large depth of field, which attracts more attention. In this paper, the traditional lens is used to replace the camera lens in the traditional structured light system with the telecentric lens. Through the improvement of the traditional two-step calibration method, the affine model of the camera is calibrated, and then the calibrated camera is used to calibrate the parameters of the projector. The experimental results show that the telecentric structured light system can achieve high-precision and high-resolution 3D

收稿日期: 2019-04-19 修回日期: 2019-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1103602); 国家自然科学基金项目(51705513); 深圳市基础研究项目(JCYJ20170818160448602)

作者简介: 石础, 硕士研究生, 研究方向为机器视觉三维重建; 谌海云, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为油气测控工程、自动化等; 宋展(通讯作者), 研究员, 博士研究生导师, 研究方向为计算机 3D 视觉, E-mail: zhan.song@siat.ac.cn.

reconstruction in a small field of vision, and has an increased depth of field. It can be used for high-precision 3D detection of semiconductor devices and micro-components.

Keywords micro vision; telecentric lens; structured light system; calibration

1 引 言

编码结构光三维重建技术是实现物体高精度测量的重要方法, 现已广泛应用于工业检测、机器人导航、医学整形和三维打印等领域^[1-5]。随着工业技术的不断发展, 工业检测技术的需求也愈发向微小化和高精度化方向发展, 即对传统的结构光系统提出了严峻挑战。

传统结构光系统由一个相机和投影仪组成, 其成像模型均为针孔成像, 对一般场景的重建工作均可较好地完成。但由于镜头成像特性、镜头畸变等因素的影响, 在应对重建精度需求较高的精密微小元器件检测问题上显然无法得到预期效果: (1) 在实际测量过程中, 相同的物体距离传统近心镜头远近的不同而使成像尺寸发生变化, 或不同的物体在不同视角下也可能出现相同的成像尺寸; (2) 传统近心镜头本身具有不同程度的镜头畸变, 使实际成像结果与预期图像发生偏差; (3) 传统近心镜头因存在不可避免的透视误差而导致拍摄图像当中存在形变, 直接影响高精度测量的结果; (4) 逆光拍摄物体时, 往往很难确定其边缘的确切位置, 对具有深度的三维形状难以达到高精度测量; (5) 传统镜头拍摄微小物体时所需要的大光圈与镜头景深范围产生矛盾, 使成像出现离焦现象, 限制了最大分辨率。与传统镜头相比, 远心镜头可以减少甚至消除传统镜头存在的大部分问题^[6]: (1) 远心镜头的成像模型为仿射成像模型, 具有十分稳定的放大倍率, 且在镜头景深范围内, 图像尺寸不会随物体的位移而发生变化, 因此成像尺寸与实际尺寸之间完美对应, 能对物体实现精确测量与定位; (2) 高

质量的远心镜头通常具有非常低的畸变影响, 可以准确还原物体的实际成像尺寸; (3) 由于光线路径平行于主光轴, 远心镜头突破了透视误差的限制, 使得物体厚度不会因与镜头距离的不同而发生变化; (4) 可以进入远心镜头的唯一反射光均为平行主光轴的光线, 其受到偏差影响较小, 物体表面对其的反射并不会损失测量精度, 使实际物体成像不存在边缘位置的不确定性; (5) 远心镜头对最佳焦点位置偏移程度更具宽容性, 光学系统的对称性以及光线的平行性促使图像光斑保持对称性, 降低了模糊效应。以上优势使远心镜头成为开发高精度测量应用的一个关键部件。

本文针对微小精密测量系统展开研究, 将传统结构光三维重建系统中相机的传统镜头替换为远心镜头, 达到拍摄图像成像失真小、拍摄视野小、图像分辨率高的目的。就本文系统而言, 传统相机标定技术已然不适用, 因此基于两步法对具有放射模型的远心镜头相机进行标定, 同时利用已标定的相机对近心镜头投影仪进行标定, 然后利用标定板上的特征点对系统内部、外部参数进行全局优化, 得到较为准确的标定参数, 并以此作为后续微小物体测量系统三维精确重建的基础。

2 理论基础

2.1 针孔成像标定模型

传统相机的成像原理就是利用光沿直线传播这一光学特性从而将物体在相机像面进行成像, 常见相机成像模型为针孔成像模型^[7]。其中, 针孔成像模型又称为线性相机模型, 空间中任意一点在图像中的成像位置可以用此模型近似表示。

