

# 基于立体视觉的光度立体 LED 光源位置参数标定方法

刘嘉缘, 王国晖\*

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 针对光度立体视觉中基于镜面反射的光源位置标定法操作复杂及误差较大等问题, 提出了一种基于立体视觉的 LED 光源位置参数标定方法。利用双目立体视觉系统依次拍摄光度立体中的 LED 光源, 利用基于立体视觉成像矩阵的最小二乘法计算光源的空间三维坐标, 通过光度立体与双目立体视觉系统中摄像机的旋转平移关系, 联立得到光源位置标定系统结构参数, 进而获得光度立体中 LED 光源相对于摄像机的空间位置关系。实验结果表明: 所提方法可以有效地解决镜面反射标定法操作繁琐的问题, 与基于镜面反射的方法相比, 所提方法通过操作方便的立体视觉系统即可获得精度更高的 LED 光源位置标定参数, 得到的光源对角线距离的平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 与镜面反射方法相比有较大程度的减小。

**关键词** 光源标定; 立体视觉; LED 光源; 位置参数; 光度立体

**中图分类号** TP391 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/LOP202259.1615001

## Stereo Vision-based Calibration Approach for Position Parameters of LED in Photometric Stereo

Liu Jiayuan, Wang Guohui\*

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

**Abstract** Focusing on the problems of complex operation and large error of the light source position calibration method based on specular reflection in photometric stereo vision, this paper proposes a method of light-emitting diode (LED) light source position parameter calibration based on stereo vision. In photometric stereo, the LED light source is photographed using binocular stereo vision system, and the three-dimensional coordinates of the light source are calculated using the least square method based on the stereo vision imaging matrix. Simultaneously, the structural parameters of the light source position calibration system are obtained through the rotation and translation relationships between the cameras in the photometric stereo and binocular stereo vision systems, and the spatial position relationship of the LED light source, which is relative to the camera in the photometric stereo system, is obtained. The experimental result shows that the proposed method can effectively solve the problem of the cumbersome operation of the specular reflection calibration method, and when compared to the method based on specular reflection, the proposed method can obtain more accurate LED light source position calibration parameters using the easy-to-operate stereo vision system. The mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) of the light source diagonal distance obtained by the proposed method are lower than those obtained by the specular reflection method.

**Key words** light source calibration; stereo vision; LED light source; position parameter; photometric stereo

## 1 引言

光度立体 (PS) 是医学研究、考古学和在线工业测量中的一种重要形状重建技术, 通过分析图像灰度与

图像形状的关系, 分析物体在不同光源照射下的表面亮度变化, 仅用少量图像可获取三维表面信息, 能够对物体细节、特征甚至无纹理的光滑表面等方面进行良好的三维形貌重建<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-06-18; 录用日期: 2021-06-27

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2022JM-318)、国家自然科学基金 (61102144)

通信作者: \*boolen@126.com

由于光度立体视觉技术依赖光源信息,如入射光方向、入射光强度及物体表面法向等物理因子,要想通过物体表面点亮度恢复出精度较高的表面形状,光源位置参数需精确标定<sup>[3-4]</sup>。为此,许多学者开始专注于光度立体视觉三维重建中LED光源的位置标定方法研究。Takai等<sup>[5]</sup>通过提取1或2个镜面高光点设计高光点与光源之间的三角关系,最终确定光源位置及其光照方向。Schmieders等<sup>[6]</sup>则借助特殊设计的平面作为探测器,利用特殊形状产生位置约束,扩展了光源与摄像机的多视图位置,完成对光源位置的标定。而Xie等<sup>[7]</sup>研究了一种基于镜面反射的光源参数标定方法,该方法利用高光点信息求解光源空间坐标。然而,传统的光度立体视觉算法直接假定光源围绕摄像机的入瞳中心呈均匀对称分布,或者采用手工测量方法,由于摄像机入瞳中心的实际空间位置无法确切给出,因此会出现很大误差。传统借助镜面反射标定物的标定方法虽能有效得到LED光源位置,但由于摄像机光轴无法严格垂直于标定物的像平面,并且操作步骤繁琐复杂,反射成像时特征点提取的难度提升,导致光源位置的标定结果存在很大误差,重建结果也产生了一定程度的模糊与变形。因此,精确标定LED光源的位置在光度立体算法中至关重要。

为此,本文提出了一种新颖的基于立体视觉的光度立体LED光源位置参数标定方法。所提方法引入双目立体视觉<sup>[8]</sup>的策略,结合立体视觉技术精度较高、适应性强、设备简单等特点,通过三台摄像机构造两组立体视觉系统,并利用基于成像矩阵的最小二乘法解算LED光源相对摄像机入瞳中心的位置<sup>[9-11]</sup>。最后通过实验对所提光度立体系统中关于LED光源位置的标定方法进行验证。

