

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107625

基于仿射变换和均值像素法的环状编码点鲁棒识别*

孙丽君^{1,2,3}, 李石^{1,2,3}, 陈天飞^{1,2,3}

(1. 河南工业大学粮食信息处理与控制教育部重点实验室 郑州 450001; 2. 河南工业大学郑州市机器感知与智能系统重点实验室 郑州 450001; 3. 河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450001)

摘要:在近景工业摄影测量中,针对环状编码点精确定位和准确识别的要求,提出了一种鲁棒性识别算法。该算法在对目标图像预处理后,首先根据边缘滤波准则初步定位编码点,并将含编码带的特征区域分割出来。然后,利用最小二乘法对特征区域进行仿射变换,将经透视投影退化的椭圆映射成规则圆形。最后,采用均值像素法获取环状编码点的解码值,进一步提高编码点的抗噪性。大量实验结果表明:该方法在对编码点的中心定位达到亚像素级别的同时,改善了算法对识别角度的鲁棒性,在识别角度为 70° 时,正确识别率仍可达97.9%,在实际复杂场景中具有较好的实用价值。

关键词:近景摄影测量;环状编码点;仿射变换;均值像素

中图分类号: TH701 TP391.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Robust recognition of circular coded point based on affine transformation and average pixel method

Sun Lijun^{1,2,3}, Li Shi^{1,2,3}, Chen Tianfei^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Grain Information Processing and Control of Ministry of Education, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Key Laboratory of Machine Perception and Intelligent System, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In close range industrial photogrammetry, according to the requirements of precise positioning and accurate recognition of circular coded point, a robust recognition algorithm is proposed. After preprocessing the target image, the algorithm firstly locates the coded point initially according to the edge filtering criterion and segment the feature region containing coding band. Then, the least square method is used to perform affine transformation on the feature region and the degenerated ellipse in perspective projection is mapped into a regular circle. Finally, the average pixel method is used to obtain the decoding value of the circular coded points, which further improves the anti-noise performance of the circular coded points. A large number of experiment results show that this method can not only achieve sub-pixel level in the center location of circular coded points, but also improve the robustness to the recognition angle of the algorithm. When the recognition angle is 70° , the correct recognition rate can still reach 97.9%, which has good practical application value in actual complex scene.

Keywords: close range photogrammetry; circular coded point; affine transformation; average pixel

收稿日期: 2021-03-17 Received Date: 2021-03-17

* 基金项目: 国家自然科学基金(61803146, 61973104)、河南省优秀青年科学基金(212300410036)、河南省高校科技创新人才支持计划(21HASTIT029)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS089)、河南省青年人才托举工程项目(2019HYTP005)、河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2019SJGLX270)、河南工业大学自科创新基金支持计划(2020ZKJ06)、河南工业大学青年骨干教师培育计划(21420080)、粮食信息处理与控制教育部重点实验室开放基金(KFJJ2020107)、河南工业大学本科教育教学改革研究与实践项目(JXYJ2019009)资助

0 引言

在近景摄影测量领域,为了提升图像匹配的精确性,通常需要借助一种带有唯一身份信息且易于识别的编码点,人为将这些编码点粘贴在待测量物体特征点上,通过对这些编码点精确定位和正确识别来实现图像之间的匹配。因此,编码点的设计、提取和识别算法具有重要的研究意义。

截止目前,国内外学者关于编码点的设计和识别做了大量工作。在编码点设计方面,具有代表性的有环状编码点^[1]、点状编码点^[2-3]、可纠错编码点^[4]、汉字编码点^[5]、8位圆形编码点^[6]、双环和象限的编码点^[7]以及带有颜色信息的编码点^[8]。其中环状编码点设计简单、易于识别、图像采集所产生的畸变对解码结果影响小且具有良好的仿射变换不变性等特点,所以本文采用环状编码点来进行检测和识别算法的研究。

关于编码点检测和识别,国内外学者也进行了深入研究并取得了一定成果,Ahm等^[2-3]针对点状编码点提出了一种圆度形状因子的方法来对编码点进行检测和识别。宋丽梅等^[9]提出了一种将局部同心椭圆变换为平行直线的仿射对数极坐标变换方法(affine log polar coordinate, ALPC),对环状编码点进行ALPC变换,将编码环带转换成一条直线进行解码。杨志等^[10]提出了基于椭圆外切矩形性质的圆形编码点检测方法来实现编码点的识别。周玲等^[11]提出了一种提取环状编码点编码带内圆和外圆之间像素中值的方法实现识别。金滔等^[12]采用透视变换和圆环扫描方法进行环状编码点的识别。谢则晓等^[13]提出六点法获取目标点近似成像中心,又基于环状编码点的仿射不变性提出了一种等分椭圆内切圆法,实现了编码点的识别。刘建伟等^[14]在相机标定中利用环状编码点,提出了改进的Canny边缘亚像素检测算法,使用先验规则去除误识别的编码点,多次拟合定位编码点中心,对编码点环带多次采样取中值进行编码点解码。

