

基于边缘方向投影的棋盘格角点亚像素细化

陈圣峰^{*}, 陈兵, 刘坚^{**}

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082

摘要 随着视觉测量技术在工程中的推广,越来越多的视觉标定和测量需在车间现场由非专业人员执行,这会造成拍摄的棋盘格图像中包含较多的噪声。为了实现噪声下棋盘格角点稳健、精确的亚像素细化,提出一种基于边缘方向投影的棋盘格角点亚像素细化方法。首先基于非极大值抑制算法计算初始边缘方向,然后基于最小加权二乘拟合法细化边缘方向,最后基于边缘方向最大投影细化棋盘格角点的亚像素坐标。结果表明:在高质量的棋盘格图像中,所提方法的棋盘格边长测量偏差的最大值均小于 0.021 mm,棋盘格边长测量偏差的均值均小于 0.006 mm;在高斯噪声和角点污染的棋盘格图像中,所提方法的棋盘格边长测量偏差的最大值均小于 0.05 mm,棋盘格边长测量偏差的均值均小于 0.02 mm。

关键词 机器视觉; 标定; 亚像素细化; 棋盘格角点; 角点定位; 边缘方向投影

中图分类号 TN206

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0815001

Checkerboard Corners Sub-Pixel Refinement Based on Edge Direction Projection

Chen Shengfeng^{*}, Chen Bing, Liu Jian^{**}

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Abstract With the popularization of visual measurement technology in engineering, more and more visual calibration and measurement need to be carried out by non-professionals in the workshop site, which will cause checkerboard images to contain more noise. In order to achieve robust and accurate sub-pixel refinement of checkerboard corner under noise, a checkerboard corners sub-pixel refinement method based on edge direction projection is proposed. First, the initial edge direction is calculated based on the non-maximum suppression algorithm. Then, the edge direction is refined based on the least weighted square fitting method. Finally, the sub-pixel coordinates of the checkerboard corners are refined based on the maximum projection of the edge direction. The results show that in the high-quality checkerboard images, the maximum measurement errors of checkerboard edge length are all less than 0.021 mm, and the average measurement errors of checkerboard edge length are all less than 0.006 mm. In the checkerboard image with Gaussian noise and corner pollution, the maximum deviation of checkerboard edge length measurement of the proposed method is less than 0.05 mm, and the average deviation of checkerboard edge length measurement is less than 0.02 mm.

Key words machine vision; calibration; sub-pixel refinement; checkerboard corner; corner positioning; edge direction projection

1 引言

棋盘格图像广泛应用于标定^[1-3]、畸变校准^[4]、

机器人手眼标定^[5]和位移测量^[6]等领域,角点亚像素的细化精度直接关系到标定和测量的精度。随着视觉测量在工程中的广泛应用^[7-11],越来越多的标

收稿日期: 2021-09-26; 修回日期: 2021-10-24; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0128400)、长沙市科技计划重大专项(kq1804005)

通信作者: *shengfengc@hnu.edu.cn; **liujian@hnu.edu.cn

定和测量工作需要由非专业人员在车间现场完成。车间环境存在噪声大和光照不均匀等缺点,而且非专业人员难以保证棋盘格图像的拍摄质量,因此在车间现场拍摄的棋盘格图像可能会出现失焦、亮度不均匀、曝光过度或不足和噪声大等现象。质量不佳的棋盘格图像为棋盘格角点亚像素的细化带来了新的挑战,因此开发一种稳健、稳定、精确的棋盘格角点亚像素细化方法对噪声下的视觉标定和测量有一定的工程价值和意义。

棋盘格角点亚像素的细化方法主要分为重心法^[12-15]、拟合法^[16-19]和梯度法^[20-25]。关于重心法的研究:Liu 等^[12]使用灰度平方重心法来细化棋盘格角点的亚像素坐标,重投影误差表明该方法可满足标定需求;屠大维等^[13]也使用了灰度平方重心法来细化棋盘格角点;杨幸芳等^[14]采用了灰度重心法来细化棋盘格角点;为了抑制棋盘格内部噪声的干扰,杨幸芳等^[15]在后续的工作中首先分离了棋盘格内部像素和边缘像素,然后使用改进的灰度重心法来细化棋盘格角点。关于拟合法的研究:王刚等^[16]结合拟合法和相关系数法来细化棋盘格角点,细化精度可满足工程需求;王海涛等^[17]使用了一种过渡边缘模型来拟合棋盘格边缘,根据拟合结果来定位角点的亚像素坐标;刘青松等^[18]采用二元二次函数来拟合角点的似然度图,似然度图中极大值坐标即为角点的亚像素坐标,重建结果表明所提方法的细化精度良好。

梯度法是目前使用最广泛且最成熟的棋盘格角点细化方法。关于梯度法的研究:Zhu 等^[20]根据角点到邻域像素的向量垂直于邻域像素梯度这一信息,使用灰度梯度法来实现棋盘格角点的细化;古鑫桐等^[21]使用 Forstner 算子来加权平均窗口内每个像素的边缘直线以细化角点;Geiger 等^[22]在灰度梯度法的基础上,提出了一种融合灰度梯度和像素筛选的棋盘格角点细化方法,由于其性能优异已被收录进 MATLAB 函数库;伍明等^[24]在角点邻域增加高斯窗口以改进 Geiger 算法,这增大了临近角点像素对亚像素细化的贡献。

