

文章编号 1004-924X(2025)18-2914-15

基于交比不变性的十字形标定靶标及其识别方法

史宝全^{1,2,3*}, 侯轩哲¹, 贺 谦², 陈先民², 张文东², 杨 林⁴

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065;

3. 西安宝创速维智能科技有限公司, 陕西 西安 712000;

4. 中科国通检测认证(天津)有限公司, 天津 300462)

摘要:针对大视场测量中传统大尺寸标定靶标制造困难、携带不便及易变形的问题,提出一种基于交比不变性的十字形标定靶标及其识别方法。首先,设计了由两根等长靶尺相互垂直连接而成的十字结构靶标。该靶标的四条臂等长,且各臂上布置满足交比恒定为4/3的靶标点(圆形非编码标志点),主体采用铝合金或碳纤维复合材料,兼顾了轻量化和高强度。其次,利用交比不变性设计了靶标点的编码规则,并开发了十字形靶标识别流程,实现标定图像中靶标点的自动检测与解码。最后,制作了靶标实物并开展了实验测试。实验结果表明所设计的靶标在80°的大倾角范围内仍能准确识别,并且其结构简单、易于制造、携带及拆装,能够满足工业现场复杂环境下大视场相机的快速标定需求。

关键词:相机标定;交比不变性;十字形靶标;大视场

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253318.2914

CSTR:32169.14.OPE.20253318.2914

A cross-shaped calibration target based on cross-ratio invariance and its identification method

SHI Baoquan^{1,2,3*}, HOU Xuanzhe¹, HE Qian², CHEN Xianming², ZHANG Wendong², YANG Ling⁴

(1. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Xi'an 710065, China;

3. Xi'an Baochuang Suwei Intelligent Research Co., Ltd, Xi'an 712000, China;

4. National Wind Energy Testing & Certification (Tianjin) Co., Ltd, Tianjin 300462, China)

* Corresponding author, E-mail: bqshi@xidian.edu.cn

Abstract: To address the challenges of manufacturing, portability, and deformation associated with traditional large-scale calibration targets in large field-of-view (FOV) measurements, a cross-shaped calibration target based on cross-ratio invariance and its recognition method was proposed. First, a cross-structured target was designed by vertically connecting two equal-length rulers. The target featured four arms of equal length, with circular uncoded markers arranged along each arm such that the cross-ratio among

收稿日期:2025-05-23;修订日期:2025-07-02.

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2023YFF0720400);强度与结构完整性全国重点实验室开放基金(No. LSSIKFJJ202402005);天津市科技计划项目(No. 22YFYSHZ00110);陕西省技术创新引导专项(No. 2024ZC-YYDP-28)

any four adjacent points remained constant at $4/3$. The main structure was made of aluminum alloy or carbon fiber composite material, ensuring both lightweight and high strength. Second, a marker encoding rule was developed based on the principle of cross-ratio invariance, and a recognition algorithm was designed to enable automatic detection and decoding of target points in calibration images. Finally, a physical prototype of the target was fabricated and tested. Experimental results demonstrate that the proposed target can be accurately recognized even at a large tilt angle of up to 80° , and its simple structure makes it easy to manufacture, assemble, disassemble, and carry, making it well-suited for rapid calibration of wide FOV cameras in complex industrial environments.

Key words: camera calibration; cross-ratio invariance; cross-shaped calibration target; large fields of view

1 引 言

3D 视觉技术凭借其高精度、高效率以及非接触式的独特优势,已经在外形轮廓检测、结构变形分析、人脸识别、智能机器人和自动驾驶等工业自动化领域得到了广泛应用。相机内外参数的精确标定是 3D 视觉系统的关键第一步,也是确保实现精准、快速测量的基础。在众多标定方法中,基于标定靶标的相机标定方式被广泛应用,通过专门设计的靶标来获取相机的内外参数,为后续的图像处理和三维重建提供了可靠的基础数据。

标定靶标按照维度可划分为一维、二维和三维标定靶标。一维靶标仅提供沿一条直线的靶点信息,通常适用于工业生产线长度测量、机器人直线导航与定位等特定场合。Zhang^[1]最早提出利用一维靶标进行相机标定的方法,但该方法需要将一维靶标的一端固定,在实际应用中较难精实现。Shi 等人^[2]基于图像相似变换的不变性特点,提出了一种适用于一维旋转靶标的加权相似不变线性标定算法。Halloran 等人^[3]进一步将一维标定方法拓展到分布式摄像头传感器网络的标定与定位中,实现了各相机节点的局部估计向全局一致估计的融合。Duan 等人^[4]则提出了一种新的畸变校正非线性优化准则,并引入循环畸变校正方法,显著提升了一维靶标标定算法的精度。一维标定靶标的主要优势在于结构简单、制造方便,尤其便于实现大尺寸靶标的加工与布设。然而,在大视场测量中,相机成像的非线性畸变更为显著,而一维靶标所提供的几何信息有限,难以有效建模

和校正畸变,因此在实际应用中受到了较大限制。

二维标定靶标,通常被称为标定板,是 3D 视觉系统中最常用的一种标定靶标。其中,棋盘格标定板因其特征点分布规律性强、提取精度高和标定精度可靠^[5],成为众多应用中的首选。然而,二维标定板的制作存在自身的挑战,尤其是大尺寸标定板的加工难度较高。由于标定板上印制或粘贴靶标点的表面必须保持足够的平整度,这限制了大尺寸标定板的制造,且容易受到加工误差的影响,从而影响标定精度。为了解决大视场相机标定中的这一难题,蒯杨柳等人^[6]提出了一种通过组合多个小棋盘标定板以构建大棋盘标定板的方法。这种方法在一定程度上缓解了大尺寸标定板难以加工的技术瓶颈,使得标定板的制作更加灵活。然而,该方法在通用性上仍存在不足,尤其是在复杂工业场景中,如何保证多个小棋盘组合的精度和一致性,依然是一个技术难点。高婷^[7]提出了一种基于子板拼接的大视场短焦距摄像机标定算法,并设计了相应的标定模板。这种方法在一定程度上解决了制作大尺寸标定板的难题。然而,在实际标定过程中,对模板的平整性要求非常高。为了获得较小的平面拟合误差,需要不断调整模板的位置。尽管经过多次位置调整以减少平面拟合误差,仍难以完全消除由于标定模板本身的平整度不足带来的误差。

三维标定靶标相比二维标定靶标增加了一个维度,在加工和制造上更具挑战性。梅文胜等人^[8]建立了一种用于相机标定的全景三维控制场,其精度达 $\pm 0.1 \text{ mm}$,但该方法仅适用于实验

室环境,无法应用于复杂工业场景。杨昭辉等人^[9]提出了一种基于编码立体靶标的双目标定方法,实现了单次采集靶标图像即可完成相机标定,提高了标定效率。秦鹏举等人^[10]为解决多目相机快速标定问题,提出一种基于新型蜂窝立体结构靶标的多目相机标定方法,能够快速准确完成多目相机标定。但与杨昭辉等人^[9]的方法类似,秦鹏举等人^[10]的靶标设计同样面临加工复杂、标志点编码严格的问题,在实际操作中,平均重投影误差较高。

胡浩等人^[11]设计了一种基于同心圆环编码标志点的大型十字架形标定靶标,主要用于大视场多相机的标定。相较于传统的二维、三维靶标,这种设计能够实现大尺寸靶标的加工制造,解决大视场标定的难题。然而,该方案也存在一定的局限性:由于编码靶标点尺寸较大,需要专门制作用于粘贴编码靶标点的基板,并将其安装在靶尺上。这种方式破坏了标定靶标的结构一致性和整体性,导致靶标的尺寸、重量及不稳定性增加。此外,该标定靶标还存在拆装繁琐、携带不便以及容易发生变形等问题,因此缺乏通用性。