由于上述传统识别算法存在诸多不足之处,例如:识别结果受拍摄角度影响较大、算法运算量大、识别效率不高、在特殊场景中识别鲁棒性差。为了实现环状编码点的精确定位和准确识别,本文提出了一种高鲁棒性的编码点解码方法,该算法在对目标图像预处理后,首先根据边缘滤波准则来初步定位中心编码点,并将含编码带的特征区域分割出来。然后利用最小二乘法对特征区域进行仿射变换,将经透视投影退化的椭圆映射成规则圆形。最后采用均值像素法获取编码点的解码值,以进一步提高编码点的抗噪性。大量实验结果表明:该方法识别率高、受拍摄角度影响小,并且在实际场景中依然保持较高的识别率和较好的鲁棒性。

1 环状编码点的设计

环状编码点的设计一般要满足以下几个条件:解码的唯一性、定位的精确性、编码容量大、解码的效率和准确率高。根据这些设计条件,本文设计出一种十五位环状编码点,如下图1(a)所示,这种环状编码点的三个同心圆的直径由内向外分别是10、20、30 mm,中心圆是白色正圆形,用于环状编码点定位,外围是用于确定身份唯一性的15位等分编码环。每一个基本的编码环单位可黑可白,对应二进制的0或1,遍历编码环一周可以获得15位二进制数字,将这15位二进制数对应的最小十进制数作为这个15位编码点的身份信息。例如图1(a)中的15位二进制序列所对应的最小十进制数为2991(对应的二进制数的序列为000101110101111)。图1(b)是图1(a)编码点受拍摄角度影响实际所成的像,一般正圆形编码点经过射影变换后都会呈现椭圆形。



(a) 环状编码点设计图
(a) Layout design diagram of circular coded point

(b) 环状编码点实际成像图
(b) Actual imaging diagram of circular coded point

图1 环状编码点

Fig. 1 Circular coded point

2 编码点的提取

环状编码点的中心被设计成正圆,经过相机成像后呈现椭圆形状。编码点目标提取的任务就是把满足条件的编码点中心圆从图像中提取出来。

2.1 图像预处理

对目标图像中的环状编码点中心圆提取之前,需对目标图像进行预处理。例如对于图2(a)中给出的一幅原始图像,首先把这个原始图像转化为图2(b)所示的灰度图像,下一步对灰度图像进行高斯平滑处理,得到如图2(c)的高斯平滑后图像。然后,对高斯平滑后图像采用大津法进行图像二值化处理,得到如图2(d)所示的二值化图像。最后,对得到的二值化图像进行边缘检测处理,获得如图2(e)所示的目标图像的边缘图像。在图像边缘检测算法中,由于Roberts算子,Sober算子,Kirsch算子和Prewitt算子对噪声敏感,导致提取的图像边缘像素点连续性差,所以我们利用Canny算子进行图像边缘提取。

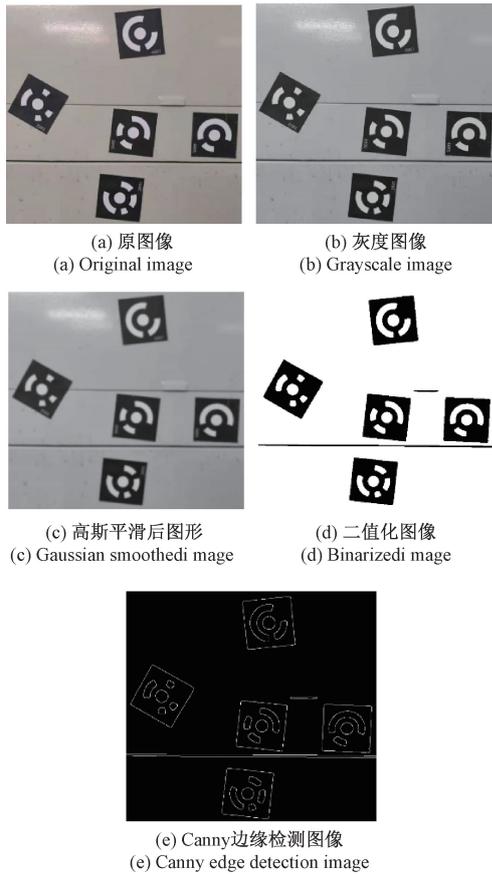


图2 图像预处理

Fig. 2 Image preprocessing

2.2 边缘滤波与编码点初定位

1) 最小二乘椭圆拟合

受拍摄角度的影响,编码点中心圆最后成像为椭圆,为了便于后续解码以及确定编码点中心圆位置坐标,需对轮廓进行最小二乘椭圆拟合。任意位置的椭圆方程可以记为式(1)。

$$f(x, y) = x^2 + Axy + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (1)$$

如果一个轮廓上的点数大于6个,那么就可以对这些点进行最小二乘椭圆拟合,得到目标函数为:

$$F(A, B, C, D, E) = \sum_{i=1}^N f^2(x_i, y_i) \quad (2)$$

根据极值的原理,如果 F 取得最小值,则必须满足下面的关系:

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial F}{\partial B} = \frac{\partial F}{\partial C} = \frac{\partial F}{\partial D} = \frac{\partial F}{\partial E} = 0 \quad (3)$$

这样就可获得参数 A, B, C, D, E 的值,从而得到拟合后的椭圆方程。

假设椭圆的中心坐标为 (x_c, y_c) , 椭圆的长短轴半径分别为 a, b , 椭圆的偏角(椭圆长轴与水平方向的夹角)

为 θ , 那么椭圆的另一种表达方式为:

$$\frac{[(x - x_c) \cos \theta + (y - y_c) \sin \theta]^2}{a^2} + \frac{[(y - y_c) \cos \theta - (x - x_c) \sin \theta]^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

联立式(1)和(4)可得:

$$A = \frac{(b^2 - a^2) \sin 2\theta}{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta} \quad (5)$$

$$B = \frac{b^2 \sin^2 \theta + a^2 \cos^2 \theta}{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta} \quad (6)$$

$$C = -2x_c - Ay_c \quad (7)$$

$$D = -Ax_c - 2By_c \quad (8)$$

$$E = x_c^2 + Ax_c y_c + By_c^2 - \frac{a^2 b^2}{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta} \quad (9)$$

从式(5)~(9)中可以计算出拟合后的椭圆的5个参数:

$$x_c = \frac{AD - 2BC}{4B - A^2} \quad (10)$$

$$y_c = \frac{AC - 2D}{4B - A^2} \quad (11)$$

$$\theta = \arctan \sqrt{\frac{Bb^2 - a^2}{b^2 - Ba^2}} \quad (12)$$

$$a = \sqrt{\frac{2(BC^2 + D^2 - ACD - 4BE + A^2E)}{(4B - A^2)(B + 1 - \sqrt{A^2 + (B - 1)^2})}} \quad (13)$$

$$b = \sqrt{\frac{2(BC^2 + D^2 - ACD - 4BE + A^2E)}{(4B - A^2)(B + 1 + \sqrt{A^2 + (B - 1)^2})}} \quad (14)$$

2) 编码点筛选准则

在对图像进行预处理后,下一步就要将环状编码点中心圆从图像中筛选出来,筛选要遵循以下几个准则:

(1) 尺寸准则

本文设计的编码点中心圆成像后会呈现椭圆形状,为了体现本文识别算法对拍摄角度(编码点所在平面的法线方向与投影方向的夹角)具有较好的鲁棒性,选取 $0^\circ \sim 85^\circ$ 的摄影角度范围,编码点中心圆成像后的轮廓面积 S 和周长 P 应该满足以下公式:

$$\begin{cases} S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \\ P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

其中, S_{\min}, S_{\max} 分别对应编码点中心圆轮廓面积在射影角度为 $0^\circ \sim 85^\circ$ 之间的最小值和最大值; P_{\min}, P_{\max} 分别对应中心圆轮廓周长在 $0^\circ \sim 85^\circ$ 之间的最小值和最大值。通过面积和周长准则的筛选,能剔除面积和周长相对于编码点中心圆成像有明显有差别的轮廓。

(2) 形状准则

由于椭圆轮廓是一个凸性封闭轮廓,形状准则利用椭圆圆度 Q 进行椭圆轮廓筛选,在本文实验条件(投影

角度 $0^\circ \sim 85^\circ$ 下,椭圆的圆度应该满足以下公式:

$$Q = \frac{2\sqrt{\pi S_{contours}}}{P_{contours} + 1} \leq Q_{max} \quad (16)$$

其中, $S_{contours}$ 是轮廓的面积; $P_{contours}$ 是轮廓的周长; Q_{max} 是轮廓圆度阈值,当轮廓圆度小于这个阈值时,不满足条件的轮廓就会被剔除。

(3) 面积差准则

拟合面积和轮廓面积的差值准则主要是为了剔除如图3所示的单位环瓣被误识别为编码点中心圆的情况。当对一个轮廓进行最小二乘拟合后,可以获取它的椭圆参数:中心坐标 (x_c, y_c) ,椭圆的长轴 a ,椭圆的短轴 b ,椭圆的偏角 θ 。利用椭圆的面积式(17)可以获得轮廓的椭圆拟合面积 $S_{ellipse}$,利用计算机视觉库中函数CountourArea获取轮廓面积 $S_{contours}$ 。如式(18)所示,利用 $S_{ellipse}$ 和 $S_{contours}$ 之间差值的绝对值对于 $S_{contours}$ 的比例就可以来剔除单位环瓣被误识别成编码点中心圆的情况。如图4所示,如果一个轮廓是一个椭圆,那么对它进行最小二乘椭圆拟合后求得 ΔS 几乎接近于0;而如图5如果轮廓是一个单位环瓣,那么对它进行最小二乘椭圆拟合后求得的 ΔS 不会接近于0。所以利用这个原理设置一个合适阈值 S ,如果 $\Delta S < S$,那么这个轮廓就可以被认定为编码点中心圆,反之就是一个单位环瓣。