当棋盘格图像中包含噪声时,角点邻域图像中的像素灰度值会发生改变,其重心出现偏差,因此基于重心法的棋盘格角点细化方法对噪声敏感,尤其是不均匀噪声。强噪声下,棋盘格图像中灰度分布的特征和参数会发生改变,由于噪声形式和参数的不确定性,拟合法的稳健性和精度均会受到较大的影响。噪声会改变棋盘格图像的像素梯度值,棋盘格图像被噪声污染后,角点到邻域像素的向量将不

再垂直于邻域像素梯度,因此梯度法无法适应噪声下棋盘格角点亚像素的细化,尤其是全域噪声。

为了填补噪声下棋盘格角点细化研究的空白,本文提出了一种基于边缘方向投影的棋盘格角点亚像素细化方法。首先,只筛选棋盘格边缘上的像素以参与亚像素细化,这消除了棋盘格内部噪声对角点细化的干扰;其次,噪声无法改变棋盘格宏观的边缘方向,设计的基于边缘方向投影的亚像素细化方法可降低边缘上噪声对角点细化的干扰。因此,本文方法在噪声棋盘格图像中具有更高的稳健性、稳定性和精度。

2 方 法

为了解决噪声下棋盘格角点亚像素细化这一难题,本文提出了一种基于边缘方向投影的棋盘格角点亚像素细化方法。图 1 以一张棋盘格图像为例,展示了本文方法的工作过程,主要包括如下步骤。

1) 灰度边缘图像的转换。将棋盘格图像转化为灰度边缘图像,这是基于边缘方向投影的棋盘格角点亚像素细化的基础。本文通过计算棋盘格图像的梯度,可以将其转化为灰度边缘图像[图 1(b)]。具体转换过程为

$$I_{\text{edge}} = 255[I_g - \min(I_g)] / [\max(I_g) - \min(I_g)], \quad (1)$$

$$I_g = \sqrt{I_{g,x}^2 + I_{g,y}^2}, \quad (2)$$

$$I_{g,x} = I \otimes D_x, \quad (3)$$

$$I_{g,y} = I \otimes D_y, \quad (4)$$

式中: I 为原始棋盘格图像; D_x 和 D_y 分别为 x 方向

和 y 方向的差分算子, $D_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $D_y =$

$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$; \otimes 为卷积运算; $I_{g,x}$ 和 $I_{g,y}$ 分别

为 x 方向和 y 方向的梯度图像; I_g 为模量梯度图像; I_{edge} 为灰度边缘图像,其灰度值已被转化为八进制。

2) 采用非极大值抑制算法计算初始边缘方向。首先以像素级角点为中心截取邻域图像[图 1(c)];然后计算邻域图像的像素级角点在各方向的累计强度,从而将邻域图像转化为角度为 θ 与累计强度为 S 的函数,即 $S = f(\theta)$ [图 1(d)];最后使用高效的非极大值抑制算法来定位函数 $S = f(\theta)$ 的 4 个局部极大值,局部极大值的方向向量 O_i ($\cos \theta_i$, $\sin \theta_i$) 即为初始边缘方向,其中 $i = 1, 2, 3, 4$ 。

3) 采用最小加权二乘法细化边缘方向。边缘方向的精度直接关系到角点亚像素的细化精度。为了获得更精确的亚像素棋盘格角点,需要对初始边缘方向进行细化。灰度边缘图像中边缘像素的灰度值大,而过渡区域的灰度值较小[图 1(c)]。为了强化边缘处像素对边缘方向细化的贡献,本文以灰度值为权重,采用最小加权二乘法来细化边缘方向,最终得到细化后的边缘方向 $O_{F,i}$ [图 1(e)]。

4) 采用边缘方向最大投影算法细化棋盘格角点的亚像素坐标。如图 1(f)所示, P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 分别为边缘 1、边缘 2、边缘 3 和边缘 4 的像素集合,则亚像素角点 C_R 到 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 中所有像素的向量在其对应的边缘细化方向 $O_{F,1}$ 、 $O_{F,2}$ 、 $O_{F,3}$ 和

$O_{F,4}$ 上的投影累积和最大。根据这一事实,计算棋盘格角点的亚像素坐标。

5) 完成目标角点的亚像素细化后转入步骤 2), 计算下一个角点的亚像素坐标,直至完成棋盘格图像中所有角点的亚像素细化[图 1(h)]。

所提方法的核心:基于非极大值抑制算法的初始边缘方向的计算、基于最小加权二乘法的边缘方向的细化和基于边缘方向最大投影的棋盘格角点亚像素的细化。在 2.1 节中将介绍基于非极大值抑制算法的初始边缘方向的计算方法;2.2 节将阐述基于最小加权二乘法的边缘方向的细化方法;2.3 节将描述基于边缘方向最大投影的棋盘格角点亚像素的细化方法。