综上所述,一维靶标虽然加工方便、尺寸扩展性好,但提供的几何信息有限,在标定精度及畸变建模能力等方面存在不足,因此在实际大视场标定应用中使用较少。二维和三维靶标虽然能显著提升标定精度,但存在大尺寸靶标加工制造困难、携带不便及易变形等问题,不能满足工业现场复杂环境下大视场相机快速、稳定标定的需求。

本文提出一种基于交比不变性的十字形标定靶标及其自动识别方法。该靶标主体选用铝合金或碳纤维复合材料,由两根互相垂直的靶尺通过螺栓连接构成四条等长臂的十字形结构,各臂中心线上等间距布置靶标点。利用交比恒定原理设计靶标点的编码规则,并开发了靶标点自动检测与解码流程。实验表明,该靶标在 80° 的大倾角范围内仍能保持高识别精度,且对环境干扰具有良好的鲁棒性,可满足工业现场复杂环境下的相机标定需求,尤其是大视场相机的快速标定需求。

2 基于交比不变性的十字形靶标设计

2.1 交比不变性原理

根据透视投影原理,尽管空间中线段的绝对长度在透视变换下会发生变化,但长度之间的比例始终保持不变。如图 1 所示,假设直线上的两点 A 和 B 为基点, C 和 D 为分点。由分点与基点确定的两个有向线段之比称为仿射比,记作:

$$SR(A, B; C) = AC/BC. \quad (1)$$

直线上分点 C 的仿射比与分点 D 的仿射比之比称为交比:

$$CR(A, B; C, D) = \frac{SR(A, B; C)}{SR(A, B; D)}. \quad (2)$$

交比是射影几何中唯一不随透视变化而改变的不变量,因此具有如下性质:

$$CR(A, B; C, D) = CR(a, b; c, d), \quad (3)$$

其中:点 a, b, c, d 分别为点 A, B, C, D 在图像平面上的对应像点。该式清晰地阐明了交比在透视投影下的不变性。

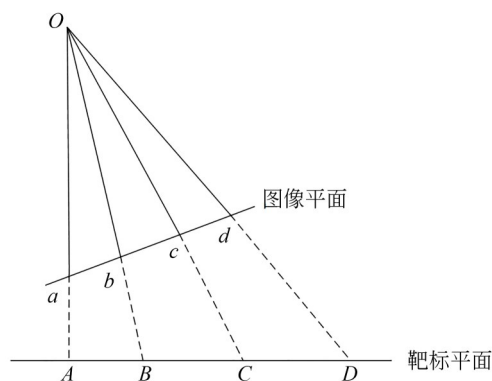


图 1 交比不变性原理示意图

Fig. 1 Illustration of the cross-ratio invariance principle

2.2 十字形靶标结构设计

现有的十字形标定靶标通常采用编码标志点作为靶标点^[12]。尽管编码标志点易于实现自动化的编码与解码操作,但由于其尺寸较大,若直接制备在靶尺表面,则会显著增加靶标整体的尺寸与重量。为缓解这一问题,一些学者提出了如图 2 所示的分体式设计^[11],虽然在一定程

度上降低了重量,但牺牲了靶标结构的一致性。

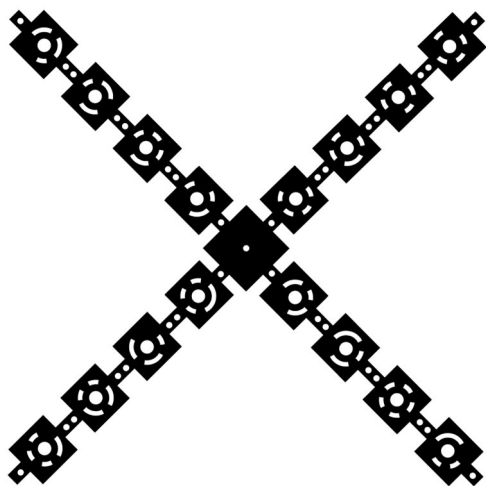


图2 现有大型十字形靶标结构示意图^[11]

Fig. 2 Structure of the existing large cross-shaped target^[11]

针对上述问题,本文提出了一种基于交比不变性原理的新型十字形标定靶标。如图3所示,该靶标由两根等长且相互垂直的靶尺(靶尺I与靶尺II)通过螺栓连接构成,形成四条等长臂(臂I、臂II、臂III和臂IV)所构成的十字结构。靶标点沿每条臂的中心线等间距排列:臂I设置 N 个靶标点($N \geq 4$),其余三条臂各设置 $N+1$ 个靶标点。根据交比不变性原理(式(2)),每条臂上任意相邻4个靶标点的交比恒为 $4/3$ 。靶标点选

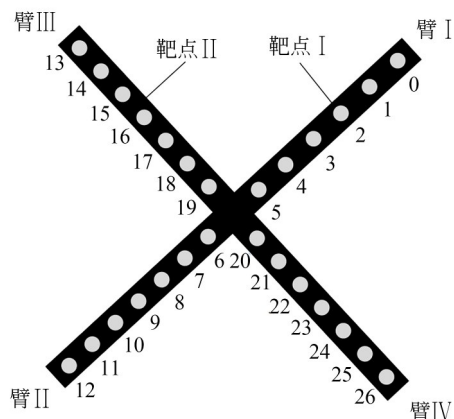


图3 本文设计的十字形靶标结构示意图

Fig. 3 Structure of the proposed cross-shaped target structure

用封闭填充型圆形非编码标志点,与编码标志点相比,非编码标志点去除了复杂的编码信息,无需进行解码,显著提升了靶标点检测的实时性和鲁棒性。同时,由于非编码标志点尺寸较小,有效缩减了靶尺宽度,使整个标定装置更加轻便灵活。

靶标点可通过粘贴或印刷的方式制备在靶尺上。对于粘贴方式,如图4(a)所示,可以使用背胶型标志点,通过钢尺等工具在靶尺四条臂上逐点定位并手动粘贴。另一种方法是使用条状型标志点,如图4(b)所示,沿靶尺臂的长度方向整体粘贴标志点带。相比于手动逐点粘贴,条状粘贴方式不仅操作更为便捷,且标志点位置更加准确。此外,标志点也可通过印刷工艺直接制备在靶尺表面。

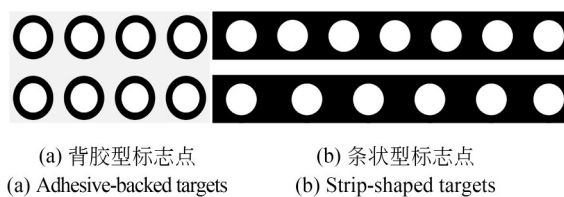


图4 靶标点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of target points

无论采用哪种制备方式,靶标点之间的间距都不可避免地存在一定误差,进而导致交比计算结果出现偏差。根据交比公式分析,当点间距存在 $\pm 4\%$ 的误差时,交比误差约为 ± 0.02 ;当点间距误差达到 $\pm 15\%$ 时,交比误差可达 ± 0.08 。相较而言,条状粘贴和印刷方式的点间距误差较小,交比误差通常可控制在 ± 0.02 以内;而手动粘贴方式因人为因素影响较大,其交比误差需控制在 ± 0.08 以内。在本文制备的十字形靶标实物中,靶标点间距为 50 mm 。若设定交比误差范围为 $\pm 0.02 \sim \pm 0.08$,对应的点间距误差应控制在 $\pm 2\text{ mm} \sim \pm 7.5\text{ mm}$ 之间。