图3 环状编码点误识别情况

Fig. 3 Misidentification of circular coded point

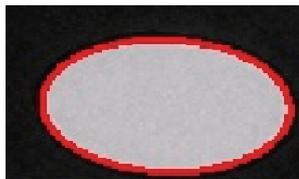


图4 环状编码点中心圆椭圆拟合情况

Fig. 4 Ellipse fitting of center circle of circular coded point



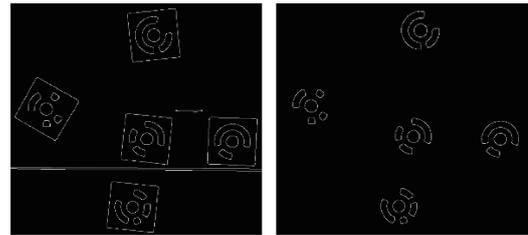
图5 单位编码瓣椭圆拟合情况

Fig. 5 Ellipse fitting of unit coded lobe

$$S_{ellipse} = \frac{\pi ab}{4.0} \quad (17)$$

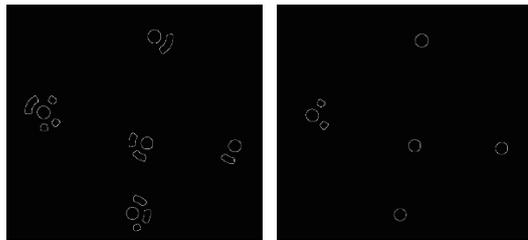
$$\Delta S = \left| \frac{S_{ellipse} - S_{contours}}{S_{contours}} \right| \quad (18)$$

利用以上准则可以准确地筛选出符合条件的椭圆形编码点中心圆,下图6(a)是预处理阶段得到的Canny边缘检测图像,图6(b)是边缘直线剔除后的图像,图6(c)是通过尺寸准则筛选后的图像,图6(d)是利用形状准则筛选后的图像,图6(e)是经过面积差准则筛选后获得的图像,此时,符合条件的编码点中心圆已被筛选出来。



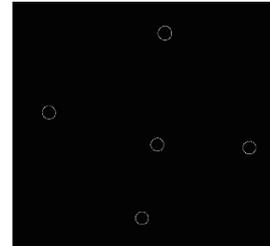
(a) Canny边缘图像
(a) Canny edge image

(b) 剔除边缘直线
(b) Eliminating edge line



(c) 尺寸滤波
(c) Dimension filtering

(d) 形状滤波
(d) Shape filtering



(e) 面积差滤波
(e) Filtering of area difference

图6 环状编码点的筛选过程

Fig. 6 The screening process of circular coded points

3 编码点的定位和解码

在上述图像预处理和编码点中心圆筛选基础上,下面对编码点进行定位和解码。

3.1 编码点的区域分割

根据编码点设计特点,构建出一个以编码点中心圆的成像椭圆圆心为中心、长轴3倍为边长的正方形区域,利用这个区域将成像后的环状编码点从原图像中分割出来,如图7所示。

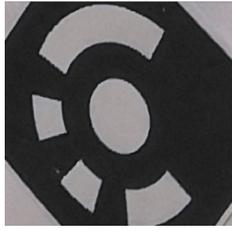


图 7 一个环状编码点的区域分割图像

Fig. 7 Region segmentation image of a circular coded point

3.2 目标区域的仿射变换

当拍摄角度不同时,环状编码点会发生不同比例的伸缩。这种伸缩对编码点的定位影响不大,但是对解码的准确性会产生较大影响,如果仅遍历圆环一周读取像素值进行解码,易导致解码错误。为了解决该问题,提出了一种基于最小二乘法的仿射变换方法,该方法可用来矫正成像过程产生的图像比例失调问题。

首先获取原图像中 4 个点和目标图像上的 4 个点。如图 8 所示选用编码带最外层椭圆轮廓的最小外接矩形的 4 个顶点(p_1, p_2, p_3, p_4)作为原图像中的 4 个点,假设变换后的图形轮廓为如图 9 示的正圆轮廓,已知编码点中心圆的成像椭圆长轴为 a ,则设定目标图像的 4 个点分别为 $(0,0), (3a,0), (3a,3a), (0,3a)$ 。

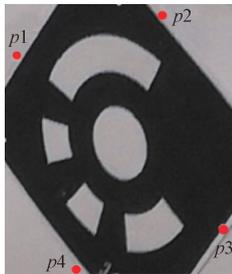


图 8 真实图像中编码点最小外接矩形的 4 个顶点

Fig. 8 Four vertices of the smallest circumscribed rectangle of coded point in the real image