如图1所示,相机的光心为 O_c ,光心到成像平面 π 的距离为焦距 f 。

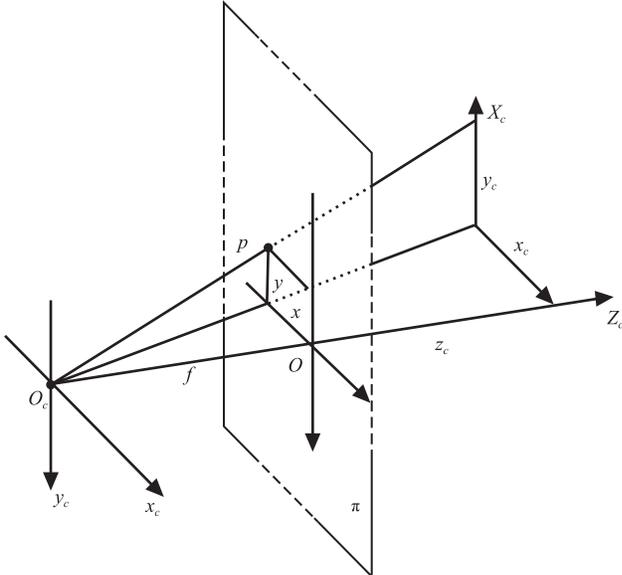


图1 针孔成像模型

Fig. 1 Pinhole model

设空间点 $P=[X_c, Y_c, Z_c]^T$,其投影到成像平面上的点 $p=[x, y]^T$,由透视投影的比例关系可得:

$$\frac{x}{X_c} = \frac{y}{Y_c} = \frac{f}{Z_c} \quad (1)$$

整理可得:

$$\begin{cases} x=f \cdot \frac{X_c}{Z_c} \\ y=f \cdot \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \rightarrow s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, s 为图像尺度因子。

2.2 仿射成像标定模型

与针孔成像模型不同的是,远心镜头模型为平行成像模型,是仿射成像模型的一种,即在景深范围之内,镜头与测量物体之间的距离变化并不会影响相机对图像的放大倍率。远心镜头成像模型如图2所示。

远心镜头相较于传统近心镜头来说,区别在于成像时缺失 Z 轴信息。在不考虑镜头畸变的情况下,由于远心镜头的成像特性,相机坐标系中

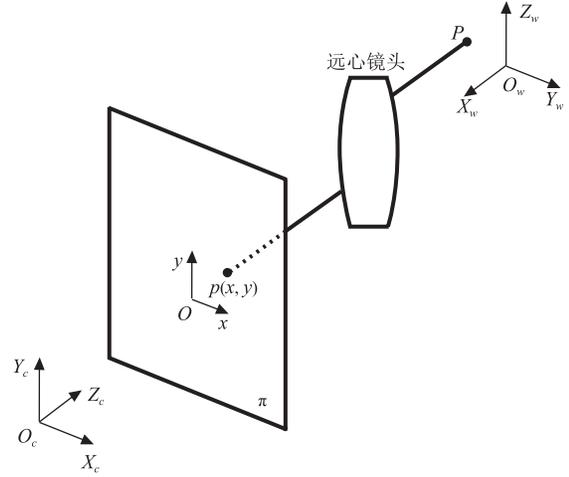


图2 远心镜头成像模型

Fig. 2 Telecentric lens imaging model

的点 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ 经过远心镜头仿射投影后,在相机像面的成像位置为点 $p(x, y)$ 。齐次数学表达式如公式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, m 为远心镜头的放大倍数,为待标定的内部参数之一。

在计算机中,所拍摄的每一幅数字图像由 M 行 N 列的像素点组成,像素点不同的灰度值使图像呈现出不同亮度。在图像中定义图像直角坐标系 uOv ,每个像素的坐标 (u, v) 分别表示该像素所在图像中的第 u 列与第 v 行。由于像素点在相机像面成像并非用物理单位,因此需要通过相机坐标系的物理尺度建立与图像坐标系的关系。图像中任意像素在两个坐标系下的坐标可以表示为:

$$\begin{cases} u = \frac{x}{du} + u_0 \\ v = \frac{y}{dv} + v_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, du 为相机在 u 方向的像素间距; dv 为相机在 v 方向的像素间距; (u_0, v_0) 表示图像坐标系的图像中心。

世界坐标系通常作为测量环境中的基准坐标系, 可用于描述环境中任何物体的位置。由于相机可以安放于环境中的任意位置, 因此相机坐标系和世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 来描述。由于远心镜头外部参数缺少 Z 轴上的变化信息, 结合公式 (3)、(4) 并利用齐次坐标可得到远心仿射理想成像模型:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/du & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dv & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