## 2 基于立体视觉的LED光源位置参数标定系统

基于光度立体的三维重建通过采集物体在不同光照条件下的图像序列,建立图像灰度与物体表面法向量之间相互关系的辐照度方程组,进而求解物体表面法向量分布;利用积分解算物体表面深度 $Z$ ,最终求出图像域 $\Omega$ 中每个像素 $\mathbf{p}$ 所对应三维空间中的共轭物点 $\mathbf{x}$ 。光度立体技术的常用模型<sup>[12]</sup>为

$$I^i(\mathbf{p}) = \rho(\mathbf{p}) \cdot \mathbf{s}^i \cdot \mathbf{n}(\mathbf{p}) = \rho(\mathbf{p}) \cdot I_0 \frac{(\mathbf{x}_s - \mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{p})}{\|\mathbf{x}_s - \mathbf{x}\|^3}, \quad (1)$$

式中: $I^i(\mathbf{p})$ 表示像素点 $\mathbf{p}$ 的图像灰度, $i \in \{1, \dots, m\}$ ;  $\mathbf{s}^i$ 表示点光源的方向向量; $\rho(\mathbf{p})$ 表示像素点 $\mathbf{p}$ 所对应的物体表面点的反射率; $I_0$ 表示光源主光强; $\mathbf{x}_s$ 为LED光源的位置参数; $\mathbf{x}$ 为物体表面点坐标; $\mathbf{n}(\mathbf{p})$ 表示物体表面点处的法向量。由此可知,光度立体视觉算法以光照模型作为获取物体表面法向的数学基础,将光源强度、光源位置参数及表面法向统一于式(1)中,建立三者之间的关系<sup>[13]</sup>。

对于任何一点 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ ,根据LED的光照信息可获得更精确的光度立体视觉模型。因此,针对LED光源位置的标定问题提出基于立体视觉的方法,整体系统如图1所示,其中图1(a)为系统实际实验图,图1(b)为光度立体中LED光源位置实际分布图。系统包括1台Chameleon CMLN-13S2M摄像机、8个LED光源、1个控制LED光源依次闪烁的Arduino系统、构成双目立体视觉系统的2台Grasshopper GRAS-50S5M摄像机。由立体视觉系统,可依次采集由A~H顺时针按序闪烁的LED光源图像序列。

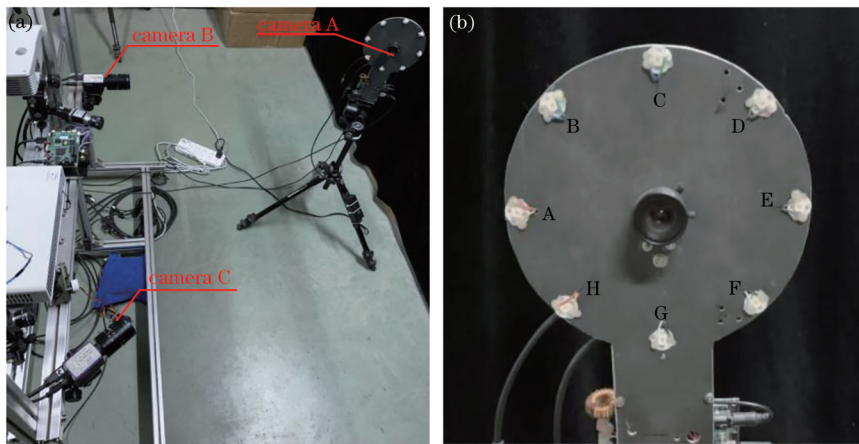


图1 基于立体视觉的LED光源位置标定系统。(a)实际实验场景图;(b)LED光源分布示意图

Fig. 1 Position calibration system of the LED light source based on stereo vision. (a) Diagram of actual experimental scene; (b) diagram of the LED light source distribution

双目立体视觉基于图像视差和摄像机内外参数来计算被检测物体的三维空间坐标,该方法既具备了

工作效率高、系统结构简单、精度相当适宜、成本低等优点,又十分适用于设备生产制造现场,实现对产品质

量的非接触式检测和控制<sup>[14]</sup>。因此,针对基于镜面反射的 LED 光源位置标定法操作时摄像机光轴无法严格垂直标定物的像平面以及实际步骤繁琐复杂等问题,本文提出一种基于立体视觉的光度立体 LED 光源位置参数标定方法。结合光度立体视觉、双目立体视觉设计的 LED 光源位置标定系统结构如图 2 所示。

