

电梯井道的彩色相机标定方法

胡兆勇^{1*} 蔡佳锋¹ 陈和恩¹

HU Zhaoyong CAI Jiafeng CHEN Heen

摘要

在电梯安装之前,对电梯井道进行全面的环境理解和勘察是关键环节之一,以此获取电梯井道重要的特征参数,便于选择合适的电梯规格,避免电梯安装过程中由电梯井道结构问题带来的损失。而针对电梯井道环境理解问题,相机标定是保障其精度必不可少的一个步骤,现有的传统相机标定算法存在计算量大,效率低的问题。为解决这一问题,在常用的彩色相机的基础上,文章提出了一种基于垂直定长约束的彩色相机标定算法,在“张正友标定法”的基础上,采用对特征点添加约束的方法替代未知数较多的单应矩阵的引入,减少了计算成本,最终实验结果表明:该标定方法具有可行性,在电梯井道的环境理解过程中符合精度要求。当电梯井道面临需要快速标定的场景或者计算机算力较小的情况下,该标定方法的标定效率优于张正友标定法。

关键词

相机标定;彩色相机;张正友标定法;单应矩阵;垂直定长约束

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.06.006

0 引言

电梯井道的环境理解是指在电梯安装之前,对电梯井道进行测量,获取准确参数信息,以确保电梯井道能够顺利容纳电梯,如图1所示,只有准确获取井道整体的宽和深等特征参数,才能选择合适的电梯规格用于电梯安装。而电梯井道的测量一直存在诸多困难,传统的测量技术不够精确,效率低,工作人员的安全得不到保障^[1],将三维重建与环境理解相结合用于电梯井道测量是近年来使用最为普遍的方法^[2],但由于所使用的相机本身将会影响到最终特征参数的精度^[3-6],为提高电梯井道测量精度,相机标定成为必不可少的步骤,通过相机标定,可以测量和确定相机的内部和外部参数,从而更加准确描述相机与世界坐标系之间的关系。



图1 电梯井道内部环境

受限于彩色相机的标定算法计算量大或效率低的问题,

在使用彩色相机时,精度要求不高的场合通常直接采用厂家提供的标定参数,但在精度要求高的场合,厂家提供的标定参数并非适配每台彩色相机,会导致精度降低。常用的标定算法分为两种,一种是TSAI相机标定法^[7],其基本原理是添加约束,使所有点与原点的距离相等,且与坐标轴的角度相等,利用这一约束将相机的模型简化为一个线性方程组,从而求解相机内外参数。该方法简单有效,但一旦涉及非线性运算,就会导致标定效果变差。第二种是以“张正友标定法”^[8]为代表的单平面棋盘格相机标定方法,该标定算法是通过单应性矩阵求解相机的内外参数,但由于引入单应矩阵,极大提高了计算成本。

为提高电梯井道数据采集效率,针对现有的相机标定算法存在计算量大,效率低的问题,本文在张正友标定法的基础上提出了一种基于垂直定长的彩色相机标定算法,该算法引入两组特征点对替代了单应矩阵,降低了计算成本,但由于特征点对的引入,特征点对的选取好坏将会影响标定的精度,因此本文借助彩色相机的颜色信息进一步优化特征点对的选取,通过实验证明本文算法在保证精度的同时,算法效率也有所提高。

1 现有相机标定算法

光线具有波长和光谱的特征,与普通相机对比,彩色相机中往往会添加滤光片或者分光装置用来获取波长和光强度,通过对比已知的像素单元的光强度和波长获取对应的颜色信息,采用去马赛克算法和插值法获取彩色图像。

1. 广东工业大学机电工程学院 广东广州 510006

彩色相机的成像模型最为常见的是小孔成像模型，在数学上可以表示为三维空间到二维平面的中心投影^[9]，该模型其中涉及 4 个坐标系，分别为世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系、像素坐标系，如图 2 所示，通过这些坐标系就可以反映物体从三维世界到成像平面上各坐标点的对应关系，公式表示为：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： s 为尺度因子； u 、 v 分别为像素坐标系中的坐标； f_x 、 f_y 、 γ 、 u_0 、 v_0 为 5 个相机内参，其中 γ 为相机制造所产生的偏斜参数，通常很小，一般令 $\gamma=0$ ； r_1 、 r_2 、 r_3 分别为 3 个相互垂直的单位方向向量，3 个向量组成旋转矩阵； t 为平移向量； X_w 、 Y_w 、 Z_w 为世界坐标系中的坐标。

