

结合模板匹配和梯度峰值的对角标志自动提取方法

王刚^{1,2**}, 施忠臣^{1,2}, 尚洋^{1,2*}, 于起峰^{1,2***}

¹国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410073;

²图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 为了提高视觉测量系统的自动化水平和测量精度,提出了一种结合模板匹配和梯度峰值的对角标志自动提取方法。使用旋转不变模板匹配方法得到原始图像与标准模板的相关系数矩阵,通过两次阈值筛选获取标志点候选位置。根据两条直线相交于标志中心处以及中心处灰度梯度存在多个峰值的特性,剔除非合作标志点,得到对角标志点初始坐标。通过生成对角标志理想相关模板,利用相关系数拟合极值法进行亚像素定位。实验结果表明,该方法可以正确提取复杂环境下对角标志或棋盘格图像中的角点,而且需要人工调节的参数少、稳健性强、定位精度高且通用性好,可应用于工程实践中环境光源变化较大的测量场合。

关键词 机器视觉; 对角标志; 自动提取; 梯度峰值; 模板匹配

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815014

Automatic Extraction of Diagonal Markers Based on Template Matching and Peaks of Gradient Histogram

Wang Gang^{1,2**}, Shi Zhongchen^{1,2}, Shang Yang^{1,2*}, Yu Qifeng^{1,2***}

¹College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Hunan Provincial Key Laboratory of Image Measurement and Vision Navigation, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract To improve the automation level and measurement accuracy of the visual measurement system, a novel method based on template matching and peaks of gradient histogram is proposed to extract the corners of diagonal markers automatically. The rotation-invariant template matching method is used to get the coefficient correlation matrix of the original image and the standard template, and the candidate positions of markers are obtained by two thresholding selection. The false candidates are eliminated and the initial coordinates of markers are found depending on the properties, which are two lines intersecting at the center of the marker and their gray gradient of the marker with multiple peaks. The subpixel is located by generating ideal templates of diagonal markers and applying the correlation coefficient fitting extreme value method. The experimental results show that the proposed method can automatically extract the corners of diagonal markers or checkboard images in a complex environment. This method has the merits of few adjustable parameters, strong robustness, precision and universality. It can be used in measuring situations where the environment light source greatly in engineering practice.

Key words machine vision; diagonal marker; automatic extraction; peaks of gradient histogram; template matching

OCIS codes 150.1135; 100.2960; 100.5760; 100.3008; 100.5010

1 引 言

在光学测量、数字摄影测量及计算机视觉等领域,为了满足各种精密测量需求,通常需要在测量视场内布设一些结构信息已知的人工标记,其称为合

作标志。常用的单点合作标志包括十字丝、圆形以及对角等标志^[1]。合作标志具有结构简单、特征明显、易于分辨以及定位精度高等优点,因而广泛应用于大型结构变形监测、航天器交会对接、视觉导航和机器人抓取等视觉测量任务中^[2-5]。研究合作标志

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-04-18

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ140517)、国防科技大学科研计划(ZK16-03-27)

* E-mail: shangyang1977@nudt.edu.cn; ** E-mail: wanggang13@nudt.edu.cn; *** E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

的自动提取方法对于提高视觉测量的自动化水平和测量精度有重要意义。

根据合作标志提取过程中是否需要人机交互,可以将其分为人工选取和自动选取。人工选取方法需要用户在图像上使用鼠标点击合作标志的粗略位置,通过亚像素定位的方法得到合作标志的精确坐标。当布设的合作标志较多时,这种方法费时费力、操作繁琐,无法满足实际生产中智能化自动化的需求,因而合作标志自动选取方法是目前研究的重点。