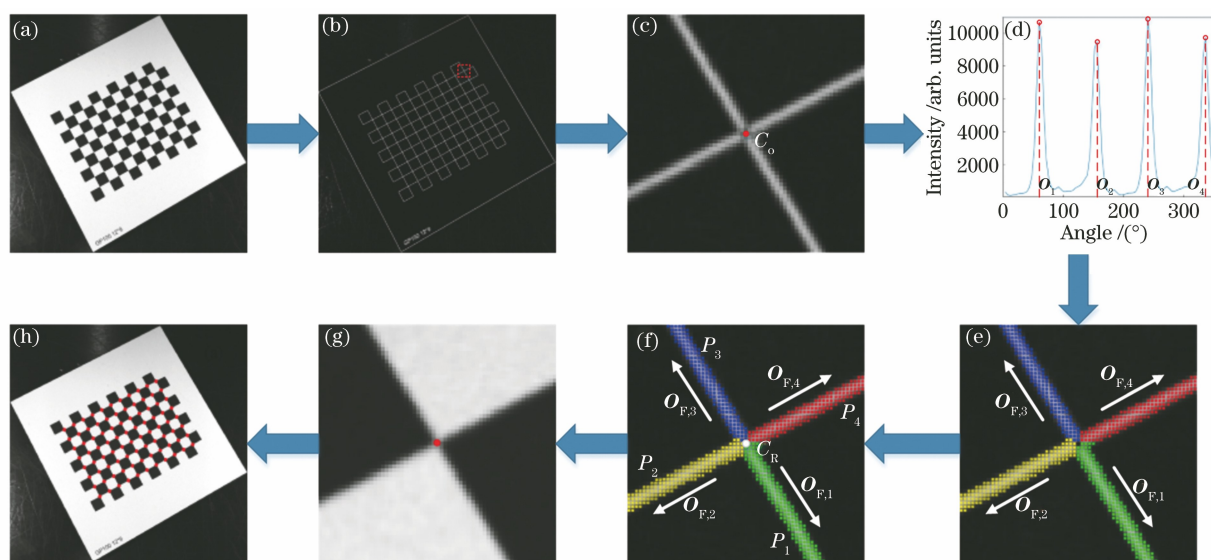


图 1 基于边缘方向投影的棋盘格角点亚像素细化方法的细化流程。(a)棋盘格图像;(b)灰度边缘图像;(c)截取后的邻域图像;(d)初始边缘方向的定位;(e)边缘方向的细化;(f)基于边缘方向最大投影的角点亚像素的细化;(g)目标角点亚像素的细化;(h)完成所有角点亚像素的细化

Fig. 1 Refinement process of checkerboard corner subpixel refinement method based on edge direction projection. (a) Checkerboard image; (b) gray edge image; (c) intercepted neighborhood image; (d) initial edge orientation; (e) refinement of edge direction; (f) refinement of corner subpixels based on maximum projection of edge direction; (g) subpixel refinement of target corner; (h) complete refinement of all corner subpixels

2.1 基于非极大值抑制算法的初始边缘方向的计算

灰度边缘图像中棋盘格角点在 4 个边缘方向上的灰度值较大,而棋盘格内部的灰度值较小。计算初始边缘方向的步骤:首先以像素级角点 C_O 为中心截取半径为 N 的邻域图像 I_N ;然后对于 I_N 中所有的像素坐标 P ,计算直线 PC_O 与图像坐标系中 x 轴的夹角 θ ;最后统计每个 θ 所对应的像素灰度累计和 S ,邻域图像 I_N 被转化为角度与累计强度的函数 $S=f(\theta)$ [图 1(d)]。

由于边缘方向上的像素有较大的灰度值,而棋

盘格内部的像素有较小的灰度值[图 1(c)],因此函数 $S=f(\theta)$ 在边缘方向上具有局部极大值,通过求取函数 $S=f(\theta)$ 的局部极大值可获得初始边缘方向。为了提高计算效率,Neubeck 等^[26]将局部极大值的求取转化为非极大值的抑制,本节使用该过程来求取函数 $S=f(\theta)$ 的局部极大值,该过程的伪代码如图 2 所示,其中 $n=45^\circ$ 为求取极大值的邻域半径, $L=90$ 为角度向量 θ 的长度, T 为强度阈值(去除累计强度小的干扰点), θ_m 为局部极大值。

取前 4 个局部极大值所对应的角度 θ_i 作为初

```

step 1 forall  $\theta \in \{n+1, 2n+1, \dots\} \cap [n, L-n]$  do  $\theta_m \leftarrow \theta$ 
step 2 forall  $\theta_2 \in [\theta, \theta+n]$  do
step 3 if  $f(\theta_2) > f(\theta_m)$  then  $\theta_m \leftarrow \theta_2$ 
step 4 forall  $\theta_2 \in [\theta_m-n, \theta_m+n] - [\theta, \theta+n]$  do
step 5 if  $f(\theta_2) > f(\theta_m) \cup f(\theta_m) < T$  then goto failed
step 6 else maximum at  $\theta_m$ 
    
```

图 2 求取函数局部极大值的伪代码

Fig. 2 Pseudocode for obtaining local maximum of function
始边缘的角度,其对应的方向向量 \mathbf{O}_i ($\cos \theta_i$, $\sin \theta_i$) 为初始边缘方向。

