

# 基于编码立体靶标的高精度双目相机标定

杨昭辉, 朱华炳\*, 殷玉龙, 杨霏

合肥工业大学机械工程学院, 安徽 合肥 230009

**摘要** 为提高双目相机标定的精度和效率, 本文提出了一种基于新型编码立体靶标并结合高精度参数优化的双目相机标定方法。新型编码立体靶标通过整合 4 个空间姿态不同的编码平面靶标, 只需拍摄一次即可完成双目相机标定, 有效提高了标定效率; 每个编码平面靶标内设置多个编码单元, 在采集到局部靶标图像时仍能获得高精度标定结果; 采用高精度参数优化方法, 建立包含重投影约束、标准长度约束和共面约束的目标函数, 有效提高了双目相机的标定精度。实验结果表明: 相比于张氏标定方法, 本文所提标定方法获得的左右相机平均绝对重投影误差分别降低了 55.42% 和 57.22%, 平均绝对标准长度误差降低了 41.28%, 平均绝对共面误差降低了 63.04%。通过多次测量不同规格的标准量块, 进一步验证了本文所提标定方法的可行性和有效性。

**关键词** 测量; 双目相机标定; 编码立体靶标; 编码标志; 高精度参数优化

中图分类号 TP399 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220523

## 1 引言

随着计算机技术的发展, 视觉测量技术已被广泛应用于各个领域。在使用相机采集图像进行测量之前, 需要提前计算相机的内部参数(以下简称“内参”)和外部参数(以下简称“外参”), 即进行相机标定。相机标定方法可分为摄影测量标定方法和自标定方法<sup>[1]</sup>。自标定方法不需要任何校准对象, 但需要计算大量的参数, 很难实现高精度的相机标定; 摄影测量标定方法通过观测三维空间中的标定物体来实现相机内外参的高精度标定。根据所使用的标定物体的不同, 可将摄影测量标定方法分为 3D 标定<sup>[2-5]</sup>和 2D 标定<sup>[6-13]</sup>。3D 标定通过观测三维标定物体来实现标定, 但需要昂贵的标定设备和复杂的设置; 2D 标定通过观测不同空间姿态的平面标定图案完成标定, 具有较高的标定精度, 同时具有较强的适用性。但是, 2D 标定方法仍然存在不足, 比如: 1) 相机标定需要多次拍摄平面标定图案, 标定过程过于繁琐<sup>[14]</sup>。为提高标定效率, Abedi 等<sup>[15]</sup>提出了一种带有三角形图案的金字塔形立体靶标, 并基于该靶标对多相机系统进行了标定; Zhang 等<sup>[16]</sup>提出了一种包含两个棋盘格靶标平面的正方体靶标; Zhang 等<sup>[17]</sup>使用多平面立体靶标(将 5 个平面标定图案放置在一个立体物体内部), 通过采集单幅图像即完成了标定。上述三种立体靶标虽然简化了标定过程, 提高了标定效率, 但其平面标定图案缺少编码信息, 易造成定位精度不高、特征点匹配困难等问题。2) 在使用传统的棋盘格靶标进行双目相机标定时, 往

往会因为采集到局部靶标图像而导致左右标定图像中同名点匹配错误, 进而导致标定失败<sup>[18]</sup>。Chen-Ley 等<sup>[18]</sup>设计了一种圆形和环状相结合的编码靶标, 用于相机的标定与定位; Romero-Ramirez 等<sup>[19]</sup>提出了 ChAruco 靶标, 并基于该靶标对单目相机进行了标定及姿态估计; Hurnik 等<sup>[20]</sup>提出了一种圆环形编码靶标并对靶标圆心进行编码, 进而完成了相机的标定。上述三种编码靶标通过对每个标定角点编码克服了拍摄到局部靶标从而导致标定失败的问题; 但此类靶标仍为单平面靶标, 无法实现高效率的相机标定, 且实际应用中对光照条件、标定环境等要求较高, 实际标定效果不佳。3) 传统的 2D 标定方法仅凭重投影约束来优化相机标定参数, 约束条件过于单一, 无法得到更为精准的相机标定结果。周舵等<sup>[21]</sup>采用改进的光束平差法对双目相机的参数进行全局最优估计; 徐呈艺等<sup>[22]</sup>通过改进粒子群算法来优化相机内参, 提高了相机标定精度, 但仍未利用靶标的三维信息。

为解决上述 2D 标定方法存在的问题, 本文提出了一种基于编码立体靶标的高精度双目相机标定方法。首先, 为了提高双目相机的标定效率, 本文提出了一种新型编码立体靶标, 此靶标将 4 个编码平面靶标按照不同的空间姿态进行组合, 仅采集一次靶标图像即可完成双目相机的标定。同时, 在每个编码平面靶标内布置多个相互独立的编码单元, 摆脱传统的棋盘格结构, 能够有效应对靶标被遮挡的情况。其次, 通过新型可变容量编码标志对每个标定角点进行编码, 以提高同名点的匹配效率和匹配精度。最后, 为丰富相机参

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-03-09; 录用日期: 2022-06-09; 网络首发日期: 2022-06-19

通信作者: \*zhuhuabing@hfut.edu.cn

数优化的约束条件,采用高精度参数优化方法,充分利用编码立体靶标的三维信息,引入标准长度约束和共面约束,以有效提高双目相机的标定精度。

## 2 新型编码靶标

### 2.1 新型编码立体靶标的编码

如图 1(a)所示,新型编码立体靶标由 4 个编码平面靶标按照不同的空间姿态组合而成,分别为第一、第二、第三和第四编码平面靶标。每个编码平面靶标内包含 12 个编码单元,其分布分别如图 1(b)、图 1(c)、图 1(d)和图 1(e)所示。

编码平面靶标内编码单元的组成如图 2(a)所示,包含 4 个标定角点和 1 个编码标志。4 个标定角点为后续相机标定中同名点的匹配作准备,其固定排序编号分别为 0、1、2、3;编码标志则是为编码单元编码,每个编码单元的编号仅有一个,且在编码立体靶标内所