靶标主体采用铝合金或碳纤维复合材料,以兼顾轻量化与高强度需求,确保在使用过程中具备优良的抗形变能力。为减少表面反光对相机标定的干扰,靶标整体采用哑光黑色为主色调,并对表面进行漫反射处理(如喷涂哑光漆),以有

效抑制镜面反射引起的高光噪声。同时,靶标平面需保持高度光滑,以保证靶标点的共线性与等间距精度。

该靶标在标定应用中,无需精确测量每个靶标点的坐标,两根靶尺也无需完全共面,仅需预先记录每根靶尺首尾两靶标点的物理间距。其可拆卸式结构有效降低了携带与维护成本。相比传统的大尺寸标定板或标定块,该靶标具有加工简便、适应性强、轻量化等优势,尤其适用于大视场条件下的现场快速标定。

2.3 基于交比不变性的靶标点编码规则

靶标点的提取与编码是相机标定中的关键环节。在编码过程中,需要根据拓扑关系对靶标点进行排序,因此靶标点的布置必须同时满足均匀性与可区分性要求。

2.3.1 编码规则

针对靶尺I(靶标点总数为 $2N+1$),其起始端与终端定义如下:起始端为臂I(靶标点数量为 N 的一端),终端为臂II(靶标点数量为 $N+1$ 的一端),靶标点沿靶尺I从起始端至终端依次赋予ID编号为0至 $2N$ 。对于靶尺II(靶标点总数为 $2N+2$),其起始端与终端定义需满足与靶尺I的拓扑关系:起始端为臂III(顺时针旋转 90° 后与靶尺I起始端重合的一端),终端为臂IV(顺时针旋转 90° 后与靶尺I终端重合的一端)。靶标点沿靶尺II从起始端至终端依次赋予ID编号为 $2N+1$ 至 $4N+2$ 。如图3所示,臂I设置了6个靶标点,即 $N=6$,靶尺I包含13个靶标点,其ID编号依次为0至12;靶尺II包含14个靶标点,其ID编号依次为13至26。

2.3.2 比例尺定义

每根靶尺上首尾两个靶标点共同构成一根比例尺,如图3所示,靶尺I由ID为0和12的靶标点构成比例尺,靶尺II由ID为13和26的靶标点构成另一根比例尺。通过近景摄影测量或高精度光学仪器测量首尾靶标点之间的物理距离,并将该距离作为比例尺长度,作为标定过程中的实际测量基准。为保证测量精度,比例尺需定期(每半年或每一年)进行重新校准,以更新其长度参数。

3 基于交比不变性的十字形靶标识别方法

基于交比不变性的十字形标定靶标识别流程如图5所示,主要包括靶标点整像素及亚像素边缘提取、椭圆拟合、直线拟合与分割、交比不变性检验、靶标点数量验证及ID赋值,具体步骤如下。

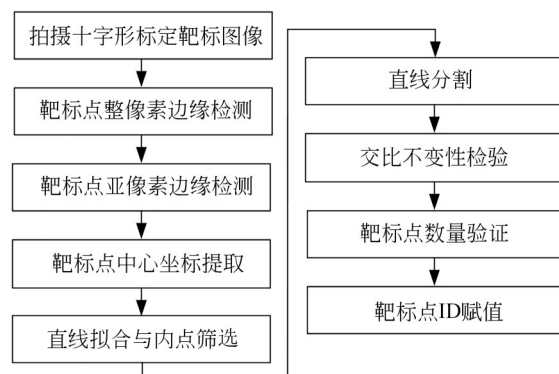


图5 十字形标定靶标识别流程

Fig. 5 Detection process of the cross-shaped calibration target

第一步:拍摄十字形标定靶标图像。将靶标以适当姿态置于相机视场内,确保其四条臂均处于相机的有效视野范围内。

第二步:靶标点整像素边缘检测。采用Canny边缘检测算法^[13],通过梯度运算与非极大值抑制,提取靶标点的整像素级边缘,初步定位其粗略轮廓。

第三步,靶标点亚像素边缘检测。基于高斯曲线拟合等方法,对第二步提取的边缘点进行亚像素级精确定位^[14-15],为后续几何拟合提供高精度数据基础。

第四步,靶标点中心坐标提取。采用最小二乘法迭代算法^[16],将亚像素边缘点拟合为椭圆曲线,提取椭圆几何中心作为靶标点的亚像素级精确坐标。

第五步,直线拟合与内点筛选。采用RANSAC算法^[17]对靶标点坐标进行拟合,提取两条相互垂直的直线,分别对应十字形靶标两根靶尺的中心线。通过迭代筛选,识别各直线上的

内点(inliers),并剔除噪声点与异常数据。

第六步,直线分割。计算第五步拟合得到的两条直线的交点,并将该交点作为分割点,将每条直线分为两段。分割后的直线段分别对应十字形靶标四条臂的中心线。

第七步,交比不变性校验。对分割后的每段直线上的内点,根据公式(2)计算其交比,保留满足交比不变性条件的内点,作为有效靶标点。

第八步,靶标点数量验证。统计通过交比较验的每段直线上的有效靶标点数量。若各段有效靶标点数量与设计值一致(臂I为 N 个,其余三臂各为 $N+1$ 个),则继续执行下一步;若不一致,则触发异常处理流程,重新拍摄十字形标定靶标图像并进行识别。

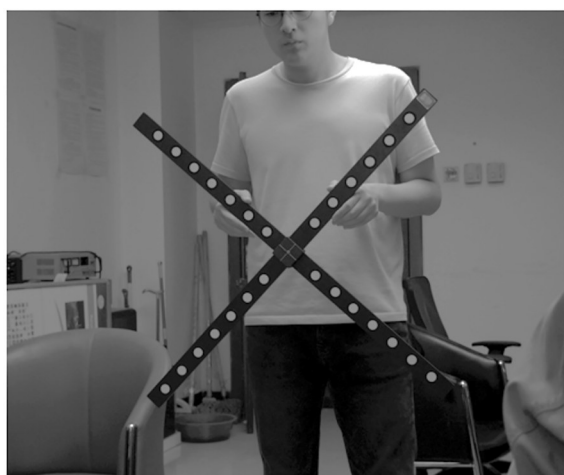
第九步,靶标点 ID 赋值。根据直线段与靶

标各条臂的对应关系,按照预定编码规则依次为靶标点分配 ID 编号。例如,当 $N=6$ 时,靶尺I(由臂I和臂II组成)的 ID 编号为 $0\sim 12$,靶尺II(由臂III和臂IV组成)的 ID 编号为 $13\sim 26$ 。

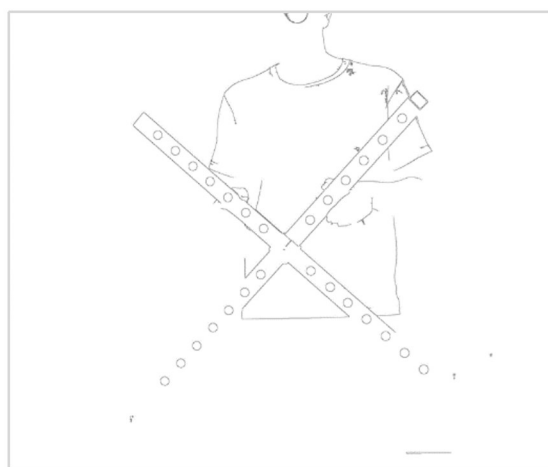
3.1 靶标点识别

3.1.1 靶标点边缘检测

相较于仅能检测水平方向和竖直方向梯度的 Sobel 算法,Canny 边缘检测算法通过多方向梯度计算与非极大值抑制(Non-Maximum Suppression)技术,能够实现对复杂边缘的精准定位^[18]。这一特性使其在处理标定靶标边缘时表现尤为出色,尤其在图像存在噪声干扰或边缘方向不规则的场景中,Canny 算法的检测效果明显优于传统的 Sobel 算法。因此,本文采用 Canny 算法提取靶标点的整像素边缘,如图 6 所示,为提取得到的靶标点边缘结果。