理论上, 远心镜头不存在镜头畸变误差, 但镜头畸变为透镜的固有特征^[8]。这是因为在精密制造的过程中, 难免会造成一定程度上的镜头畸变。而在高精度的要求下, 镜头畸变需要被考虑在成像模型内。常见镜头畸变分为径向畸变和切向畸变。将镜头畸变引入远心仿射成像模型中如公式 (6) 所示:

$$\begin{cases} u' = u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_1 v + p_2(r^2 + 2u^2)] \\ v' = v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_2 u + p_1(r^2 + 2v^2)] \end{cases} \quad (6)$$

其中, $r^2 = (u' - u_0)^2 + (v' - v_0)^2$ 表示图像畸变中心到像素点的径向距离的平方; k_i 表示径向畸变阶数; p_i 表示切向畸变参数, 畸变参数可以表示为 $d(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$ 。

至此, 相机的仿射成像模型参数和远心镜头畸变参数一起组成需要标定的带有远心镜头相机的内部参数 (m, u_0, v_0, d) 。

2.3 四步相移法

相移法在光学测量中得到了广泛的应用。在相位测量轮廓术 (PMP) 系统中, 相位偏移的编码图案由投影仪投射到待测场景中, 由待测目标表面反射, 并由相机对蕴藏着深度信息的调制条纹

进行捕捉存储, 再利用相位解卷绕的方法对被调制的正弦条纹图像求解绝对相位。在系统完成标定工作的前提下, 将绝对相位信息转化为待测物体的三维点云。相移理论发展较为成熟, 其中主要有三步、四步和五步相移。由于四步相移对偶次谐波具有抑制作用且投射正弦图像数量适中, 因此本文采取相移步长为 $\frac{\pi}{2}$ 的四步相移法作为后续三维重建的相关方法。

四步相移正弦条纹通过投影仪投射到待测物体表面, 之后通过远心镜头采集被自由曲面调制的正弦条纹图案。其中, 条纹图案的亮度值满足表达式 (7):

$$I_k(u, v) = I'(u, v) + I''(u, v) \cos \left[\phi(u, v) + \frac{(k-1)\pi}{2} \right] \quad (7)$$

其中, $k=1, 2, 3, 4$; (u, v) 为图像中像素点坐标; $I_k(u, v)$ 表示第 k 幅相移图像中 i 行 j 列像素点的灰度值; $I'(u, v)$ 为平均灰度值; $I''(u, v)$ 为调制灰度值; $\phi(u, v)$ 为像素点对应位置的相位主值。利用相移信息对相位主值进行解算可得:

$$\phi(u, v) = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (8)$$

其中, 公式 (8) 计算的相位主值为包裹在 2π 内的折叠相位, 满足条纹级数全局唯一需要对包裹相位进行解包展开得到连续相位。本文采用时间相位展开算法中的多频外差法^[9]对包裹相位进行展开, 得到投影仪与相机之间的对应性即为投影仪投射正弦图案中的 u 坐标。

3 远心三维系统标定

3.1 相机标定

目前, 张正友提出的基于 2D 平面靶标标定法^[10-11]已被广泛应用在结构光系统的标定中。受限于多姿态采集标定板图像的标定方式, 本文采用 Tsai 的两步法^[12-13]对带有远心镜头的相机进

行标定工作，并将世界坐标系建立于标定板平面上，此时 $Z_w=0$ 。具体方法如下：

第一步，忽略远心镜头畸变，基于径向排列约束求解初始参数。

由相机坐标系与世界坐标系关系可以得到：

$$\begin{cases} X_c = r_{11}X_w + r_{12}Y_w + T_x \\ Y_c = r_{21}X_w + r_{22}Y_w + T_y \end{cases} \quad (9)$$

由径向排列约束(RAC)可得：

$$\frac{X_c}{Y_c} = \frac{x}{y} = \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w + T_x}{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + T_y} \quad (10)$$

将公式(10)移项，整理得到矢量形式：

$$\begin{bmatrix} X_w & Y_w & y & -X_w x & -Y_w x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11}/T_y \\ r_{12}/T_y \\ T_x/T_y \\ r_{21}/T_y \\ r_{22}/T_y \end{bmatrix} = x \quad (11)$$

