

# 一种结构光三维成像系统的简易标定方法

张翰<sup>1</sup>, 包国琦<sup>2</sup>, 刘凯<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

<sup>2</sup>广东省公安厅, 广东 广州 510050

**摘要** 为了实现结构光三维成像系统参数的简易、快速标定, 提出一种利用单应矩阵获取大量标定数据的方法, 步骤如下: 获取立体标靶上左右两侧矩形框角点的图像坐标和对应的世界坐标, 分别计算左右两侧靶面从图像坐标变换到世界坐标的单应矩阵; 将图像中立体标靶矩形框内所有的像素点应用到计算出的单应矩阵中, 得到与之对应的世界坐标; 利用图像中立体标靶的靶面上几乎所有像素点的图像坐标和对应世界坐标来执行三维成像系统的标定。设计了一种与该标定方法相对应的立体标靶, 基于该立体标靶对结构光三维成像系统进行标定, 并利用标定后的系统进行实验。实验结果表明, 该标定方法具有较高的标定精度, 重建的三维点云图具有很好的视觉效果。该标定方法过程简单, 可降低标定成本, 具有实际应用价值。

**关键词** 成像系统; 结构光系统; 标定数据; 单应矩阵; 三维测量

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.141102

## Simple Calibration Method for Three-Dimensional Imaging System with Structured Light

Zhang Han<sup>1</sup>, Bao Guoqi<sup>2</sup>, Liu Kai<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

<sup>2</sup> Guangdong Provincial Public Security Department, Guangzhou, Guangdong 510050, China

**Abstract** To achieve a simple and fast calibration of parameters for three-dimensional imaging system with structured light, a method of obtaining a large number of calibration data using a homography matrix is presented. First, the image coordinates and the corresponding world coordinates of the rectangular corner points on the left and right sides of a stereo target are obtained, and the homography matrices of the left and right sides of the target surface from the image coordinates to the world coordinates are then calculated respectively. Next, all the pixels in the rectangular frame of the stereo target in the image are applied to the calculated homography matrix to obtain the corresponding world coordinates. Finally, we calibrate the three-dimensional imaging system using the image coordinates of nearly all the pixels on the target surface of the stereo target in the image and the corresponding world coordinates. A stereo target corresponding to the proposed calibration method is designed. Based on the stereo target, the three-dimensional imaging system with structured light is calibrated and experiments are carried out using the calibrated system. The experimental results show that the calibration method has high calibration accuracy, the reconstructed three-dimensional point cloud image has a good visual effect, and the calibration process is simple, which reduces the cost of calibration and is valuable for practical applications.

**Key words** imaging systems; structured-light system; calibration data; homography matrix; three-dimensional measurement

**OCIS codes** 110.6880; 150.1135; 150.1488

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-01-13; 录用日期: 2019-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(61473198)、四川省科技厅重点研发项目(2018GZ0198)、成都市科技局重点研发支撑计划(2018-YFYF-00029-GX)、四川大学自贡市校地科技合作重点研发项目(2018CDZG-12)

\* E-mail: kailiu@scu.edu.cn

# 1 引言

结构光系统以其非接触、高效率、高精度等优点成为重要的三维成像技术<sup>[1-3]</sup>,并被广泛应用于逆向工程<sup>[4]</sup>、医学建模<sup>[5]</sup>、在线检测<sup>[6]</sup>、三维生物识别<sup>[7-8]</sup>等领域。结构光系统通常由摄像机、投影仪和计算机组成。投影仪将编码图案图像投影到目标的表面,摄像机捕获目标物体变形的图案。通过对捕获的图像进行解码,可以在摄像机和投影仪之间建立对应关系。基于该对应关系,可通过三角测量原理对目标物体进行测量和三维重建<sup>[9-10]</sup>。摄像机和投影仪的标定是结构光系统至关重要的环节,其标定精度决定结构光系统的测量精度和三维重建效果。

摄像机的标定问题已经得到了广泛的研究,标定技术相对成熟。Sobel<sup>[11]</sup>利用精确制造的三维标靶来对摄像机进行标定。Tsai<sup>[12]</sup>提出经典的两步法,将标定目标简化为二维。Zhang<sup>[13]</sup>利用二维棋盘格标定板实现了对摄像机的校准,其所用的棋盘格可以放置成任意姿态。此外,还可通过自标定法<sup>[14]</sup>等对摄像机进行标定。投影仪与摄像机不同,投影仪自身不能捕捉图像,研究人员不能直接获取目标物体的空间坐标与其映射到投影仪空间坐标的关系,故投影仪的标定问题相对复杂。基于基准面的标定技术<sup>[15]</sup>易于计算相位到深度的转换,但是基准面需要具有较高的表面平坦度和良好的光学特性,可以通过各种优化技术解码投影仪投影图案的编码深度信息来解决基于参考平面校准的局限性<sup>[16-17]</sup>。基于投影仪视为反摄像机的概念,Zhang等<sup>[18]</sup>利用投影仪捕捉图像(像摄像机一样),使用绝对相位将摄像机成像平面内的像素点映射到投影仪。该技术需要利用水平和垂直图案来定位二维投影仪的像素坐标。通过已经得到的映射关系还可创建出投影仪的目标图像,从而实现利用成熟的摄像机校准算法来校准投影仪。在此技术基础上,研究人员提出了一系列不同的技术,包括线性插值<sup>[19]</sup>、光束平差法<sup>[20]</sup>、残差补偿<sup>[21]</sup>等。在大多数结构光系统的标定方法中,研究人员会将摄像机的标定和投影仪的标定分为两个步骤,过程复杂且耗时。制作标靶的费用昂贵,经济实用性较差。此外,投影编码图案到被测物体时的反射光是求解相位的依据,需由摄像机准确获取,故某些高精度标靶材料并不适用于投影仪的标定。二维标靶在投影仪标定环节需要摄像机采集大量的编码图案,例如:利用Zhang<sup>[13]</sup>的棋盘格需要在每个姿态下采集大量的编

