

面向复杂环境的圆形标志高精度定位方法^{*}

洪振华 李浩

(河海大学地球科学与工程学院 南京 210000)

摘要: 标志定位精度影响着视觉测量的精度,针对复杂环境测量标志自动定位精度不高的问题,本文提出一种基于亚像素弧段法的圆形标志中心定位方法。该方法首先对预处理图像进行边缘检测与跟踪,提取亚像素边缘序列,再利用边缘显著点与弧段几何特性对边缘序列进行中心约束,有效剔除伪圆弧特征,然后用更高效的相对位置约束与内接三角形约束对边缘弧段进行重组,最后对弧段组进行最小二乘拟合实现标志中心精确定位。本文通过提取亚像素弧段序列与更高效的弧段重组方法,提高了定位精度的同时,减少了弧段重组的时间。实验表明,在模拟图像的定位精度达到 0.007 pixel,动态位移实验中精度达到 0.05 mm,在光照变化、噪声、遮挡等不良条件下均能够满足视觉测量实时定位的需求。

关键词: 圆形测量标志;高精度定位;边缘跟踪;亚像素;弧段

中图分类号: P232 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.2020

High-precision positioning method for circular target in complex background

Hong Zhenhua Li Hao

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210000, China)

Abstract: A high-precision positioning method was proposed to meet the demands for automatic positioning in complex backgrounds. First, sub-pixel edge sequences are derived from discrete edge points of a preprocessed image by applying an edge tracing algorithm and interpolation algorithm. Next, the non-circular edges were excluded by salient point segmentation and center constraints based on geometric features. Then arcs belonging to the same circle are reorganized by more efficient relative position constraints and inscribed triangle constraints. And finally the arc segment group was subjected to least squares fitting to achieve accurate positioning of the target center. In this paper, by extracting sub-pixel arc sequence and a more efficient arc recombination method, the positioning accuracy is improved and the time of arc recombination is reduced. The experimental results demonstrate that the positioning accuracy of the simulated image reaches 0.007 pixel, and the accuracy of the dynamic displacement experiment reaches 0.05 mm, which can meet the needs of visual measurement real-time positioning under adverse conditions such as illumination changes, noise, and occlusion.

Keywords: circular target; high precision location; edge tracking; sub-pixel; arc segments

0 引言

视觉测量技术由于快速、非接触式、精确等优势,被广泛应用于工程工业等领域。在测量中,常采用人工标志作为合作目标对物体进行测量,其特殊的形状可以提高测量的效率。圆形标志是最常见的标志之一,圆形标志中心精确提取常见的方法有质心法^[1-2]、霍夫变换法(Hough transform, HT)及其改进方法^[3-5]、基于弧段特征的算法^[6-8]。

灰度质心法定位精度高,计算速度快,但是抗干扰能力弱,且依赖于手动设置感兴趣区域和阈值的选取,适用于无干扰、背景简单的标志点定位。基于 HT 的定位方法抗干扰能力强,但计算效率低,与灰度质心法相比有 5~12 倍速度差距,且占用的内存较大。相关的改进的方法主要是减少计算的样本数量和降低参数维度以达到提高计算效率的目的^[9-10]。基于弧段特征的算法不再以像素为基本的处理单元,而是通过圆弧整体的几何特性实现圆的定位。这种

收稿日期:2022-08-28

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(41830110)项目资助

方法不需要处理高维的参数空间,速度快且往往具有较好的鲁棒性。该方法最早由 Kim 等^[11]于 2005 年提出,随后许多学者基于该思想提出了许多改进的方法^[7,12-13]。弧段法的主要策略是检测边缘,然后对边缘弧段或者边缘近似的弧段进行筛选和分组,再进行参数计算,最后进行拟合验证。相关的改进方法区别主要在于提取弧段的标准,弧段的分组方式、圆参数的计算。

对于弧段提取,一些研究直接连接边缘点以提取弧段,如 Liu 等^[14]通过在弧段分割时使用自适应采样间隔计算弧段的特性来减少图像边缘锯齿化带来的影响,与使用线段逼近边缘相比,相当于增加了参与拟合的点数量,提高拟合的精度。更多研究通过检测线段或者用线段逼近边缘以提取弧段^[7,12,15],如 Akinlar 等^[7]提出无参数边缘检测器(edge drawing parameter free,EDPF)逼近圆的边缘,对边缘线段进行筛选,但当圆有缺陷时会有显著偏差;Lu 等^[12]使用线段检测器(line segment detector,LSD)提取可能构成圆的圆弧支撑线段。对于弧段的筛选与分组,主要是根据弧段的几何特性进行的,如用圆的完整度^[6]、面积^[16]、梯度^[15]、极性^[12,17]等,如 Lu 等^[12]通过面积限制、半径、梯度极性分析判断曲线是否为初始圆;或者通过估计出圆的初始参数^[7,12],将具有相似参数的弧段组合起来。对于弧段的参数计算,一些研究使用基于随机采样一致(random sample consensus,RANSAC)的方法计算^[18]或参数基于弦的垂直平分线的方法^[18-19],但这些方法对噪声敏感,尤其弧段整像素时有时会