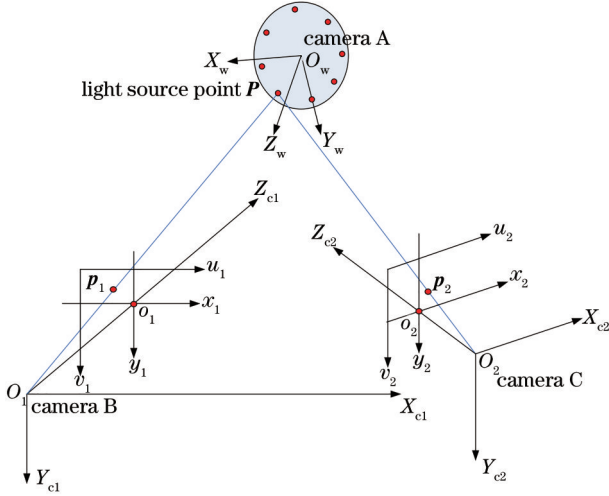


图 2 LED 光源位置参数标定系统

Fig. 2 LED light source position parameter calibration system

LED 光源位置标定系统中,光度立体摄像机 A 所在三维坐标系为  $O_w - X_w Y_w Z_w$ , 标定 LED 光源空间三维坐标时,要确保摄像机 A 与 LED 光源须在摄像机 B、C 构成的立体视觉系统视场范围内,并保证摄像机 A、B 之间存在公共视场。双目摄像机 B、C 分别采集依次闪烁的 LED 光源图像,根据立体视觉的几何成像原理,通过基于成像矩阵的最小二乘法可计算得到 LED 光源的空间坐标信息<sup>[15]</sup>。以双目立体视觉系统中的左摄像机为基准坐标系,联立标定两组双目立体视觉系统,可实现对系统摄像机结构参数的解算,经一次坐标系转换,获取 LED 光源在光度立体系统的空间位置。

### 3 基于立体视觉的 LED 光源空间坐标计算

基于双目立体视觉的 LED 光源位置标定系统中含摄像机 A、B、C,均需进行单摄像机标定,以及进行摄像机 B、C 与 A、B 之间的双目立体视觉系统标定,从而获得摄像机内部参数、外部参数及双目立体视觉结构参数,解算出 LED 光源三维空间坐标,重建 LED 光源在光度立体系统中的真实空间位置。

#### 3.1 单摄像机标定

摄像机标定是三维计算机视觉中从二维图像提取度量信息的必要步骤,在计算机视觉和摄影测量中得到了广泛的研究。在双目立体视觉应用中,摄像机内、外部参数的标定精度直接影响 LED 光源三维空间位置的精确度,提高标定精度是后续工作的基础和关

键<sup>[16]</sup>。单摄像机标定可求解摄像机的内参和外参,如表 1 所示。内部参数是描述摄像机本身性质的物理光学参数,包括主点  $(u_0, v_0)$ 、 $u$  和  $v$  两个方向上的有效焦距  $f_x$  和  $f_y$ ;外部参数指摄像机坐标系相对于世界坐标系的方向和位置<sup>[17]</sup>。

表 1 摄像机参数

Table 1 Camera parameters

| Camera internal parameter   | Camera external parameter  |
|---|--|
| $\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ |

张正友标定法采用非线性摄像机模型,是一种基于 2D 平面靶标的摄像机标定方法,通过摄像机拍摄的任意方位棋盘格,求解棋盘格平面和像平面之间的单应矩阵,进而求解摄像机内、外部参数矩阵,构造目标函数,优化求精。该方法无需知道任意位姿棋盘格靶标的运动约束,可有效避免传统方法设备要求高与操作繁琐等缺点,保证了标定的高精度<sup>[18]</sup>。

#### 3.2 立体视觉联立标定系统

LED 光源位置标定系统中的立体视觉联合标定通过三台摄像机构造的两组立体视觉联立求解光源位置定位过程中所涉及的系统结构参数转换问题<sup>[19]</sup>,立体视觉联立标定系统结构示意图如图 3 所示。棋盘格靶标是实现立体视觉系统中摄像机联合标定的必要条件,作用是摄像机联合定位提供相应的标定角点。标定光源位置时将联合三个摄像机的内部参数、外部参数以及两组立体视觉系统结构参数,以确保所标定的光度立体系统中 LED 光源位置的唯一性与准确性。

根据针孔成像模型,  $O_1 - X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ 、 $O_2 - X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$  分别为双目立体视觉中摄像机 B、C 所对应的摄像机坐标系,三维场景中任意一 LED 光源所对应的空间坐标

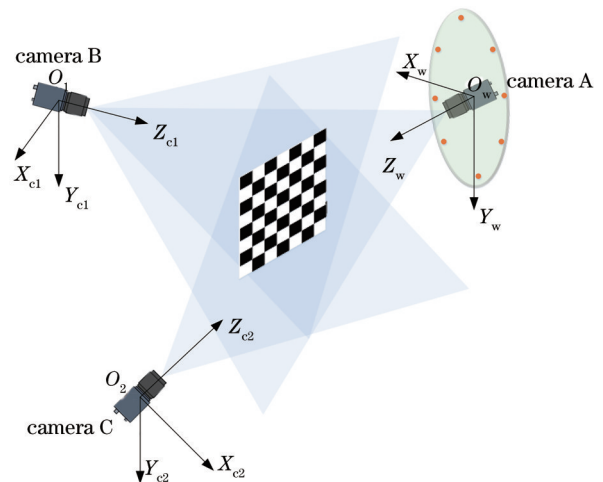


图 3 立体视觉联立标定系统结构示意图

Fig. 3 Schematic of the stereo vision simultaneous calibration system

为  $L_w(X_w, Y_w, Z_w)$ , 在左、右摄像机坐标系下的坐标分别为  $L_{cl}(X_{cl}, Y_{cl}, Z_{cl})$  和  $L_{cr}(X_{cr}, Y_{cr}, Z_{cr})$ 。立体视觉系统中 LED 光源空间坐标满足的关系式为