有编号均不相同。编码标志的组成如图 2(b)所示,白色连通域  $A_1$  为定位连通域,白色圆  $A_2$  为定向连通域,圆  $a_1、a_2、a_3、b_1、b_2、b_3$  为一级编码圆,圆  $c_1 \sim c_9$  为二级编码圆,二级编码圆的个数根据所需最大编号不同而变化。图 2(b)为最大编号 511 对应的编码标志图案。一级编码区的背景为黑色;一级编码圆的颜色若为白色表示二进制“1”,若为黑色则表示二进制“0”;一级编码圆  $a_1、a_2、a_3$  表示二级编码圆排列的行数编码,其中  $a_1$  表示二进制最高位,  $a_3$  表示二进制最低位。同理,一级编码圆  $b_1、b_2、b_3$  表示二级编码圆排列的列数编码,其中  $b_1$  表示二进制最高位,  $b_3$  表示二进制最低位。二级编码区的背景为白色;二级编码圆的颜色若为白色表示二进制“0”,若为黑色则表示二进制“1”;二级编码圆  $c_1$  表示二进制最低位,二级编码圆  $c_1 \sim c_9$  表示的位数逐次升高,二级编码圆  $c_9$  表示二进制最高位。

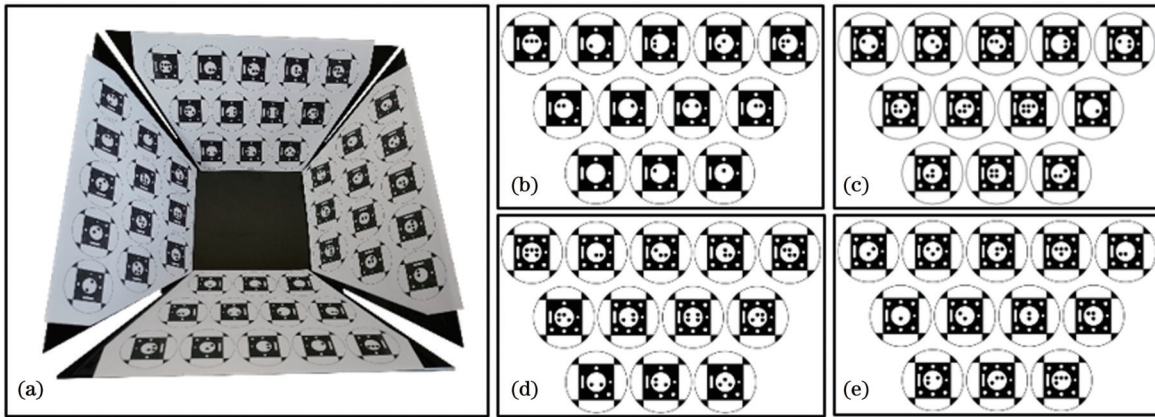


图 1 新型编码立体靶标结构示意图。(a)新型编码立体靶标;(b)第一编码平面靶标(编号范围为 0~11);(c)第二编码平面靶标(编号范围为 26~37);(d)第三编码平面靶标(编号范围为 40~51);(e)第四编码平面靶标(编号范围为 13~24)

Fig. 1 Schematic of new coding stereoscopic target. (a) New coding stereoscopic target; (b) the first coding target plane (number range is 0~11); (c) the second coding target plane (number range is 26~37); (d) the third coding target plane (number range is 40~51); (e) the fourth coding target plane (number range is 13~24)

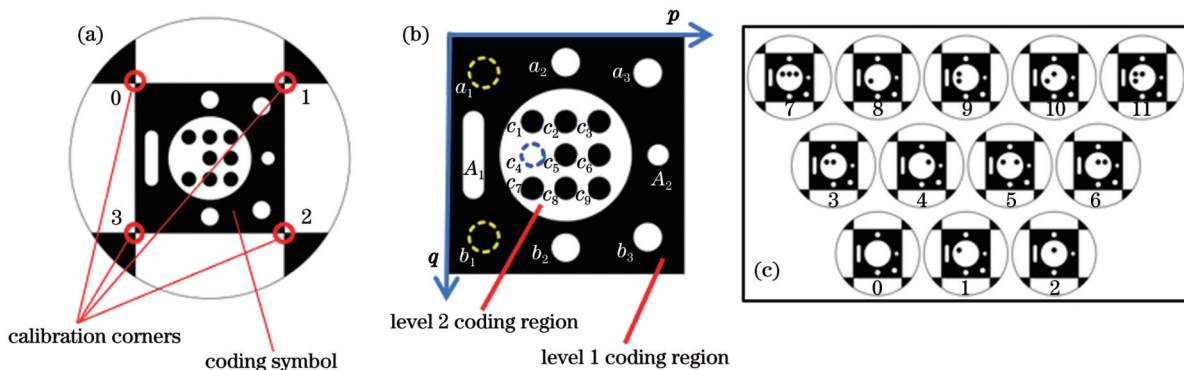


图 2 编码单元结构示意图。(a)编码单元构造图;(b)编码标志构造图;(c)第一编码平面靶标内各编码单元编号示意图

Fig. 2 Schematic of coding unit structure. (a) Coding unit construction diagram; (b) encoding symbol construction diagram; (c) numbering diagram of each coding unit in the first coding target plane

另外,各连通域的尺寸设计需要满足以下要求: 1)在整个编码标志的白色连通域内,二级编码区的白色连通域面积最大,一级编码区内白色定位连通域

$A_1$  的面积次之,一级编码区内白色定向圆的面积最小;b)以定位连通域  $A_1$  的中心为起始点,以定向连通域  $A_2$  的中心为末尾点的向量,需与向量  $p$  同向,且

二级编码圆需按照向量  $p$ 、向量  $q$  的方向进行排列；c) 在图像处理过程中, 进行黑色连通域腐蚀后, 需保证所有连通域面积关系不变, 且相互独立, 不发生干涉。