码图片来进行相位解码,且采集图片时需要将姿态固定,不适用于现场投影仪标定。采用传统方案得到的校准数据的数量非常少,在获取标靶点的过程中也易受环境等因素的影响。

针对以上问题,本文提出一种结构光三维成像系统的简易标定方法。以相位测量轮廓术(PMP)<sup>[22]</sup>为基础,设计了一个适合现场标定的标靶。该方法通过标靶得到矩形框角点的图像坐标和对应的世界坐标,从而获得像平面到空间平面的单应矩阵。通过内在的约束条件用Levenberg-Marquardt算法<sup>[23]</sup>来优化参数,减小原始采集图像点误差和摄像机畸变效应带来的误差。根据设计标靶的特性,采用单应矩阵获取矩形框内其他像素点的图像坐标和对应的世界坐标,并对三维成像系统进行标定。本文方法能够获取大量的校准数据,保证系统的校准精度。该方法对摄像机和投影仪标定的过程进行了统一,简化了标定步骤。

## 2 基本原理

### 2.1 摄像机和投影仪模型

摄像机用针孔模型来描述。在世界坐标系中某点的三维坐标向量为 $\mathbf{Q}=(X^w, Y^w, Z^w)^\top$ ,投影到像平面上的图像坐标向量为 $\mathbf{q}^c=(u^c, v^c)^\top$ ,二者对应的齐次向量分别表示为 $\tilde{\mathbf{Q}}=(X^w, Y^w, Z^w, 1)^\top$ , $\tilde{\mathbf{q}}^c=(u^c, v^c, 1)^\top$ 。基于透视投影模型的空间点三维坐标向量 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 和摄像机中图像点坐标向量 $\tilde{\mathbf{q}}^c$ 的关系为

$$s^c \tilde{\mathbf{q}}^c = \mathbf{K}^c [\mathbf{R}^c, \mathbf{t}^c] \tilde{\mathbf{Q}}, \quad (1)$$

式中:参数 $s^c$ 为比例系数; $\mathbf{M}^{wc}=\mathbf{K}^c[\mathbf{R}^c, \mathbf{t}^c]$ 为摄像机参数矩阵; $[\mathbf{R}^c, \mathbf{t}^c]$ 为摄像机的外参数矩阵,表示世界坐标系到摄像机坐标系的旋转和平移; $\mathbf{K}^c$ 为摄像机的内参数矩阵,即

$$\mathbf{K}^c = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 $f_x, f_y$ 为图像平面坐标轴 $u, v$ 方向上的焦距, $(c_x, c_y)$ 为图像的主点, $\gamma$ 为倾斜因子。投影仪是将二维图像映射到三维空间,摄像机则将三维场景映射到二维图像,所以两者的光学结构相同。因此投影仪系统可被当作一个相反光路的摄像机系统,投影仪也可用针孔模型来描述。空间点三维坐标 $\tilde{\mathbf{Q}}=(X^w, Y^w, Z^w, 1)^\top$ 和投影仪中图像点坐标 $\tilde{\mathbf{q}}^p=(u^p, v^p, 1)^\top$ 的关系为

$$s^p \tilde{\mathbf{q}}^p = \mathbf{K}^p [\mathbf{R}^p, \mathbf{t}^p] \tilde{\mathbf{Q}}, \quad (3)$$

式中: $s^p$ 为比例系数; $\mathbf{M}^{wp}=\mathbf{K}^p[\mathbf{R}^p, \mathbf{t}^p]$ 为投影仪参

数矩阵;  $[\mathbf{R}^p, \mathbf{t}^p]$  为投影仪的外参数矩阵, 表示世界坐标系到投影仪坐标系的旋转和平移;  $\mathbf{K}^p$  为投影仪的内参数矩阵。

## 2.2 结构光系统的标定

结构光系统的标定包括摄像机的标定和投影仪的标定。Li 等<sup>[24]</sup>介绍了一种相位测量轮廓术, 该方法使投影仪能够像摄像机一样采集图像, 从而使投影仪的标定与摄像机的标定相同。相位测量轮廓术使用的是时间域的编码方式, 通过相移变化可形成一系列投射图案。其相应的解码方式则是根据投射图案上每个点的相位值的时域关系, 求解出该点对应的相位值  $\Phi(u^c, v^c)$ 。  $\Phi(u^c, v^c)$  是在图像坐标点  $(u^c, v^c)$  位置的相位值。  $\Phi(u^c, v^c)$  值一旦被计算出来, 投影坐标  $(u^p, v^p)$  就可通过相关公式恢复出来。