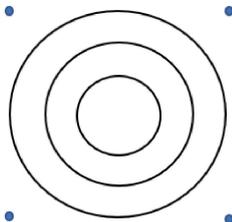


图 9 变换后的正圆轮廓和 4 个目标点

Fig. 9 The transformed contour of a circle and four target points

根据原图和目标图像对应的两组坐标点,利用最小二乘法获取转换参数^[15-16],进而求得原图像到目标图像的仿射变换矩阵 H 。然后,对图 7 所示的原始图像进行仿射变换,得到变换后的图像如图 10 所示的规则圆形,

结果表明,该方法有效地矫正了圆形编码点因拍摄角度而产生的拉伸变形问题。

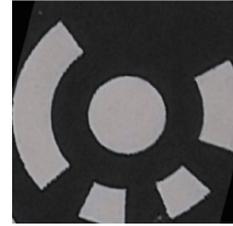


图 10 变换后环状编码点图像

Fig. 10 The image of the circular coded point after transformation

3.3 编码点的定位

经上述转换,因成像导致变形的编码点已恢复成规则圆型,然后可对编码点进行定位。传统的编码点的亚像素定位方法中,质心法精度高且易于实现,本文采用质心法利用式(19)进行编码点中心亚像素定位。式中, (x_0, y_0) 为编码点中心坐标, $I_{i,j}$ 为区域内像素点 (i, j) 的灰度值。

$$x_0 = \frac{\sum_j \sum_i i \cdot I_{i,j}}{\sum_j \sum_i I_{i,j}}, y_0 = \frac{\sum_j \sum_i j \cdot I_{i,j}}{\sum_j \sum_i I_{i,j}} \quad (19)$$

3.4 编码点的解码

如图 11 所示,变换后的规则编码点图像中,中心圆环 K 为识别出来的编码点中心圆边缘,圆环 L 和最外层圆环 N 分别对应编码带内边界和外边界的边缘,圆环 M 位于编码带内边界和外边界的中间,根据上述变换,圆环 M 被转换成标准圆。

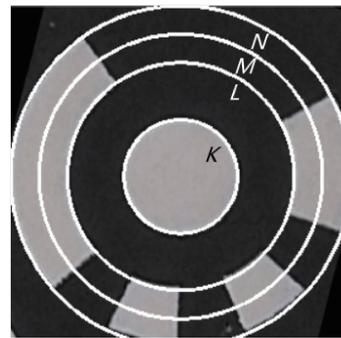


图 11 变换后的环状编码点

Fig. 11 Circular coded point after transformation

下面对 M 上的像素进行遍历。如图 12 所示,本文采用 15 位编码点,单位编码带所对应的角度是 24° 。在圆环 M 上,每隔 24° 取一个像素,则得到一个 15 位二进制数字序列 $b[i]$,通过移位运算将该 15 位二进制序列 $b[i]$ 转化成对应最小十进制整数的二进制序列 $b_{min}[i]$ 。

第一次遍历 M 取 15 个像素值 $b_1[i]$,第二次遍历 M 相对于第一次取像素值的位置顺时针偏移 1° ,如图 13 所示,第二次取到 15 个像素值 $b_2[i]$ 。

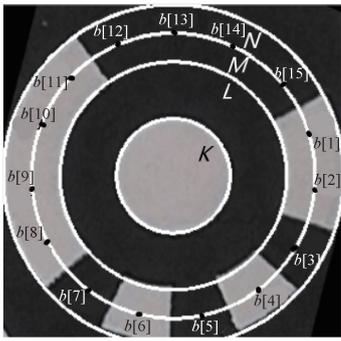


图 12 遍历像素值

Fig. 12 Traversing pixel values

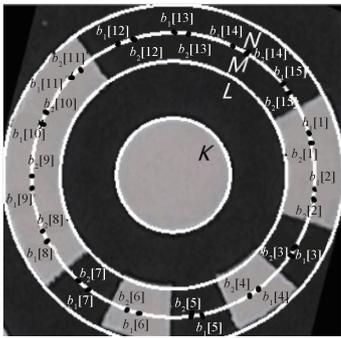


图 13 第二次遍历像素值

Fig. 13 Second traversal pixel values

将上述过程循环 $u (u > 24)$ 次,每一次遍历 M 取像素值的位置较上次取像素值位置顺时针移动 1° , 得到 u 个二进制序列 $b_{(j)}[i]$ 。通过对 u 个二进制序列进行移位运算,可得到 u 个二进制序列 $b_{\min(j)}[i]$ 。在对 u 个二进制序列 $b_{\min(j)}[i]$ 中对应元素求和的基础上,求平均数得到一个 15 位序列 $b_{\text{even}}[i]$ 。然后,分别对该序列中的 15 个数字进行阈值判断,如果大于 0.5,该二进制数字被置为 1,如果小于 0.5,被置为 0,则得到最终的 15 位二进制序列 $b_{\text{result}}[i]$ 。最后,利用式 (20) 将该二进制序列转换成十进制数,即该编码点所对应的编码值。

$$result = \sum_{i=0}^{14} 2^{14-i} \times b_{\text{result}}[i] \quad (20)$$

上述识别算法通过多次像素移位遍历运算求取像素均值,能够对受污染的编码点保持良好的识别能力,取图 14 编码值为 4 091 的编码点,图 15 是该编码点表面附着大量污染物的图像,为验证本文算法对污染严重编码点所具备较强的鲁棒识别能力,在相同的环境下,利用文献[9]、[13]和本文识别算法对图 15 中的编码点进行识别,结果如图 16 所示,文献[9]和[13]的识别结果为 3 833 和 3 497,本文算法识别结果为 4 091。结果表明:本文识别算法在编码点受到严重污染情况下仍具有较强的鲁棒性。