编码标志的编码过程如下: 设所需编码标志最大的十进制编号为  $z$ , 将  $z$  转换为二进制数  $B$ , 设  $k$  为  $B$  的位数, 由式(1)、式(2)可计算出所需二级编码圆的行数  $m$  和列数  $n$ ; 将十进制数  $m$  和  $n$  分别转换为二进制数  $B_1$  和  $B_2$ , 根据  $B_1$ 、 $B_2$  即可得出一级编码圆的颜色排列; 进一步, 根据二级编码圆的行数  $m$ 、列数  $n$  和二进制数  $B$ , 得到所有二级编码圆的颜色排列, 由此完成编码。

$$m = \begin{cases} f_{\text{round}}(k^{\frac{1}{2}}), & k^{\frac{1}{2}} < f_{\text{round}}(k^{\frac{1}{2}}) + 0.5 \\ f_{\text{round}}(k^{\frac{1}{2}}) + 1, & k^{\frac{1}{2}} \geq f_{\text{round}}(k^{\frac{1}{2}}) + 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

$$n = f_{\text{round}}[(k-1)^{\frac{1}{2}}] + 1, \quad (2)$$

式中:  $f_{\text{round}}(x)$  表示取不超过  $x$  的最大整数。根据上述编码规则, 由于本文所需最大编号为 51, 因此所采用的编码标志仅需要 2 行 3 列个二级编码圆。在每个编码平面靶标内, 所有编码单元从左下角开始, 按照编号从小到大的顺序依次放置。以第一编码平面靶标为例, 其所有编码标志的编号如图 3 所示。至此, 完成了编码立体靶标的编码。

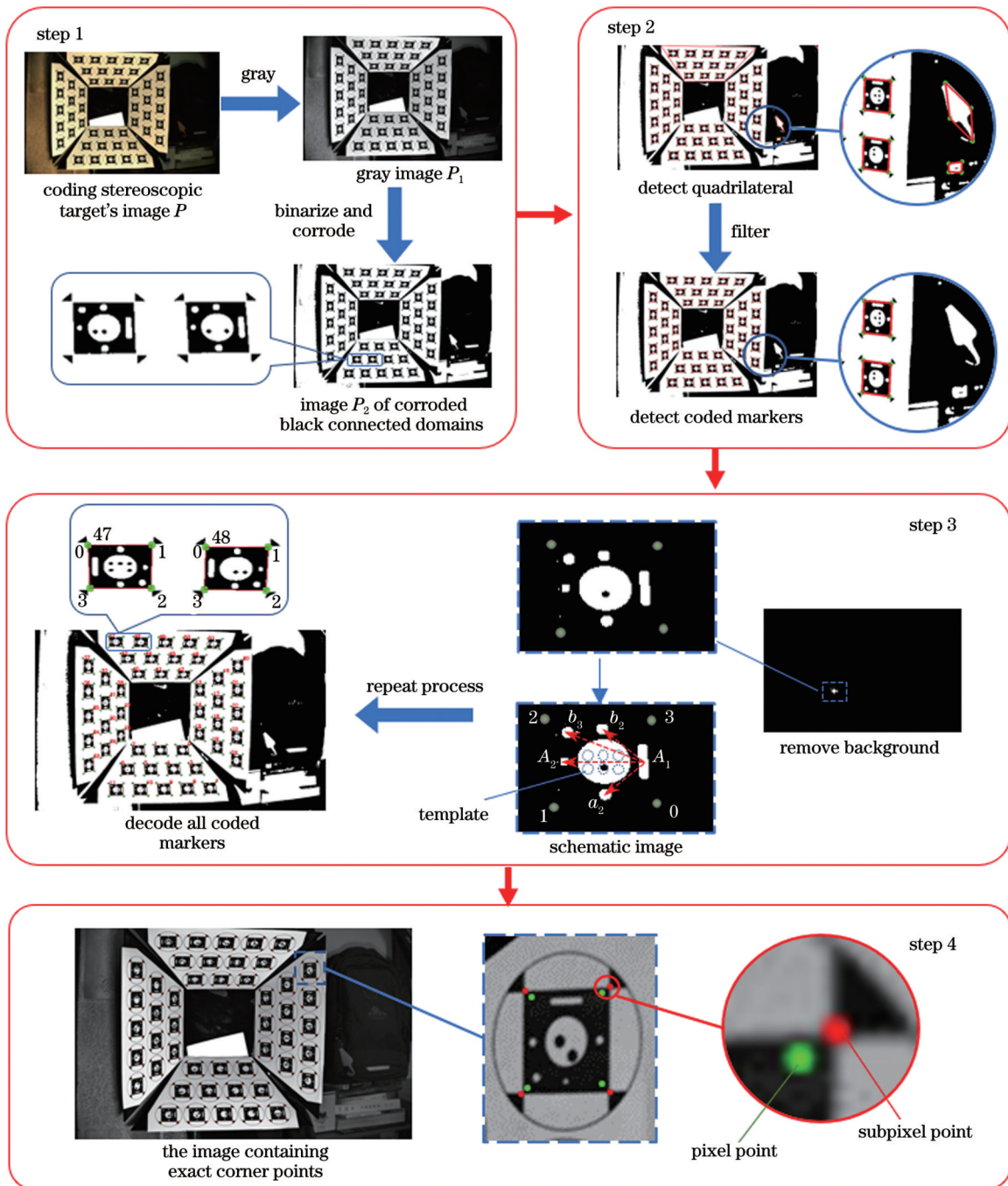


图 3 新型编码立体靶标的解码原理图

Fig. 3 Decoding schematic of new coding stereoscopic target

## 2.2 新型编码立体靶标的解码

将编码立体靶标图像作为输入条件,经过解码程序处理后可以获得每个编码平面靶标内每个编码单元中编码标志的编号、4个标定角点的排序编号和亚像素坐标。解码步骤如图3所示。

步骤1:将编码立体靶标图像 $P$ 灰度化,得到图像 $P_1$ ,然后进一步进行二值化、黑色连通域腐蚀操作,使得所有标定角点断开,每个编码标志均成为独立的四边形,得到图像 $P_2$ 。

步骤2:在图像 $P_2$ 内,利用四边形检测算法找到图像 $P_2$ 中所有形状规则的四边形,并返回所有四边形的顶点像素坐标,同时利用连通域个数、连通域面积等限制条件,排除非编码标志干扰,找到图像 $P_2$ 中的所有编码标志。

步骤3:在图像 $P_2$ 内,针对每个编码标志,根据4个顶点像素坐标去除复杂背景(将背景赋黑),仅保留单个编码标志,检测所有黑色和白色连通域,得到相应的连通域中心。同时,利用向量 $(A_2 - A_1)$ 与向量 $(a_2 - A_1)$ 、 $(b_2 - A_1)$ 、 $(c_2 - A_1)$ 叉乘结果的正负以及各一级编码圆的圆心与 $A_1$ 、 $A_2$ 的距离差,对一级编码圆解码,获得二级编码圆排列的行列数。进一步,已知二级编码圆的行列数可推算出二级编码圆的分布模板,根据二级编码区黑色连通域的中心位置与模板的对比,可计算出此编码标志的编号;同时,根据向量 $(A_2 - A_1)$ 对4个标定角点进行排序,得到4个标定角点的排序编号;重复编码标志的解码过程,获得所有编码标志的编号及其4个顶点的排序编号和像素坐标。