利用最小二乘法原理可求解摄像机的参数矩阵和投影仪的参数矩阵。摄像机中的图像点的坐标  $(u^c, v^c)$  和其对应的标定物的世界坐标  $(X^w, Y^w, Z^w)$  之间的转换关系为

$$u^c = \frac{m_{11}^{wc} X^w + m_{12}^{wc} Y^w + m_{13}^{wc} Z^w + m_{14}^{wc}}{m_{31}^{wc} X^w + m_{32}^{wc} Y^w + m_{33}^{wc} Z^w + m_{34}^{wc}}, \quad (4)$$

$$v^c = \frac{m_{21}^{wc} X^w + m_{22}^{wc} Y^w + m_{23}^{wc} Z^w + m_{24}^{wc}}{m_{31}^{wc} X^w + m_{32}^{wc} Y^w + m_{33}^{wc} Z^w + m_{34}^{wc}}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}^{wc} = \begin{bmatrix} m_{11}^{wc} & m_{12}^{wc} & m_{13}^{wc} & m_{14}^{wc} \\ m_{21}^{wc} & m_{22}^{wc} & m_{23}^{wc} & m_{24}^{wc} \\ m_{31}^{wc} & m_{32}^{wc} & m_{33}^{wc} & m_{34}^{wc} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{M}^{wc}$  为数字摄像机的参数矩阵,  $m_{11}^{wc} \sim m_{34}^{wc}$  为该矩阵中的元素。投影仪中的图像点的坐标  $v^p$  和对应的标定物表面的世界坐标  $(X^w, Y^w, Z^w)$  也有相似的转换关系, 即

$$v^p = \frac{m_{11}^{wp} X^w + m_{12}^{wp} Y^w + m_{13}^{wp} Z^w + m_{14}^{wp}}{m_{21}^{wp} X^w + m_{22}^{wp} Y^w + m_{23}^{wp} Z^w + m_{24}^{wp}}, \quad (7)$$

$$\mathbf{M}^{wp} = \begin{bmatrix} m_{11}^{wp} & m_{12}^{wp} & m_{13}^{wp} & m_{14}^{wp} \\ m_{21}^{wp} & m_{22}^{wp} & m_{23}^{wp} & m_{24}^{wp} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{M}^{wp}$  为投影仪的参数矩阵,  $m_{11}^{wp} \sim m_{24}^{wp}$  为该矩阵中的元素。由于  $M_{34}^{wc}$  和  $M_{24}^{wp}$  是一个比例系数值, 通常假设  $M_{34}^{wc} = M_{24}^{wp} = 1$ , 所以还要求解  $\mathbf{M}^{wc}$  和  $\mathbf{M}^{wp}$  中其余元素的值。根据最小二乘法,  $\mathbf{M}^{wc}$  中其余元素为

$$\mathbf{m}^c = [m_{11}^{wc} \ m_{12}^{wc} \ \cdots \ m_{33}^{wc}]^T, \quad (9)$$

$$\mathbf{E}_{2i-1}^c = [X_i^w, Y_i^w, Z_i^w, 1, 0, 0, 0, 0, -u_i^c X_i^w, -u_i^c Y_i^w, -u_i^c Z_i^w], \quad (10)$$

$$\mathbf{E}_{2i}^c = [0, 0, 0, 0, X_i^w, Y_i^w, Z_i^w, 1, -v_i^c X_i^w, -v_i^c Y_i^w, -v_i^c Z_i^w], \quad (11)$$

$$F_{2i-1}^c = u_i^c, \quad (12)$$

$$F_{2i}^c = v_i^c, \quad (13)$$

$$\mathbf{m}^c = (\mathbf{E}^{cT} \mathbf{E}^c)^{-1} \mathbf{E}^{cT} \mathbf{F}^c, \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{m}^c$  是由  $\mathbf{M}^{wc}$  中的元素组成的列向量;  $\mathbf{E}_{2i-1}^c$  和  $\mathbf{E}_{2i}^c$  分别是矩阵  $\mathbf{E}^c$  的奇数行的行向量和偶数行的行向量;  $F_{2i-1}^c$  和  $F_{2i}^c$  分别是列向量  $\mathbf{F}^c$  的奇数行元素和偶数行元素; 下标  $i$  是指数字摄像机采集的像素点个数。

同理,  $\mathbf{M}^{wp}$  中的其余元素为

$$\mathbf{m}^p = [m_{11}^{wp} \ m_{12}^{wp} \ \cdots \ m_{23}^{wp}], \quad (15)$$

$$\mathbf{E}_i^p = [X_i^w, Y_i^w, Z_i^w, 1, -v^p X_i^w, -v^p Y_i^w, -v^p Z_i^w], \quad (16)$$

$$F_i^p = v_i^p, \quad (17)$$

$$\mathbf{m}^p = (\mathbf{E}^{pT} \mathbf{E}^p)^{-1} \mathbf{E}^{pT} \mathbf{F}^p, \quad (18)$$

式中:  $\mathbf{m}^p$  是由  $\mathbf{M}^{wp}$  中的元素组成的列向量;  $\mathbf{E}_{2i-1}^p$  和  $\mathbf{E}_{2i}^p$  分别是矩阵  $\mathbf{E}^p$  的奇数行的行向量和偶数行的行向量;  $F_{2i-1}^p$  和  $F_{2i}^p$  分别是列向量  $\mathbf{F}^p$  的奇数行元素和偶数行元素。