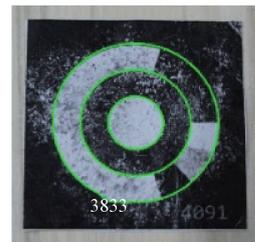
图 14 编码值为 4 091 的环状编码点

Fig. 14 The circular coded point with the coding value of 4 091



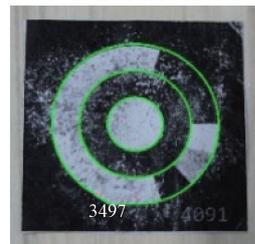
图 15 受污染的环状编码点

Fig. 15 Contaminated circular coded point



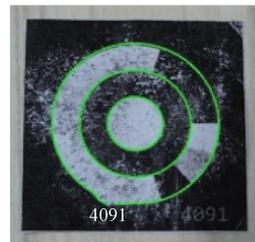
(a) 文献[9]识别结果

(a) The recognition results in reference [9]



(b) 文献[13]识别结果

(b) The recognition results in reference [13]



(c) 本文算法识别结果

(c) The recognition results of this algorithm

图 16 环状编码点的识别结果

Fig. 16 Recognition results of circular coded points

4 实验结果分析

为了验证本文解码算法的识别效果,利用佳能 1300D 相机对以下场景中编码点进行识别验证,统计解码算法的综合识别率。

4.1 不同拍摄角度下算法的识别率验证

目前,相关研究多忽略了大于 80°的拍摄角度,(相机的光轴与编码点法线所成角度),为了验证不同拍摄角度对编码点识别率的影响,本文选用较大的 0~85°拍摄角度范围,通过更大拍摄角度下对编码点的识别,可进一步验证本文算法对拍摄角度大范围变化所具有的良好鲁棒性。

首先用佳能 1300D 相机对贴有编码点的平面,从拍摄角度 0°开始,每隔 5°拍摄 20 张图片,0°~85°的拍摄范围总共拍摄了 360 幅图像,其分辨率为 5 184×3 456。统计 360 幅不同角度拍摄的编码点识别结果,可获得不同角度下本文解码算法的解码正确率,如图 17 所示。当角度小于 70°时,平均识别率达到 97.9%;角度为 75°、80°时相应的识别率分别为 94.7%、88.6%;当拍摄角度大于 80°时,识别率较小于 80°时明显下降;当拍摄角度被设置成 85°时,识别率为 55.6%。本文选取拍摄角度为 60°、65°、70°、75°、80°、85°的部分识别结果如图 18 所示。

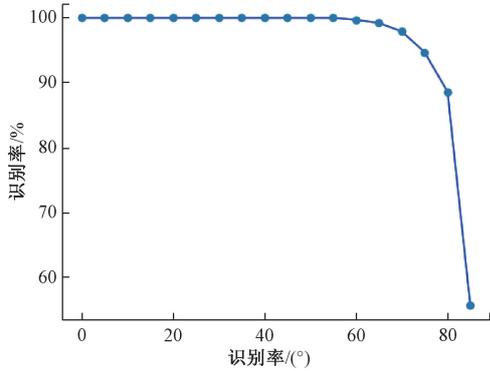


图 17 不同角度下环状编码点识别的准确率

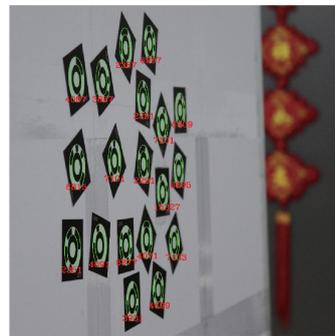
Fig. 17 The recognition accuracy of circular coded points for different angles



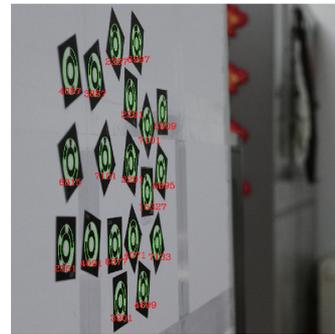
(a) 角度为60°的识别结果
(a) The recognition result for the angle of 60°



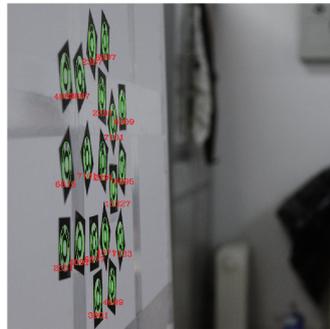
(b) 角度为65°的识别结果
(b) The recognition result for the angle of 65°