步骤4:在灰度图像 $P_1$ 内,针对每个编码标志,在其4个顶点附近,利用亚像素角点检测算法得到每个编码单元内每个标定角点的亚像素坐标。

由此便可完成编码立体靶标图像 $P$ 的解码任务,获得图像 $P$ 内所有编码单元中编码标志的编号以及4个标定角点的排序编号和亚像素坐标。

## 3 双目相机标定方法

### 3.1 双目相机标定模型

如图4所示,本文采用针孔相机模型进行标定。设编码立体靶标中第一编码平面靶标(其他编码平面靶标类似)内的第一靶标坐标系 $(O_1^w - X_1^w Y_1^w Z_1^w)$ 下某一点 $M_1 = [X_1, Y_1, 0]^T$ 的齐坐标为 $\tilde{M}_1 = [X_1, Y_1, 0, 1]^T$ 。

$$\begin{cases} x_{d,1} = x + x(k_{1,1}r^2 + k_{2,1}r^4 + k_{3,1}r^6) + 2p_{1,1}xy + p_{2,1}(r^2 + 2x^2) \\ y_{d,1} = y + y(k_{1,1}r^2 + k_{2,1}r^4 + k_{3,1}r^6) + p_{1,1}(r^2 + 2y^2) + 2p_{2,1}xy \end{cases} \quad (4)$$

式中: $(x_{d,1}, y_{d,1})$ 和 $(x, y)$ 分别表示真实像点坐标和理想像点坐标; $r$ 为成像点到左相机坐标系原点的距离。上述各参数的具体计算过程可参考文献[1]。

同理可得出左、右相机第 $i(i=1, 2, 3, 4)$ 个靶标坐

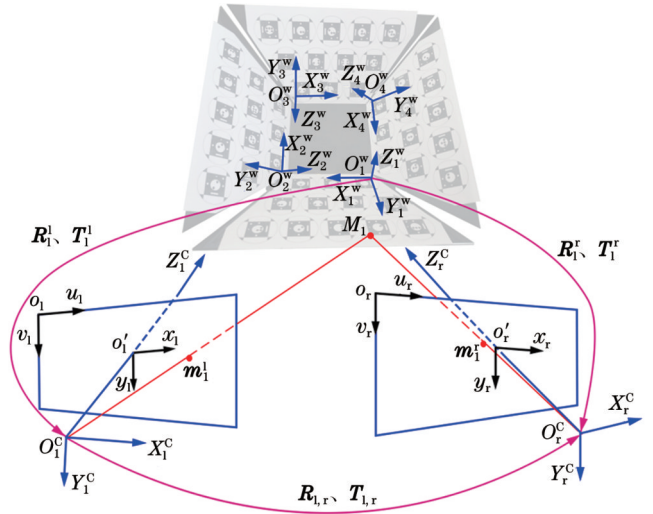


图4 双目相机标定模型

Fig. 4 Calibration model of binocular camera

以左相机为例(右相机的成像过程相同), $M_1$ 点投影到左相机像素坐标系 $(o_1 - u_1 v_1)$ 下的理想像点坐标 $m_1' = [u_1', v_1']^T$ 的齐次坐标为 $\tilde{m}_1' = [u_1', v_1', 1]^T$ 。那么通过第一靶标坐标系 $(O_1^w - X_1^w Y_1^w Z_1^w)$ 、左相机坐标系 $(O_1^c - X_1^c Y_1^c Z_1^c)$ 、左图像坐标系 $(o_1' - x_1 y_1)$ 和左像素坐标系 $(o_1 - u_1 v_1)$ 之间的转换,可以得到第一靶标坐标系到左像素坐标系的转换关系为

$$s \begin{bmatrix} u_1' \\ v_1' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{x,1} & 0 & u_{0,1} \\ 0 & f_{y,1} & v_{0,1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [r_{1,1}^l \quad r_{2,1}^l \quad r_{3,1}^l \quad T_1^l] \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A^l [R_1^l \quad T_1^l] \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $s$ 为比例因子; $A^l$ 由 $f_{x,1}$ 、 $f_{y,1}$ 、 $u_{0,1}$ 、 $v_{0,1}$ 决定,这4个参数仅与相机本身的结构有关,因此 $A^l$ 为左相机的内参矩阵; $R_1^l$ 和 $T_1^l$ 分别为第一靶标坐标系 $(O_1^w - X_1^w Y_1^w Z_1^w)$ 到左相机坐标系 $(O_1^c - X_1^c Y_1^c Z_1^c)$ 的旋转矩阵和平移矩阵,与相机本身无关,因此 $R_1^l$ 和 $T_1^l$ 为相机的外部参数。实际上,由于相机镜头存在畸变,无法达到完全理想的模型,因此需要引入左相机镜头的径向畸变系数 $(k_{1,1}, k_{2,1}, k_{3,1})$ 和切向畸变系数 $(p_{1,1}$ 和 $p_{2,1})$ 。于是,本文采用的畸变模型为

标系到左、右相机坐标系的旋转矩阵 $R_i^l$ 、 $R_i^r$ 和平移矩阵 $T_i^l$ 、 $T_i^r$ 。进一步,可计算出从左相机坐标系 $(O_1^c - X_1^c Y_1^c Z_1^c)$ 到右相机坐标系 $(O_r^c - X_r^c Y_r^c Z_r^c)$ 的旋转矩阵 $R_{1,r}$ 和平移矩阵 $T_{1,r}$ 的初始值为

$$\begin{cases} R_{l,r} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 R_i^l (R_i^r)^{-1} \\ T_{l,r} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [T_i^r - R_i^l (R_i^r)^{-1} T_i^l] \end{cases} \quad (5)$$

### 3.2 高精度参数优化方法

为得到高精度的双目相机标定结果,本文提出了高精度参数优化方法:结合重投影约束、标准长度约束和共面约束,即在重投影误差、标准长度误差和共面误差之和最小时,计算各参数初始值的最优解。