有较大误差,因此主流方法还是使用最小二乘拟合^[14],这也是目前认为最可靠的方法。视觉测量环境中可能存在光照变化、物体遮挡、噪声干扰等问题,灰度质心法与基于 HT 变换的方法难以在复杂环境下实现高精度测量。弧段法由于其以连续的弧段作为处理对象,在复杂环境中具有明显优势,现有弧段法在挑选候选圆弧时使用了不同的方法对弧段进行简化以加快处理速度和避免图像边缘锯齿状带来的影响,但这对于利用几何信息进行候选弧段挑选的弧段法十分不利,且线段近似轮廓导致最后参与拟合的边缘点变少,精度下降,这不适用高精度的视觉测量应用。

针对上述问题,本文以圆形视觉测量标志为研究对象,研究了一种基于弧段法的圆形标志点精确定位方法,提出利用图像局部插值方法替代线段检测获取平滑的圆弧边缘序列,减少边缘锯齿效应带来的影响,对弧段估计中心进行约束,排除伪椭圆特征;再用相对位置约束排除不符合分组条件的弧段对,提出用内接三角形初步估计圆的参数,将具有相近参数的弧段分为同一组,最后用最小二乘算法精确拟合标志点的中心。

1 基于弧段法的圆形标志定位

本文提出的面向复杂测量环境的圆形标志高精度定位算法总体框架如图 1 所示,主要包括如下步骤:1)亚像素的边缘序列提取;2)弧段的分割;3)合理圆弧的提取;4)圆弧重组;5)圆参数的拟合与验证。

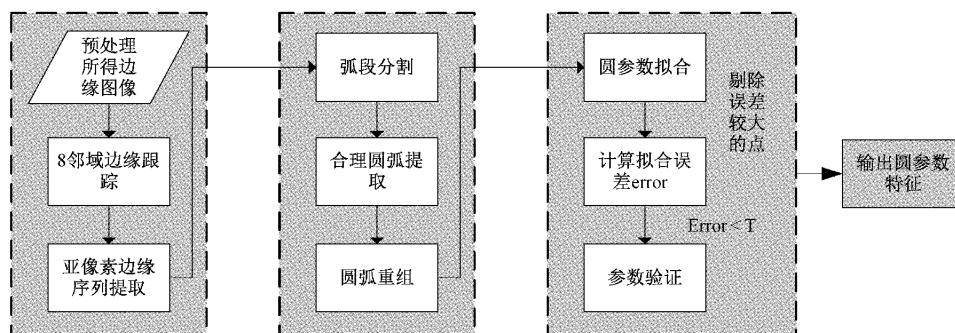


图 1 面向复杂测量环境的圆形标志高精度定位算法总体框架

步骤 1)中,对图像进行 Canny 边缘检测得到边缘图像,再对已知的整像素边缘进行插值得到亚像素边缘序列;步骤 2)对显著点(拐点与角点)进行检测,得到平滑的边缘序列;步骤 3)、4)对非合理弧段进行中心约束,剔除了伪圆弧特征,然后对弧段进行相对位置约束和内接三角形约束条件,对属于同一圆的弧段对进行匹配,避免了反复调用最小二乘拟合算法,提高检测效率,最终建立弧段集合;步骤 5)对弧段集进行拟合,得到圆参数,随后进行误差验证与二次拟合,提高拟合精度。

1.1 亚像素边缘提取

为了消除噪声影响,本文对载入的灰度图像进行高斯滤波处理,再用自适应阈值的 Canny 算子^[20]对边缘进行检

测,得到二值边缘图像。采用八邻域搜索的方法将具有邻接关系的边缘点连接成有几何意义的整像素边缘弧段序列,再利用局部边缘插值方法对得到的边缘序列进行插值,得到亚像素坐标的边缘序列。八邻域的方向码如图 2 所示,具体步骤如下:

1)从边缘图像的左上角或上次结束的点开始搜索,判断是否为搜索过的边缘点,若是则将其标记为 $start_{pi}$;

2)因为 $start_{pi}$ 的上方和左侧的点已经搜索过,因此只需要搜索该点的 1~4 邻域的点,如果在邻域内搜索到未标记的边缘点,将该点记为 $second_{pi}$,方向记为 D_{1-2} ,转入步骤 3);如果邻域内未搜索到边缘点,则 $start_{pi}$ 为孤立点,删除该点转回步骤 1);