目前合作标志的提取方法研究主要集中在圆形标志和棋盘格,而关于对角标志的自动提取方法研究很少^[6-10]。与其他合作标志相比,对角标志具有构造简单,对尺寸变化不敏感,中心处灰度梯度大,易于高精度定位等优点,研究对角标志的自动提取方法具有广泛的应用价值。相比于圆形标志,对角标志特征更加复杂;相比于棋盘格,对角标志约束条件更少,因而对角标志的自动提取更具有挑战性。

对于对角标志的自动提取,大多数学者主要在传统的自动角点检测算法基础上,利用对角标志特有的灰度特征和几何特征,实现标记点的识别定位。这些方法大多要求较好的成像质量,并且需要设置一系列的参数阈值。参数调节不当,标志点提取经常会出现遗漏或误判的情况,无法应对噪声明显、光照不均或测量距离远等复杂环境。本文在分析、总结对角标志中心处图像特征的基础上,提出了一种结合模板匹配和梯度峰值的对角标志自动提取算法。实验验证了该算法的稳健性、通用性及精度。

2 基本原理

2.1 获取候选标志点

由于对角标志中心为两条直线的交叉处,其图像灰度与邻域之间的变化程度相差较大,具备角点特性,因而可以利用角点检测的方法粗定位出对角标志点。Harris 角点检测^[11]是常用的一种角点提取算法,是基于灰度图像的角点检测算法,其稳定性高;然而由于采用了高斯滤波,其运行效率较低,角点信息存在丢失或位置偏移现象。当光照条件较差时,为了保证检测到足够多的角点,通常需要对源图像进行二值化处理,通常二值化阈值参数需要根据工程经验设定。因而,可以采用更加稳定可靠、参数较少的模板匹配方法在图像上获取候选的对角标志点。

提高适应光照变化的能力是成功提取对角标志的关键问题。在读入源图像后,首先对图像进行简单的、无需设置阈值参数的预处理,完成中值滤波、灰度均衡化。归一化互相关(NCC)能适应图像灰度线性畸变,因此优先选作模板匹配的距离度量准则。这些操作均可以有效降低光照变化的影响,提高角点检测的成功率。

模板匹配的基本思想是在目标匹配之前,预先制作目标的模板图像,然后将模板图像在待匹配图像上逐像素滑动窗口,比较模板图像与窗口图像的相似度,最后将相似度最高的窗口作为匹配结果。为了克服图像旋转问题,在经典 NCC 模板匹配基础上,将模板图像旋转 K 个角度,然后一起与源图像进行模板匹配,如图 1(a)所示。每个窗口最终的相似度响应值为所有不同旋转角模板匹配结果中的最大值,可以表示为

$$R(x, y) = \max_{k=0,1,\dots,K-1} \left\{ \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T^{2\pi k/K}(m, n) \cdot I^{x,y}(m, n)]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T^{2\pi k/K}(m, n)]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [I^{x,y}(m, n)]^2}} \right\}, \quad (1)$$

式中 $T(m, n)$ 为模板图像在像点 (m, n) 处的灰度值, $I^{x,y}$ 为源图像在像点 (x, y) 处的窗口图像, M, N 分别为模板图像或窗口图像的长、宽, K 为旋转角划分的个数, $R(x, y)$ 为源图像在像点 (x, y) 处的多角度模板匹配综合响应值。保留所有滑动窗口的 NCC 响应值,可以得到匹配响应图,如图 1(b)所示。

在得到多角度模板匹配综合响应图后,将这些响应值确定为可能对角标志点。设置 NCC 响应阈

值,将响应值小于阈值的点均置为 0,得到图 1(c)。对图 1(c)进行高斯滤波,减少随机噪声或异常点的影响,如图 1(f)所示。对滤波后的响应图的所有值进行排序,仅保留响应值大于排序阈值的点,如图 1(e)所示。将完成筛选的匹配响应图进行自动阈值分割,得到多个连通区域。将所有连通区域的中心位置作为对角标志提取的候选结果,如图 1(d)所示。