$$\begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_l & \mathbf{T}_l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X_{cr} \\ Y_{cr} \\ Z_{cr} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_r & \mathbf{T}_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{R}_l$  和  $\mathbf{T}_l$ ,  $\mathbf{R}_r$  和  $\mathbf{T}_r$  分别为左、右摄像机的旋转矩阵和平移向量。结合式(2)、(3)可得到两个双目摄像机之间的坐标转换关系:

$$\begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_l \mathbf{R}_r^{-1} & \mathbf{T}_l - \mathbf{R}_l \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{T}_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cr} \\ Y_{cr} \\ Z_{cr} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{21} & \mathbf{T}_{21} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cr} \\ Y_{cr} \\ Z_{cr} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{R}_{21}$ 、 $\mathbf{T}_{21}$  分别是立体视觉系统中 B、C 摄像机之间相互转换的旋转矩阵和平移矢量。

### 3.3 LED 光源三维坐标测量

在基于立体视觉的 LED 光源位置参数标定系统中, 可借助基准坐标系辅助摄像机之间的立体视觉联立标定, 进而得到三维坐标系之间的转换关系, 实现光度立体中 LED 光源的空间三维坐标解算<sup>[20]</sup>。假设双目立体视觉系统中左摄像机 B 为基准坐标系, 此时双目立体视觉成像公式为

$$Z_{cl} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{A}_1 \quad 0] \begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,11} & m_{1,12} & m_{1,13} & m_{1,14} \\ m_{1,21} & m_{1,22} & m_{1,23} & m_{1,24} \\ m_{1,31} & m_{1,32} & m_{1,33} & m_{1,34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$Z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{A}_2 \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{12} & \mathbf{T}_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{2,11} & m_{2,12} & m_{2,13} & m_{2,14} \\ m_{2,21} & m_{2,22} & m_{2,23} & m_{2,24} \\ m_{2,31} & m_{2,32} & m_{2,33} & m_{2,34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将式(5)、(6)联立, 并改写为  $\mathbf{C} \cdot \mathbf{L}_{cl} = \mathbf{D}$  的矩阵形式, 表示为

$$\begin{bmatrix} m_{1,31} \cdot u_1 - m_{1,11} & m_{1,32} \cdot u_1 - m_{1,12} & m_{1,33} \cdot u_1 - m_{1,13} \\ m_{1,31} \cdot v_1 - m_{1,21} & m_{1,32} \cdot v_1 - m_{1,22} & m_{1,33} \cdot v_1 - m_{1,23} \\ m_{2,31} \cdot u_2 - m_{2,11} & m_{2,32} \cdot u_2 - m_{2,12} & m_{2,33} \cdot u_2 - m_{2,13} \\ m_{2,31} \cdot v_2 - m_{2,21} & m_{2,32} \cdot v_2 - m_{2,22} & m_{2,33} \cdot v_2 - m_{2,23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,14} - m_{1,34} \cdot u_1 \\ m_{1,24} - m_{1,34} \cdot v_1 \\ m_{2,14} - m_{2,34} \cdot u_2 \\ m_{2,24} - m_{2,34} \cdot v_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: 矩阵  $\mathbf{C}$  为非方阵。因此通过最小二乘法解算基准坐标系下的 LED 光源空间坐标, 表达式为

$$\mathbf{L}_{cl} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{D}. \quad (8)$$

此时, 在摄像机 A、B 所构成的立体视觉系统中, 再次假设以左摄像机 A 为基准坐标系, 根据式(4)可得到光度立体系统中摄像机作为基准坐标系的 LED 光源空间坐标  $L_w(X_w, Y_w, Z_w)$ :

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}'_{21} & \mathbf{T}'_{21} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{R}'_{21}$ 、 $\mathbf{T}'_{21}$  分别是立体视觉系统中 A、B 摄像机之间相互转换的旋转矩阵和平移矢量。

## 4 系统标定结果与分析

### 4.1 摄像机标定结果

基于 LED 光源位置参数标定方法, 获取单摄像机内参及立体视觉系统的结构参数, 以上过程均通过 MATLAB 软件编程实现。标定结果分别如表 2 和表 3 所示。