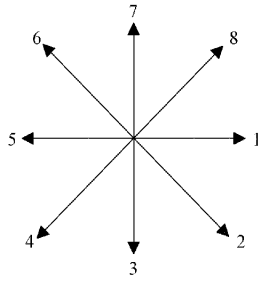


图2 边缘连接方向码

3)将当前点记为 cur_{pt} , 从 D_{1-2} 方向开始在 cur_{pt} 的邻域内继续搜索边缘点, 将找到的第一个未标记的边缘点更新为下一个 cur_{pt} , 方向记为 cur_d ; 重复该步骤直至新的边缘点邻域内无未标记的边缘点, 转入步骤4);

4)将步骤3)中得到的边缘序列标记为 $chain_i$, 记录到链表中, 如果 D_{1-2} 的值为1或2, 则转入2, 在 $start_{pt}$ 的3和4方向寻找未标记的边缘点, 若存在边缘点, 重复步骤2)与3)并将边缘序列标记为 $chain_i$, 逆序添加到链表中。对获取的整像素边缘列表, 利用已知的边缘的梯度方向代替理论的亚像素点的梯度方向, 在该方向上利用二次多项式插值, 重新计算得到理论亚像素的梯度幅值, 再重新计算边缘坐标, 得到亚像素坐标序列。二次多项式插值公式如式(1)所示。

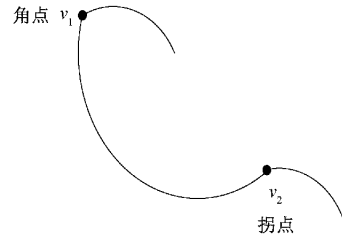
$$\begin{cases} x = i + \frac{R_1 - R_{-1}}{R_1 + R_{-1} - 2R_0} \times \frac{w}{2} \times \cos\theta \\ y = j + \frac{R_1 - R_{-1}}{R_1 + R_{-1} - 2R_0} \times \frac{w}{2} \times \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: i, j 为整像素边缘的坐标; R_1 和 R_{-1} 为当前点沿梯度方向的八邻域的两个点的梯度幅值; R_0 为当前点梯度幅值; w 为相邻像素到边缘点的距离, θ 为梯度方向。

1.2 弧段的分割

依据上述方法处理完边缘图像后, 得到所有的边缘序列点的集合。这些边缘序列包含了干扰边缘, 在复杂环境中可能会存在转折边缘、直线边缘、细小的非圆弧段、孤立点等, 这些干扰边缘对于标志中心定位有很大干扰。理想情况下的圆弧应具备以下两点特性: 1) 圆弧上相邻3个点所成的角度应为大于 90° 的钝角; 2) 圆弧的二次导数正负不发生改变, 即凹凸性不变。干扰边缘往往不满足这些特性, 为了剔除这些干扰边缘, 需要对这些边缘进行预处理, 利用边缘的两个特性将较长且不平滑的边缘分割成平滑无转折的理想弧段, 用分割后的子弧段的集合代替原始弧段。不满足两个特性的点分别为弧段的角点和拐点, 角点是曲率大小发生剧烈变化的点, 拐点是曲率方向发生剧烈变化的点, 如图3所示。

对于角点, 如图4所示, 取边缘序列连续 k 点为一组, 记录端点坐标分别为 $\{P_1, P_2, \dots, P_{i-k}, P_i, P_{i+k}, \dots\}$, P_i 点为记录的端点坐标。 P_{i-k} 和 P_i 组成的直线为 l_i , P_i 和 P_{i+k} 组成的直线段为 l_{i+k} 。直线段 l_i 和 l_{i+k} 线段之间的夹



角为 $\theta_i \in [-\pi, \pi]$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$), 当夹角 $\theta_i < \frac{\pi}{2}$, 则

认为 P_i 为边缘的一个角点。对于拐点, 确定拐点的方法主要是计算相邻3个点的二阶差分, 再给定一个阈值, 判断计算值与阈值的大小关系确定拐点, 但是这样实际误差较大。本文通过搜索曲率值的正负的点搜索拐点, 本文采用 Zhang 等^[21]提出的方法, 计算离散边缘点的曲率大小和曲率方向, 同样如图4所示, 以 P_{i-k}, P_i, P_{i+k} 三个点估计点 P_i 的曲率以及曲率方向, 当前点曲率值正负发生变化, 则认为边缘在该点前后走向发生较大变化, 有可能为边缘序列的拐点。