(c) 角度为70°的识别结果
(c) The recognition result for the angle of 70°



(d) 角度为75°的识别结果
(d) The recognition result for the angle of 75°



(e) 角度为80°的识别结果
(e) The recognition result for the angle of 80°



(f) 角度为85°的识别结果
(f) The recognition result for the angle of 85°

图 18 不同角度下环状编码点识别结果

Fig. 18 The recognition results of circular coded points for different angles

4.2 大量编码点在立体环境中的识别率验证

为了进一步验证本文算法的综合识别能力,采用大量的编码点对本文识别算法进行验证,能较为客观反映出本文识别算法的识别能力。首先使用佳能 1300D 对如图 19 所示粘贴大量编码点的亚克力正六面体进行各个角度拍照,共拍摄 672 张分辨率为 5 184×3 456 的图像,图 20 为随机选取 1 张图像的识别情况。综合 672 张图像的识别情况,编码点在实际立体场景中的综合识别率为 98.1%。



图 19 粘贴环状编码点的亚克力正六面体

Fig. 19 The acrylic regular hexahedron pasted with circular coded points



图 20 正六面体上环状编码点的识别情况

Fig. 20 Recognition of circular coded points on regular hexahedron

4.3 实际复杂场景中的验证

为了验证本文算法在复杂实际场景中识别的有效性,将编码点粘贴到一个柜子顶角所紧邻的三个面上,使用佳能 1300D 相机对贴有编码点,且外表带有诸多干扰因素的柜子从不同角度拍摄,共获得 200 幅分辨率为 5 184×3 456 的图像,随机选择其中一幅图像如图 21 所示。利用本文所描述的算法进行识别,图 22 为对应的编码点的识别结果。通过统计 200 幅图像的识别结果,本场景中的编码点的识别正确率为 98.3%。



图 21 粘贴环状编码点的小书柜

Fig. 21 The small bookcase with circular coding points pasted



图 22 小书柜上环状编码点的识别结果

Fig. 22 Recognition results of the circular coded points on the small bookcase

为了进一步验证本文识别算法在含较多干扰因素大型物件上的识别能力,利用佳能 1300D 相机对贴满编码点别克汽车的各个角度进行拍照,总共拍摄 100 幅分辨率为 5 184×3 456 的图像,随机选择其中一幅图像如图 23 所示,利用本文识别算法进行识别,结果如图 24 所示。综合 100 张拍摄图像的识别结果,统计出本文识别算法在有诸多干扰因素大型物件场景中综合识别率为 97.2%。



图 23 粘贴环状编码点的汽车

Fig. 23 The car with circular coded points pasted



图 24 汽车上环状编码点的识别结果

Fig. 24 Recognition results of the circular coded points on the car

上述两种实际复杂场景下算法识别率验证实验结果表明,本文算法在实际复杂环境中依然保持较高的识别率和较好的鲁棒性。

将本文编码点识别算法和其他文献的识别算法从识别正确率、误识别率和识别效率 3 个方面进行比较,结果如表 1 所示。本文提出的识别算法综合检测准确率为 98.1%,误识别率为 1.05%,识别的平均速率为 2.09 s/幅。对比其他文献的识别算法,本文算法的识别率最佳,误识别率最低。

表 1 不同算法的解码性能对比

Table 1 Comparison of decoding performance of different algorithms

算法	识别正确率/%	误识别率/%	识别效率/(s/幅)
本文	98.1	1.05	2.09
文献[9]	97.5	2.01	2.25
文献[11]	97.1	2.85	3.07
文献[13]	95.7	4.09	4.05

5 结 论

近景摄影测量中,编码点识别的准确率和稳定性对后续相机标定和三维坐标精确获取至关重要。本文首先

采用 4 个准则来筛选和提取编码点中心圆,然后提出基于最小二乘仿射变换和均值像素的鲁棒识别方法。通过实验证明了本文算法较传统算法具有两处显著提升:

1) 本文识别算法受拍摄角度影响较小,在拍摄角度 70°以内,具有 97.9% 的识别率;80°以内,依然保持 88.6% 的识别率。目前相关文献多忽略了大于 80°的拍摄角度,本文拍摄角度扩展到 80°以上,在 85°极端的拍摄角度下,仍具有 55.6% 的较高识别率。更大拍摄角度下编码点的识别结果表明:本文算法对拍摄角度具有较好的鲁棒性。

2) 本文识别算法在实际场景中的识别率较高,算法在复杂实际场景中的误识别率、漏识别率仅为 1.05% 和 0.85%。实际复杂场景下算法识别率验证实验结果表明,本文算法在实际复杂环境中依然保持较高的识别率和较好的鲁棒性。