由以上可知, 校准数据为三维标定物上已知的世界坐标  $(X^w, Y^w, Z^w)$ 、对应的图像点的坐标  $(u^c, v^c)$  和 PMP 求得的  $v^p$ 。将校准数据代入 (6) 式和 (8) 式即可求得摄像机的参数矩阵  $\mathbf{M}^{wc}$  和投影仪的参数矩阵  $\mathbf{M}^{wp}$ 。然而, 高精密三维标定物的加工和维护比较困难, 且其校准数据也是有限的。基于最小二乘法进行标定时, 理论上可用的校准数据量越大, 标定结果的精度越高, 为此需设计一种立体标靶。

## 3 结构光系统的简易标定方法

基于上述分析, 设计了一种能获取大量校准数据的立体标靶, 如图 1 所示。立体标靶有左右两个互相垂直的平面。为保证立体标靶具有足够高的平

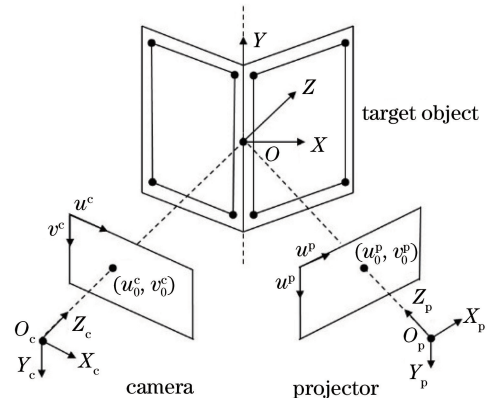


图 1 用于结构光系统标定的立体标靶图

Fig. 1 Stereo target for calibration of structured-light system

面度,在左右平面上采用纸板或者直接标靶平面上打印一个矩形框。为充分利用空间,所打印的矩形框的大小与标靶平面尽量保持相同。为了保证左侧平面和右侧平面坐标统一,制作标靶时两个平面在  $Y$  轴方向也尽量保持对齐。

立体标靶的三维世界坐标系的定义为: $X$  方向为从左到右的方向, $Y$  方向为从底部到顶部的方向, $Z$  方向是相关对应摄像机由近及远的方向,原点在两个平面交线的中间。通过精确测量可以知道左右两个平面内矩形框的 8 个角点的三维坐标( $X^w, Y^w, Z^w$ )。根据上述坐标系的定义,左侧平面内的空间点满足  $Z^w = -X^w$ ,右侧平面内的空间点满足  $Z^w = X^w$ 。因此可通过摄像机采集的二维图像找出平面中空间点对应的图像点中的坐标( $u^c, v^c$ ),建立二维图像中点的坐标( $u^c, v^c$ )和立体标靶中的点坐标( $X^w, Y^w$ )的对应矩阵关系,从而得到单应矩阵  $\mathbf{H}$ 。

### 3.1 像平面到空间平面的单应矩阵

立体标靶的一侧平面中点的坐标( $X^w, Y^w$ )与对应二维图像中点的坐标( $u^c, v^c$ )关系可以用单应变换来表示。单应矩阵,也称为单应变换或者二维射影变换,是一个非奇异的  $3 \times 3$  矩阵,表示将一个射影平面上的点映射到另一个射影平面上,如图 2 所示。在透视投影模型下,将立体标靶左侧像平面到空间平面的单应矩阵记为  $\mathbf{H}_1$ ,图像中点的坐标( $u^c, v^c$ )和其对应的立体标靶的世界坐标( $X^w, Y^w$ )之间的转换关系为

$$X_j^w = \frac{h_{11}u_j^c + h_{12}v_j^c + h_{13}}{h_{31}u_j^c + h_{32}v_j^c + 1}, \quad (19)$$

$$Y_j^w = \frac{h_{21}u_j^c + h_{22}v_j^c + h_{23}}{h_{31}u_j^c + h_{32}v_j^c + 1}, \quad (20)$$

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

式中: $h_{11} \sim h_{32}$ 为矩阵元。

把(19)式和(20)式变换一下,得到其等价的矩阵形式为

$$\mathbf{E}^h \mathbf{h} = \mathbf{F}^h, \quad (22)$$

$$\mathbf{h} = (\mathbf{E}^h)^{-1} \mathbf{F}^h, \quad (23)$$

$$\mathbf{h} = [h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}]^T, \quad (24)$$

$$\mathbf{E}_{2j-1}^h = [u_j^c, v_j^c, 1, 0, 0, 0, -u_j^c X_j^w, -v_j^c X_j^w], \quad (25)$$

$$\mathbf{E}_{2j}^h = [0, 0, 0, u_j^c, v_j^c, 1, -u_j^c Y_j^w, -v_j^c Y_j^w], \quad (26)$$