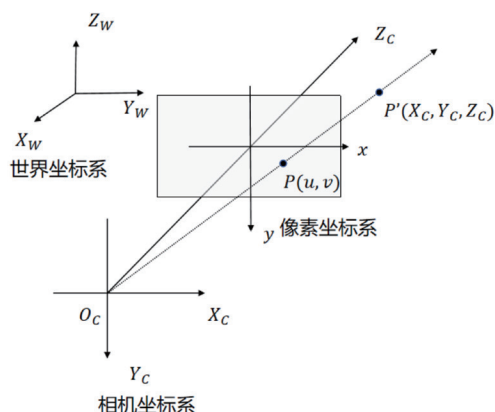


图 2 相机成像过程中的坐标系转换

小孔成像模型是在理想情况下的相机成像模型，在实际生活中，相机由于透镜和装配等原因，并非严格遵循针孔成像模型，空间点坐标和图像坐标间会存在复杂的畸变关系^[10-13]。由于这种畸变关系，空间点实际投影在二维图像上的坐标与小孔成像模型得到的坐标值就会存在偏差，称为像差^[14]。所以在三维重建或者三维信息测量时，准确地矫正镜头畸变是相机标定的必要步骤。常用的标定方法就是张正友标定法。

张正友标定法标定精度高、操作简便，利用平面标定板上的已知点坐标和相应的像素坐标，通过最小二乘法拟合相机的内部参数和外部参数，完成相机标定。张正友标定法对相机进行标定时，会选取已知大小的二维棋盘格作为相机标定板，将世界坐标系的原点定义在相机标定板的固定一角，此时的相机标定板处于 $Z_w=0$ 的平面上，通过提取二维棋盘格的特征点，获取所需角点的图像坐标和像素坐标，同一角点的两个坐标满足式 (1)，再引入单应矩阵优化图像坐标与像素坐标之间的关系，单应矩阵包含 9 个未知数，令单应矩阵的模为 1，只需要 4 对匹配后对应点的坐标值便可以计算出单应矩阵 H 。

最后由旋转矩阵的单位正交性，构造单应矩阵与相机内参之间的关系，令 $B = A^{-T}A^{-1}$ ，通过 3 张或 3 张以上不同角度的标定图像即可得到 6 个或 6 个以上包含 6 个未知数的方程，联立求解 B ，就可以算出相机的内参，完成相机标定，结果用公式表示为：

$$\begin{cases} f_x = \sqrt{\lambda/B_{11}} \\ f_y = \sqrt{\lambda B_{11}/(B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \\ u_0 = \gamma v_0/f_y - B_{13}f_x^2/\lambda \\ v_0 = (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})/(B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \\ \gamma = -B_{12}f_x^2f_y/\lambda \\ \lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})]/B_{11} \end{cases} \quad (2)$$

2 基于垂直定长约束的彩色相机标定算法

张正友标定法为提高计算精度，引入单应矩阵，不可避免地引入了误差，同时，由于单应矩阵内的未知数较多，因此计算成本会有所提高，还要求在拍摄标定图像时，需要控制标定板使其保持平面且不发生扭曲，否则会影响标定结果的准确性^[15]。基于上述不足，本文对其进行优化，提出了一种基于垂直定长约束的彩色相机标定方法。

首先将世界坐标系设在与相机坐标系相同的位置，并且假设相机位姿不变，对相机内参先进行求解，选取世界坐标系到像素坐标系这一过程进行分析，可以得到坐标之间的转换关系转变成如公式所示：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{设 } p_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}, P_i = \begin{bmatrix} X_{ci} \\ Y_{ci} \\ Z_{ci} \end{bmatrix}, p_i \text{ 和 } P_i \text{ 分别为同一点对应的像素}$$