2.2 基于最小加权二乘法的边缘方向的细化

为了获得更精确的边缘方向,需对 2.1 节中求

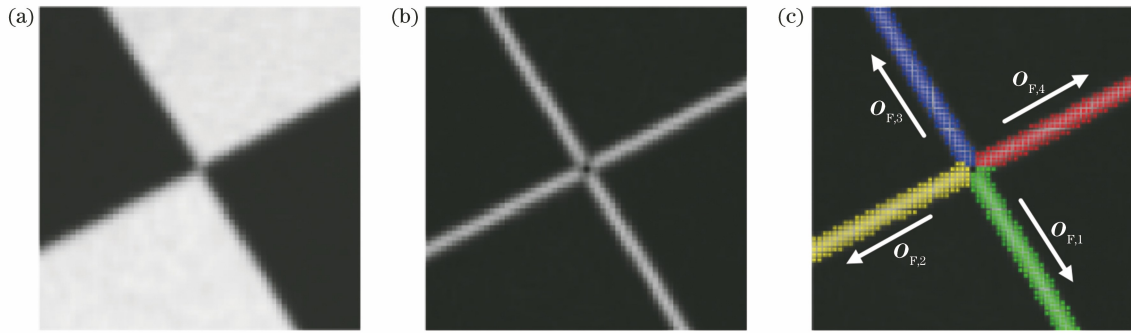


图 3 角点邻域图像和灰度边缘图像的特征。(a)角点邻域图像;(b)灰度边缘邻域图像;(c)像素筛选结果
Fig. 3 Characteristics of corner neighborhood image and gray edge image. (a) Corner neighborhood image;
(b) gray edge neighborhood image; (c) pixel screening results

假设边缘 L_i 的方程为 $Ax + By + C = 0$, 则边缘 L_i 的细化方向为 $\mathbf{O}_{F,i} = (A/\sqrt{A^2+B^2}, -B/\sqrt{A^2+B^2})$ 。参与边缘最小加权二乘拟合的像素坐标集合为 $P_i(x_i, y_i)$, 当其到直线 $Ax + By + C = 0$ 的距离和最小时, A, B 和 C 为最优参数, 该问题可转化为

$$e = \operatorname{argmin} \sum_{p_i(x_i, y_i) \in P_i} (Ax_i + By_i + C)^2 / (A^2 + B^2)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \cos(\overrightarrow{p_i C_0}, \mathbf{O}_i) = \frac{\overrightarrow{p_i C_0} \cdot \mathbf{O}_i}{|\overrightarrow{p_i C_0}| |\mathbf{O}_i|} > 0.966 \\ \sqrt{|\overrightarrow{p_i C_0}|^2 - |\overrightarrow{p_i C_0} \cdot \mathbf{O}_i|^2} \leq 3 \\ I_{\text{edge}}(x_i, y_i) \geq T_s \end{cases}, \quad (5)$$

式中: e 为优化函数; T_s 为灰度值阈值。像素筛选的约束条件: 第 1 个约束条件的含义为直线 $p_i C_0$ 与其对应 \mathbf{O}_i 的夹角余弦大于 0.966, 即直线 $p_i C_0$ 与 \mathbf{O}_i 的夹角小于 15° ; 第 2 个约束条件的含义为像素 p_i 到 \mathbf{O}_i 的距离不大于 3 pixel; 第 3 个约束条件的含义为灰度边缘图像中像素 p_i 的灰度值

取的方向向量 \mathbf{O}_i 进行细化。图 3 展示了角点邻域图像及灰度边缘图像的特征。由图 3(a) 和图 3(b) 可知: 灰度边缘图像的灰度值在棋盘格边缘大, 而在棋盘格内部较小; 对于边缘方向的细化, 只有棋盘格边缘上的像素为有用信息, 而棋盘格内部像素为干扰信息。根据上述特征, 本节设计的边缘方向细化方法具有如下特征: 1) 为了强化棋盘格边缘上的像素对边缘细化的贡献, 以灰度边缘图像的灰度值为权重设计了基于最小加权二乘法的边缘细化算法; 2) 根据约束条件来筛选邻域图像中满足条件的像素, 并使其参与最小加权二乘的拟合, 这可以避免棋盘格内部噪声等对边缘方向细化的干扰。

$I_{\text{edge}}(x_i, y_i)$ 大于阈值 T_s 。根据极值条件, e 在最小值处关于系数 A, B 和 C 的偏导数均为 0, 则(5)式可转化为

$$\sum_{p_i(x_i, y_i) \in P_i} (Ax_i + By_i + C)(B^2 x_i - AB y_i - AC) = 0, \quad (6)$$

$$\sum_{p_i(x_i, y_i) \in P_i} (Ax_i + By_i + C)(A^2 y_i - AB x_i - BC) = 0, \quad (7)$$

$$\sum_{p_i(x_i, y_i) \in P_i} (Ax_i + By_i + C) = 0. \quad (8)$$

联立(6)~(8)式可求得系数 A, B 和 C , 则 L_i 的边缘细化方向 $\mathbf{O}_{F,i} = (A/\sqrt{A^2+B^2}, -B/\sqrt{A^2+B^2})$ 。

2.3 基于边缘方向最大投影的棋盘格角点亚像素的细化

如图 1(f) 所示, 假设角点亚像素坐标位于 C_R , 记 C_R 到边缘 L_1 像素集合 P_1 的直线 $P_1 C_R$ 在边缘细化方向 $\mathbf{O}_{F,1}$ 上的投影和为 $R_1 = \sum_{p \in P_1} \overrightarrow{p C_R} \cdot \mathbf{O}_1$, 同理记 C_R 到边缘 L_2, L_3 和 L_4 上像素集合的直线分