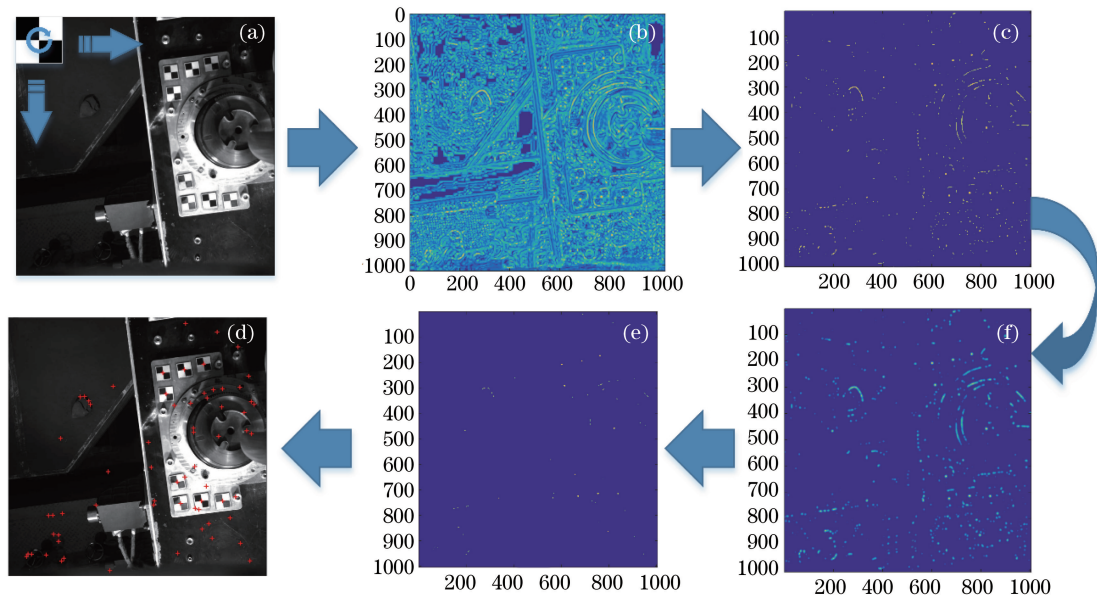


图 1 获取候选标志点不同阶段结果图。(a)模板匹配;(b) NCC 相应图;(c) NCC 阈值化;
(d)候选标志点;(e)排序阈值化;(f)高斯滤波

Fig. 1 Results of different stages in getting candidate markers. (a) Template matching; (b) response map by NCC;
(c) NCC thresholding; (d) candidate markers; (e) ordering thresholding; (f) Gaussian filtering

在整个获取候选标志点过程中,需要两次设置阈值参数并对匹配响应值进行筛选。在无法确定合作标志个数的前提下,为了能够成功提取所有的合作标志,需要在这一步骤中保证正确的合作标志不被剔除,因此在这里应该设置宽松的阈值。多次实验发现 NCC 响应阈值和排序阈值取 0.6 时,可获得较好效果。

2.2 剔除非标志点

候选标志点中通常包含合作标志之外的干扰点,因此需要对这些候选点进行验证,将非标志点剔除掉。经观察发现,虽然经过透视变换,并引入噪声、光照等干扰因素,对角标志依然具有如下灰度特征和几何特征:1)中心区域的平均灰度与整个合作标志的平均灰度差异很小;2)对角标志为原点对称图形,相邻象限区域一明一暗,平均灰度差异大,而相对象限区域同为明或暗,平均灰度相近;3)有且仅有相交于中心区域的两条直线;4)灰度方向梯度直方图特征方向存在 4 个梯度峰值。相对于单纯的灰度特征,边缘特征和灰度梯度特征具有稳定性好、抗噪能力强以及对光照变化不敏感等优点,因而将使用后两种图像特征验证候选标志点的正确性并提升角点提取算法的稳健性。