坐标和相机坐标，任意两个点之间都可以用公式分别表示为：

$$A(P_1 - P_2) = s_1 p_1 - s_2 p_2 \quad (4)$$

$$A(P_3 - P_4) = s_3 p_3 - s_4 p_4 \quad (5)$$

在标定板上选择两组点对，使得上下与左右点对之间的连线相互垂直并且长度相等，根据坐标将上述的约束条件用公式表示为：

$$(P_1 - P_2)^T(P_3 - P_4) = 0 \quad (6)$$

$$(P_1 - P_2)^T(P_1 - P_2) = (P_3 - P_4)^T(P_3 - P_4) \quad (7)$$

设 $T_1 = Z_{c1}p_1 - Z_{c2}p_2$ ， $T_2 = Z_{c3}p_3 - Z_{c4}p_4$ ，故 T_1 、 T_2 已知，简化表达式，将式 (6)、式 (7) 代入式 (4)、式 (5) 中，可得约束条件为：

$$T_1^T A^{-T} A^{-1} T_2 = 0 \quad (8)$$

$$T_1^T A^{-T} A^{-1} T_1 = T_2^T A^{-T} A^{-1} T_2 \quad (9)$$

由此可知，每一组点可以提供两个约束。按照张正友标定法优化方程的方法进行优化求解，设 $B = A^{-T}A^{-1}$ ， B 为对

称矩阵,存在6个未知数,通过**b**对对称矩阵进行表示,最终计算为:

$$\begin{bmatrix} V_{12}^T \\ V_{11}^T - V_{22}^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (10)$$

式中: $V_{ij} = [T_{i1}T_{j1} \ T_{i1}T_{j2} + T_{i2}T_{j1} \ T_{i2}T_{j2} \ T_{i3}T_{j1} + T_{i1}T_{j3} \ T_{i3}T_{j2} + T_{i2}T_{j3} \ T_{i3}T_{j3}]^T$ 是一个 $2n \times 6$ 的矩阵; n 是不同角度的标定图像数量,当 $n \geq 3$ 时,展开即可得到6个方程,通过求解方程就能算出 **b**,最终算出相机内参矩阵 **A**,完成彩色相机标定。

本文标定算法是基于两组点对的约束条件进行算法的优化,因此,两组点对的选取将会影响到该算法的精度,为了完成上述标定算法,对张正友标定法进行特殊处理,通过对需要的特征点进行标记处理,再借助彩色相机获取特征点的颜色信息,在计算成本较低的情况下直接获取到所需的特征点对,再通过特征点对已知的约束,在无需计算单应矩阵的情况下计算出了相机内参,实现了相机的标定。而通过彩色相机直接得到所需要的特征点对,也不会额外增加计算成本,并且无需引入单应矩阵,计算效率将大大提高。

根据以上描述,对本文标定算法的步骤进行概括为:

- (1) 标定板处理:在张正友标定板的基础上添加上4个带垂直定长约束的点。
- (2) 图像采集:在1 m范围固定好彩色相机,旋转标定板到固定角度采集图像数据。
- (3) 图像预处理:对采集到的图像进行去噪等预处理。
- (4) 计算变换矩阵:提取标定板上的所有特征点,基于特征点匹配计算标定板的变换矩阵。
- (5) 获取特征点坐标:使用彩色相机采集到的颜色信息在特征点中筛选出所需的4个特殊特征点,通过变换矩阵计算出每张图像特殊特征点的世界坐标,然后进行直线拟合,若拟合出来的两条直线相互垂直且定长,分别获取出这两条直线的端点坐标。
- (6) 计算相机内参:基于获取的特征点坐标以及特征点之间的约束信息计算相机内参。
- (7) 评估标定结果:通过计算重投影误差评估相机标定的结果,若重投影误差越小,标定结果就越准确。

3 实验结果分析

为验证算法可行性,使用图3标定板对相机进行标定,其中,采用棋盘格数量为 12×9 ,大小为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的标定板,在黑白棋盘标定板的基础上,上下左右各标注1个红色