别在 $\mathbf{O}_{F,2}$ 、 $\mathbf{O}_{F,3}$ 和 $\mathbf{O}_{F,4}$ 上的投影和为 R_2 、 R_3 和 R_4 。当 C_R 位于准确的亚像素角点坐标时, $R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ 值最大, 本文根据这一事实设计了棋盘格角点亚像素细化算法, 该算法的数学描述为

$$C_R = \operatorname{argmin} \sum_{j=1}^4 \sum_{p_{ij} \in P_j} (|\overrightarrow{p_{ij}C_R}|^2 - |\overrightarrow{p_{ij}C_R} \cdot \mathbf{O}_{F,j}|^2)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \cos(\overrightarrow{p_{ij}C_R}, \mathbf{O}_{F,j}) = \frac{\overrightarrow{p_{ij}C_R} \cdot \mathbf{O}_{F,j}}{|\overrightarrow{p_{ij}C_R}| |\mathbf{O}_{F,j}|} > 0.966 \\ \sqrt{|\overrightarrow{p_{ij}C_R}|^2 - |\overrightarrow{p_{ij}C_R} \cdot \mathbf{O}_{F,j}|^2} \leq 3 \\ I_{\text{edge}}(p_{ij}) \geq T_s \end{cases}, \quad (9)$$

式中: j 为第 j 条边缘; P_j 为第 j 条边缘上的像素集合。约束条件用来筛选参与细化角点亚像素坐标的像素, 其含义与 2.2 节一致。根据极值条件, 棋盘格角点亚像素坐标 C_R 的数学表达式为

$$C_R = \sum_{j=1}^4 \sum_{p_{ij} \in P_j} (1 - \mathbf{O}_{F,j} \mathbf{O}_{F,j}^T)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^4 \sum_{p_{ij} \in P_j} (1 - \mathbf{O}_{F,j} \mathbf{O}_{F,j}^T) p_{ij}. \quad (10)$$

为了验证基于边缘方向最大投影的棋盘格角点亚像素细化方法的正确性, 使用两张角点亚像素坐标已知的仿真图像(角点的亚像素坐标均为 $[10.5, 10.5]$)进行测试。本文方法细化的角点坐标均为 $[10.5, 10.5]$, 因此基于边缘方向最大投影的棋盘格角点亚像素细化方法在理论上是正确的。

3 测试与分析

为了评估本文方法的性能, 在高质量图像、高斯噪声图像和角点污染图像中测试了所提方法、方法 A^[22]、方法 B^[24] 和方法 C^[15] 的精度和稳健性。方法 A 是一种融合梯度法和筛选法的棋盘格角点细化方法, 由于其性能优越已被收录进 MATLAB 函数库; 方法 B 是方法 A 的一种改进方法, 其通过增加高斯窗口来强化角点附近像素对角点细化的贡献, 但缺少像素筛选的过程; 方法 C 是一种基于改进重心法的棋盘格角点细化方法。

以往科研人员采用重投影误差来间接反映棋盘格角点的细化精度, 这可定性反映角点的细化精度, 但无法量化对比不同方法间的差异。为了定量分析与对比棋盘格角点的细化精度, 搭建了一个双目系统来测量棋盘格的边长尺寸, 通过对比棋盘格边长的测量误差来定量描述棋盘格角点的细化精度。该双目系统[图 4(a)]包括 2 个分辨率均为 1536 pixel ×

2048 pixel 的 CCD 相机, 2 个 25 mm 焦距的定焦镜头, 1 台 2.8 GHz Intel Core i5-8400 CPU 的计算机、数据线和工装夹具。图像的处理软件为 MATLAB 2021a, 双目标定算法采用 MATLAB 2021a 函数库中的双目标定函数。3.1 节对比了在高质量图像下本文方法、方法 A、方法 B 和方法 C 的精度和稳健性; 3.2 节对比了在高斯噪声图像下本文方法、方法 A、方法 B 和方法 C 的精度和稳健性; 3.3 节对比了在角点污染图像下本文方法、方法 A、方法 B 和方法 C 的精度和稳健性。

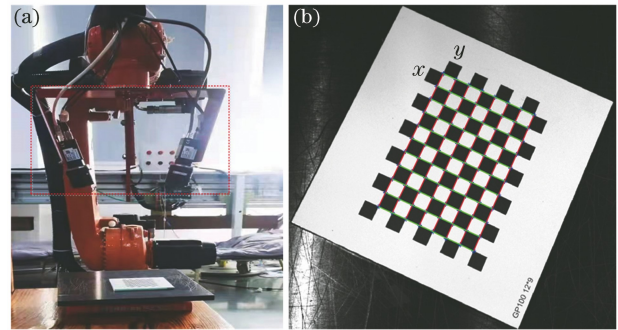


图 4 双目系统和棋盘格边长测量示意图。(a) 双目系统; (b) 棋盘格边长的测量要求(每组图像共需测量 157 个棋盘格边长, x 方向 80 个、 y 方向 77 个)
Fig. 4 Schematic of binocular system and checkerboard edge length measurement. (a) Binocular system; (b) measurement requirements of checkerboard edge length (157 checkerboard edge length should be measured for each group of images, 80 in x direction and 77 in y direction)

3.1 高质量图像的测试与分析

在高质量的棋盘格图像中, 本节测试了本文方法、方法 A、方法 B 和方法 C 的精度和稳健性。首先使用标定好的双目系统来拍摄 9 对棋盘格图像(棋盘格标定板随机处于视场的任何位置); 然后使用方法 A 中的像素级角点检测算法来定位棋盘格角点的像素级坐标; 最后使用本文方法、方法 A、方法 B 和方法 C 分别细化棋盘格角点的亚像素坐标。根据棋盘格角点的亚像素坐标和双目系统的标定结果, 可反求棋盘格边长(两角点间的距离), 通过计算反求的棋盘格边长与真实边长的差值可定量测量角点的细化精度。图 4(b)展示了需测量的棋盘格边长数量, 本文使用的标定板棋盘格边长为 6 mm。1 张棋盘格图像中包含 88 个(11×8)角点, 因此一对棋盘格图像需要测量的棋盘格边长为 157 个(x 方向 80 个, y 方向 77 个)。图 5 展示了本文方法、方法 A、方法 B 和方法 C 的测试结果, 其中 B_{\max} 为每