利用上述对角标志的第 3 条特征来剔除一部分非标志点,其基本思路为:以候选点为中心选取合适

的矩形区域,在这个矩形区域子图上检测直线,并判断是否存在两条相交于矩形中心附近的直线,若存在,则保留该候选标志点;反之,则剔除该点。

直线检测算法选用目前应用广泛、效果可靠的直线段检测(LSD)方法^[12],与之前的直线提取算法相比,LSD 方法的特别之处在于能在较短的时间内得到亚像素级别的直线提取结果,同时使用了错误控制策略,能保证检测结果比较准确,且在任意待检测图像上无需调节参数。然而 LSD 是一种局部直线提取方法,每个点只允许属于一条直线,若存在相交情况,则一条直线至少被割裂为两条。又因为直线交点处梯度值通常较小,不会被检测为边缘点,因此相交的两条直线在交点处被分割为 4 条线段,如图 2(b)所示。在直线检测后,还需要根据直线夹角及其之间的空间关系将同一直线合并,得到完整的直线检测结果,如图 2(c)所示。

上述步骤结束后,通过直线提取到的两条直线相交于中心这一限制条件,大部分错误标志点已经被剔除。但还是存在一些相似目标的干扰,如 T 形结构等,接下来利用对角标志的灰度梯度特性继续筛选出角点的初始位置。

标准对角标志如图 3(a)所示,其中实线箭头方向为对角标志图像的边缘方向。很显然,对角标志在中心直线边缘处的梯度幅值较大,而在亮块或暗

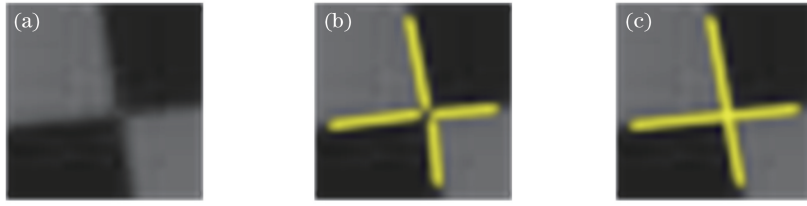


图 2 LSD 对角直线检测效果图。(a) 对角标志局部图; (b) LSD 直线提取结果; (c) 直线合并结果

Fig. 2 Detection graphs of diagonal lines with LSD. (a) Topography of the diagonal marker; (b) extraction results of LSD; (c) lines merging results

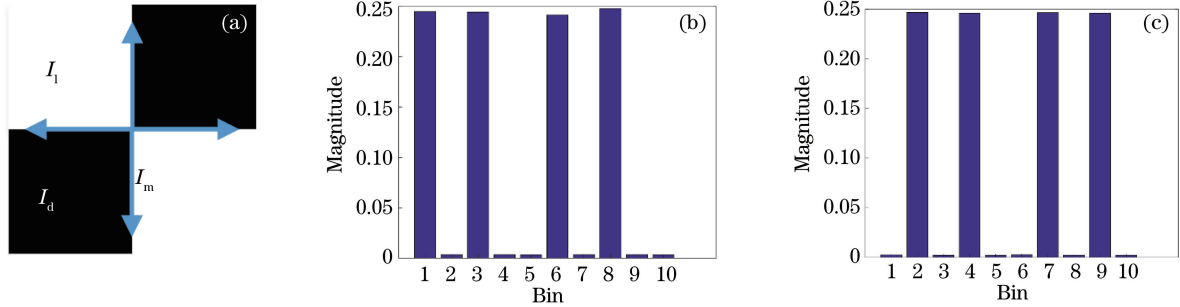


图 3 对角标志方向梯度。(a) 梯度方向; (b) 原图直方图; (c) 图像旋转 45° 直方图

Fig. 3 Oriented gradient of the diagonal marker. (a) Gradient directions; (b) histogram of original image; (c) histogram of original image rotated 45°