#### 3.2.1 重投影误差

重投影误差是指图像中每个标定角点的像素坐标与相应靶标坐标系下的标定角点按照当前估计的位姿进行投影得到的像素坐标的误差。本文提出的新型编码立体靶标包含 4 个编码平面靶标,假设每个编码平面靶标包含  $m$  个编码单元,那么重投影误差可表示为

$$J_{\text{rep}} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^4 \left\| p_{i,j,k} - \hat{p}_{i,j,k}(A, R_i, T_i, D, P_{i,j,k}) \right\|^2, \quad (6)$$

式中: $\hat{p}_{i,j,k}(A, R_i, T_i, D, P_{i,j,k})$ 表示空间中第  $i$  个编码平面靶标内第  $j$  个编码单元中第  $k$  个标定角点  $P_{i,j,k}$  的重投影点的像素坐标; $A$  表示相机的内参矩阵; $R_i$  和  $T_i$  表示第  $i$  个编码平面靶标对应的相机的外参矩阵; $D$  表示相机的畸变系数矩阵。

#### 3.2.2 标准长度误差

标准长度误差是指每个编码单元中每两个相邻的三维重建标定角点之间的距离与新型编码立体靶标内每个编码单元中编码标志边长的标准长度之间的误差。本文提出的新型编码立体靶标包含 4 个编码平面靶标,假设每个编码平面靶标包含  $m$  个编码单元,那么标准长度误差可表示为

$$J_{\text{sd}} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^4 \left| L_{\text{sd}} - \hat{D}(p_{i,j,k}, p_{i,j,f_{\text{mod}}(k+1,4)}) \right|, \quad (7)$$

式中: $L_{\text{sd}}$  表示新型编码立体靶标内每个编码单元中编码标志边长的标准长度; $p_{i,j,k}$  表示第  $i$  个编码平面靶标内第  $j$  个编码单元中第  $k$  个标定角点三维重建后的三维坐标; $f_{\text{mod}}(k+1, 4)$  表示取  $(k+1)$  除以 4 的余数; $\hat{D}(p_{i,j,k}, p_{i,j,f_{\text{mod}}(k+1,4)})$  表示空间点  $p_{i,j,k}$  与空间点  $p_{i,j,f_{\text{mod}}(k+1,4)}$  的三维空间距离。

#### 3.2.3 共面误差

共面误差是指每个编码平面靶标内每个三维重建后的标定角点与该编码平面靶标内所有三维重建后的标定角点拟合获得的空间平面的误差。本文提出的新型编码立体靶标包含 4 个编码平面靶标,假定每个编码平面靶标包含  $m$  个编码单元,那么共面误差可以表示为

$$J_{\text{cop}} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^4 \left| \hat{d}(p_{i,j,k}, M_i) \right|, \quad (8)$$

式中: $M_i$  表示第  $i$  个编码平面靶标内所有三维重建后

的标定角点拟合获得的三维空间平面; $\hat{d}(p_{i,j,k}, M_i)$  表示第  $i$  个编码平面靶标内第  $j$  个编码单元中第  $k$  个三维重建后的标定角点到上述三维空间平面  $M_i$  的三维空间距离。

综上可得双目相机内外参优化的目标函数为

$$f = \min(J_{\text{rep}} + J_{\text{sd}} + J_{\text{cop}}). \quad (9)$$

本文采用 Levenberg-Marquardt<sup>[23]</sup> 算法对上述目标函数进行求解。最终可获得双目相机内外参的精确值:左相机内参矩阵  $A^l$ 、右相机内参矩阵  $A^r$ 、左相机畸变系数  $(k_{1,l}, k_{2,l}, k_{3,l}, p_{1,l}, p_{2,l})$ 、右相机畸变系数  $(k_{1,r}, k_{2,r}, k_{3,r}, p_{1,r}, p_{2,r})$  以及双目相机外参  $(R_{l,r}$  和  $T_{l,r})$ 。

## 4 实验结果与分析

本文所有实验采用的双目相机型号均为 MER-231-41U3C,其分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ ,像元尺寸为  $5.86 \mu\text{m}$ ;相机镜头型号为 HN-1616-5M-C2/3X,焦距为  $16 \text{ mm}$ 。在本文所有实验采用的编码立体靶标中,编码标志的边长为  $22 \text{ mm}$ ,每行相邻编码单元的间隔为  $40 \text{ mm}$ ,相邻两行编码单元的间隔为  $40 \text{ mm}$ ;本文所有实验采用的棋盘格靶标包含  $8 \times 7$  个角点数,且边长均为  $22 \text{ mm}$ 。

### 4.1 基于编码立体靶标的标定对比实验

为了验证本文提出的标定方法(结合编码立体靶标以及本文所提优化方法的标定方法)对双目相机标定的精度,采用本文提出的标定方法和经典的张氏标定方法,分别对相同位姿的双目相机进行标定。为保证结果的可靠性,两组不同标定方法均进行 15 次双目相机标定,且每次双目相机系统均相同,采集图像中的靶标均为完整靶标。如图 5 所示,采用本文提出的标定方法进行实验时,每次实验双目相机均只需同时拍摄一次编码立体靶标;采用经典的张氏标定方法进行实验时,每次实验双目相机均需同时拍摄 15 次棋盘格靶标。

采用本文所提标定方法和张氏标定方法的双目相



图 5 实验场景

Fig. 5 Experimental scene

机标定结果如表 1 所示。两种方法得到的平均绝对重投影误差(MARE)、平均绝对标准长度误差(MASE)和平均绝对共面误差(MACE)在三个维度上的对比如图 6 所示。

表 1 本文所提方法与张氏标定方法的实验标定结果  
Table 1 Experimental calibration results of proposed method and Zhang's method