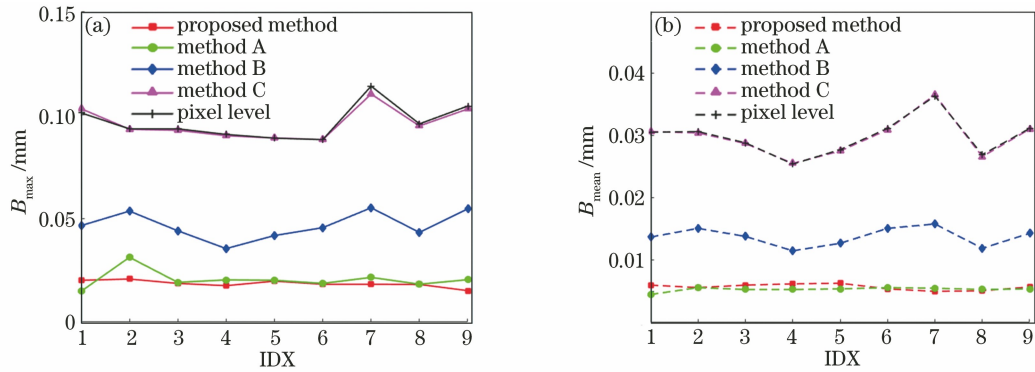


图 5 高质量图像下各方法的测试结果。(a) B_{max} 的测试结果; (b) B_{mean} 的测试结果

Fig. 5 Test results of each method under high quality image. (a) Test results of B_{max} ; (b) test results of B_{mean}

组棋盘格边长测量偏差的最大值, B_{mean} 为偏差的均值(每组包含 157 个边长), IDX 为组号。

从图 5 可知: 本文方法、方法 A 和方法 B 均可提高棋盘格角点的定位精度, 而方法 C 无法提高棋盘格角点的定位精度(与像素级角点的定位精度无本质差异); 方法 B 的最大偏差和平均偏差均大于本文方法和方法 A, 精度较差; 本文方法的 B_{max} 指标更加优异, 而方法 A 的 B_{mean} 指标更加优异, 表明本文方法的稳健性更好(波动小), 而方法 A 的平均角点细化精度略高; 在高质量棋盘格图像中, 本文方法和方法 A 的角点细化精度最高, 且两者无本质差异。

3.2 高斯噪声图像的测试与分析

由于车间现场的成像环境(环境光、电路干扰)不可控, 在车间现场采集的棋盘格图像中往往包含较多噪声, 其中高斯噪声是最常见的噪声之一, 而视场亮度不足、视场亮度不均匀、图像传感器温度过高和电路元件自身噪声均是图像高斯噪声的来源^[27]。随着机器视觉在工业中的广泛应用, 在车间现场完成标定和测量的需求越来越多, 因此棋盘格角点亚像素细化方法需具备较强的抗高斯噪声能力。为了测试本文方法在高斯噪声干扰下的性能, 在棋盘格图像[图 6(a)]中加入参数为(0, 0.02)的高斯噪声, 然后测试高斯噪声下棋盘格角点亚像素的细化精度。图 7 展示了各方法的测试结果。

从图 7 可以看到: 当棋盘格图像被高斯噪声污染后, 本文方法的 B_{max} 和 B_{mean} 两个指标均为最佳; 9 组测试中本文方法的 B_{max} 值均小于 0.05 mm, B_{mean} 值均小于 0.02 mm, 且波动较小, 因此本文方法对高斯噪声污染的棋盘格图像仍有良好的精度和稳健性; 方法 A 的表现最差, 这是因为棋盘格图像被高斯噪声污染后, 图像的梯度会随之改变, 因此基

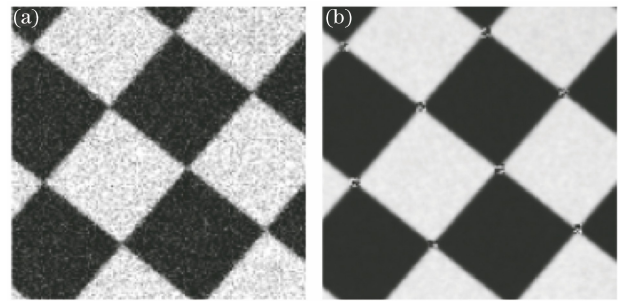


图 6 噪声干扰下的棋盘格图像。(a)高斯噪声污染的棋盘格局部图像; (b)角点污染的棋盘格局部图像

Fig. 6 Checkerboard image with noise disturbance. (a) Checkerboard pattern segment image under Gaussian noise; (b) checkerboard pattern segment image of corner contamination

于梯度的棋盘格角点细化方法失效; 方法 B 由于增加了高斯窗口、降低了远离角点的噪声对亚像素细化的影响, 所以精度下降较少。

3.3 角点污染图像的测试与分析

将棋盘格角点模糊、消失或断开统称为角点污染。对于经验不足的标定人员或自动化标定, 上述情况经常发生。为了测试本文方法在角点污染的棋盘格图像中的性能, 模拟了棋盘格角点被污染的情况[图 6(b)], 然后测试了各方法在此工况下的性能表现。图 8 展示了各方法的测试结果。