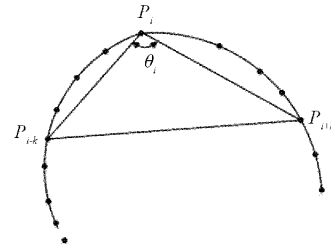


图4 显著点判定示意图

不同的 k 值对不同长度的边缘轮廓效果不同, 其取值与边缘长度和图像大小决定, k 值的选取如式(2)所示。

$$k = \text{Int} \left[\eta \times \left(\frac{S}{100} + 2 \right) + (1 - \eta) \times \left(\frac{\min(h, w)}{100} \times \pi + 2 \right) \right] \quad (2)$$

其中, $0 < \eta < 1$ 为权重参数, S 是边缘长度, $\min(h, w)$ 是图像宽度和长度的最小值。为了平衡边缘长度和图像大小对 k 的影响, 通过设置 η 来调整权重, 以适应不同类型的图像。 k 的最小取值为2, 对于较短的边缘依旧有着不错的效果。

1.3 合理圆弧提取

经过分割后得到的弧段集合 $Arcs$ 中包含的平滑的合理弧段、直线段元素以及一些无几何意义的边缘, 如图5(a)所示。为提取出合理圆弧的集合, 干扰边缘采用下述方法剔除。对于直线段元素, 计算 $t = 10 \times (l_{arc}/l_{chord} - 1)$, 理想情况下, 直线对应的 t 值为0, 实际情况下, 若 t 小于阈值 T_s , 则可以认为该边缘为直线予以剔除。实验表明, t 取0.05取得较好的直线剔除效果。

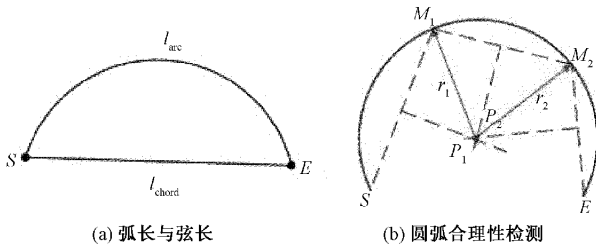


图5 合理圆弧提取

对于其他边缘,如图5(b)所示,利用垂直平分线交点快速估算弧段两部分的中心。具体步骤如下:在弧段上选取4个点,分别为两个端点和两个三等分点,记为 S, E, M_1, M_2 。弦 SM_1 和弦 EM_2 的中垂线相交于点 P_1 , P_1 和 M_1 的距离为 r_1 ,同理可以得到 P_2 和 r_2 。理想圆弧的情况下, P_1 与 P_2 重合, r_1 和 r_2 应该相等。但是实际上存在误差,通过式(3)衡量 P_1 和 P_2 的相似性以及 r_1 和 r_2 的相似性, $conf$ 值越接近1,则认为相似性高。如果 $conf$ 位于区间 $[0.85, 1]$ 则认为该边缘是合理圆弧。反之则认为不是合理圆弧,予以剔除。

$$conf = \left(1 - \frac{|r_1 - r_2|}{r_1 + r_2}\right) \left(1 - \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{r_1 + r_2}\right) \quad (3)$$

1.4 圆弧重

考虑到图像噪声与遮挡的影响,同一圆的轮廓可能被拆分成了多段圆弧,多点测量时也会存在多个圆多条不同的边缘,某些合理圆弧可能属于同一个圆形,因此要对圆弧进行重组,将具有相似几何特性的圆弧进行重组。本文提出通过相对位置关系对弧段组进行约束,得到满足相对位置关系约束的弧段组,然后根据内接三角形估计弧段组的中心和半径,如果两条弧段估计得到的中心和半径具有相似性,则认为这对弧段很可能属于同一个圆。为了避免重复计算和加快执行速度,1.3节中计算的 t 值也被用以衡量圆弧的完整度,当 t 值达到25左右认为圆弧是完整的圆,无需参与分组过程,但是仍需要后续的严格验证。

相对位置约束实际上是反映两段圆弧的凹凸关系,两端圆弧如果属于一个圆,满足这两个圆弧在彼此的凹侧,具体如图6所示。连接任意弧段 arc_i 的两个端点 S_i 和 E_i ,构成直线 $l_i: A_i x + B_i y + C_i = 0$,用 $l_i(p)$ 表示点 p 与直线 l_i 的关系,将点 p_i, p_j 的坐标带入直线方程,若 $l_i(p_i)$ 和 $l_i(p_j)$ 同号,则认为两点在直线的同侧。对于任意弧段组 arc_i, arc_j ,如果满足下式则认为弧段组满足相对位置关系。

$$\begin{cases} l_i(S_j) \cdot l_i(E_j) > 0 \wedge l_i(S_j) \cdot l_i(E_j) \cdot l_i(M_i) \\ l_j(S_i) \cdot l_j(E_i) > 0 \wedge l_j(S_i) \cdot l_j(E_i) \cdot l_j(M_j) \end{cases} \quad (4)$$