Parameter	Zhang's method <sup>[1]</sup>	Proposed method
Left camera internal parameter $\mathbf{A}^l$ /pixel	$\begin{bmatrix} 2686.29 & 0 & 959.22 \\ 0 & 2681.16 & 580.75 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2707.34 & 0 & 930.12 \\ 0 & 2704.52 & 542.67 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Right camera internal parameter $\mathbf{A}^r$ /pixel	$\begin{bmatrix} 2693.63 & 0 & 907.00 \\ 0 & 2688.85 & 565.51 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2704.62 & 0 & 915.58 \\ 0 & 2698.10 & 544.79 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Left camera distortion coefficient $[k_{1,l}, k_{2,l}, k_{3,l}, p_{1,l}, p_{2,l}]$	$[-0.25 \ 1.24 \ -6.95 \ -0.0015 \ -0.0003]$	$[-0.24 \ 0.79 \ -3.27 \ -0.0027 \ -0.0003]$
Right camera distortion coefficient $[k_{1,r}, k_{2,r}, k_{3,r}, p_{1,r}, p_{2,r}]$	$[-0.21 \ 0.18 \ 3.33 \ -0.0016 \ -0.0019]$	$[-0.19 \ 0.88 \ 7.11 \ -0.0031 \ -0.0009]$
Rotation matrix of left camera to right camera $\mathbf{R}_{l,r}$ /( $^\circ$ )	$[-0.32 \ 18.53 \ 0.56]$	$[-0.19 \ 19.38 \ 0.41]$
Translation matrix of left camera to right camera $\mathbf{T}_{l,r}$ /mm	$[-203.70 \ -0.44 \ 41.20]$	$[-199.59 \ -1.85 \ 48.50]$

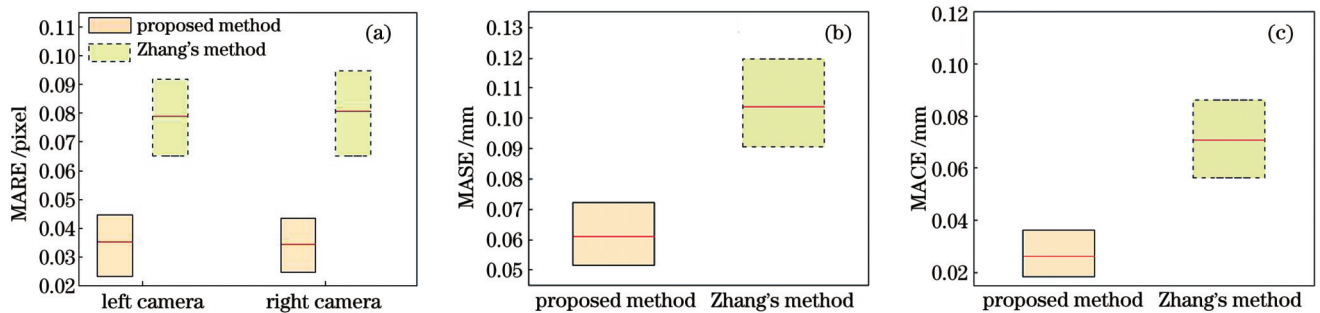


图 6 本文所提标定方法与张氏标定方法获得的各平均绝对误差对比图。(a)平均绝对重投影误差;(b)平均绝对标准长度误差;(c)平均绝对共面误差

Fig.6 Comparison diagrams of average absolute errors between proposed method and Zhang's method. (a) Mean absolute reprojection error (MARE); (b) mean absolute standard-length error (MASE); (c) mean absolute coplanar error (MACE)

采用本文所提标定方法进行双目相机标定实验获得左相机平均绝对重投影误差为 0.03522 pixel, 相比采用张氏标定方法获得的左相机平均绝对重投影误差 0.07901 pixel 降低了 55.42%; 采用本文所提标定方法进行双目相机标定实验获得右相机平均绝对重投影误差为 0.03448 pixel, 相比张氏标定方法获得的 0.08059 pixel 降低了 57.22%。采用本文所提标定方法进行双目相机标定实验获得的平均绝对标准长度误差为 0.06099 mm, 相比张氏标定方法获得的 0.10386 mm 降低了 41.28%。采用本文所提标定方法进行双目相机标定实验获得的平均绝对共面误差为 0.02622 mm, 相比张氏标定方法获得的 0.07094 mm 降低了 63.04%。可见, 与张氏标定方法相比, 本文提出的标定方法显著提高了双目相机的标定精度。此外, 在相机标定过程中本文提出的标定方法仅采集了一次靶标

图像, 可以有效提高双目相机的标定效率。

#### 4.2 基于局部靶标的标定对比实验

为了验证双目相机在采集到局部编码立体靶标图像时, 采用本文所提标定方法进行标定仍具有较高精度, 本文进行了在仅采集局部编码立体靶标图像下的相机标定补充实验。在补充实验中, 使用与 4.1 节实验相同的双目相机系统和编码立体靶标进行 15 次双目标定实验, 每次双目标定实验中双目相机仅采集一次局部编码立体靶标图像(部分编码单元被遮挡)。在仅采集局部编码立体靶标图像情况(PMPET)下以及采集完整编码立体靶标图像情况(PMEET)下, 本文所提标定方法的平均绝对重投影误差、平均绝对标准长度误差和平均绝对共面误差如图 7 所示。

仅采集局部编码立体靶标图像时, 采用本文所提方法进行双目相机标定获得的左相机平均绝对重投影

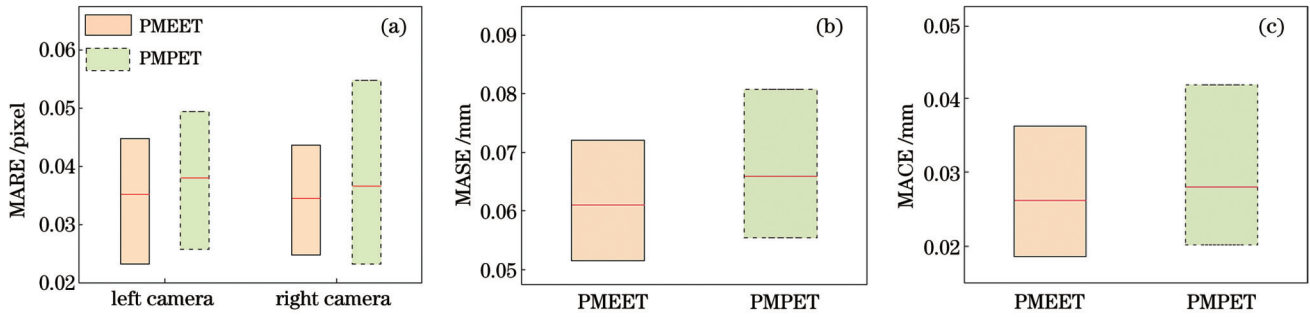


图7 仅采集局部编码立体靶标图像与采集完整编码立体靶标图像情况下的各平均绝对误差对比图。(a)平均绝对重投影误差；(b)平均绝对标准长度误差；(c)平均绝对共面误差