采用重投影误差评定单摄像机标定结果和双目立体视觉系统结构参数标定结果的精确度, 结果分别如图 4、图 5 所示, 重投影误差最大值在 0.25 个像素以内。

表 2 摄像机内参

Table 2 Camera internal parameters

| Camera   | Focal length |           | Principal point |          | Radial distortion |        |
|----------|--------------|-----------|-----------------|----------|-------------------|--------|
|          | $f_x$        | $f_y$     | $u_0$           | $v_0$    | $k_1$             | $k_2$  |
| Camera A | 2225.8629    | 2227.6786 | 659.0179        | 506.3386 | -0.1104           | 0.4042 |
| Camera B | 2394.9793    | 2396.0596 | 664.5126        | 481.5372 | -0.0825           | 0.3242 |
| Camera C | 2407.6362    | 2407.8217 | 632.8595        | 467.3357 | -0.0824           | 0.2748 |

表 3 立体视觉系统结构参数

Table 3 Structural parameters of stereo vision system

| Binocular camera (A, B)  |   | Binocular camera (B, C)   |  |
|--|---|---|--|
| Rotation matrix  | Translation matrix  | Rotation matrix   | Translation matrix   |
| $\begin{bmatrix} -0.5713 & 0.1159 & -0.8124 \\ -0.0985 & 0.9731 & 0.2081 \\ 0.8147 & 0.1989 & -0.5445 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -366.8018 \\ -253.3272 \\ 1869.4907 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.6894 & 0.0342 & -0.7236 \\ -0.0533 & 0.9985 & -0.0035 \\ 0.7224 & 0.0410 & 0.6902 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -1094.9922 \\ 32.2841 \\ 52.5594 \end{bmatrix}$ |

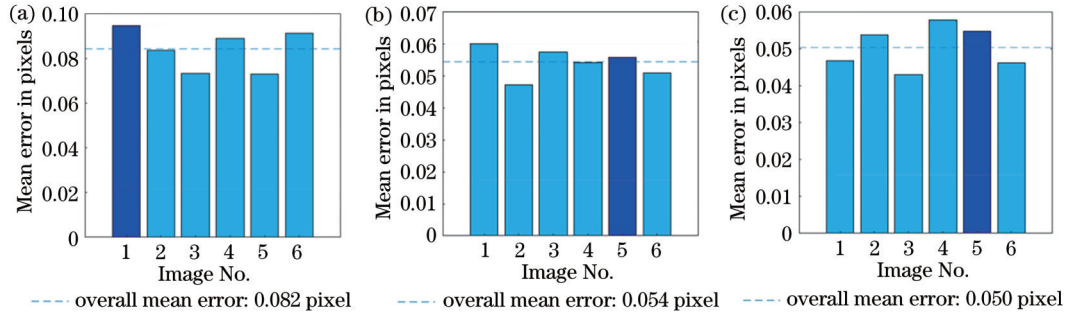


图 4 摄像机重投影误差。(a)摄像机 A; (b)摄像机 B; (c)摄像机 C  
Fig. 4 Reprojection error of the camera. (a) Camera A; (b) camera B; (c) camera C

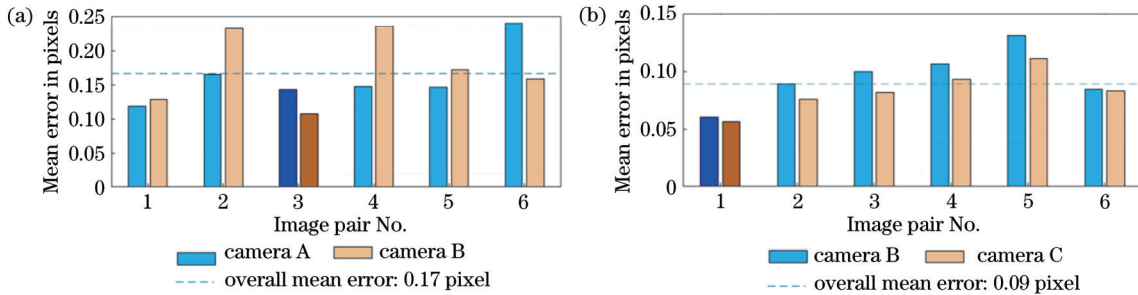


图 5 双目立体视觉系统重投影误差。(a)摄像机 A、B; (b)摄像机 B、C  
Fig. 5 Reprojection error of binocular stereo vision system. (a) Camera A, B; (b) camera B, C

### 4.2 光源位置标定结果

为了清晰地检测 LED 光源所在区域,背景须保持较高对比度,通过摄像机 B、C 构成的立体视觉系统拍摄从 A~H 顺时针依次闪烁的 LED 光源,如图 6 所示。