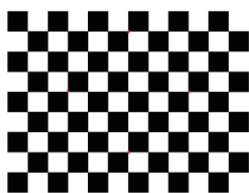


图3 标定板

点,使得上下点与左右点的连线相互垂直并且距离相等,实验所用的相机型号为 Intel Realsense D455 相机,图片分辨率为 $1280 \text{ px} \times 720 \text{ px}$ 。

实验过程中,保持相机不动,旋转标定板,使用相机采集不同角度下8张包含所有角点信息的图像,后通过检测角点进行相机参数求解,最终完成相机标定。采集到的图像如图4所示。

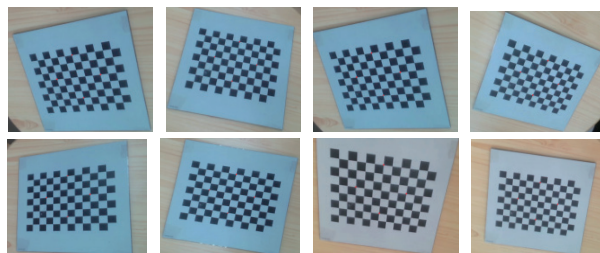


图4 标定图像

最终标定结果 $f_x=646.493 \ 331$ 、 $f_y=646.021 \ 400$ 、 $u_0=627.144 \ 203$ 、 $v_0=358.631 \ 538$ 。为确保实验结果的准确性,采用重投影误差对结果进行评估,即将标定的相机参数应用到三维坐标上,计算出标定后像素点的坐标,再将该坐标与实际坐标进行距离误差计算。通常会选取多个特征点进行计算,对结果取平均值作为重投影误差的值。除算法因素外,影响相机标定精度的外部因素主要是标定板平整性、特征点数量、标定物距等^[16],将外部影响因素保持不变,同时为避免实验结果存在偶然误差,进行5组标定实验,求出5组标定实验的重投影误差对比与标定时间对比如表1、表2所示。

表1 重投影误差对比

实验组	标定算法	重投影误差 / 像素
1	张正友标定法	0.236 5
	本文标定法	0.222 1
2	张正友标定法	0.314 2
	本文标定法	0.322 5
3	张正友标定法	0.254 1
	本文标定法	0.242 7
4	张正友标定法	0.232 5
	本文标定法	0.214 1
5	张正友标定法	0.241 6
	本文标定法	0.236 7

表2 标定时间对比

实验组	标定算法	标定时间 / s
1	张正友标定法	2.306 46
	本文标定法	2.017 55
2	张正友标定法	2.234 16
	本文标定法	1.875 13

表 2(续)

实验组	标定算法	标定时间 /s
3	张正友标定法	2.623 14
	本文标定法	2.364 51
4	张正友标定法	2.231 32
	本文标定法	1.575 11
5	张正友标定法	2.142 33
	本文标定法	2.015 25

通过观察上述实验结果,在标定时间的对比上,张正友标定法用时 2.3 s 左右,而本文标定法用时则在 1.9 s 左右,本文标定法的标定时间少于张正友标定法。在 5 组对照实验标定条件相同的情况下,这表明本文标定方法所需的计算成本更小。同时,在第 2 组实验组中,张正友标定法的重投影误差低于本文标定法,其他实验组中,本文标定法的重投影误差低于张正友标定法。本文标定法也适用于张正友标定法适用的场合。

为验证该算法得到的标定参数是否满足其精度适用于电梯井道的环境理解上,通过本文相机标定算法对相机进行标定后,把该相机用于采集电梯井道的特征参数上。通过相机采集到的电梯井道点云如图 5 所示。