其中, S, E 分别表示弧段的两个端点, M 表示弧段的中心。式(4)表示对于 l_i, S_j 和 E_j 在直线的一侧,而 M_i 在

另外一侧。同时,对于 l_j, S_i 和 E_i 在直线的一侧,而 M_j 在另外一侧。图6列举了两条弧段组可能的相对位置关系,只有图6(a)满足相对位置关系,其余均不满足,则 arc_i 和 arc_j 必然不匹配,两者之间无需进行后续匹配,避免了冗余计算。

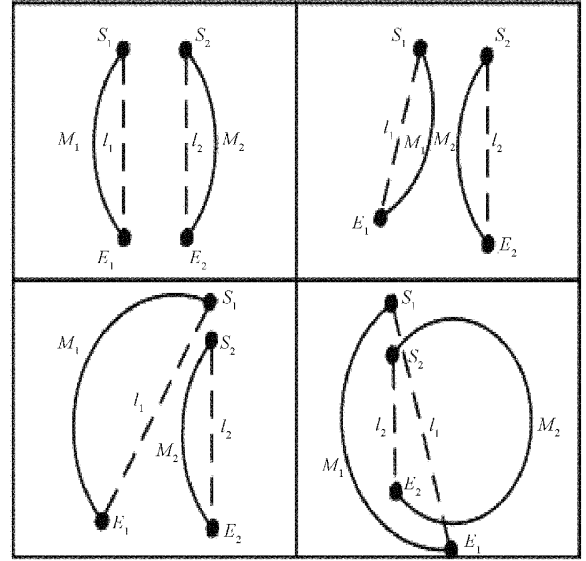


图6 弧段相对位置约束

属于同一圆的弧段还应满足具有相似半径和圆心的要求,一些研究反复调用最小二乘估计弧段的圆心和半径显然效率太低,本文通过圆的内接三角形估计弧段的圆心和半径,判断弧段组圆心和半径的相似性对弧段进行组合。如图7所示,设 arc_1, arc_2 为两条弧段, $S_i, E_i, M_i (i = 1, 2)$ 分别表示弧段的两个端点和中点,分别估算以 $S_1 M_1 E_1, S_2 M_2 E_2$ 为内接三角形的圆的半径及圆心。 arc_1 估计的半径和圆心分别表示为:

$$R_1 = \frac{|S_1 M_1| |E_1 M_1| |S_1 E_1|}{4S_{\Delta S_1 M_1 E_1}} \quad (5)$$

$$x_{o_1} = \frac{1}{2} \frac{\begin{vmatrix} 1 & x_{M_1}^2 + y_{M_1}^2 & y_{M_1} \\ 1 & x_{S_1}^2 + y_{S_1}^2 & y_{S_1} \\ 1 & x_{E_1}^2 + y_{E_1}^2 & y_{E_1} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & x_{M_1} & y_{M_1} \\ 1 & x_{S_1} & y_{S_1} \\ 1 & x_{E_1} & y_{E_1} \end{vmatrix}},$$

$$y_{o_1} = \frac{1}{2} \frac{\begin{vmatrix} 1 & x_{M_1} & x_{M_1}^2 + y_{M_1}^2 \\ 1 & x_{S_1} & x_{S_1}^2 + y_{S_1}^2 \\ 1 & x_{E_1} & x_{E_1}^2 + y_{E_1}^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & x_{M_1} & y_{M_1} \\ 1 & x_{S_1} & y_{S_1} \\ 1 & x_{E_1} & y_{E_1} \end{vmatrix}} \quad (6)$$

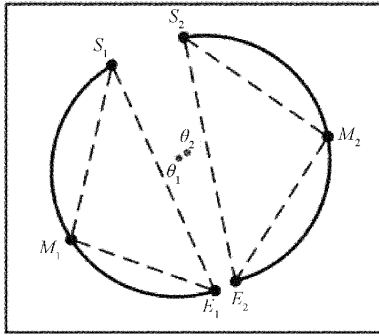


图7 内接三角形约束

同理可以估计出 arc_2 的半径和圆心。判断弧段组是否具有相似性,同样以式(3)衡量 arc_1, arc_2 估算得到的半径和圆心相似性。如果 $conf$ 位于区间 $[0.9, 1]$ 则可以将 arc_1, arc_2 组合在一起。重复上述分组的过程,直到找到所有满足条件的圆弧组,将各弧段组记为 $G_1, G_2, \dots, G_n$, 这些弧段组所成的集合为弧段参数拟合集为 Φ 。