为增强相对背景中局部特征信息的检测性并突出重点检测区域,采用图像滤波的步骤对 LED 光源拍摄图像进行预处理,消除图像噪声和不必要的冗余信息,提高检测速度。

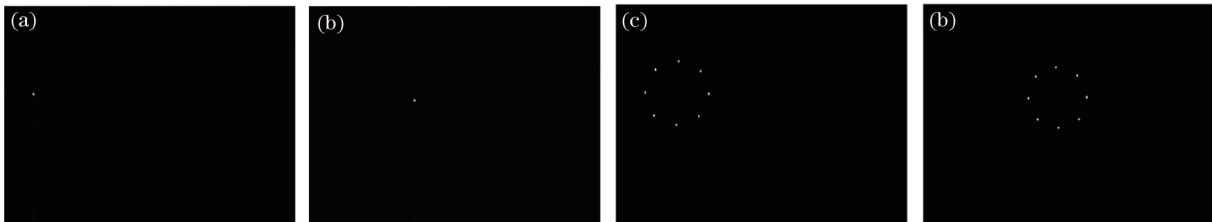


图 6 双目摄像机所拍摄的 LED 光源图像。(a)(b)左右摄像机分别拍摄的 LED 光源 A; (c)(d)左右摄像机分别拍摄的 LED 光源 A~H  
Fig. 6 LED light source images captured by the binocular camera. (a) (b) LED light source A captured by left and right cameras; (c) (d) LED light source A~H captured by left and right cameras

光度立体系统中 LED 光源位置标定仍然采用 MATLAB 编程实现。双目立体视觉系统标定得到 LED 光源三维坐标后,应用式(4)所示结构关系对得到的 LED 光源空间三维坐标进行转换计算,得到光度立体系统中 LED 光源空间三维坐标标定结果,如表 4 所示。

所设计的 LED 光源位置标定系统以摄像机 A 的入瞳中心为坐标系原点,但摄像机入瞳中心的实际空间位置无法确切给出,导致无法精确判定 LED 光源相对入瞳中心的真实坐标分布情况。因此,根据光源分布于同一平面的特点,采用对角线的距离误差来有效判定光源分布,进而判定标定的光源位置精度。根据图 1

所标注的 LED 光源分布,计算光度立体视觉系统中 LED 光源对角线的欧氏距离  $l_{AE}$ 、 $l_{BF}$ 、 $l_{CG}$ 、 $l_{DH}$ ,如表 5 所示。

表 4 基于立体视觉的 LED 光源三维坐标  
Table 4 3D coordinates of LED light sources based on stereo vision

| LED light source | Calibration value of space 3D coordinate /mm |
|------------------|--|
| $A(X, Y, Z)$     | (109.11, 9.49, -18.22)                       |
| $B(X, Y, Z)$     | (81.87, -56.13, -18.21)                      |
| $C(X, Y, Z)$     | (17.30, -82.04, -19.18)                      |
| $D(X, Y, Z)$     | (-47.21, -56.28, -21.45)                     |
| $E(X, Y, Z)$     | (-73.91, 9.19, -23.34)                       |
| $F(X, Y, Z)$     | (-46.95, 75.59, -23.34)                      |
| $G(X, Y, Z)$     | (17.84, 101.24, -22.12)                      |
| $H(X, Y, Z)$     | (82.67, 74.91, -20.19)                       |

表 5 基于立体视觉的 LED 光源对角线距离  
Table 5 Diagonal distance of LED light sources based on stereo vision

| Parameter    | Value  |
|--------------|--------|
| $l_{AE}$ /mm | 183.10 |
| $l_{BF}$ /mm | 184.32 |
| $l_{CG}$ /mm | 183.31 |
| $l_{DH}$ /mm | 184.61 |

### 4.3 系统精度分析

为了验证所提方法的有效性,采用传统的基于镜面反射的 LED 光源位置标定方法<sup>[7]</sup>进行对比,得到光度立体系统中 LED 光源空间三维坐标标定结果和光度立体系统中 LED 光源对角线距离结果,分别如表 6 和表 7 所示。

图 7 为两种方法对同一分布的 LED 光源空间位置进行标定所得到的实验结果,其中五角星、圆点分别表示基于镜面反射、立体视觉方法标定的 LED 光源空

表 6 基于镜面反射法的 LED 光源三维坐标

Table 6 3D coordinates of LED light sources based on specular reflection method

| LED light source | Calibration value of space 3D coordinate /mm |
|------------------|--|
| $A(X, Y, Z)$     | (77.14, -11.78, 15.78)                       |
| $B(X, Y, Z)$     | (51.71, 46.19, 48.42)                        |
| $C(X, Y, Z)$     | (-7.21, 83.08, 6.43)                         |
| $D(X, Y, Z)$     | (-64.47, 53.03, 30.22)                       |
| $E(X, Y, Z)$     | (-85.78, -4.11, 107.94)                      |
| $F(X, Y, Z)$     | (-62.53, -69.55, -22.40)                     |
| $G(X, Y, Z)$     | (-6.23, -93.71, -10.28)                      |
| $H(X, Y, Z)$     | (51.01, -69.85, -16.61)                      |