$$\mathbf{F}_{2j-1}^h = X_j^w, \quad (27)$$

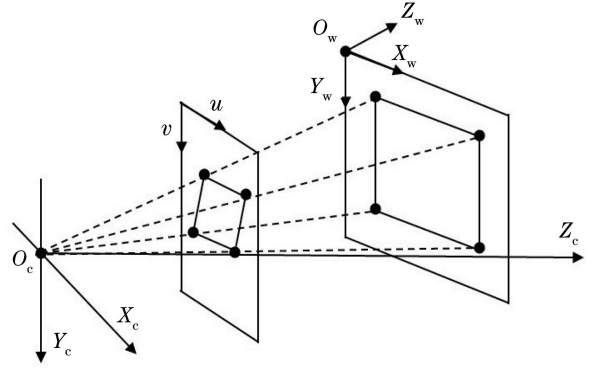


图 2 空间平面到像平面的透视投影图

Fig. 2 Perspective projection from space plane to image plane

$$\mathbf{F}_{2j}^h = Y_j^w, \quad (28)$$

式中: $\mathbf{h}$ 是由  $\mathbf{H}$  中的元素组成的列向量; $\mathbf{E}_{2j-1}^h$ 和  $\mathbf{E}_{2j}^h$ 分别是  $\mathbf{E}^h$  的奇数行的行向量和偶数行的行向量; $\mathbf{F}_{2j-1}^h$ 和  $\mathbf{F}_{2j}^h$ 分别是矩阵  $\mathbf{F}^h$  的奇数行元素和偶数行元素;下标  $j$  是指用于计算矩阵所用的点数。该问题需求解 8 个未知数,通过矩形框获取的 4 个角点数据,正好对应有 4 对匹配点,故该问题有唯一解,能够保证单应矩阵的计算准确度。

接下来将采集的图像的矩形框中所有点的坐标( $u^c, v^c$ )应用于矩阵  $\mathbf{H}_1$ ,得到与之相对应的( $X^w, Y^w$ )。按之前定义的三维世界坐标系  $X^w$  与  $Z^w$  之间的关系,即可得到立体标靶左侧矩阵方框内所有对应空间点的校准数据。

### 3.2 考虑畸变的非线性优化

由于设计和加工工艺方面的限制,摄像机镜头一般存在一定的畸变,并非理想的光学镜头。畸变可分为径向畸变、离心畸变和薄透镜畸变。一般只考虑径向畸变,在图像坐标系中的表达式为

$$u = u_d + k[(u_d - c_x)^2 + (v_d - c_y)^2]d_x^2(u_d - c_x), \quad (29)$$

$$v = v_d + k[(u_d - c_x)^2 + (v_d - c_y)^2]d_y^2(v_d - c_y), \quad (30)$$

式中:( $u_d, v_d$ )为畸变后的投影坐标,可由 CCD 像平面直接读取的实际坐标值;( $u, v$ )为理想的投影坐标,可由线性摄像机模型计算得到无畸变理想坐标值; $k$ 为一次径向畸变系数; $d_x$ 和  $d_y$ 为像元尺寸。

直线上无穷远点的像称为该直线的消隐点,空间中的平行簇通过理想透视投影模型会在平面上相交于消隐点。图 3 所示,空间中的一组平行线  $L_1$  和  $L_2$  分别经过透视投影,在二维图像  $\Omega$  上投影分别为  $l_1$  和  $l_2$ ,由其延长线可以得到消隐点  $V_1$ 。同



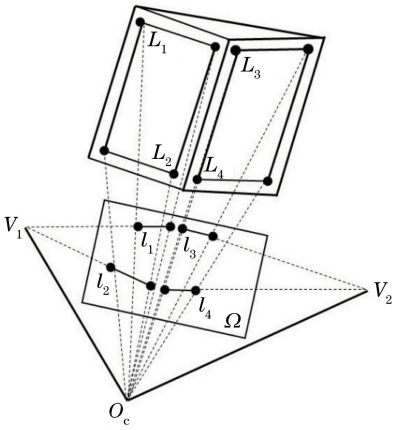


图3 两组正交平行线理想投影的几何模型图  
Fig. 3 Geometric model of ideal projection of two groups of orthogonal parallel lines

理,可以得到另一组平行线  $L_3$  和  $L_4$  分别经过透视投影,在二维图像  $\Omega$  上投影分别为  $l_3$  和  $l_4$ ,由其延长线可以得到消隐点  $V_2$ 。由上述设定的标靶模型可知,标靶两个平面必须相互垂直,两组平行线正交,故得到的两个消隐点为正交消隐点。

由透视投影原理可知,消隐点  $V_1$  和摄像机坐标系原点  $O_c$  的连线的空间向量( $V_1$ )与消隐点  $V_2$  和摄像机坐标系原点  $O_c$  的连线的空间向量( $V_2$ )相互垂直。可利用此性质来非线性优化参数,进一步矫正初始的8个点的坐标值,以使本文定标方法的精度更高。

要得到空间向量,首先需要将得到的消隐点的坐标  $V_1(u_1, v_1)$ 、 $V_2(u_2, v_2)$  从像素坐标系转换到摄像机坐标系  $V_1[(u_1 - c_x)d_x, (v_1 - c_y)d_y, f]$ 、 $V_2[(u_2 - c_x)d_x, (v_2 - c_y)d_y, f]$ ,其中  $(c_x, c_y)$  为主点坐标,  $f$  为摄像机焦距。以上参数可以通过对求得的  $M^{wc}$  进行正交三角(QR)分解<sup>[25]</sup>方法得到。

针对之前  $V_1$  与  $V_2$  正交的特性,建立摄像机参数的非线性优化函数,应用 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[23]</sup>最小化目标函数,实现对摄像机参数的优化,模型的目标函数为

$$F(k, c_x, c_y, f) = \frac{\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2}{\sqrt{V_1^2} \sqrt{V_2^2}} \quad (31)$$

根据(31)式,建立最小化目标函数的最优化问题为

$$F(k^*, c_x^*, c_y^*, f^*) = \min F, \quad (32)$$

式中:参数的上标 \* 代表该参数已优化。以分解求得的  $f, c_x, c_y$  作为初值,畸变系数  $k$  的初值取 0,以最优的  $k, f, c_x, c_y$  作为参数,更新  $M^{wc}$ ,进行重投影,设置阈值条件迭代校准矩阵对最初的投影坐