1.5 圆拟合与检验

经过上述约束,已经去除了大量非匹配的弧段组,利用最小二乘算法对候选弧段组分别进行参数计算得到初步的圆参数。但是弧段组集合中仍可能存在假圆特征。假圆特征可能来源于噪声产生的碎片弧段与用多项式逼近的圆边缘相似,由于其较小可能产生错误检验,实际影像上并没有意义。下面对利用拟合误差对参与拟合的点进行误差,剔除误差较大的点,再进行二次拟合。本文拟合误差检验定义如下:

$$\begin{cases} True, & |d_i - r| < \lambda r \\ False, & |d_i - r| \geq \lambda r \end{cases} \quad (7)$$

式中: d_i 为边缘上的点到拟合的圆心距离, r 为拟合圆的半径, λ 是拟合允许的误差系数,越小意味着验证越严格。对边缘序列的每个点进行检验,光线不均匀或阴影导致梯度方向发生改变,部分像素点可能会带来较大的误差,计算结果为 False 的点认为误差较大,予以剔除,最后对剩余的点进行二次拟合。

2 实验及结果分析

为验证本文算法的精度与可靠性,本文设计仿真实验和真实影像实验,从拍摄距离、噪声、光照变化、遮挡等角度对比本文算法的精度与稳定性。

2.1 仿真标志实验

在真实背景影像中制作仿真标志点,影像尺寸为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,标志点中心坐标真值为 $(200, 200)$,设置了圆形标志半径为 10、15、25、30、45 pixel 等尺寸用以模拟不同距离成像情况。将本方法与传统圆形中心定位方法灰度质心法、随机霍夫变换方法(randomized Hough transform, RHT)以及同样基于弧段法的 Akinlar 方法、Liu 方法进行对比分析。求取其与真值的误差,其结果如表 1 所示。从表格中 X、Y 方向误差可知,本文方法在仿真生成的各尺寸的理想圆形定位中均优于其他方法,定位最大误差为 0.007 pixel。而 Liu 方法与 Akinlar 方法相比在标志点尺寸较小时精度略高,但在尺寸较大时并无明显优势,这一原因归结于 Akinlar 方法使用线段检测的方法逼近弧段,导致尺寸较小的圆最后参与拟合的点较少。实验中手动设置了标志点的感兴趣区域,使得灰度质心法也有不错的精度,该方法在标志点大时有精度更高。

为验证噪声对本文算法的影响,在 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 的影像上生成仿真圆形标志,圆的半径为 15 pixel;分别加入不同方差的高斯噪声 ($\sigma = 0.01, 0.02, 0.05, 0.1$) 和不同密度的椒盐噪声 ($d = 0.002, 0.005, 0.02, 0.05$) 进行实验;然后采用与传统圆形中心定位方法灰度质心法、随机霍夫变换方法(RHT)以及同样基于弧段法的 Akinlar 方法、Liu 方法进行对比分析,实验结果如表 2 所示。从表中可以看出,随着噪声的增大,5 种方法的误差也在增加,本文算法定位精度在本实验中误差小于 0.02 pixel,噪声较小时精度更是高于其他算法数倍,在 RHT 与 Akinlar 方法在噪声较高时误差能达到 0.15 pixel, Liu 方法精度略高于 RHT 与 Akinlar 方法,但并不稳定。本实验对灰度质心方法认为设置了最佳感兴趣区域,但是精度仍低于本文算法。

表1 不同尺寸标志点的中心定位结果

半径	pixel									
	灰度质心法		RHT		Akinlar		Liu		本文方法	
	X_{error}	Y_{error}	X_{error}	Y_{error}	X_{error}	Y_{error}	X_{error}	Y_{error}	X_{error}	Y_{error}
10	0.035	0.035	0.053	0.045	0.034	0.108	0.002	0.004	0.004	0.003
15	0.021	0.022	0.033	0.037	0.060	0.008	0.036	0.010	0.000 2	0.002
25	0.013	0.013	0.025	0.034	0.038	0.149	0.008	0.071	0.007	0.003
30	0.010	0.010	0.058	0.056	0.019	0.106	0.023	0.026	0.006	0.007
45	0.007	0.007	0.028	0.059	0.013	0.086	0.022	0.025	0.002	0.003

2.2 真实标志点实验

为进一步验证本文算法在真实标志点中心提取的可靠性,在光照不均匀、强光照射、低光照、不同程度的圆周

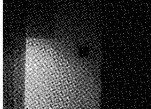
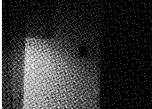
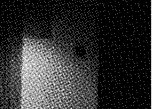
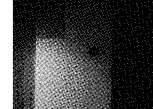
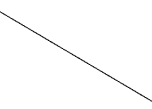
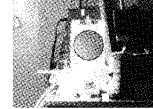
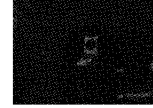
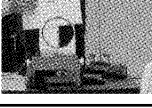
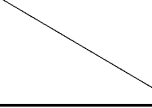
遮挡等条件下进行检测,标志点为直径 13 cm 的黑色实心圆,图像由 CANON 6DII 拍摄,拍摄距离为 10 m。各类方法检测结果如表 3 所示。可以看出本文算法在从在不同