(a) 采集的靶标图像
(a) Image of a calibration target



(b) 靶标点边缘检测结果
(b) Edge detection result of target points

图 6 某靶标图像中靶标点边缘检测结果

Fig. 6 Edge detection of the target points

亚像素边缘定位是提升靶标点识别精度的关键步骤。通过亚像素级定位,可有效降低由像素离散性引起的定位误差(通常约为 ± 0.5 pixels)。本文基于靶标点轮廓的灰度分布特性,采用高斯曲线拟合法实现亚像素边缘定位^[14]。具体流程如下:首先进行灰度投影建模,沿靶标点边缘方向提取灰度值序列,构建一维灰度分布曲线;随后通过最小二乘法将灰度分布拟合为高斯

函数,取其峰值位置作为亚像素级边缘坐标;最后结合相邻像素的灰度梯度信息,进一步修正边缘位置,提升定位精度。

3.1.2 靶标点中心坐标提取

采用最小二乘法^[16]对提取的靶标点亚像素边缘点集进行迭代椭圆拟合,确定靶标中心坐标。为抑制噪声干扰,在每次迭代中,首先基于当前拟合的椭圆参数计算所有边缘点到椭圆的

几何距离,统计距离的标准差为 σ ;随后剔除距离超过 3σ 的离群点(outliers),仅保留有效边缘点参与下一轮迭代。迭代收敛后,最终拟合的椭圆几何中心即为靶标点中心坐标。

椭圆作为圆锥曲线的典型代表,其一般方程为:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0, \quad (4)$$

其中: A, B, C, D, E, F 为待定系数。为消除尺度影响,对式(4)两端同除以 F (假设 $F \neq 0$),可得标准化方程:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + 1 = 0, \quad (5)$$

其中: $a = A/F, b = B/F, c = C/F, d = D/F, e = E/F$ 。为求解椭圆参数 $\{a, b, c, d, e\}$ 构造基于几何距离的最小二乘目标函数:

$$f(a, b, c, d, e) = \min \left(\sum_{i=1}^N \left[\frac{|ax_i^2 + bx_iy_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + 1|}{\sqrt{(2ax_i + by_i + d)^2 + (bx_i + 2cy_i + e)^2}} \right]^2 \right), \quad (6)$$

其中: $\min()$ 表示最小值函数, N 为有效边缘点的数量。通过拉格朗日乘子法将约束条件(椭圆判据)融入目标函数,并利用奇异值分解(SVD)或梯度下降法求解参数。最终,椭圆中心坐标 (x_c, y_c) ,可通过以下公式解算:

$$x_c = \frac{2cd - be}{B^2 - 4AC}, y_c = \frac{2ae - bd}{B^2 - 4AC}, \quad (7)$$

其中: A, B, C 由标准化参数 a, b, c 重新计算得到。图7所示为采用最小二乘迭代拟合算法提

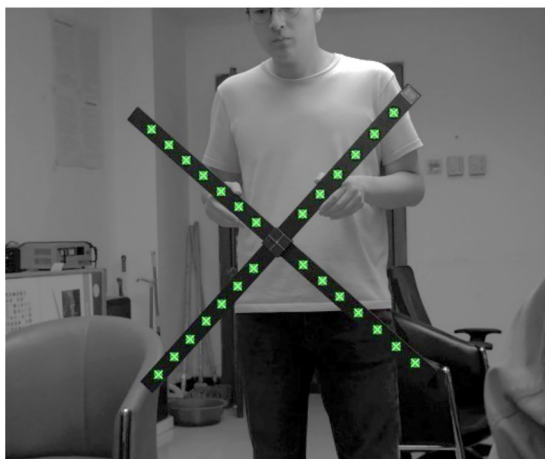


图7 提取的某靶标图像中靶标点中心坐标

Fig. 7 Extracted center coordinates of the target points

取的某标定靶标图像中27个靶标点的中心坐标。

3.1.3 直线拟合与分割

在完成靶标点亚像素中心坐标提取后,所有候选点(包括有效靶标点与噪声点)共同构成待处理点集。鉴于噪声点可能对后续几何结构分析产生干扰,本文采用RANSAC算法^[17]对候选点进行直线拟合,以提取靶标几何结构中的两条基线。RANSAC算法基于概率统计原理,能够在存在异常点或噪声的情况下稳健地估计模型参数。通过迭代筛选,最终可准确拟合出两条直线并标记其内点,具体关键步骤如下:

(1)模型初始化与随机抽样。在候选点集中,随机选取两个点作为初始样本,计算其对应的直线方程 L 。该步骤以最小样本数量(2点)建立初始模型假设,满足直线参数的最小约束条件。

(2)内点识别与阈值筛选。对所有候选点,计算其到直线 L 的垂直距离 D ,并与设定的阈值 T 比较。若 $D < T$,则将该点标记为内点并进行统计。阈值 T 根据图像分辨率和噪声水平设定(通常为2~5 pixels),以平衡噪声抑制与有效点保留。

(3)迭代优化与模型置信度提升。重复执行步骤(1)和步骤(2),直至达到设定的最大迭代次数。最大迭代次数一般依据公式 $M \times (M-1)/2$ 计算,其中 M 为候选靶标点的数量。通过多轮采样与验证,逐步提升模型的置信度与拟合精度。

(4)直线拟合。在所有迭代结果中,选取内点数量最多的直线作为第一条直线,并从候选点集中剔除其对应的内点。重复步骤(1)至步骤(4),拟合出第二条直线。如图8所示为拟合的两条直线。

在完成两条直线拟合后,计算其交点 O ,并以该交点作为分割点,将每条直线分割为两段。同时,将每条直线对应的内点划分为两组,分别对应于分割后的两段直线。实际上,分割得到的四段直线与十字形标定靶标的四条臂的中心线一一对应。

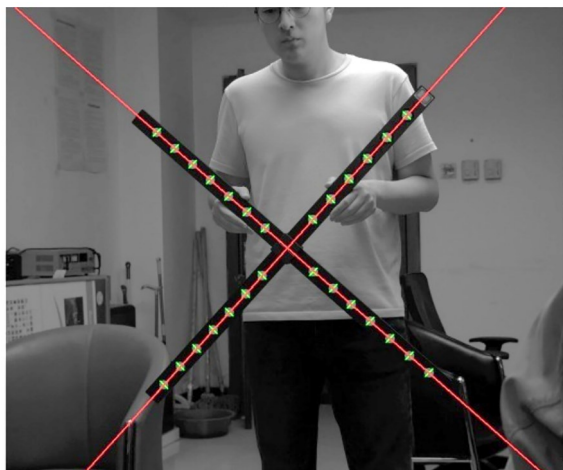


图 8 某靶标图像中拟合的两条直线

Fig. 8 Two fitted lines in a calibration target image

3.2 靶标点 ID 赋值

3.2.1 交比不变性检验

在十字形靶标设计中,基于其几何特性,每条臂上的靶标点共线且等间距分布,且任意相邻四个靶标点的交比值恒定为 $4/3$ 。因此,本文采用交比不变性检验方法对靶标点进行筛选,仅保留满足交比不变性条件的内点作为分割后直线上的有效靶标点。具体检验流程如下:

(1)初步筛选。对于分割后的一段直线,若其对应的内点数量少于 4 个,则判定所有内点均不满足交比不变性条件;若内点数量等于或大于 4 个,则计算每个内点到直线交点 O 的距离,并按照距离从小到大对内点进行排序。

(2)前 4 个内点交比验证。从排序后的内点中取前 4 个,计算它们的交比 λ 。若交比满足条件 $4/3 - \epsilon \leq \lambda \leq 4/3 + \epsilon$ (其中 ϵ 为误差因子,取值范围为 $0.02 \sim 0.08$),则判定前 4 个内点满足交比不变性条件,并将其标记为有效靶标点。

(3)第 5 个内点交比验证。对于排序中的第 5 个内点,选取其相邻的前三个内点(即排序第 4, 3, 2 位内点),构成新的 4 点集合,计算交比 λ 。若该交比仍满足上述不变性条件,则将第 5 个内点也标记为有效靶标点。

(4)其余内点交比验证。根据步骤(3)中第 5 个内点的验证方法,依次对排序中的其他内点进行交比检验,直至所有内点完成验证。

3.2.2 靶标点 ID 赋值

在完成交比不变性检验后,需对四段分割后的直线进行几何一致性验证。具体方法是统计每段直线对应的有效靶标点数量,并与十字形标定靶标预设的靶标点数量(四条臂上靶标点数量)进行比对。例如,若某段直线对应的有效靶标点数量为 N ,而其他三段直线对应的有效靶标点数量均为 $N+1$,则判定与靶标预设设计一致,检验结果合格。

检验合格后,对四段直线对应的有效靶标点进行 ID 赋值,具体流程如下:

(1)臂 I 上靶标点 ID 赋值。对于有效靶标点数量为 N 的分割直线(对应臂 I 的中心线),计算每个靶标点到交点 O 的欧氏距离,并将靶标点按距离从远到近降序排列,并依次赋值 ID 为 $0 \sim N-1$ (如图 9 中臂 I 上靶标点 ID 赋值为 $0 \sim 5$)。

(2)臂 II 上靶标点 ID 赋值。对于与有效靶标点数量为 N 的分割直线共线的另一段分割直线(对应臂 II 的中心线,靶标点数量为 $N+1$),同样计算每个靶标点到交点 O 的距离,按距离从近到远升序排列,并依次赋值 ID 为 $N \sim 2N$ (如图 9 中臂 II 上靶标点 ID 赋值为 $6 \sim 12$)。

(3)基准向量的构建。以 ID 为 0 的靶标点为起始点, ID 为 $2N$ 的靶标点为终点,构建基准向量 $\mathbf{a}$,该向量定义了靶标点分布的主方向。

(4)臂 III 与臂 IV 上靶标点 ID 赋值。对于剩

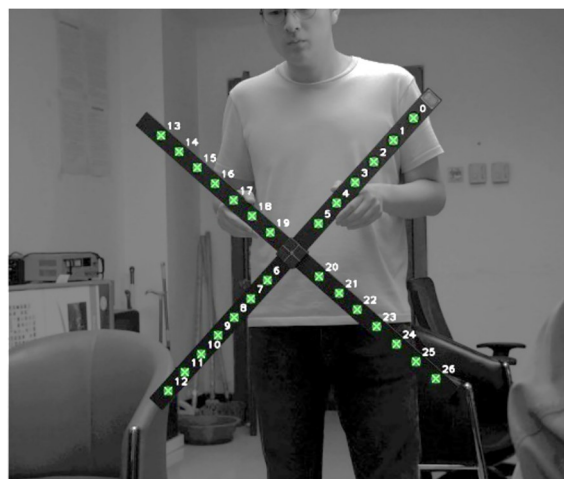


图 9 某靶标图像中靶标点 ID 赋值

Fig. 9 ID assignment for target points.

余两段分割直线,选取距离交点 O 最远的有效靶标点,与ID为0的靶标点构成向量 b (以ID为0为起点)。计算向量 b 与基准向量 a 的叉积,即 $a \times b$ 。若叉积结果为正,将该段分割直线(对应臂Ⅲ的中心线)对应的有效靶标点按距离从远到近排序,ID依次赋值为 $2N+1 \sim 3N+1$ (如图9中臂Ⅲ上靶标点ID赋值为13~19);若叉积结果为负,将该段直线(对应臂Ⅳ的中心线)对应的有效靶标点按距离从近到远排序,ID依次赋值为 $3N+2 \sim 4N+2$ (如图9中臂Ⅳ上靶标点ID赋值为20~26)。

4 实验分析

为开展相关实验,制作了如图10所示的十字形标定靶标实物。该靶标主体采用碳纤维材料制造,整体结构为空心框架式设计,在保证高刚度的同时实现轻量化,总质量仅为570 g。单根靶尺的尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为900 mm $\times$ 30 mm $\times$ 15 mm。其表面靶标点采用条状型标志点,由高抗碎裂材料(PET)制成,直径为20 mm(可根据需求定制加工)。该条状型标志点背胶粘性强,可将整条靶标点牢固地贴附于靶尺表面,确保使用过程中的稳定性与耐用性。两根靶尺通过六角螺丝连接于中部,组装成标准十字形结构,支持自由拆装。在运输与存储时,可将两根靶尺重叠固定,显著减少空间占用,提升便携性;使用过程中,可单手操作,便于高效完成标定任务。



图10 制作的十字形靶标实物图

Fig. 10 Image of the fabricated cross-shaped target

4.1 靶标识别能力测试

为评估十字形靶标在复杂姿态下的识别鲁

棒性,本实验首先测试了其在不同倾斜角度条件下的识别性能。根据标定应用的一般要求,常规场景中靶标的倾斜角度通常控制在 $\pm 45^\circ$ 以内^[19],靶标能够保持较高的识别率。针对工业现场可能出现的极端工况,如复杂光照、振动干扰或空间受限环境,本实验进一步扩展了测试范围,对靶标在大倾角 $\pm 80^\circ$ 下的识别能力进行了验证,以全面评估其在极端条件下的适用性和鲁棒性。

搭建的实验测试场景如图11所示。实验中,采用Basler acA2500-60 μ m双目相机进行靶标图像采集,图像分辨率为2 592 $\times$ 2 048,像元尺寸为4.8 μ m,采集模式设置为黑白模式。双目相机通过一根横梁固连在一起,搭配MVL-MF1228M-10MPE定焦光学镜头,焦距为12 mm。图12展示了十字形靶标在 0° 倾角下的识别结果,所有靶标点均被准确识别。



图11 实验场景图

Fig. 11 Experimental setup



图12 0° 倾角下靶标点的识别结果

Fig. 12 Target point recognition results at 0° tilt angle

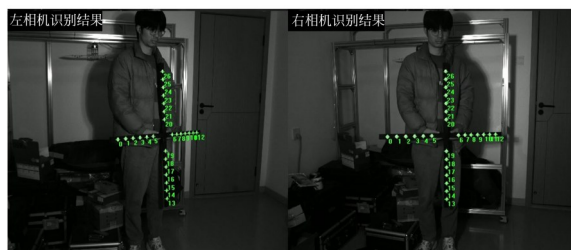
图 13 进一步展示了十字形靶标在约 40° 左倾、右倾、前倾和后倾姿态下的识别效果。图中绿色编号点表示成功识别的靶标点,蓝色点为环境噪声干扰点(彩图见期刊电子版)。实验结果表明,在常规标定应用中,本文提出的十字形靶标具有较高的识别准确率和出色的鲁棒性,能够