其中，行矢量 $[X_w, Y_w, y, -X_w x, -Y_w x]$ 是已知的，而列矢量 $[r_{11}/T_y, r_{12}/T_y, T_x/T_y, r_{21}/T_y, r_{22}/T_y]^T$ 是待求的参数。由于棋盘格中提取的特征点大于需要求解的参数个数，故对列矢量采用最小二乘法求解其线性最优解。根据文献[14-17]所述的方法可以解出部分外部参数 $(r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}, T_x, T_y)$ ，由旋转矩阵 \mathbf{R} 的正交性解出旋转矩阵其余分量 (r_{31}, r_{32}, r_{33}) 。

利用标定板上的特征点结合公式(5)可求解内部参数 m ，具体表达式如下：

$$[m] \cdot \begin{bmatrix} r_{11}X_w + r_{12}X_w + T_x \\ r_{21}X_w + r_{22}X_w + T_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (12)$$

第二步，引入镜头畸变，非线性迭代得到准确参数。

在引入镜头畸变的情况下，带远心镜头的相机标定问题转化为公式(13)取得最小值时得到的参数值：

$$F = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n \|p_i - \tilde{p}_i(R, T_x, T_y, m, d)\|^2 \quad (13)$$

取畸变参数初始值为 0， (u_0, v_0) 初始值为图

像中心点坐标，利用 MATLAB 中非线性迭代函数 `fminsearch` 解决方程 F 的非线性最小值问题。

至此，带有远心镜头相机的内部、外部参数标定完毕。

3.2 投影仪标定

投影仪标定通过平面映射的方法建立相机像平面与投影仪像平面之间的对应关系。具体方法是通过向标定板上投影棋盘格图案，如图 3 所示，并通过相机采集投影的棋盘格图案，计算平面间的映射关系即单应性矩阵 \mathbf{H} ，如公式(14)所示。

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

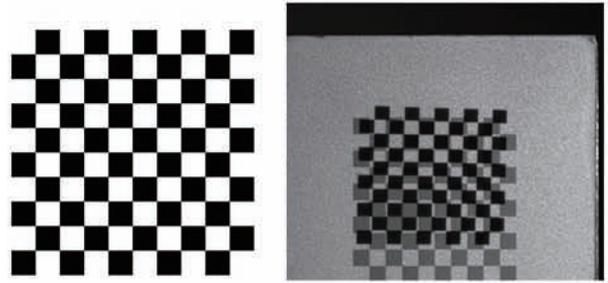


图3 投影棋盘格图像

Fig. 3 Projected checkerboard pattern

获得相机与投影仪像面之间的映射关系即可将投影仪视为“伪相机”来进行标定。同样采用两步法对其进行标定工作：(1)忽略远心镜头畸变，基于径向排列约束求解初始参数；(2)引入镜头畸变，非线性迭代得到准确参数。与相机标定远心模型不同的是，投影仪采用的是传统镜头，因此无需标定放大倍数 m 。标定过程中，图像棋盘格特征点的检测通过 Matlab 工具箱中的 `CameraCalibrator` 工具进行识别与提取，提取的角点结果如图 4 所示。标定结果如表 1 所示。

由表 1 与表 2 列出的远心结构光标定参数，分别计算相机与投影仪的反向投射误差。其中，相机反向投射误差在 0.29 像素之内，投影仪反

表 1 远心结构光系统内参数

Table 1 Intracentric parameters of telecentric structured light system

设备	m	f (像素)	图像坐标原点 (像素)		畸变系数 (像素) $\times 10^{-5}$				
			u_0	v_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
相机	0.416 3	\	1 217.5	1 020.0	0.000 9	-0.103 9	-0.037 4	0.000 0	0.000 0
投影仪	\	3 061.5	637.5	396.6	-0.004 0	0.785 2	0.900 4	0.000 0	0.000 0

注: m 为镜头放大倍数; f 为焦距; $d_1 \sim d_3$ 为径向畸变系数, d_4 、 d_5 为切向畸变系数; “\” 为无相应参数

表 2 远心结构光系统外参数

Table 2 External parameters of telecentric structured light system

设备	旋转矩阵 R			平移向量 T		
	r_1	r_2	r_3	T_x	T_y	T_z
相机	0.031 3	0.078 1	-0.002 0	-7.534 4	-1.208 0	\
投影仪	0.527 7	0.063 5	3.085 0	12.732 5	3.379 1	-92.380 5

注: “\” 为 T_z 缺失 (映射模型的原因, 远心镜头无法测量出 z 轴数据)