表 2 不同噪声条件下检测

pixel

实验条件		灰度质心法		RHT		Akinlar		Liu		本文方法	
		X_{error}	Y_{error}	X_{error}	Y_{error}	X_{error}	Y_{error}	X_{error}	Y_{error}	X_{error}	Y_{error}
高斯 噪声 σ	0.01	0.021	0.021	0.011	0.006	0.003	0.019	0.001	0.019	0.002	0.002
	0.05	0.026	0.022	0.034	0.056	0.048	0.017	0.010	0.032	0.007	0.007
	0.1	0.025	0.032	0.029	0.030	0.057	0.012	0.046	0.036	0.004	0.012
椒盐 噪声 d	0.002	0.023	0.024	0.036	0.008	0.003	0.012	0.005	0.019	0.002	0.007
	0.005	0.043	0.015	0.048	0.001	0.025	0.013	0.016	0.015	0.004	0.011
	0.02	0.020	0.012	0.057	0.027	0.069	0.001	0.030	0.013	0.011	0.009
	0.05	0.048	0.028	0.141	0.010	0.117	0.030	0.012	0.058	0.020	0.023

表 3 不同实验条件各方法检测结果

实验条件	原始图像	本文方法	RHT	Akinlar	Liu 方法
光照不均匀					
强光照射					
低光照					
圆周遮挡 25%					
圆周遮挡 50%					
圆周遮挡 75%					

实验条件下均能稳定提出标志点中心;RHT 算法在标志点受到强光照射实验条件下未能检测出圆形标志,而在遮挡实验中发生大量误检;Akinlar 方法在圆周遮挡 75%处未能检测出标志,且在遮挡 25%的实验中背景中的白色贴纸误检测为目标圆;Liu 方法通过自适应采样的方法避免了边缘锯齿效应,提高了检测圆形标志的能力,但在遮挡实验中也出现将背景中的物体误检为目标圆。本文算法在有背景干扰的情况下具有良好的鲁棒性,能够满足视觉测量的稳定检测需求。为进一步验证本文算法定位标志点的稳定性与精度,本文设计了位移实验。实验选取了 350 张连续拍摄的影像,影像序列中的标志粘贴于活动视标上,视标可以水平移动,位移分辨率为 0.02 mm,标志架设在距离相机 10 m 的位置且与相机平面近似平行,设

置影像分辨率为 1 920 pixel×1 080 pixel。实验中,以初始帧影像中标志点的中心为参考点,在水平方向分别移动活动视标 0.5 mm,0.5 mm,1 mm,1 mm,2 mm,2 mm。选择灰度质心法、Liu 方法、Akinlar 方法以及本文方法对标志点的中心进行定位,对连续图像的像素位移进行对比,用平均法进行位移换算,其结果如图 8 所示,图 9 为位移曲线的局部方法图。实验结果表明本文算法在位移测量实验中精度较高,测量误差控制在 0.01~0.05 mm 之间,最大相对误差控制在 1.8%;灰度质心法设定了感兴趣区域,但是由于标志点的移动以及环境的干扰,误差较大;Akinlar 与 Liu 方法在实验中均出现了漏检的情况,Liu 方法在 100~150 帧受到干扰,结果浮动很大,随后误差稳定在 0.05~0.1 mm 之间,Akinlar 与 Liu 方法精度接近。从

图9位移曲线局部方法图可以看出,本文方法在标志点处于静止状态时,提取的位移基本静止,而Liu方法与Akinlar方法存在误差且稳定性较差,灰度质心法在无光照等条件改变时稳定性较高,但是受背景像素的干扰过大,导致其误差较大。综上所述,本文方法有较高的稳定性与精度,能够满足视觉测量的需求。