充分满足实际应用需求。

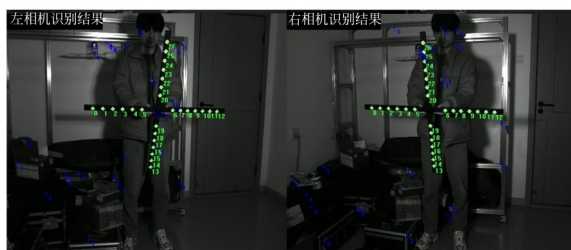
图 14 进一步给出了在约 80° 倾斜角度下的识别结果。可以看出,所有靶标点均被准确识别,展现出卓越的鲁棒性。然而,当倾斜角超过 80° 时,相邻靶标点可能出现粘连现象,从而导致识别失败。



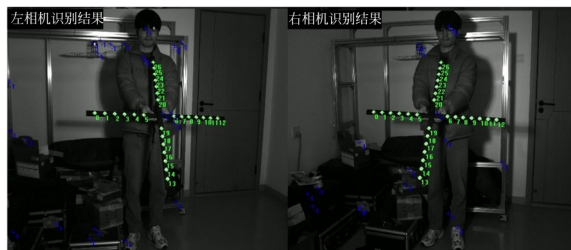
(a) 左倾约 40°
(a) Approximately 40° left tilt



(b) 右倾约 40°
(b) Approximately 40° right tilt



(c) 前倾约 40°
(c) Approximately 40° forward tilt



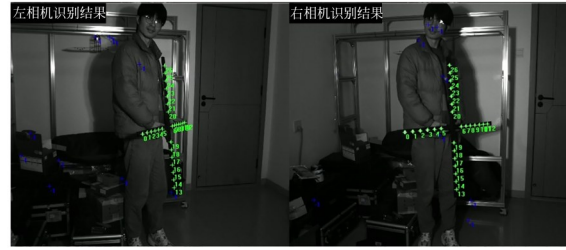
(d) 后倾约 40°
(d) Approximately 40° backward tilt

图 13 40° 倾角下靶标点的识别结果

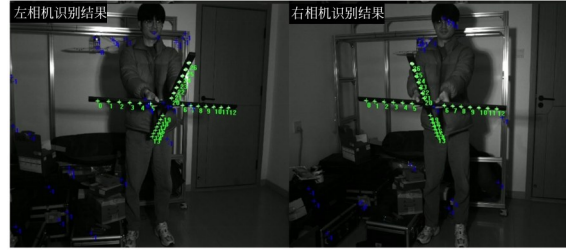
Fig. 13 Target point recognition results at about 40° tilt angle



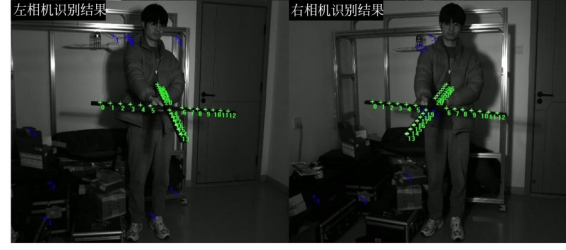
(a) 左倾约 80°
(a) Approximately 80° left tilt



(b) 右倾约 80°
(b) Approximately 80° right tilt



(c) 前倾约 80°
(c) Approximately 80° forward tilt



(d) 后倾约 80°
(d) Approximately 80° backward tilt

图 14 80° 倾角下靶标点识别结果

Fig. 14 Target point recognition results at about 80° tilt angle

此外,本文提出的十字形标定靶标具有较高的识别效率,在分辨率为 500 万的单张图像中,靶标识别时间仅为 0.2 s(实验所用计算机配置为 CPU:I9-14900KF,内存:128 GB),满足实时标定的实际应用需求。

4.2 大视场相机标定实验

为评估十字形靶标在相机标定中的性能,设计了两种不同场景(室内与室外)的大视场相机标定实验,并通过重投影误差(Reprojection Error)对标定精度进行量化分析。实验中采用的标定模型均为十参数畸变模型^[20]。

4.2.1 室内环境双目相机标定实验

实验依旧采用图 11 所示的测试环境,视场范围约为 $3\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 。标定过程使用经典的八步法:左右相机同步采集 8 组处于不同姿态的十字形靶标图像,覆盖平移、旋转及倾斜等多种运动,从而建立充分的多视角几何约束,保证标定结果的精度与鲁棒性。图 15 展示了标定过程中左右相机同步获取的靶标图像(左右相机在每一步采集的图像一一对应)。从图中可见,所有靶标点均被准确识别,验证了本文方法的有效性。