块这些平坦区域的梯度幅值很小,统计整个对角标志区域像素点的方向梯度直方图,如图 3(b)所示,很明显存在 4 个峰值,且当图像发生旋转或缩放等几何变化时,这种性质依然不变。图 3(c)为对角标志旋转 45° 得到的方向梯度直方图。根据这一特性,计算得到以候选标志点为中心区域的方向梯度直方图,判断其是否存在 4 个峰值,且相邻两峰值的间隔角度相近,最大峰值与最小峰值相差约为 270°。若满足上述条件,则作为正确的标志点保留;反之,则作为伪标志点剔除。

2.3 亚像素定位

亚像素目标定位是保证使用合作标志的图像测量系统测量精度的关键步骤之一,具有重要的理论意义和工程意义。对于拥有特定灰度分布和形状分布的已知结构目标,常用的亚像素定位方法包括矩方法、拟合法和相关法等。

结合拟合法和相关法的相关系数拟合极值法^[10],其基本思路是通过自适应生成对角标志的理想相关模板,利用该模板与粗定位的对角标志区域进行 NCC 模板匹配,获取相关系数矩阵。这种归一化互相关方法得到的相关系数矩阵具有明显的单峰分布特性,易于拟合极值点。在系数矩阵上利用高斯拟合得到极值点,作为对角标志精确定位结果。

对角标志的理想相关模板可以通过 2.2 节中直线检测提取的两条直线自适应生成。定义模板方向 ϕ 和变形系数 d ,模板方向表示当前合作标志两对角线夹角平分线与水平线的夹角,变形系数为当前标志两直线夹角与未经过透视变换的初始对角标志直线夹角之比,可以由式(2)计算得到:

$$\phi = \frac{(\theta_B + \theta_w)}{2}, d = \frac{(\theta_B - \theta_w)}{\pi/2}, \quad (2)$$

式中 θ_B, θ_w 为对角线与水平线的夹角, (ϕ, d) 组成了模板参数。

图 3(a)所示了对角标志区域的灰度分布,其中 I_1 为最大灰度, I_d 为最小灰度, I_m 为亮区和暗区间过渡区域的灰度。对角标志整个区域的灰度近似满足标志中心取极值的高斯分布函数,可得图 3(a)模板参数 $\left(\frac{\pi}{4}, 1\right)$ 的对角标志图像为

$$G(x, y) = \begin{cases} I_b(x, y), & xy \geq 0 \\ I_1 + I_d - I_b(x, y), & xy < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $I_b(x, y) = \frac{I_1 + I_d}{2} \exp\left\{-\frac{[\min(|x|, |y|)]^2}{2\sigma^2}\right\}$, 其中 σ 为标准差,反映了灰度分布的陡峭程度。参数 (ϕ, d) 的理想相关模板与(3)式相似,可以将像点坐标 (x, y) 通过如下的坐标系变换得到新的坐标 (x', y') ,再代入(3)式即可。

$$\begin{cases} x' = \frac{\sqrt{2}}{2} [x(d \cos \phi + \sin \phi) + y(d \sin \phi - \cos \phi)] \\ y' = \frac{\sqrt{2}}{2} [x(d \cos \phi - \sin \phi) + y(d \sin \phi + \cos \phi)] \end{cases} \quad (4)$$

2.4 算法流程

综上所述,具体的算法流程如图4所示,所述对角标志角点自动提取方法主要分为候选标志点获取、伪标志点剔除和亚像素定位等3个部分。1)候选标志点获取部分。生成标准模板并旋转多个角度,分别与原图进行模板匹配,得到综合NCC响应图,将响应值小于阈值的点剔除,再高斯模糊,对剩下的点按响应值大小进行排序,保留排在前面的点。

2)伪标志点剔除部分。利用LSD直线检测方法提取直线段并合并相近直线,求取对角线交点,将交点不在候选点中心的候选标志剔除,统计方向梯度直方图并提取峰值,判断峰值是否符合对角标志特性。3)亚像素定位部分。根据直线提取得到的直线生成理想模板,与候选区域模板匹配得到相关系数矩阵,利用高斯拟合提取极值点作为最终的亚像素定位结果。