标进行矫正。结构光三维成像系统标定的整体流程图如图 4 所示。

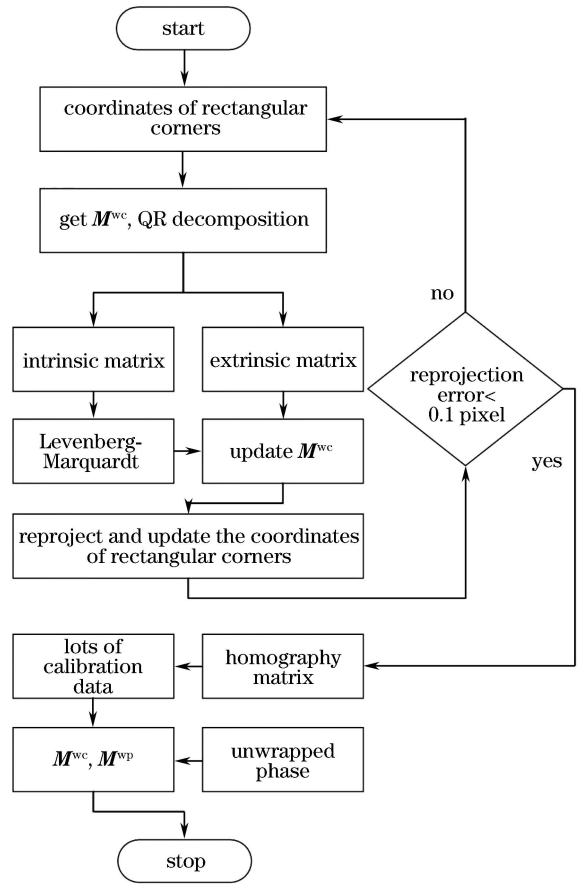


图4 系统标定流程图

Fig. 4 Flow chart of system calibration

## 4 实验结果与分析

实验采用的结构光标定系统如图 5(a)所示。该系统由 AVT(Allied Vision)公司提供的型号为 Prosilica GC 650 的摄像机, Casio 公司提供的型号为 XJ-A155V 的投影仪及自制的立体标靶组成。摄像机的分辨率为 659 pixel (H) × 493 pixel (V), H 代表横向, V 代表纵向,像元尺寸为 7.4 μm × 7.4 μm。投影仪的分辨率为 800 pixel (H) × 600 pixel (V)。分别用投影仪投射频率为 1, 4, 16, 64 的正弦相移编码 8 张图片,图 5(b)为摄像机采集到的频率为 16 的一帧正弦相移编码图。

依据第 3 节单应矩阵的求解算法,可以得到立体标靶左侧平面的像平面到空间平面的单应矩阵为

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0.0948 & 0.0013 & -29.6297 \\ 0.01592 & -0.0979 & 39.3748 \\ 0.0011 & 6.7888 \times 10^{-6} & 1 \end{bmatrix}, \text{ 立体}$$

标靶右侧平面的像平面到空间平面的单应矩阵为

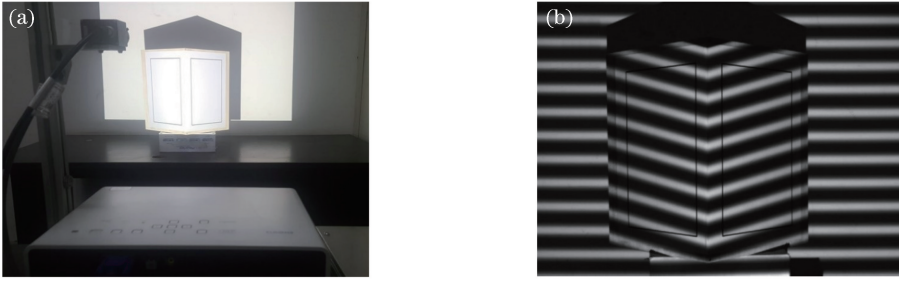


图5 立体标靶实验。(a)结构光标定系统图;(b)一帧正弦相移编码图

Fig. 5 Stereo target experiment. (a) Photo of structured-light calibration system; (b) one sinusoidal phase shift coding graph

$$H_r = \begin{bmatrix} 0.0591 & 3.7663 \times 10^{-4} & -18.6085 \\ -0.0100 & -0.0549 & 28.1312 \\ -7.8013 \times 10^{-4} & 4.3185 \times 10^{-5} & 1 \end{bmatrix}.$$

(RMSE)为 0.0519 mm。另外,对某一台阶进行测量,实验结果如图 7 和表 1 所示, $d_{12}$ 表示 plane1 和 plane2 之间的距离, $d_{23}$ 表示 plane2 和 plane3 之间的距离。实验的结果表明,该方法有较高的标定精度和稳健性。

实验得到近 10 万组校准数据,将这些数据代入公式求得摄像机参数矩阵为  $M^{wc} =$

$$\begin{bmatrix} 11.9564 & -0.0806 & 3.2006 & 298.8677 \\ 0.2886 & -11.2633 & 3.8360 & 430.7841 \\ 9.3925 \times 10^{-4} & -1.6595 \times 10^{-4} & 0.0125 & 1 \end{bmatrix},$$