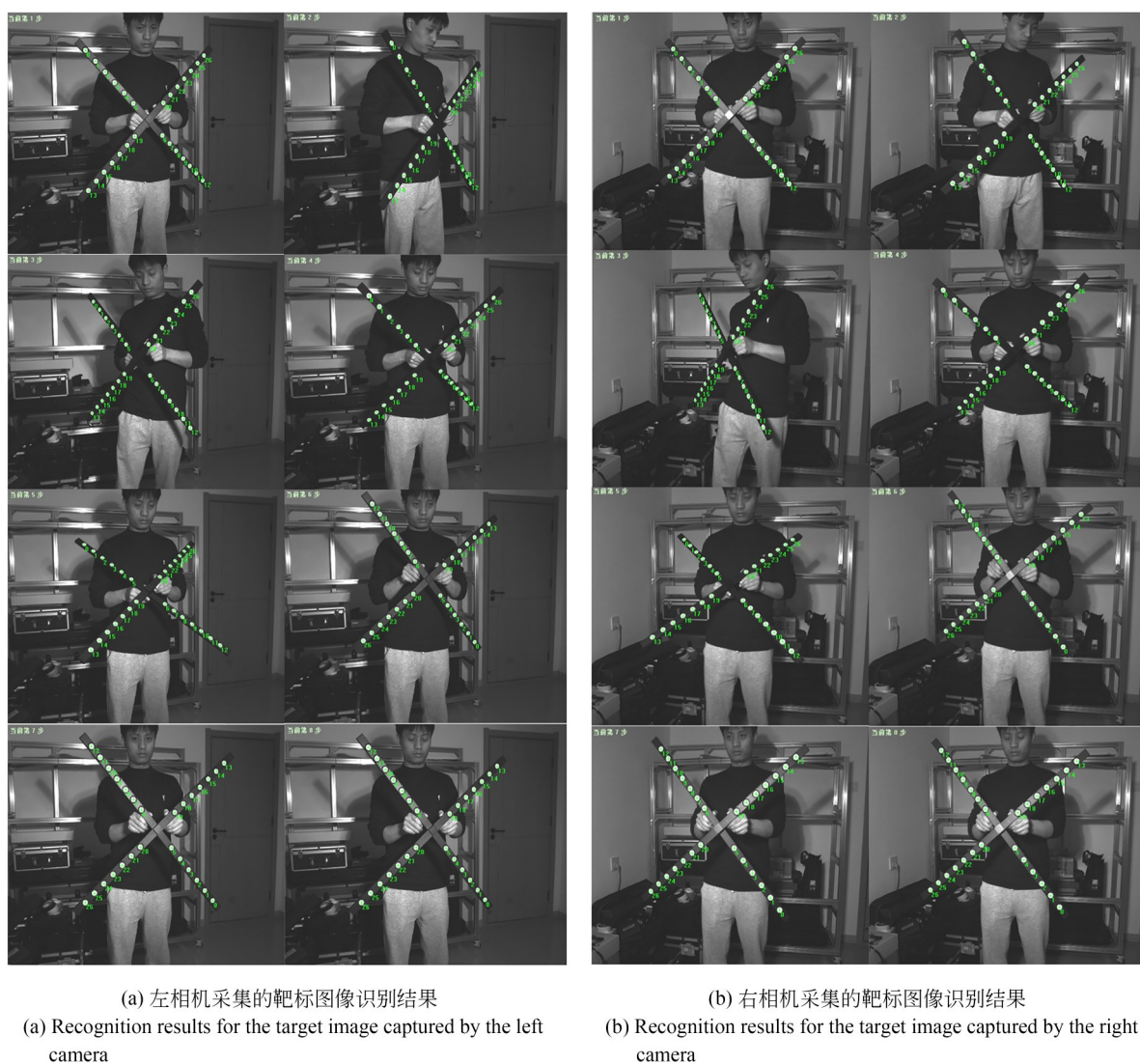


图 15 室内环境下采集的十字形靶标图像识别结果

Fig. 15 Recognition results of cross-shaped target images captured indoors

表1列出了左右相机标定得到的内、外参数。结果表明,双目相机的重投影误差仅为0.017 pixels,完全满足高精度测量的工程应用需求,进一步验证了本文提出的标定靶标及其识别方法的有效性。

表 1 室内环境双目相机标定结果
Tab. 1 Results of indoor stereo-camera calibration

参数	左相机	右相机
焦距 f/pixel	4 673.698	4 682.842
主点 $(x_0,y_0)/\text{pixel}$	$(-70.808,-10.56)$	$(-66.603,26.871)$
径向畸变因子 k_1	$-5.912\text{e}-9$	$-5.788\text{e}-9$
径向畸变因子 k_2	$5.020\text{e}-16$	$3.336\text{e}-16$
径向畸变因子 k_3	$-5.673\text{e}-23$	$1.018\text{e}-23$
切向畸变系数 P_1	$-2.883\text{e}-8$	$-1.652\text{e}-7$
切向畸变系数 P_2	$1.122\text{e}-7$	$1.148\text{e}-7$
像平面畸变系 b_1	$5.028\text{e}-5$	$-1.828\text{e}-4$
像平面畸变系 b_2	$-2.808\text{e}-4$	$-1.007\text{e}-4$
旋转矩阵 R	$\begin{bmatrix} 0.954 & 0.012 & -0.299 \\ -0.010 & 0.999 & 0.007 \\ 0.300 & -0.003 & 0.953 \end{bmatrix}$	
平移矩阵 T	$[-596.676 \quad -1.219 \quad -99.892]^T$	
重投影误差/ pixel	0.017	

4.2.2 室外环境双目相机标定实验

实验在如图 16 所示的室外环境下进行,使用 Basler acA2440-75 μm 相机,配备 Computar 16 mm 定焦光学镜头,测量视场范围为 30 m $\times$ 20 m,布置了若干圆形非编码标志点作为观测点。由于测量视场较大、基线长(30 m),因此两台相机分别安装在云台上并固定于三脚架,三脚架直接置于地面。分别控制左右相机采集 8 帧不同位姿下的十字形靶标图像,标定左右相机的内参数。随后,同步采集一帧测量视场图像,完成外参数的标定^[20]。

图 17 展示了左右相机拍摄的十字形靶标图像。与室内可控光照不同,室外光照受自然光影响显著:受光面明亮,背光面相对昏暗。本实验中,靶标正处于背光侧,因而图像中靶标亮度较低。与此同时,测试视场中布设的若干观测点也对靶标识别产生了干扰。尽管存在这些不利因



图 16 室外双目相机标定实验
Fig. 16 Experimental setup for outdoor stereo camera calibration

素,所有靶标点仍被准确识别,充分证明了本文方法的可靠性与鲁棒性。

表 2 列出了标定得到的左右相机内外参数。结果表明,双目相机标定后的重投影误差为 0.064 pixels,满足高精度、大视场视觉测量的工程实际应用需求,再次验证了本文提出的十字形标定靶标及其识别方法的有效性。