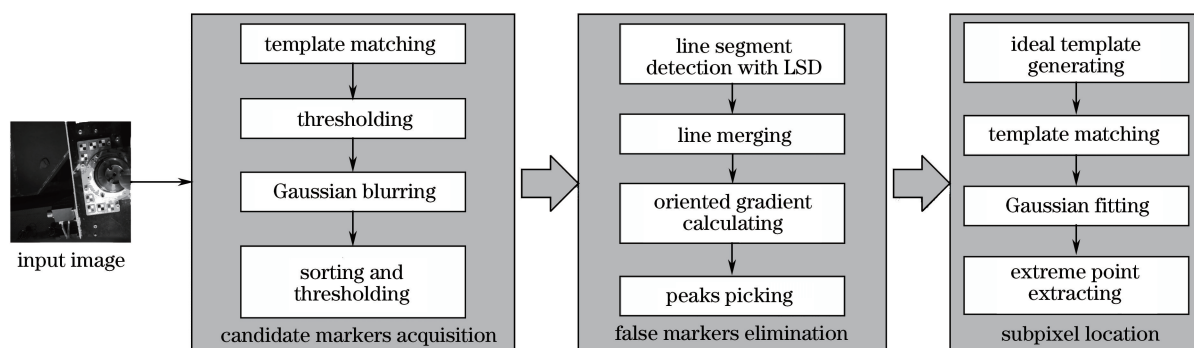


图4 对角标志自动提取算法流程图

Fig. 4 Flowchart of diagonal markers' automatic extraction method

3 实验结果及分析

为了测试所述对角标志自动提点算法的性能,以实验室采集的各种不同形状的对角标志的图像及实际项目中使用的对角标志图像为例进行实验,并且与其他对角标志自动提取算法进行对比。实验室采集图像的相机为加拿大灰点相机FL3-GE-50S5M-C,其分辨率为1920 pixel×1080 pixel,镜头焦距为6 mm。所述方法已由C++实现。

3.1 稳健性实验

为了检验所述方法的稳健性和实用性,选用实验室可控环境下拍摄的方形对角标志图像以及图像测量工程中采用的对角标志图像,本文方法对角标志自动提取结果如图5所示。

图5(a)为同一视角下不同光照条件的对角标志图像,通过调节工业相机的光圈控制图像从左至右逐渐变亮,并且使用外部光源控制光照变化,在实

验室中营造非均匀光照及过度曝光环境。随着光照的减弱,图像的噪声也明显变大,增加了合作标志的提取难度。图5(b)为相机不同观测视角变化下的对角标志图像,对角标志发生了不同的透视变形,标志的图像尺寸和形状变化明显。当目标距离相机较远时,合作标志还会存在模糊现象。图5(c)为实际光学测量中复杂环境下的对角标志图像,可以明显地看出,该条件下光照较暗、背景杂乱,且图中的标志尺度差异较大。

由图5可知,对角标志自动提取算法在上述条件下,均能成功地检测出正确的对角标志,既没有漏检也没有错检。在参数设置方面,只需要根据标志在图像中的大小改变初始模板的尺寸。实验结果表明,本文方法对光照条件、视角变化等均不敏感,可以适应标志模糊、背景干扰以及环境光变化的情形,需要人工调节的参数较少,具有很强的稳健性。