表 7 基于镜面反射法的 LED 光源对角线距离

Table 7 Diagonal distance of LED light sources based on specular reflection method

| Parameter    | Value  |
|--------------|--------|
| $l_{AE}$ /mm | 187.34 |
| $l_{BF}$ /mm | 177.38 |
| $l_{CG}$ /mm | 177.58 |
| $l_{DH}$ /mm | 175.01 |

间位置。图 7(a)是两种方法标定得到的 LED 光源位置投影至  $X_w Y_w$  方向的分布图像,由于实际 LED 光源均匀分布于固定直径圆盘外围,因此从图中可以看出,立体视觉法标定结果更贴合 LED 光源真实空间分布。图 7(b)为 LED 光源位置投影至  $Y_w Z_w$  方向的分布图像,可直观得到基于镜面反射方法的 LED 光源在  $Z_w$  轴方向分布不均,坐标相对不稳定。因此,从图 7 可以看出,所提立体视觉方法可得到较为理想的 LED 光源空间位置,标定误差相比镜面反射方法有较大程度的减小。

为了定量地比较标定结果,使用对角线标定值与真实值之间的距离平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)来对基于镜面反射法的 LED 光源位置标

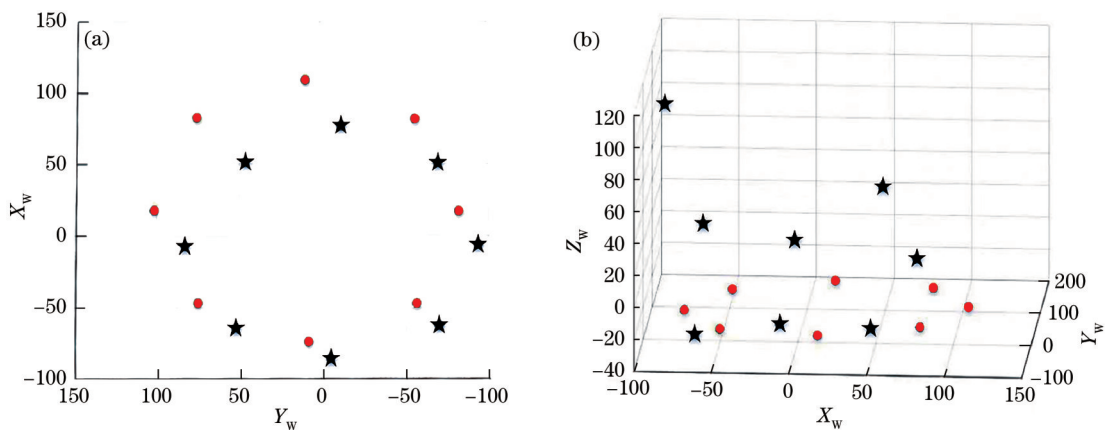


图 7 LED 光源位置标定实验结果。(a)  $X_w Y_w$  方向;(b)  $Y_w Z_w$  方向

Fig. 7 LED light source position calibration experiment results. (a)  $X_w Y_w$  direction; (b)  $Y_w Z_w$  direction

定结果和双目立体视觉的 LED 光源位置标定结果进行比较分析。MAE 和 RMSE 表达式分别为

$$E_{MA} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |L_i - \tilde{L}_i|, \quad (10)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |L_i - \tilde{L}_i|^2}, \quad (11)$$

式中:  $m$  为 LED 光源对角线个数序号;  $L_i$ 、 $\tilde{L}_i$  分别为 LED 光源对角线在序列  $i$  处的标定值距离和真实值距离。基于镜面反射、立体视觉的 LED 光源三维坐标标定误差比较如表 8 所示。由表 8 可知, 对于光度立体系统中 LED 光源位置, 基于镜面反射方法的 MAE 和 RMSE 分别为 6.34 mm 和 6.65 mm, 基于立体视觉方法的 MAE 和 RMSE 分别为 0.63 mm 和 0.66 mm。

表 8 基于镜面反射、立体视觉的 LED 光源三维坐标误差

Table 8 Three-dimensional coordinate error of the LED light source based on specular reflection and stereo vision

| Parameter | Three-dimensional coordinate error / mm |                      |
|-----------|---|----------------------|
|           | Specular reflection method              | Stereo vision method |
| MAE       | 6.34                                    | 0.63                 |
| RMSE      | 6.65                                    | 0.66                 |

由表 4~8 所示的 LED 光源三维空间位置标定结果、LED 光源对角线距离、MAE、RMSE 可以得出, 所提基于立体视觉的 LED 光源位置参数标定方法解决了镜面反射标定法操作繁琐的问题, 同时降低了标定误差。LED 光源位置标定结果验证了所提方法的有效性, 为光度立体中 LED 光源位置的标定提供了一种更高效、精确的解决办法。