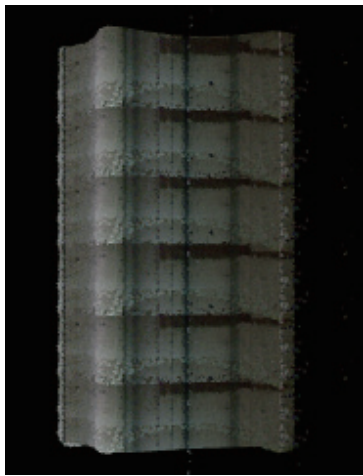


图 5 标定后电梯井道的三维点云重建

对点云数据进行滤波、下采样,为了获取电梯井道整体的宽和深,需要将采集的井道平面提取出来,效果如图 6 所示。

可见从采集的点云数据中获取的平面与电梯井道实际平面相似,平面拟合效果可以满足用于获取井道的特征参数。

选取拟合的 4 个内部平面计算平面相交直线,通过直线之间的计算就可以得到电梯井道整体的宽和深。得到的特征参数与实际井道土建图参数之间的对比如表 3 所示。

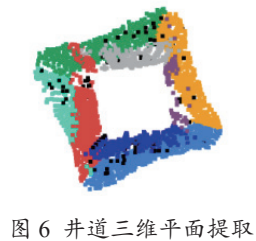


图 6 井道三维平面提取

表 3 相机标定后采集参数与土建图参数对比

井道所需特征参数	井道土建图数据	相机标定后采集数据
	/mm	/mm
井道宽	2 600	2 636.14
井道深	3 600	3 620.29

可以发现虽然最终得到的特征参数与实际参数之间仍然存在误差,但是该误差在 $\pm 5\text{ cm}$ 范围内,为电梯安装的可接受误差,表明通过本文标定法标定后的相机精度能够满足用于电梯井道的环境理解。同时,在一些需要考虑算法成本的情况下,如计算机性能不高的场合,本文标定的方法更能突出其优点。

此外,虽然该标定方法相比较张正友标定法对特征点没有额外的要求,但是对选取的直线要求会比较高,该方法需要选取的特征点对两两相互垂直且定长,便可实现彩色相机标定,如果标定板上选取的特殊点不垂直或者长度不一,就会导致标定精度下降。

4 结论

本文通过对现有彩色相机标定法进行具体分析,在张正友标定法的基础上,提出了一种基于垂直定长的彩色相机标定方法,随后通过 5 组对照实验,验证了该标定方法可以达到张正友标定法同样精度,在需要考虑计算成本的场合,该标定方法适用于张正友标定法。随后,将本文标定方法标定的结果用于电梯井道的环境理解上,验证了该方法的可行性。尽管本文提出的基于垂直定长约束的彩色相机标定方法已经可以适用于需要考虑计算成本的场合,但是在算法精度上尚仍可以继续优化,使之可以应用到所需相机精度更高的环境中。

参考文献:

- [1] 张琳. 计算机视觉技术在电梯安装质量检测中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2024(13):5-8.
- [2] 陈建勋, 戚政武, 苏宇航. 电梯井道空间尺寸的主动视觉测量方法研究[J]. 特种设备安全技术, 2024(3):29-33.
- [3] 林绿开, 钮倩倩, 李毅. 基于棋盘标定板的优化相机参数标定方法[J]. 计算机技术与发展, 2023,33(12):101-105.
- [4] 刘兴盛, 李安虎, 邓兆军, 等. 单相机三维视觉成像技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022,59(14):87-105.
- [5] 吴政. 面向 3D 点云重建的双目相机标定技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [6] 伍倩. 基于 Kinect v2 相机的柑橘点云分割与配准研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2022.
- [7] GEE T, DELMAS P, STONES-HAVAS N, et al. Tsai camera calibration enhanced[C]//2015 14th IAPR international conference on machine vision applications (MVA). Piscataway: IEEE, 2015: 435-438.

(下转第 30 页)

变换时易丢失关键特征的问题。主要内容如下:

(1) 原始图像常因拍摄条件、光照环境等外部因素而模糊、灰暗且缺乏层次感。本研究先进行图像预处理,消除不利因素对图像质量的影响,提升图像在色彩、亮度和清晰度方面的表现,为后续处理提供高质量输入。

(2) 针对预处理后的图像,采用改进遗传算法进行对比度增强。该算法借助智能搜索和优化机制精确调整对比度增强变量,相比传统方法,处理效率更高,关键特征丢失更少。实验表明,实验组图像灰度值和峰值评价结果最优,证明该方法在对比度增强方面性能优越。

(3) 对比度增强后,通过逆变换恢复图像可能丢失的特征,不仅增强对比度,还保证信息完整性。逆变换使处理后图像在细节、轮廓和整体清晰度上显著提升,实验验证了其对于恢复图像特征、提升图像质量的有效性。