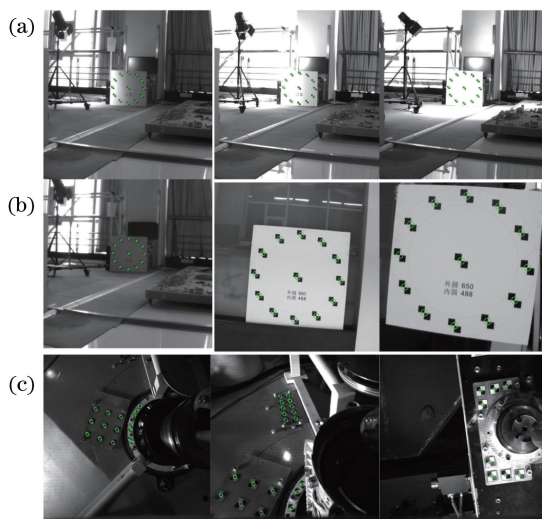


图 5 稳健性测试。(a)不同光照;(b)不同视角;(c)复杂环境

Fig. 5 Robustness test. (a) Different illuminations; (b) different perspectives; (c) complex environment

3.2 通用性实验

所述自动提点算法主要是利用对角标志中心区域的灰度梯度特征和几何特征,未利用标志的外部轮廓信息,因此本文算法并不局限于方形对角标志,

也可以扩展到中心区域符合黑白交替形状的目标,如圆形对角标志、编码圆形对角标志和棋盘格等。为了验证本文方法的通用性,选取了一组不同形状的合作标志图像进行角点提取,结果如图 6 所示。

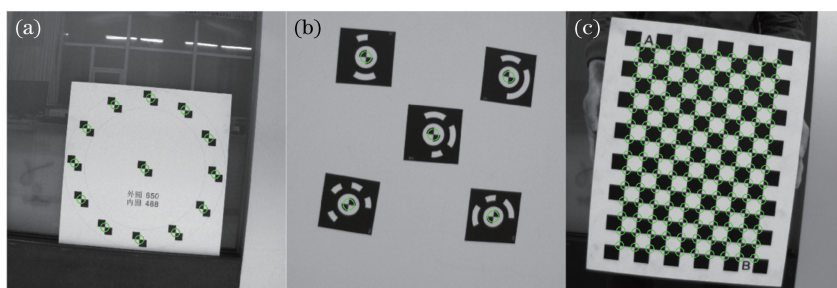


图 6 通用性测试。(a)方形对角标志;(b)编码圆形对角标志;(c)棋盘格

Fig. 6 Universality test. (a) Square diagonal marker; (b) coded circular diagonal marker; (c) checkerboard

由图 6 可以看出,本文算法正确检测出了方形对角标志、编码圆形对角标志以及棋盘格图像的角点。实验结果表明,本文方法具有很好的通用性和拓展性,可以广泛应用于中心符合对角分布的合作目标角点提取。

3.3 精度对比实验

由于在实际应用中,无法获取对角标志角点位置的真值,为了检测本文方法的精度,通常的做法是对同一棋盘格图像分别采用本文方法和现有方法进行角点提取,并比较提点坐标的差异。张正友棋盘

格提点算法^[13]是目前国内外相对稳定且精度较高的提点算法,常用于相机标定,因此可以用于检验本文算法的精度。

为了不失一般性,选择 8 幅不同视角采集的棋盘格图像分别使用上述两种方法提取角点,提取结果如图 7 所示。记录两种方法提取的所有对应角点之间的距离偏差,并统计出每组图像角点误差的最大偏差、平均偏差及偏差在 0.1 pixel 以内点的百分比,统计结果如表 1 所示。

从表1可以发现,尽管两种方法的对比最大偏



图 7 棋盘格角点提取结果

Fig. 7 Results of checkerboard corner detection

表 1 两种棋盘格角点提取方法结果偏差统计

Table 1 Deviations of checkerboard corner detection by two methods

Image number	Maximum deviations /pixel	Average deviations /pixel	Deviations ≤ 0.1 pixel /%
1	0.3130	0.0170	99.29
2	0.2223	0.0164	98.57
3	0.2068	0.0166	98.57
4	0.3267	0.0195	95.00
5	0.2777	0.0182	98.57
6	0.4173	0.0221	97.86
7	0.1427	0.0151	98.57
8	0.0988	0.0147	100