## 5 结 论

提出了一种基于立体视觉的光度立体 LED 光源位置参数标定方法, 解决了光度立体视觉三维重建中传统的镜面反射法由于摄像机光轴无法严格垂直标定物的像平面, 并且操作步骤繁琐复杂导致光源位置标定结果误差较大的问题。在 LED 光源位置参数标定方法中, 利用双目立体视觉系统依次拍摄光度立体 LED 光源, 推导 LED 光源空间三维坐标成像矩阵, 构建基于成像矩阵的最小二乘求解方法; 通过光度立体与双目立体视觉系统中摄像机的旋转平移关系, 构造两组立体视觉系统, 采用张正友标定技术标定摄像机内部参数、外部参数及双目立体视觉结构参数, 进而联立解算光度立体系统中 LED 光源相对摄像机入瞳中心的空间位置关系。实验结果验证了立体视觉方法的有效性, 为光度立体中 LED 光源位置参数的标定提供了一种简便高效的解决办法。下一步研究将重点围绕基于平面的光度立体中 LED 光源位置参数的快速、高精度求解等内容展开。

## 参 考 文 献

- [1] Xie L M, Song Z, Jiao G H, et al. A practical means for calibrating an LED-based photometric stereo system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 64: 42-50.
- [2] 王国辉, 张璇. 透视投影下混合表面 3D 重建的快速 SFS 算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1215003.  
Wang G H, Zhang X. Fast shape-from-shading algorithm for 3D reconstruction of hybrid surfaces under perspective projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1215003.
- [3] 聂颖, 宋展, 焦国华. 一种基于近似点光源模型的光度立体视觉系统标定方法[J]. *集成技术*, 2016, 5(5): 38-48.  
Nie Y, Song Z, Jiao G H. A novel calibration method for the photometric stereo system with quasi-point light sources[J]. *Journal of Integration Technology*, 2016, 5(5): 38-48.
- [4] Woodham R J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images[J]. *Optical Engineering*, 1980, 19: 139-144.
- [5] Takai T, Maki A, Niinuma K, et al. Difference sphere: an approach to near light source estimation[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, 113(9): 966-978.
- [6] Schnieders D, Wong K Y K. Camera and light calibration from reflections on a sphere[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2013, 117(10): 1536-1547.
- [7] Xie W Y, Nie Y, Song Z, et al. Mesh-based computation for solving photometric stereo with near point lighting[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2019, 39(3): 73-85.
- [8] Asada M, Tanaka T, Hosoda K. Visual tracking of unknown moving object by adaptive binocular visual serving [C]//Proceedings of 1999 IEEE/SICE/RSJ. International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, August 18, 1999, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 1999: 249-254.
- [9] 杨琼楠, 马天力, 杨聪锟, 等. 基于优化采样的 RANSAC 图像匹配算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101104.  
Yang Q N, Ma T L, Yang C K, et al. RANSAC image matching algorithm based on optimized sampling[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101104.
- [10] 李硕, 韩迎东, 王双, 等. 基于 Pearson 相关系数的图像误匹配点剔除算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0810025.  
Li S, Han Y D, Wang S, et al. Algorithm for eliminating mismatched points based on Pearson correlation coefficient[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0810025.
- [11] Durrant-Whyte H, Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(2): 99-110.
- [12] Quéau Y, Durix B, Wu T, et al. LED-based photometric stereo: modeling, calibration and numerical solution[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*,

- 2018, 60(3): 313-340.
- [13] Ma L, Liu J R, Pei X, et al. Calibration of position and orientation for point light source synchronously with single image in photometric stereo[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 4024-4033.
- [14] 姜涛, 程筱胜, 崔海华, 等. 基于单应性矩阵的变焦双目视觉标定方法[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0315005.  
Jiang T, Cheng X S, Cui H H, et al. Calibration method of binocular vision system with zoom lens based on homography matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0315005.
- [15] 曹之乐, 严中红, 王洪. 双目立体视觉匹配技术综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(2): 70-75.  
Cao Z L, Yan Z H, Wang H. Summary of binocular stereo vision matching technology[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(2): 70-75.
- [16] 王国琿, 钱克矛. 线阵相机标定方法综述[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111011.  
Wang G H, Qian K M. Review on line-scan camera calibration methods[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111011.
- [17] 程子怡, 卢荣胜, 毛翠丽. 光亮表面双目立体视觉三维形貌测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071202.  
Cheng Z Y, Lu R S, Mao C L. Measurement method of three-dimensional shape of bright surface with binocular stereo vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071202.
- [18] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] 蓝旼, 华云松. 一种基于双目立体视觉的立体标定方法 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(8): 86-90.  
Lan T, Hua Y S. Stereo calibration method based on binocular stereo vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(8): 86-90.
- [20] Svoboda T. A software for complete calibration of multicamera systems[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5685: 115-128.