Fig.7 Comparison diagrams of average absolute errors between only collecting partial coding stereoscopic target image and collecting complete coding stereoscopic target image. (a) Mean absolute reprojection error; (b) mean absolute standard-length error; (c) mean absolute coplanar error

误差为 0.03807 pixel,与采集完整编码立体靶标图像获得的平均绝对重投影误差之间的相对误差为 7.49%。仅采集局部编码立体靶标图像时,采用本文所提方法进行双目相机标定获得的右相机的平均绝对重投影误差为 0.03660 pixel,与采集完整编码立体靶标图像获得的平均绝对重投影误差之间的相对误差为 5.81%。仅采集局部编码立体靶标图像时,采用本文所提方法进行双目相机标定获得的平均绝对标准长度误差为 0.06588 mm,与采集完整编码立体靶标图像获得的平均绝对标准长度误差之间的相对误差为 7.42%。仅采集局部编码立体靶标图像时,采用本文所提方法进行双目相机标定获得的平均绝对共面误差为 0.02800 mm,与采集完整编码立体靶标图像获得的平均绝对共面误差之间的相对误差为 6.36%。可见,当采集到局部编码立体靶标图像时,本文所提标定方法仍具有较高的双目相机标定精度。

### 4.3 双目相机三维测量实验

为验证本文所有实验中采用的双目相机系统的标定精度,利用 4.1 节和 4.2 节所述双目相机系统,分别对 50、60、70 mm 的标准量块测量 15 次。图 8 所示为

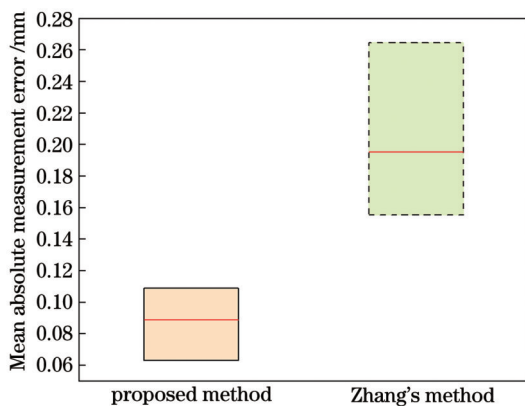


图8 本文所提方法和张氏标定方法的标准量块测量误差对比图  
Fig.8 Comparison diagram of standard measuring block measurement error by proposed method and Zhang's calibration method

本文所提方法与张氏标定方法的标准量块测量误差对比图。

如图 8 所示,采用本文所提方法进行测量得到的平均绝对测量误差为 0.08866 mm,而采用张氏标定方法进行测量得到的平均绝对测量误差为 0.19533 mm,前者相比后者降低了 54.61%。因此,相比张氏标定方法,本文所提标定方法获得的双目相机内外参具有更高的测量精度。

## 5 结 论

本文提出了一种基于编码立体靶标并结合高精度参数优化的双目相机标定方法。编码立体靶标包含 4 个不同空间姿态的编码平面靶标,通过在编码平面靶标内布置多个编码单元,并对每个标定角点进行编码,实现了单次采集靶标图像即可完成双目相机标定。相比于需要多次拍摄棋盘格靶标的张氏标定方法,所提标定方法有效提高了相机的标定效率。采用高精度参数优化方法建立结合重投影约束、标准长度约束和共面约束的目标函数,有效提高了双目相机的标定精度。实验结果表明,相比于张氏标定方法,所提标定方法有效降低了双目相机标定的平均绝对重投影误差、平均绝对标准长度误差和平均绝对共面误差。另外,在拍摄到局部编码立体靶标时,所提方法仍能高效完成双目相机标定,且与拍摄到完整编码立体靶标相比,得到的各平均绝对误差的相对误差均小于 8%,能够满足光学测量对双目相机高精度标定的要求。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [2] Zhang X W, Ren Y F, Zhen G Y, et al. Camera calibration method for solid spheres based on triangular primitives[J]. Precision Engineering, 2020, 65: 91-102.
- [3] Barone S, Neri P, Paoli A, et al. 3D acquisition and stereo-camera calibration by active devices: a unique structured light encoding framework[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105989.