在标定过程的简便性方面,将本文方法与 Zhang<sup>[13]</sup>的方法作对比,利用棋盘格采集 8 个姿态的标定数据。每个姿态需要采集一幅摄像机图片,投影仪同样投射频率分别为 1,4,16,64 的正弦相移编码图片。为创建出投影仪的目标图像,投影仪需要投射水平和垂直两个方向的正弦相移编码图片,共 512 张,并且保证在投影仪扫描过程中不能移动,这也给二维标靶带来一定不便。本文方法只需一次投影 32 张图片,并且不需要担心如何固定立体标靶的问题。实验采集过程中某一姿态

投影仪参数矩阵为  $M^{wp} =$

$$\begin{bmatrix} 0.0044 & -0.1089 & 0.0538 & 3.2378 \\ 9.3921 \times 10^{-4} & -5.1875 \times 10^{-4} & 0.0116 & 1 \end{bmatrix}.$$

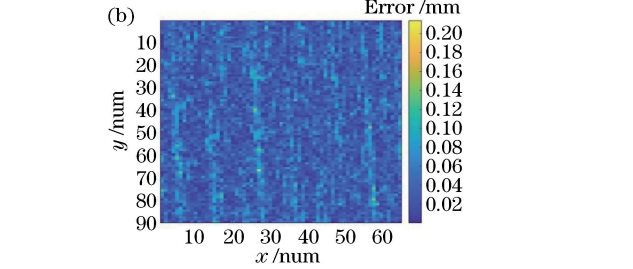
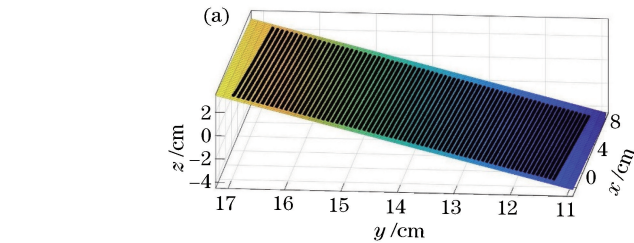


图6 平面三维测量结果。(a)拟合点云平面;(b)平面误差

Fig. 6 Three-dimensional measurement results of plane. (a) Plane of fitting point cloud; (b) plane error

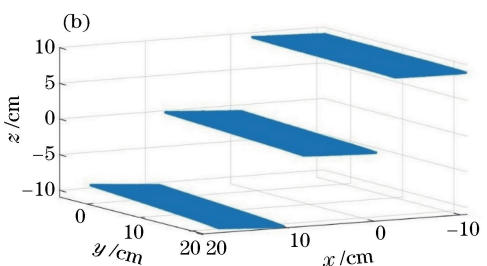
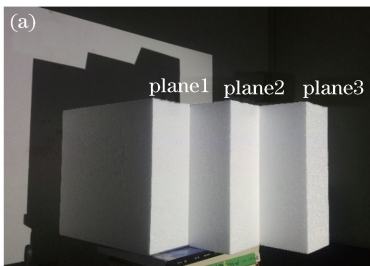


图7 台阶的三维测量结果。(a)台阶实物图;(b)三维重建结果

Fig. 7 Three-dimensional measurement results of step. (a) Photo of step; (b) three-dimensional reconstruction result

表 1 台阶面的测量距离

Table 1 Measurement distances between step planes

Distance	Nominal value /mm	Estimated value /mm	Absolute error /mm	Relative error /%
$d_{12}$	100	99.977	0.023	0.023
$d_{23}$	100	99.853	0.147	0.147

的摄像机视角如图 8(a)所示。通过求解相位可得到摄像机跟投影仪之间的对应关系,生成相应投影仪视角的图片如图 8(b)所示。由此可利用 Matlab

软件的标定工具箱进行标定。综上所述,本文方法在保证精度的同时极大地降低了标定过程的复杂度。

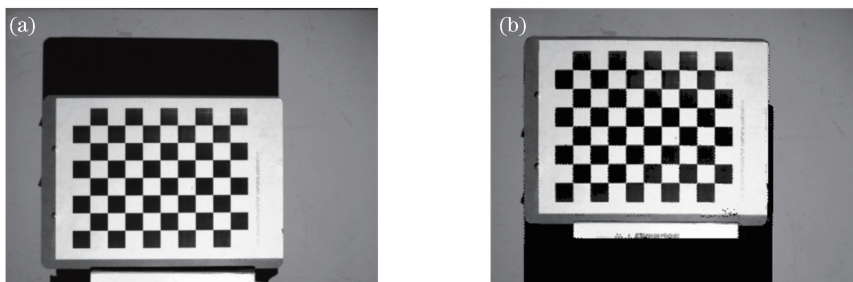
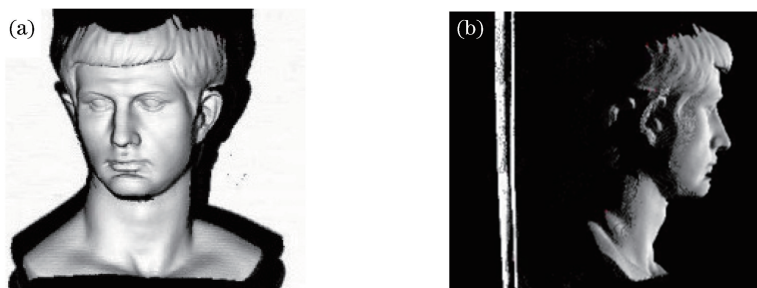
图 8 Zhang<sup>[13]</sup>的方法的标定过程。(a)摄像机视角;(b)投影仪视角Fig. 8 Calibration process of Zhang's method<sup>[13]</sup>. (a) Visual angle of camera; (b) visual angle of projector