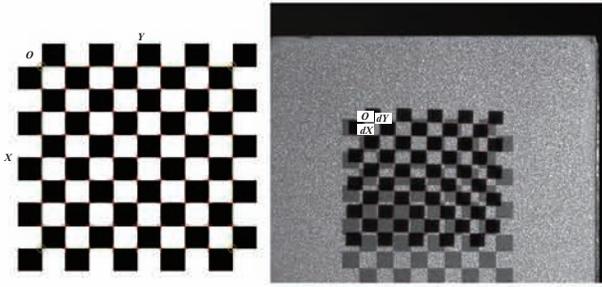


图 4 提取角点坐标

Fig. 4 Extract grid corners

向误差在 0.37 像素之内。显然, 投影仪反向误差较大。分析其原因发现, 建立公式 (14) 单应性矩阵的点对来源为投影仪投射的棋盘格角点, 较少的棋盘格角点对准确计算单应性矩阵的贡献度较低。因此, 在投影仪与相机分辨率允许的情况下, 可以尽可能地增加棋盘格角点密度, 进而达到准确描述相机与投影仪像平面映射关系的目的。

4 远心三维重建

4.1 三维重建

由公式 (5) 可得世界坐标系在带远心镜头的相机图像坐标系下的对应关系, 如公式 (15) 所示:

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m}{du_p} & 0 & u_0^c \\ 0 & \frac{m}{dv_p} & v_0^c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11}^c & r_{12}^c & r_{13}^c & T_x^c \\ r_{21}^c & r_{22}^c & r_{23}^c & T_y^c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

同理可得世界坐标系中点在投影仪图像坐标系下的对应关系:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_p}{du_p} & 0 & u_0^p \\ 0 & \frac{f_p}{dv_p} & v_0^p \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11}^p & r_{12}^p & r_{13}^p & T_x^p \\ r_{21}^p & r_{22}^p & r_{23}^p & T_y^p \\ r_{31}^p & r_{32}^p & r_{33}^p & T_z^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, 投影仪的内部、外部参数由投影仪标定过程获得。结合公式 (15) 和 (16) 可得如下世界坐标方程组:

$$\begin{cases} u_c = u_0^c + \frac{m(r_{11}^c X_w + r_{12}^c Y_w + r_{13}^c Z_w + T_x^c)}{du_c} \\ v_c = v_0^c + \frac{m(r_{21}^c X_w + r_{22}^c Y_w + r_{23}^c Z_w + T_y^c)}{dv_c} \\ Z_p u_p = u_0^p + \frac{f_p(r_{11}^p X_w + r_{12}^p Y_w + r_{13}^p Z_w + T_x^p)}{du_p} \end{cases} \quad (17)$$

由方程组(17)可得,利用已标定完成的远心结构光系统进行三维重建,只需获得投影仪垂直方向上的对应性 u_p 即可。而对应性的获取如2.3节所述,相移法得到的图像序列利用条纹分析法得到具有缠绕性质的卷绕相位,之后利用多频外差法对卷绕相位进行解卷绕工作,得到具有全局唯一性的展开相位,最终通过展开相位寻找相位对应的条纹级数,即可得到对应性。对于相机采集图像上的任意一点 (u_c, v_c) ,通过公式(14)均可在投影仪图像上的对应位置找到投影像素点 (u_p, v_p) ,则结合相机和投影仪的标定结果并通过方程组(17)即可唯一确定其所对应的世界坐标^[18]。

4.2 实验设备

本文实验平台由一个带远心镜头的相机和一个DLP投影仪组成。其中,灰点工业相机BFS-U3-32S4C,分辨率 $2\,448 \times 2\,048$,像素尺寸 $3.45\ \mu\text{m}$;镜头选取远心光学系统公司(BTOS)型号为BT-2320的远心镜头,放大倍率 m 为0.42,视场大小为 $21.0\ \text{mm} \times 15.7\ \text{mm}$,景深为 $3\ \text{mm}$,工作距离为 $90\ \text{mm}$;投影仪采用德州仪器(Texas Instruments)公司DLP4500投影仪,分辨率 $912 \times 1\,140$,像素尺寸 $7.64\ \mu\text{m}$,实验平台搭建如图5所示。