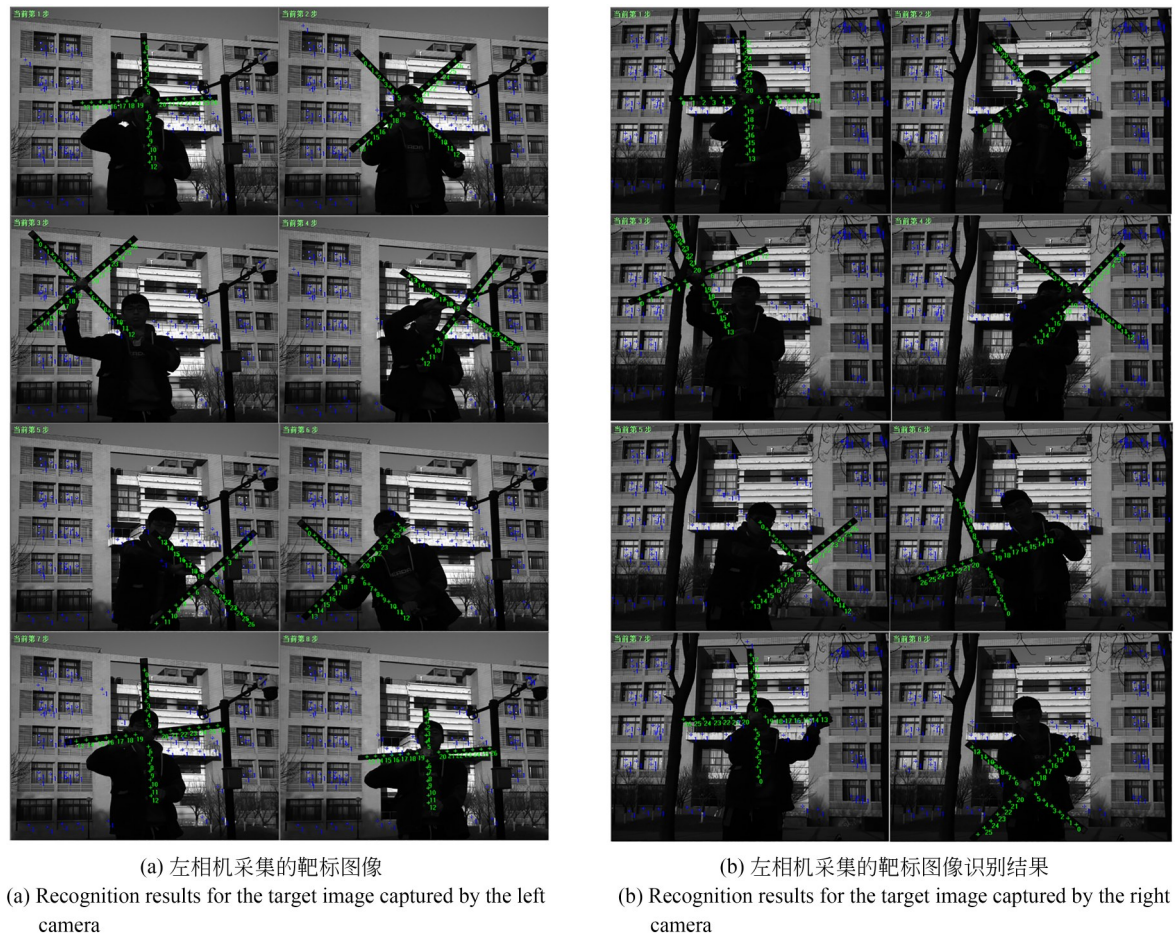


图 17 室外双目相机标采集的十字形靶标图识别结果

Fig. 17 Recognition results of cross-shaped target images captured outdoors

表 2 室外环境双目相机标定结果

Tab. 2 Results of outdoor stereo-camera calibration

参数	左相机	右相机
焦距 f/pixel	4 649.543	4 640.480
主点 $(x_0, y_0)/\text{pixel}$	(37.965, -51.550)	(-2.607, 3.435)
径向畸变因子 k_1	-1.080e-09	-1.319e-11
径向畸变因子 k_2	1.764e-15	1.623e-15
径向畸变因子 k_3	-1.639e-22	-3.718e-22
切向畸变系数 P_1	2.409e-07	-2.450e-07
切向畸变系数 P_2	-1.658e-07	9.922e-08
像平面畸变系数 b_1	-4.593e-05	1.639e-04
像平面畸变系数 b_2	4.783e-5	1.243e-04
旋转矩阵 R	$\begin{bmatrix} 0.895 & -0.038 & -0.444 \\ 0.030 & 0.999 & -0.024 \\ 0.445 & 0.008 & 0.896 \end{bmatrix}$	
平移矩阵 T	$[-29\,347.845 \quad -191.363 \quad -4\,348.558]^T$	
重投影误差/ pixel	0.064	

5 结 论

针对传统大尺寸标定靶标存在加工制造困难、拆装繁琐、携带不便及使用过程中容易变形等问题,本文依据透视变换下线段长度会发生变化但长度比例保持不变的特性,设计了一种十字形标定靶标,并开发了相应的识别算法。该靶标由两根等长且相互垂直的靶尺通过螺栓连接而成,结构简洁,易于实现大尺寸加工制造与现场组装。在实验测试中,单根靶尺的加工尺寸为 $900\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,使用者可根据实际测量视场需求,灵活扩展靶尺的长度,而宽度和厚度仅需满足刚度要求,无需显著增加,因此重量不会明显增加。此外,该标定靶标表面制备的靶标点为圆形非编码标志点,适用于复杂工业现场环境,能够始终保持稳定的识别

性能。实验表明,在 80° 的大倾角范围内,所有靶标点均可准确识别。进一步实验结果表明,该靶标适用于多种测量场景,在室内环境($3\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 测量视场)双目相机高精度标定中,其重投影误差为 0.017 pixels ;在室外环境($30\text{ m} \times 20\text{ m}$ 测量视场)双目相机高精度标定中,重投影误差为 0.064 像素,体现出较好的通用性和实用价值。

作者贡献声明:

史宝全:测量方法的提出,论文构思和撰写;
侯轩哲:测量数据整理和分析,论文撰写;
贺谦:测量实验设计、数据分析;
陈先民:实验指导,论文审核与编辑;
张文东:测量实验设计、数据分析;
杨林:实验指导,论文审核与编辑。

参考文献:

- [1] ZHANG Z Y. Camera calibration with one-dimensional objects[C]. *Computer Vision-ECCV 2002. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*, 2002: 161-174.
- [2] SHI K F, DONG Q L, WU F C. Weighted similarity-invariant linear algorithm for camera calibration with rotating 1-D objects[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(8): 3806-3812.
- [3] HALLORAN B, PREMARATNE P, VIAL P J. Robust one-dimensional calibration and localisation of a distributed camera sensor network[J]. *Pattern Recognition*, 2020, 98: 107058.
- [4] DUAN Y, YU Y L, LI P, et al. High-precision camera calibration based on a 1D target[J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 36873-36888.
- [5] ZHENG Z, FAN J F, SHAO L, et al. Affine constrained binocular camera calibration with planar target single-axis translating[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 5018313.
- [6] 蒯杨柳,文贡坚,回丙伟,等. 利用多个小棋盘的大视场相机标定方法[J]. *测绘通报*, 2016(7): 39-43, 54.
Kuai Y L, Wen G J, Hui B W, et al. Large-scale scene calibration method utilizing multiple chessboards[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(7): 39-43, 54. (in Chinese)
- [7] 高婷. 大视场短焦距摄像机标定的研究与应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
GAO T. *Research and Application of Camera Calibration with Large Field of View and Short Focal Length* [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [8] 梅文胜,徐芳,陈潇. 室内全景三维控制场设计与建立[J]. *测绘信息与工程*, 2011, 36(6): 39-42, 45.
MEI W S, XU F, CHEN X. Design and establish of panoramic indoor 3D control field[J]. *Journal of Geomatics*, 2011, 36(6): 39-42, 45. (in Chinese)
- [9] 杨昭辉,朱华炳,殷玉龙,等. 基于编码立体靶标的高精度双目相机标定[J]. *中国激光*, 2023, 50(6): 65-73.
YANG Z H, ZHU H B, YIN Y L, et al. High-precision binocular camera calibration based on coding stereoscopic target[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(6): 65-73. (in Chinese)
- [10] 秦鹏举,蒋周翔,苏瑞,等. 基于蜂窝立体结构靶标的多目相机标定方法[J]. *机床与液压*, 2024, 52(12): 10-16.
QIN P J, JIANG Z X, SU R, et al. Calibration method for multi-camera based on honeycomb stereo target[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2024, 52(12): 10-16. (in Chinese)
- [11] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 大视场多像机视频测量

- 系统的全局标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 369-378.
- HU H, LIANG J, TANG Z Z, *et al.* Global calibration for Muti-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 369-378. (in Chinese)
- [12] 晋毅东. 大视场相机标定方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- JIN Y D. Calibration Method of Large Field of View Camera [D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [13] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [14] 曾猛杰, 汪晨曦, 赖俊杰, 等. 亚像素边缘检测算法综述[J]. 光学精密工程, 2024, 32(23): 3513-3524.
- ZENG M J, WANG C X, LAI J J, *et al.* Review of sub-pixel edge detection algorithms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(23): 3513-3524. (in Chinese)
- [15] 姜群, 吕钧浩, 文立华, 等. 基于亚像素边缘检测的高精度相机标定方法[J]. 光学学报, 2022, 42(20): 90-98.
- LOU Q, LÜ J H, WEN L H, *et al.* High-precision camera calibration method based on sub-pixel edge detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(20): 90-98. (in Chinese)
- [16] PRASAD D K, LEUNG M K H, QUEK C. Elliptic Fit: an unconstrained, non-iterative, least squares based geometric Ellipse Fitting method [J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(5): 1449-1465.
- [17] YANG K C, YU L, XIA M, *et al.* Nonlinear RANSAC with crossline correction: an algorithm for vision-based curved cable detection system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141: 106417.
- [18] AHMED A S. Comparative study among Sobel, Prewitt and Canny edge detection operators used in image processing [J]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2018, 96(19): 6517-6525.
- [19] MATHWORKS. Lidar and Camera Calibration Guidelines[EB/OL]. (2024-06-01)[2025-06-28]. <https://www.mathworks.com/help/lidar/ug/lidar-camera-calibration-guidelines.html>.
- [20] 顾为晨. 大视场 3D 视觉检测技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- GU W C. *3D Vision Detection Technology with Large Field of View* [D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)

通讯作者:



史宝全(1982—),男,副教授,硕士生导师,分别于2005年、2009年、2013年于西安交通大学获得学士、硕士及博士学位,主要研究方向为人工智能与3D视觉检测技术。E-mail:bqshi@xidian.edu.cn

作者简介:



侯轩哲(1999—),男,陕西周至人,硕士研究生,2023年于陕西科技大学获得学士学位,主要从事计算机视觉及图像处理方面的研究。E-mail:23041212910@stu.xidian.edu.cn