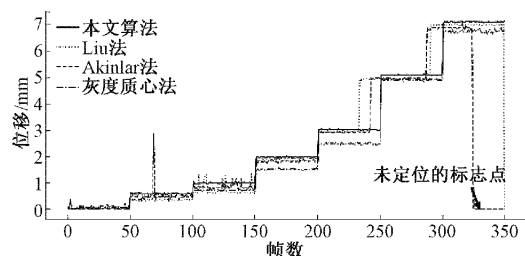


图8 动态位移监测

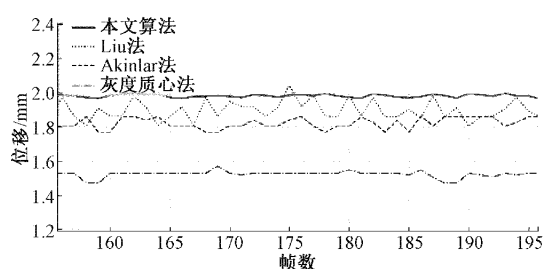


图9 位移曲线局部放大图

3 结 论

本文提出了一种面向复杂测量环境的圆形标志点高精度定位方法。算法中,以亚像素边缘序列为高精度定位的基础,利用几何特征与中心约束剔除非圆弧特征,通过更高效的相对位置约束与内接三角形约束对弧段进行重组,提高了其检测残缺圆的能力。实验结果表明,与现有常用方法相比较,本文方法能实现自动高精度提取圆形标志点信息,实验中的位移提取精度能够满足复杂环境下视觉测量的高精度需求。未来实际的应用还有必要进一步研究更为复杂的场景,如面对相机与标志点平面不平时标志点成像为椭圆、多点测量时不同距离存在尺度差异等。

参考文献

- [1] 徐瑞超,胡艳凯,线晨. 激光三角法微位移测量的算法比较[J]. 上海电气技术, 2021,14(4):75-78.
- [2] 杨浩宇,张尚盈,肖莉,等. 自动精确提取圆形标志点中心的相机标定研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(19):155-160.
- [3] TIAN Y D, ZHANG J, YU S S. Vision-based structural scaling factor and flexibility identification through mobile impact testing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019,122:387-402.
- [4] ZHAO X F, RI K W, WANG N N, et al. Experimental verification for cable force estimation using handheld shooting of smartphones[J]. Journal of Sensors, 2017(6):1-13.
- [5] 邹荣,赵稼宸,凌俊,等. 基于Hough投票空间的椭圆图像特征亚像素提取方法[J]. 光学技术, 2016, 42(2):141-145.
- [6] 丁伟利,郝增号. 基于YOLOv4-tiny和完整度排序的标志物快速圆检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022,36(2):12-22.
- [7] AKINLAR C, TOPAL C H. EDCircles: A real-time circle detector with a false detection control [J]. Pattern Recognition, 2013,46(3):725-740.
- [8] LIU D, WANG Y T, TANG Z, et al. A robust circle detection algorithm based on top-down least-square fitting analysis [J]. Computers and Electrical Engineering, 2014,40(4):1415-1428.
- [9] SHE J H, ZHAN W, HONG S, et al. A method for automatic real-time detection and counting of fruit fly pests in orchards by trap bottles via convolutional neural network with attention mechanism added[J]. Ecological Informatics, 2022,70: 101690.
- [10] 周封,杨超,王晨光,等. 基于随机Hough变换的复杂条件下圆检测与数日辨识[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(3):622-628.
- [11] KIM E, HASEYAMA M, KITAJIMA H. The extraction of circles from arcs represented by extended digital lines[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2005,88(2):252-267.
- [12] LU C, XIA S, HUANG W, et al. Circle detection by arc-support line segments [C]. 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2017: 76-80.
- [13] LE T, DUAN Y. Circle detection on images by line segment and circle completeness [C]. 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), IEEE, 2016: 3648-3652.
- [14] LIU Y, DENG H G, ZHANG Z Y, et al. A fast circle detector with efficient arc extraction [J]. Symmetry, 2022,14(4):734.
- [15] DONG H X, KPRASAD D, CHEN I M. Accurate detection of ellipses with false detection control at video rates using a gradient analysis [J]. Pattern Recognition, 2018,81(2):112-130.
- [16] 刘祥磊,童小华,马静. 视频测量影像序列椭圆形人工目标点快速识别和跟踪方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(6):663-669.
- [17] LU C, XIA S, SHAO M, et al. Arc-support line

- segments revisited: An efficient high-quality ellipse detection[J]. IEEE Trans Image Process, 2019, 29: 768-781.
- [18] JIA Q, FAN X, LUO Z, et al. A fast ellipse detector using projective invariant pruning [J]. IEEE Transactions on Image processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2017, 26(8): 3665-3679.
- [19] MICHELE F, ANDREA P, RITA C. A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(11): 3693-3708.
- [20] 陈明曦, 侯涛, 赵晏章, 等. 基于新型改进 Canny 算法的铁轨边缘检测研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 48-52.
- [21] ZHANG P J, WANG C B, YE L. A type III radio burst automatic analysis system and statistic results for a half solar cycle with Nancay Decameter Array data [J]. Astronomy & Astrophysics, 2018, 618(10): 165.

作者简介

洪振华, 硕士研究生, 主要研究方向为摄影测量与遥感、图像处理。

E-mail: 201309020003@hhu. edu. cn

李浩, 教授, 主要研究方向为摄影测量和影像地理信息系统。

E-mail: lihao@hhu. edu. cn