从图 8 可以看到: 棋盘格角点被污染后, 方法 A 的精度最高, B_{max} 值均小于 0.04 mm, B_{mean} 值均小于 0.01 mm; 本文方法次之, B_{max} 值均小于 0.05 mm, B_{mean} 值均小于 0.02 mm。虽然本文方法的精度略差于方法 A, 但本文方法仍然具有较高的精度, 可满足标定需求。棋盘格角点被污染后, 高斯窗口增大了污染对角点细化的影响, 所以方法 B 的定位精度急剧下降。

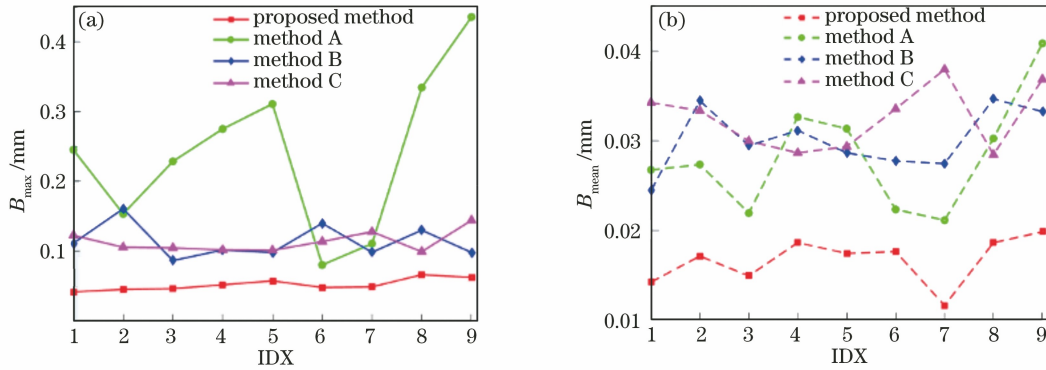


图 7 高斯噪声下各方法的测试结果。(a) B_{max} 的测试结果; (b) B_{mean} 的测试结果

Fig. 7 Test results of each method under Gaussian noise. (a) Test results of B_{max} ; (b) test results of B_{mean}

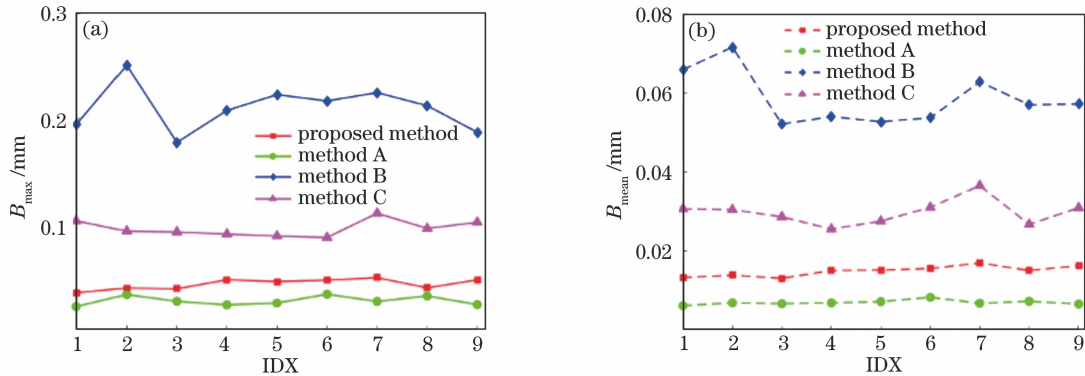


图 8 角点污染下各方法的测试结果。(a) B_{max} 的测试结果; (b) B_{mean} 的测试结果

Fig. 8 Test results of each method under corner contamination. (a) Test results of B_{max} ; (b) test results of B_{mean}

高质量图像、高斯噪声干扰图像和角点污染图像中的测试结果表明:本文方法在精度、稳健性和稳定性三个方面综合最优,在高质量图像中 B_{max} 值均小于 0.021 mm、 B_{mean} 值均小于 0.006 mm,在高斯噪声干扰图像和角点污染图像中 B_{max} 值均小于 0.05 mm、 B_{mean} 值均小于 0.02 mm;方法 A 在高质量图像和角点污染图像中性能良好,但在高斯噪声图像中方法失效;方法 B 的精度较差,尤其在角点污染图像中;方法 C 的精度最差,与像素级角点的精度无本质差异,表明该方法不适合棋盘格角点亚像素细化。

4 结 论

针对在车间现场视觉标定和测量的需求,本文提出了一种基于边缘方向投影的棋盘格角点亚像素细化方法。首先,将棋盘格图像转化为灰度边缘图像,并使用非极大值抑制算法来求取角点的初始边缘方向;然后,为了提高精度,以灰度边缘图像的灰度值为权重设计了基于最小加权二乘法的边缘方向细化算法;最后,根据边缘像素在其对应边缘细化方向上投影累积和最大的事实,设计了基于边缘方向

最大投影的棋盘格角点亚像素细化算法。测试结果表明:在高质量的棋盘格图像中,本文方法的 B_{max} 值均小于 0.021 mm、 B_{mean} 值均小于 0.006 mm,与目前最成熟和广泛使用的方法无差异;在含有高斯噪声的棋盘格图像中,本文方法的精度最高;在角点污染的棋盘格图像中,本文方法的精度比目前最成熟和广泛使用的方法略差,但仍能满足标定需求。由此说明,本文方法具有更强的稳健性和稳定性,可以满足噪声下棋盘格角点细化的需求。

参 考 文 献

- [1] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [2] 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.
- [3] 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.