差最大可约达 0.4 pixel,这主要是由标志处于视场边缘或者离相机较远导致,可以通过畸变校正减小该偏差。平均偏差 <0.03 pixel 且偏差 <0.1 pixel 的标志点比例均 $>95\%$,说明本文算法定位精度与张正友棋盘格提点方法相近,可满足实际应用要求。

4 结 论

为了解决目前对角标志角点自动提取方法较少且无法应对光照条件较差的问题,提出了结合模板匹配和梯度峰值的方法自动获取角点坐标。利用模板匹配方法来获取对角标志候选位置,根据对角标志的几何特征和灰度梯度特征对候选点进行筛选,剔除伪对角标志点,再利用相关系数拟合极值法得到角点的亚像素级定位结果。实验结果表明:1)本文方法的稳健性得到了明显的提升,能够实现复杂环境下对角标志的正确自动提取;2)本文方法具有很强的通用性,不仅可以自动提取方形对角标志,还能够正确识别编码对角标志、棋盘格图像等;3)本文算法定位精度与张正友棋盘格提点方法相近,完全满足工程实践需求。

参 考 文 献

- [1] Yu Q F, Shang Y. Videometrics: principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009.
于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] Yu Q F, Shang Y, Fu S H, *et al.* Development of videometrics for large scale structural deformation and topography measurement [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5): 479-490.
于起峰, 尚洋, 伏思华, 等. 大型结构变形及形貌摄像测量技术研究进展[J]. 实验力学, 2011, 26(5): 479-490.
- [3] Zhang Y J, Qin S Y, Hu X H. A high accuracy target positioning method for autonomous rendezvous and docking between spacecrafts [J]. Journal of

Astronautics, 2014, 35(12): 1430-1436.

张莹瑾, 秦世引, 胡晓惠. 航天器自主交会对接的高精度目标定位方法[J]. 宇航学报, 2014, 35(12): 1430-1436.

- [4] Yang C S, Yang Z, Xue B Y. An approach of vision navigation of UAV based on artificial marks [J]. Applied Science and Technology, 2015, 42(5): 34-37.
杨成顺, 杨忠, 薛八阳. 基于人工标志的无人机视觉导航方法[J]. 应用科技, 2015, 42(5): 34-37.
- [5] Zhang X, Wei P. Monocular vision calibration method of the stereo target for robot pose measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(11): 1117005.
张旭, 魏鹏. 针对机器人位姿测量立体标靶的单目视觉标定方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1117005.
- [6] 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.
- [7] Zhang H Y, Yu Z J. Initial displacement estimation method for speckle image based on marker matching [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0303001.
张红颖, 于之靖. 基于标志点匹配的散斑图像变形初值估计法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0303001.
- [8] Shan B H, Yuan W T, Liu Y. A calibration method for stereovision system based on solid circle target [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0915001.
单宝华, 袁文厅, 刘洋. 一种基于实心圆靶标的立体视觉系统标定方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0915001.
- [9] Xia R B, Liu W J, Zhao J B, *et al.* Fully automatic camera calibration method based on circular markers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 368-373.
夏仁波, 刘伟军, 赵吉宾, 等. 基于圆形标志点的全

- 自动相机标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 368-373.
- [10] Shang Y, Yu Q F, Lu H W. Auto-recognition and pinpoint of circular opposite vertical angle marks[C]. 2002'China Optoelectronics Technology Conference, 2002: 218-223.
尚洋, 于起峰, 陆宏伟. 圆形对角标志自动识别与精确定位[C]. 2002年全国光电技术学术交流会, 2002: 218-223.
- [11] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C] // Proceedings of the Allvey Vision Conference, 1988: 147-151.
- [12] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [13] von Gioi R G, Jakubowicz J, Morel J M, *et al*. LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(4): 722-732.