图 9 三维重建点云图。(a)正交投影视图;(b)侧视图

Fig. 9 Reconstructed three-dimensional point cloud. (a) Orthographic projection view; (b) side view

为了直观地验证结构光三维成像系统的效果,测量了一个更复杂的石膏模型,如图 9 所示。结果表明,重建的三维几何曲面光滑,视觉效果优良。

## 5 结 论

提出一种简便、快速、高精度的结构光三维成像系统的标定方法。设计了一种立体标靶,利用单应矩阵获取大量标定数据。通过透视投影内在的标靶约束对标定参数进行优化,从而实现结构光系统的标定。实验结果表明,该方法能够对目标进行精确的测量和三维成像。与现有的方法相比,本文方法简化了标定步骤,降低了标定成本。需要说明的是,该方法的标定精度仍受限于标靶的制作精度。在后续的工作中,将从标靶的材质影响、标定点的快速精确获取等方面做研究,进一步提高结构光三维成像系统的标定精度。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Wang Y C, Liu K, Hao Q, *et al.* Robust active stereo vision using Kullback-Leibler divergence [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(3): 548-563.
- [3] Tian Z X, Chen W J, Su X Y. Method for improving accuracy and measurement speed of PMP using error diffusion binary encoded sinusoidal grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121201. 田紫霞, 陈文静, 苏显渝. 采用二元编码的正弦光栅提高 PMP 测量速度和精度的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121201.

- [4] Wang X, Zhang M M, Yu X, *et al.* Point cloud registration based on improved iterative closest point method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 2068-2077.  
王欣, 张明明, 于晓, 等. 应用改进迭代最近点方法的点云数据配准[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 2068-2077.
- [5] Ou P, Wang T, Li R X. A three-dimensional teeth measurement system based on structured light [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 011102.  
欧攀, 王婷, 李瑞祥. 一种基于结构光的牙齿三维测量系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 011102.
- [6] Wu Y C, Cao Y P, Xiao Y S, *et al.* On-line three-dimensional inspection using randomly phase-shifting fringe based on least-square iteration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1347-1353.  
武迎春, 曹益平, 肖焱山, 等. 任意相移最小二乘法迭代的在线三维检测[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1347-1353.
- [7] Yu X, Liu K. Face recognition based on phase measuring profilometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(6): 39-43.  
余祥, 刘凯. 基于相位测量轮廓术的人脸识别[J]. *光电工程*, 2016, 43(6): 39-43.
- [8] Guo Z, Fan Y Y, Liu S, *et al.* 3D to 2D: facial intrinsic shape description maps [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3391-3400.  
郭哲, 樊养余, 刘姝, 等. 三维到二维: 人脸本征形状描述图[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3391-3400.
- [9] Ribo M, Brandner M. State of the art on vision-based structured light systems for 3D measurements[C] // *International Workshop on Robotic Sensors: Robotic and Sensor Environments 2005*, September 30-October 1, 2005, Ottawa, Ont., Canada. New York: IEEE, 2005: 2-6.
- [10] Sung M H, Lim H, Kim H G, *et al.* Image unprojection for 3D surface reconstruction: a triangulation-based approach [C] // *2013 IEEE International Conference on Image Processing*, September 15-18, 2013, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE, 2013: 161-165.
- [11] Sobel I. On calibrating computer controlled cameras for perceiving 3-D scenes[J]. *Artificial Intelligence*, 1974, 5(2): 185-198.
- [12] Tsai R. 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*, 1987, 3(4): 323-344.
- [13] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [14] Xue J P, Su X Y, Dou Y F. A concentric circles and wedge grating-based camera self-calibration method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0308002.  
薛俊鹏, 苏显渝, 窦蕴甫. 基于同心圆光栅和楔形光栅的摄像机自标定方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0308002.
- [15] Villa J, Araiza M, Alaniz D, *et al.* Transformation of phase to  $(x, y, z)$ -coordinates for the calibration of a fringe projection profilometer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(2): 256-261.
- [16] Merner L, Wang Y J, Zhang S. Accurate calibration for 3D shape measurement system using a binary defocusing technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(5): 514-519.
- [17] Huang L, Chua P S K, Asundi A. Least-squares calibration method for fringe projection profilometry considering camera lens distortion [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(9): 1539-1548.
- [18] Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 083601.
- [19] Li Z W. Accurate calibration method for a structured light system[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(5): 053604.
- [20] Yin Y K, Peng X, Li A M, *et al.* Calibration of fringe projection profilometry with bundle adjustment strategy[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 542-544.
- [21] Han D, Chimienti A, Menga G. Improving calibration accuracy of structured light systems using plane-based residual error compensation[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 104106.
- [22] Chang M, Ho C S. Phase-measuring profilometry using sinusoidal grating [J]. *Experimental Mechanics*, 1993, 33(2): 117-122.
- [23] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory [M] // *Watson G A. Lecture notes in mathematics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1978, 630: 105-116.
- [24] Li J L, Hassebrook L G. Robust SVD-based calibration of active range sensors[J]. *Proceedings of*



SPIE, 2000, 4041: 68-77.

Technology, 2004: 27-30.

- [25] Cai T. Research on method and application of monocular vision three-dimensional reconstruction [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and

蔡涛. 单目视觉三维重建方法与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004: 27-30.