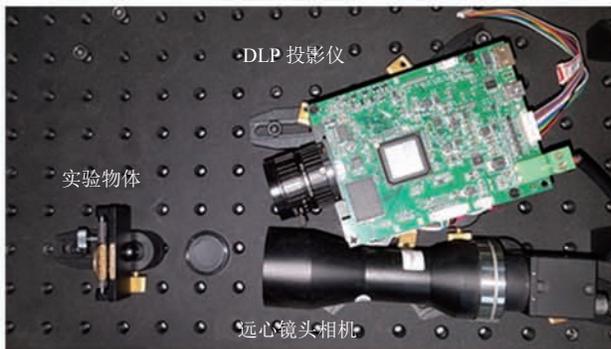


图5 实验平台搭建

Fig. 5 The experimental setup

本文采用 $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 高精度铝制棋盘格标定靶对系统进行标定工作,如图6所示。该标定棋盘格格子宽度均为 $1\ \text{mm}$,精度为 $1\ \mu\text{m}$ 。由

于远心镜头景深等因素的限制,本文仅对标定板的一个姿态进行标定即可完成远心结构光系统的标定工作。

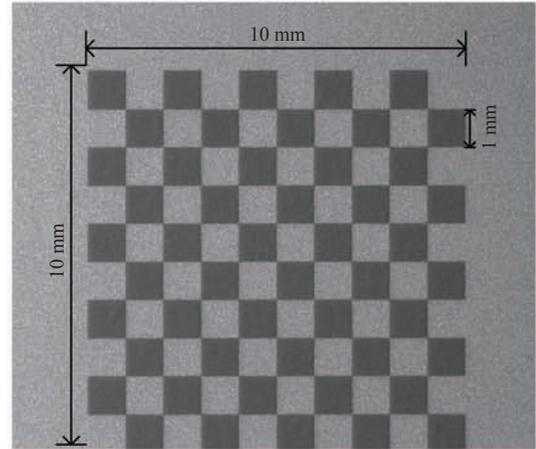


图6 高精度棋盘格标定板

Fig. 6 High precision chessboard calibration board

4.3 实验结果

本文选用硬币、钥匙和芯片引脚作为三维重建实验对象,来验证本文搭建远心系统的可行性。实验结果如图7所示。

图7(a)为1角硬币实物图,图7(b)为硬币重建结果图。受限于硬币表面的材质因素,对投影条纹灰度的均匀性造成了影响,故对其表面进行喷粉操作,将其转化为具有漫反射的特征表面,实现对其高质量的重建工作。从实验结果可以看出,本文的远心结构光系统对漫反射表面物体重建具有较高还原度,细节得到了较大程度的保留,初步验证了系统的可行性。图7(c)为钥匙实物图,图7(d)为钥匙重建结果图。金属表面具有一定的非朗伯特特性,表面反射条纹强度超过相机的动态范围形成局部高光区域,造成条纹编码信息的缺失从而对曲面重建的准确度产生影响。从实验结果可以看出,本文系统在较大程度上重建了金属钥匙的三维模型,具备一定的系统鲁棒性。图7(e)为精密芯片引脚实物图,图7(f)为对局部引脚的重建结果。从重建结果可以看出,本文系统在较大程度上还原了芯片引脚的深度信息。