- 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.
- [4] Hu J P, Song F F, Luo C L, et al. Non-metric distortion correction method based on adaptive corner detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1210012.
胡均平, 宋菲菲, 罗春雷, 等. 一种基于自适应角点检测的非量测畸变校正方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 1210012.
- [5] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(3): 345-358.
- [6] Grédiac M, Blaysat B, Sur F. Comparing several spectral methods used to extract displacement fields from checkerboard images[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127: 105984.
- [7] Zhou F Q, Wang Y X, Chai X H, et al. Review on precise measurement technology based on mirror binocular vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815003.
周富强, 王晔昕, 柴兴华, 等. 镜像双目视觉精密测量技术综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815003.
- [8] Jing J F, Xie J, Li P F, et al. Quantity statistics and size measurement of vamps based on machine vision[J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(11): 156-161.
景军锋, 谢佳, 李鹏飞, 等. 应用机器视觉的鞋面数量统计与尺寸测量[J]. 纺织学报, 2017, 38(11): 156-161.
- [9] Xing X L, Gan W B, Jiang C G. Technology of size detection of air rivets based on machine vision[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(5): 518-523.
邢雪亮, 甘文波, 蒋朝根. 基于机器视觉的航空铆钉尺寸检测技术[J]. 计量学报, 2020, 41(5): 518-523.
- [10] Zhang X P, Wang J Q, Zhang Y X, et al. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0315002.
张旭莘, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.
- [11] Xiang R, He W H, Zhang X N, et al. Size measurement based on a two-camera machine vision system for the bayonets of automobile brake pads[J]. *Measurement*, 2018, 122: 106-116.
- [12] Liu Y, Liu S P, Cao Y, et al. Automatic chessboard corner detection method[J]. *IET Image Processing*, 2015, 10(1): 16-23.
- [13] Tu D W, Zhang Y C. Auto-detection of checkerboard corners based on grey-level difference[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1360-1366.
屠大维, 张翼成. 基于灰度差异的棋盘格角点自动检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1360-1366.
- [14] Yang X F, Huang Y M, Gao F, et al. New corner detection algorithm of chessboard image for camera calibration[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5): 1109-1113.
杨幸芳, 黄玉美, 高峰, 等. 用于摄像机标定的棋盘图像角点检测新算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1109-1113.
- [15] Yang X F, Huang Y M, Li Y, et al. Sub-pixel corner detection algorithm of chessboard image based on improved SUSAN operator[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(21): 2541-2545.
杨幸芳, 黄玉美, 李艳, 等. 基于改进的 SUSAN 算子的棋盘格亚像素角点检测算法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(21): 2541-2545.
- [16] Wang G, Shi Z C, Shang Y, et al. Automatic extraction of diagonal markers based on template matching and peaks of gradient histogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815014.
王刚, 施忠臣, 尚洋, 等. 结合模板匹配和梯度峰值的对角标志自动提取方法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815014.
- [17] Wang H T, Hong L, Tan C G. An effective algorithm of the black and white checkerboard corner detection for the camera calibration[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(12): 33-38.
王海涛, 洪亮, 谭成国. 一种用于相机检校的黑白棋盘格角点提取算法[J]. 测绘通报, 2016(12): 33-38.
- [18] 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.
刘青松, 谢晓方, 张焯喆, 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.
- [19] Yang W S, Guo S P, Li X J, et al. Checkerboard corner detection based on Hough transform and circular template[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181510.
杨炜松, 郭帅平, 李学军, 等. 基于 Hough 变换和圆形模板的棋盘格角点检测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181510.
- [20] Zhu W X, Ma C H, Xia L B, et al. A fast and accurate algorithm for chessboard corner detection[C]//2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, October 17-19, 2009, Tianjin, China. New York: IEEE Press, 2009: 10955558.

- [21] Gu X T, Lu D M, Diao C Y. Rapid chessboard corner extraction in complex background [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(26): 145-147, 169.
古鑫桐, 鲁东明, 刁常宇. 复杂背景下棋盘格角点亚像素识别 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(26): 145-147, 169.
- [22] Geiger A, Moosmann F, Car Ö, et al. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot [C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 14-18, 2012, Saint Paul, MN, USA. New York: IEEE Press, 2012: 3936-3943.
- [23] Qiao Y J, Tang Y C, Li J S. Improved Harris sub-pixel corner detection algorithm for chessboard image [C]//Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control, August 16-18, 2013, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2013: 1408-1411.
- [24] Wu M, Wu J L, Ma S, et al. Checkerboard corner detection based on corner gray distribution feature [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011204.
伍明, 伍俊龙, 马帅, 等. 基于角点灰度分布特征的棋盘格角点检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011204.
- [25] Li H, Zhang X M, Chen Z. Automatic corner detection of checkerboard based on LSD [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(12): 3480-3489.
李海, 张宪民, 陈忠. 基于直线检测的棋盘格角点自动提取 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3480-3489.
- [26] Neubeck A, van Gool L. Efficient non-maximum suppression [C]//18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06), August 20-24, 2006, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2006: 850-855.
- [27] Luisier F, Blu T, Unser M. Image denoising in mixed Poisson-Gaussian noise [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(3): 696-708.