- [4] 李勤文, 倪首军, 王志乾, 等. 非公共视场双目相机位姿标定[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2737-2744.  
Li Q W, Ni S J, Wang Z Q, et al. Calibration of binocular camera with non-common field of view[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(12): 2737-2744.
- [5] 王腾, 杨树明, 李述胜, 等. 振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2315001.  
Wang T, Yang S M, Li S S, et al. Error analysis and compensation of galvanometer laser scanning measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2315001.
- [6] Jiang T, Cui H H, Cheng X S. Accurate calibration for large-scale tracking-based visual measurement system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [7] Feng M C, Huang S, Wang J S, et al. Accurate calibration of a multi-camera system based on flat refractive geometry[J]. Applied Optics, 2017, 56(35): 9724-9734.
- [8] Jia Z Y, Yang J H, Liu W, et al. Improved camera calibration method based on perpendicularity compensation for binocular stereo vision measurement system[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15205-15223.
- [9] 王谭, 王磊磊, 张卫国, 等. 基于张正友标定法的红外靶标系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1828-1835.  
Wang T, Wang L L, Zhang W G, et al. Design of infrared target system with Zhang Zhengyou calibration method[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1828-1835.
- [10] 马玛双, 杨小冈, 李传祥, 等. 基于空间约束的非重叠视场相机精确标定方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1015003.  
Ma M S, Yang X G, Li C X, et al. Accurate calibration method for non-overlapping fields of cameras based on spatial constraints [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1015003.
- [11] Yu L, Han Y Y, Nie H, et al. A calibration method based on virtual large planar target for cameras with large FOV[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 101: 67-77.
- [12] 卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304008.  
Lu X D, Xue J P, Zhang Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304008.
- [13] 刘青松, 谢晓方, 张焜喆, 等. 用于聚焦型光场相机标定的棋盘角点检测算法[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1415002.  
Liu Q S, Xie X F, Zhang X Z, et al. Checkerboard corner detection algorithm for calibration of focused plenoptic camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1415002.
- [14] Zhang J, Yu H, Deng H X, et al. A robust and rapid camera calibration method by one captured image[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 4112-4121.
- [15] Abedi F, Yang Y, Liu Q. Group geometric calibration and rectification for circular multi-camera imaging system[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30596-30613.
- [16] Zhang Z, Zhao R J, Liu E H, et al. A single-image linear calibration method for camera[J]. Measurement, 2018, 130: 298-305.
- [17] Zhang J, Zhu J, Deng H X, et al. Multi-camera calibration method based on a multi-plane stereo target[J]. Applied Optics, 2019, 58(34): 9353-9359.
- [18] Chan-Ley M, Olague G, Altamirano-Gomez G, et al. Self-localization of an uncalibrated camera through invariant properties and coded target location[J]. Applied Optics, 2020, 59(13): D239-D245.
- [19] Romero-Ramirez F J, Muñoz-Salinas R, Medina-Carnicer R. Speeded up detection of squared fiducial markers[J]. Image and Vision Computing, 2018, 76: 38-47.
- [20] Hurník J, Zatočilová A, Paloušek D. Circular coded target system for industrial applications[J]. Machine Vision and Applications, 2021, 32(1): 39.
- [21] 周舵, 王鹏, 孙长库, 等. 投影仪和双相机组成的三目立体视觉系统标定方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115001.  
Zhou D, Wang P, Sun C K, et al. Calibration method for trinocular stereovision system comprising projector and dual cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115001.
- [22] 徐呈艺, 刘英, 肖轶, 等. 基于改进粒子群算法的相机内参优化方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 041514.  
Xu C Y, Liu Y, Xiao Y, et al. Optimization method for camera intrinsic parameters based on improved particle swarm algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 041514.
- [23] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory[M]// Watson G A. Numerical analysis. Lecture notes in mathematics. Heidelberg: Springer, 1978, 630: 105-116.

## High-Precision Binocular Camera Calibration Based on Coding Stereoscopic Target

Yang Zhaohui, Zhu Huabing\*, Yin Yulong, Yang Pei

*School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China*

### Abstract

**Objective** Binocular camera calibration is important to realize high-precision 3D measurements, dynamic target trajectory estimations, and 3D positioning through binocular vision. Zhang's traditional calibration method based on a checkerboard target is currently the most widely used camera calibration method. However, Zhang's calibration method has certain shortcomings. First, Zhang's calibration method requires multiple shots of the checkerboard target, rendering the calibration process cumbersome. Second, when using the checkerboard target for calibration, the calibration accuracy is often degraded owing to the acquisition of local target images; this may sometimes also lead to failure of calibration. Finally, Zhang's calibration method optimizes the parameters of a camera through reprojection constraints; moreover, the constraints are extremely singular, and hence, accurate camera calibration results cannot be obtained. To address the above-mentioned issues, this paper proposes a high-precision binocular camera calibration method based on a novel stereoscopic target.

**Methods** To solve the problems encountered in Zhang's calibration method, first, this study adopted a new type of coding stereoscopic target composed of four encoded plane targets with different spatial attitudes so that only one target image was needed to



collect to complete the binocular camera calibration. In each coding plane target, multiple independent coding units were arranged to eliminate the traditional checkerboard structure, which could effectively address occlusion of the target. Second, each calibration corner was coded by a new variable-capacity coding flag, which improved the matching efficiency and accuracy of points with the same name. Finally, to enrich the camera parameter optimization constraints, a high-precision parameter optimization method was adopted, exploiting the three-dimensional information of the coding stereoscopic target and introducing standard length and coplanar constraints, which effectively improved the calibration accuracy of binocular cameras.

**Results and Discussions** Compared with Zhang's traditional calibration method, the method proposed in this paper demonstrates significantly improved calibration efficiency and accuracy. In Zhang's calibration method, the checkerboard target must be shot multiple times, and each shot must ensure the integrity of the checkerboard target and the difference in the spatial posture of the checkerboard target. In contrast, the method proposed in this paper only requires to shoot the coding stereoscopic target once and can cope with the situation of the local target; therefore, the calibration efficiency is significantly improved. For the calibration accuracy, compared with Zhang's calibration method, the proposed method reduces the reprojection errors of the left and right cameras by 55.42% and 57.22%, respectively; the standard-length error by 41.28%; and the coplanarity error by 63.04% (Fig. 6). Simultaneously, when using the standard gauge block for verification, the measurement error of the proposed method is reduced by 54.61% compared with that of Zhang's calibration method (Fig. 8). When the locally encoded stereoscopic target is captured, the relative error between the left and right camera reprojection errors is 7.49%, the relative error of the standard-length error is 7.42%, and the relative error of the coplanar error is 6.36% compared with the complete target (Fig. 7). When a locally encoded stereoscopic target is recorded, the proposed method still demonstrates a high calibration accuracy for the binocular camera.

**Conclusions** This paper proposes a binocular camera calibration method based on a coding stereoscopic target, combined with high-precision parameter optimization. The coding stereoscopic target includes four encoded plane targets with different spatial attitudes. By arranging multiple encoding units in the encoded plane target and encoding each calibration corner, the binocular camera can be calibrated based on a single target image acquisition. Compared with Zhang's calibration method, which requires multiple shots of the checkerboard targets, the method proposed in this paper effectively improves the camera calibration efficiency. In this study, a high-precision parameter optimization method is used to establish an objective function that combines reprojection constraints, standard length, and coplanar constraints, thereby effectively improving the calibration accuracy of binocular cameras. The experimental results reveal that compared with Zhang's calibration method, the proposed method effectively reduces the mean absolute reprojection error, mean absolute standard-length error, and mean absolute coplanarity error of binocular camera calibration. In addition, when the locally coded stereoscopic target is captured, the proposed method can still efficiently complete binocular camera calibration, and the relative error of each mean absolute error is less than 8% compared with that when the completely coded stereoscopic target is captured. This condition satisfies the requirements of high-precision calibration of binocular cameras for optical measurements.

**Key words** measurement; binocular camera calibration; coding stereoscopic target; coding symbol; high-precision parameter optimization