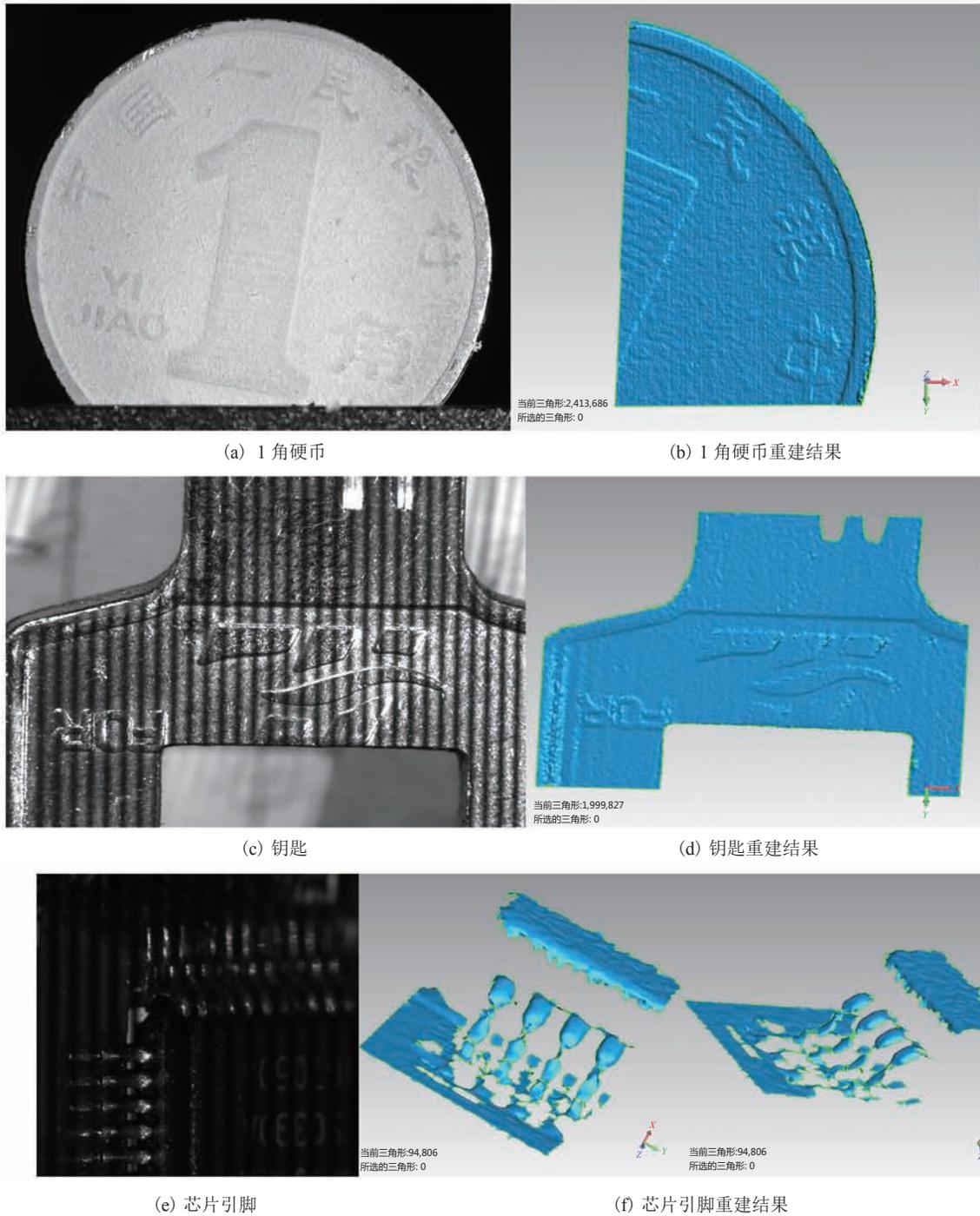


图 7 实验结果图

Fig. 7 Experimental results

其中单个引脚测量结果如图 8、9 所示, 测量的引脚间距为 0.505 mm, 与中星微 vimicro 芯片的紧凑封装引脚设计间距 0.5 mm 相吻合; 设计封装引脚高度 0.75 mm, 测量引脚高度为 0.734 mm。本