参考文献

- [1] SCHNEIDER C T, SINNREICH K. Optical 3-D measurement systems for quality control in industry [C]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1993: 56-59.
- [2] AHN S J, RAUH W, RECKNAGEL M. Circular coded landmark for optical 3D-measurement and robot vision [C]. International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999: 1128-1133.
- [3] AHN S J, RAUH W. Circular coded target for automation of optical 3D-measurement and camera calibration [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2001, 15(6): 905-919.
- [4] 杨剑, 韩建栋, 秦品乐. 视觉测量中可纠错的编码点识别及提取 [J]. 光学 精密工程, 2012, 20(10): 2293-2299.
YANG J, HAN J D, QIN P L. Correcting error on recognition of coded points for photogrammetry [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(10): 2293-2299.
- [5] 陶聪, 施云, 张丽艳. 基于卷积神经网络的汉字编码标记点检测识别 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 191-200.
TAO C, SHI Y, ZHANG L Y. Detection and recognition of Chinese character coded marks based on convolutional neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 191-200.
- [6] 马扬飏, 钟约先, 郑聆, 等. 三维数据拼接中编码标志点的设计与检测 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(2): 169-171.
MA Y B, ZHONG Y X, ZHENG L, et al. Design and detection of coded marker points in three-dimensional

- data mosaic [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2006, 46(2):169-171.
- [7] SONG L, ZHANG C, WEI Y, et al. Technique for calibration of chassis components based on encoding marks and machine vision metrology[J]. Optoelectronics Letters, 2011, 7(1): 61-64.
- [8] MORIYAMA T, KOCHI N, YAMADA M, et al. Automatic target identification with the Color-Coded-Targets [C]. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing, WG, 2008: 39-44.
- [9] 宋丽梅, 陈昌曼, 陈卓, 等. 环状编码标记点的检测和识别[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3239-3247.
- SONG L M, CHEN CH M, CHEN ZH, et al. Detection and recognition of circular coded target points[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3239-3247.
- [10] 杨恣, 达飞鹏. 基于椭圆外切矩形性质的圆形标志点检测[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 254-261.
- YANG M, DA F P. Circular marker detection based on elliptic circumscribed rectangle property[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 254-261.
- [11] 周玲, 张丽艳, 郑建冬, 等. 近景摄影测量中标记点的自动检测[J]. 应用科学学报, 2007, 25(3): 288-294.
- ZHOU L, ZHANG L Y, ZHENG J D, et al. Automated reference point detection in close range photogrammetry[J]. Journal of Applied Science, 2007, 25(3): 288-294.
- [12] 金滔, 董秀成. 一种环状编码标记点的设计及解码算法[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(4): 1217-1221.
- JIN T, DONG X CH. Design and decoding algorithm of a ring coding marker [J]. Application Research of Computers, 2019, 36(4): 1217-1221.
- [13] 解则晓, 高翔, 朱瑞新. 环状编码标记点的高效提取与鲁棒识别算法[J]. 光电子·激光, 2015, 26(3): 559-566.
- XIE Z X, GAO X, ZHU R X. Efficient extraction and robust recognition algorithm of circular coded target points[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2015, 26(3): 559-566.
- [14] 刘建伟, 梁晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 126-134.
- LIU J W, LIANG J, LIANG X H, et al. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 126-134.
- [15] 孔建, 姚宜斌, 许双安. 整体最小二乘求取坐标转换参数[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(3): 75-78.
- KONG J, YAO Y B, XU SH AN. Solving coordinate transformation parameters based on total least-squares regression [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(3): 75-78.
- [16] 岳东杰, 梅红. 地图扫描矢量化误差的最小二乘配置法处理研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(2): 51-53.
- YUE D J, MEI H. Research on the least square collocation method for processing vectorization error of map scanning [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(2): 51-53.

作者简介



孙丽君, 1989年在西安电子科技大学获工学学士学位, 2001年在合肥工业大学获工学硕士学位, 2005年在西北工业大学获工学博士学位。现为河南工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、计算机视觉。

E-mail: sunlijunzz@163.com

Sun Lijun received her B.Sc. degree in 1989 from Xidian University, M.Sc. degree in 2001 from Hefei University of Technology and Ph.D. degree in 2005 from Northwestern Polytechnical University. Now, she is a professor and Ph.D. supervisor at Henan University of Technology. Her main research interest includes intelligent control and computer vision.



李石, 2018年于郑州轻工业大学获得学士学位, 现为河南工业大学在读研究生, 主要研究方向为计算机视觉、摄影测量。

E-mail: 2940063406@qq.com

Li Shi received his B.Sc. degree in 2018 from Zhengzhou University of Light Industry. Now, he is a master student in Henan University of Technology. His main research interest includes computer vision and photogrammetry.



陈天飞 (通信作者), 2013年于大连海事大学获取博士学位, 现为河南工业大学副教授, 主要研究方向为计算机视觉和无线传感器网络。

E-mail: chen_tianfei@163.com

Chen Tianfei (Corresponding author) received his Ph.D. degree in 2013 from Dalian Maritime University. Now, he is an associate professor at Henan University of Technology. His main research interest includes computer vision and wireless sensor network.