综上所述,基于改进遗传算法的视觉传达图像对比度增强方法能够显著加强图像的清晰度,增强作品的艺术表现力。

参考文献:

- [1] 韩晓微,张云泽,谢英红,等. 动态异构特征融合的水下图像增强算法[J]. 控制与决策,2023,38(6):1560-1568.
- [2] 张书赫,曹良才. 基于数字衍射的单幅眼底图像增强[J]. 光学精密工程,2024,32(15):2429-2438.
- [3] 胡振宇,陈琦,朱大奇. 基于颜色平衡和多尺度融合的水下图像增强[J]. 光学精密工程,2022,30(17):2133-2146.
- [4] 刘波,田广粮,肖斌,等. 利用自适应光照初始化的弱光图像增强方法[J]. 电子与信息学报,2024,46(2):643-651.

(上接第26页)

- [8] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [9] 贾星伟,殷晨晖,隋国荣. 单目摄像机线性模型可靠性分析与研究[J]. 光学仪器,2019,41(1): 60-67.
- [10] TANG Z W, GIOI R G V, MONASSE P, et al. A precision analysis of camera distortion models[J]. IEEE transactions on image processing, 2017, 26(6):2694-2704.
- [11] LOPEZ M, MARI R, GARGALLO P, et al. Deep single image camera calibration with radial distortion[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2019: 11817-11825.
- [12] 傅思勇,吴禄慎,陈华伟,等. 综合多畸变因素的摄像机标定[J]. 仪器仪表学报,2018,39(2):248-256.
- [13] 刘杨豪,谢林柏. 基于共面点的改进摄像机标定方法研究

- [5] 郭伟,王欣哲,王江达,等. 基于卷积调制与空间协作的水下图像增强[J]. 计算机工程,2024,50(8):310-318.
- [6] 牛宏侠,张鸿铸. 基于 Lab 色彩空间的沙尘降质图像增强方法[J]. 液晶与显示,2024,39(9):1274-1284.
- [7] 陈华腾,刘磊,钱芸生,等. 基于 Retinex 里双分量改进的微光图像增强方法[J]. 应用光学,2024,45(4):819-827.
- [8] 顾文娟,丁灿,魏金,等. 基于双边滤波 MSR 与 AutoMS-RCR 融合的低光照图像增强[J]. 光学精密工程, 2023, 31(24): 3606-3617.
- [9] 游达章,陶加涛,张业鹏,等. 基于灰度变换及改进 Retinex 的低照度图像增强[J]. 红外技术,2023,45(2):161-170.
- [10] 路皓翔,刘振丙,张静,等. 结合多尺度循环卷积和多聚类空间的红外图像增强[J]. 电子学报,2022,50(2):415-425.
- [11] 邱敬,梁婵,任莉,等. 基于多尺度对比度增强和跨维度交互注意力机制的红外与可见光图像融合[J]. 红外技术, 2024, 46(7):754-764.

【作者简介】

赵媛(1993—),女,河南新乡人,硕士,助教,研究方向:计算机应用。

李宛玉(1999—),女,河南南阳人,硕士,助教,研究方向:计算机视觉及图像处理。

辛焦丽(1982—),女,河南焦作人,硕士,副教授,研究方向:智能网络。

(收稿日期:2025-01-14 修回日期:2025-06-03)

[J]. 计算机工程,2016,42(8):289-293.

- [14] 熊亚凡. 基于结构直线特征标定的立体视觉测量方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [15] 李一硕. 高精度相机标定算法研究[D]. 黑龙江:黑龙江大学,2023.
- [16] 翟溢章,宿洁华,张士恒,等. 相机标定的精度影响实验分析[J]. 电子设计工程,2022,30(7): 82-86.

【作者简介】

胡兆勇(1976—),通信作者(email:zhy.hu@gdut.edu.cn),男,安徽庐江人,博士,副教授,研究方向:虚拟现实和计算机仿真。

蔡佳锋(1998—),男,福建泉州人,硕士研究生,研究方向:计算机视觉。

(收稿日期:2025-01-16 修回日期:2025-05-16)