文总共对芯片引脚重建的 10 个结果进行测量, 测量结果如表 3 所示。经计算, 总体绝对误差不超过 2%。

从测量结果来看, 引脚间距的准确测量验证

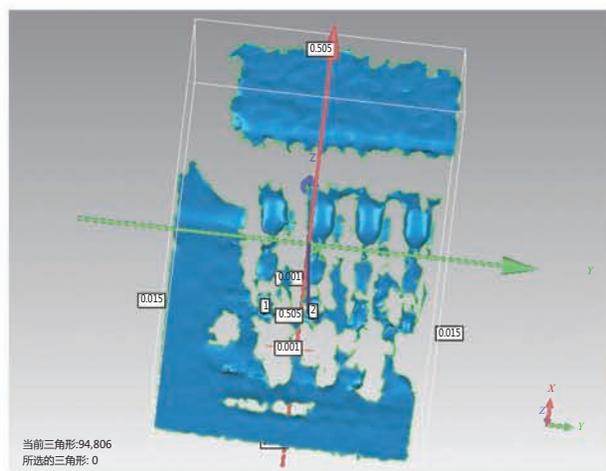


图 8 引脚间距实验结果

Fig. 8 Experimental result of pin pitch

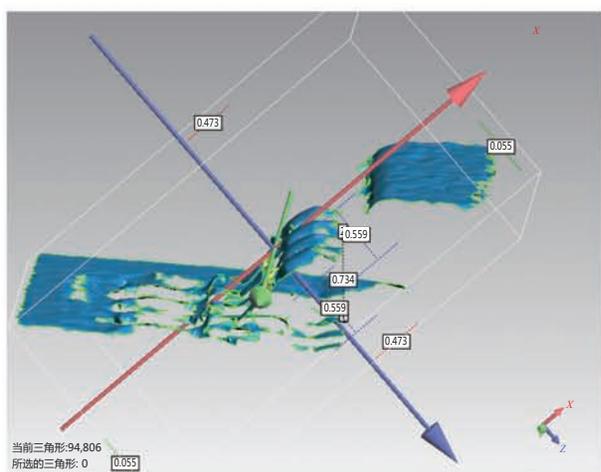


图 9 引脚高度实验结果

Fig. 9 Experimental result of pin height

表 3 芯片引脚测量结果表

Table 3 Table of chip pin measurement

序号	测量引脚高度 (mm)	绝对误差 (%)
1	0.740	1.33
2	0.743	0.93
3	0.743	0.93
4	0.745	0.67
5	0.738	1.60
6	0.736	1.87
7	0.760	1.33
8	0.739	1.47
9	0.749	0.13
10	0.758	1.07

了本文远心系统物理尺度换算的准确性；引脚高度的准确测量表明，本文系统对于精密物体深度还原具有较高的可信度。对于工业检测来说，提前对芯片引脚高度的异常做出判断，对高精密芯片的生产质量把控具有积极意义。

5 讨论与分析

Li 等^[15]采用双远心结构光系统重建精密芯片的三维模型，通过计算芯片焊球间距准确度和标定板圆心间距准确度来验证系统物理尺度的准确性，平均距离绝对误差为 0.16%；通过计算标定板在固定深度的测量值来验证系统深度信息测量的准确性，对拟合的平面相互比较得到平面间的距离，计算得到测量误差小于 10 μm 。本文测量的数据与之相比较大体处于同一精度水平，与之不同的是，本文采用单远心镜头的结构光系统对待测物体进行三维重建工作，适用条件较为宽泛，在验证其可行性的同时保证其测量精度不受影响。

6 结论

针对微小视野范围的高精度三维重建工作，本文将传统结构光系统中相机的近心镜头替换具有小视野、大景深、低畸变等特点的远心镜头，搭建远心结构光三维重建系统。将传统两步法结合远心成像模型作为结构光系统的标定方法，标定参数的正确性在后续实验中也得到了充分验证，系统的可行性得到进一步证实。对于后续工作，面对待测物体表面纹理较为复杂的情况以及金属材质反射光强超出了相机的动态范围等问题，仍需要进一步研究与论证。总的来说，与传统结构光方法相比，本文的远心结构光系统可以作为高精度的工业检测切实可行的解决方案。

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.
- [2] 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.
- [3] 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): 1115.
- [4] 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.
- [5] 张维光, 韩军, 周翔. 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.
- [6] Niu ZQ, Gao N, Zhang ZH, et al. 3D shape measurement of discontinuous specular objects based on advanced PMD with bi-telecentriclens [J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1615.
- [7] Moldovan D, Wada T. A calibrated pinhole camera model for single viewpoint omnidirectional imaging systems [C] // International Conference on Image Processing, 2004: 2977-2980.
- [8] 朱铮涛, 黎绍发. 镜头畸变及其校正技术 [J]. 光学技术, 2005, 31(1): 136-138.
- [9] Reich C, Ritter R, Thesing J. White light heterodyne principle for 3D-measurement [C] // Proceedings Volume 3100, Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing, 1997: 236-245.
- [10] Zhang ZY. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [11] Zhang ZY. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C] // Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, 1999: 666-673.
- [12] Tsai RY. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 2003, 3(4): 323-344.
- [13] 王洪益. 一种远心镜头的标定方法及精度研究 [J]. 光学技术, 2018, 44(3): 359-364.
- [14] Cao Y, Fu JB, Bai Y. Camera calibration and error analysis based on Matlab calibration tool [C] // Proceedings of the 2016 6th International Conference on Mechatronics, Computer and Education Informationization, 2016.
- [15] Li D, Liu CY, Tian JD. Telecentric 3D profilometry based on phase-shifting fringe projection [J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31826-31835.
- [16] Li D, Tian JD. An accurate calibration method for a camera with telecentriclenses [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(5): 538-541.
- [17] Haskamp K, Kästner M, Reithmeier E. Accurate calibration of a fringe projection system by considering telecentricity [C] // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII, 2011: 80821B.
- [18] 朱铮涛, 裴炜冬, 李渊, 等. 基于远心镜头的激光三角测距系统研究与实现 [J]. 激光与光电子学进展, 2018(3): 185-190.