

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415613

基于改进边缘信息的 ZNCC 位移提取算法研究^{*}褚冬亭¹ 刘丙友¹ 齐晶晶² 孔科研³

(1.安徽工程大学电气工程学院 芜湖 241000; 2.安徽达尔智能控制系统股份有限公司 芜湖 241000;

3.安徽天兵电子科技有限公司 芜湖 241000)

摘 要: 为了解决 ZNCC 模板匹配算法计算量大、定位精度低等问题,提出了一种基于改进边缘信息的 ZNCC 位移提取算法。首先,通过曲面拟合法提高基于 ZNCC 位移提取算法的亚像素精度。然后利用滤波处理后的 Sobel 算子边缘检测算法提取视频每一帧中的重要信息特征,创建新的模板,并进行 ZNCC 相关值计算。为减少匹配点和运算量,根据信息点数设定不同的步长。最后,采用基于改进边缘信息的 ZNCC 位移提取算法提取实验视频中运动对象的位移波形图进行分析验证。实验结果显示,测量速度上提高了 77.46%,测量误差为 0.234 4%,证明了基于改进边缘信息的 ZNCC 位移提取算法不仅保留了原算法的搜寻精度与稳定性优势,并在速度上取得了显著提高。

关键词: 模板匹配;边缘检测;相关值;位移

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4099

Research on ZNCC displacement extraction algorithm based on improved edge information

Chu Dongting¹ Liu Bingyou¹ Qi Jingjing² Kong Keyan³

(1. School of Electrical Engineering, Anhui University of Engineering, Wuhu 241000, China;

2. Anhui Dar Intelligent Control System Stock Co., Ltd., Wuhu 241000, China;

3. Anhui Tianbing Electronic Technology Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to solve the problems of large computation and low localization accuracy of ZNCC template matching algorithm, this paper proposes a ZNCC displacement extraction algorithm based on improved edge information. First, the sub-pixel accuracy of the ZNCC displacement extraction algorithm based on ZNCC is improved by surface fitting method. Then, the important information features in each frame of the video are extracted using the filtered Sobel operator edge detection algorithm to create a new template and perform ZNCC correlation value calculation. In order to reduce the number of matching points and operations, different step sizes are set according to the number of information points. Finally, the ZNCC displacement extraction algorithm based on improved edge information is used to extract the displacement waveform graphs of the moving objects in the experimental video for analysis and verification. The experimental results show that the measurement speed is improved by 77.46% and the measurement error is 0.234 4%, which proves that the ZNCC displacement extraction algorithm based on improved edge information not only retains the search accuracy and stability advantages of the original algorithm, but also achieves a significant improvement in speed.

Keywords: template matching; edge detection; correlation value; displacement

0 引 言

模板匹配算法作为一种图像处理方法,主要是利用图像模板与原图像进行相似度判断实现目标位置的定位,目前广泛应用于机器人目标定位^[1]、形状识别^[2-3]、物体检

测^[4-5]等领域。常用的模板匹配算法有误差平方和法(sum of squared differences, SSD)、归一化互相关(normalized cross correlation, NCC)算法和零均值归一化互相关(zero-mean normalized cross correlation, ZNCC)算法等。其中 ZNCC 算法的相似度计算结果在 0~1,比较容易量化比较,

收稿日期:2024-03-11

^{*} 基金项目:芜湖市核心技术攻关项目(2022hg11, 2023yf012)资助

具有精度高、抗干扰性强和鲁棒性强等特点,是现有的模板匹配算法中效果最佳的,将其应用于视觉测量领域,可以根据模板匹配实现振动位移提取,但是其计算量大、匹配速度慢和计算复杂度高。为解决此类问题,许多学者致力于改进相关算法。

一些学者如张一梵^[6]利用积分图和图像金字塔加速,并提出了基于公式变换、图像重心和相邻行程关系的加速方法,极大地加快了计算速度,然而,他在设定金字塔层数时只考虑了图像尺寸,而未考虑图像的结构和纹理信息,导致准确度下降。Zhang等^[7]为提高匹配速度,提出了一种基于Sub-NCC的模板匹配算法,用旋转不变的边缘点进行粗略匹配,快速确定不匹配的区域,匹配时间限制在0.1 s以内,但是未设自适应阈值和金字塔层数,没有考虑多尺度问题。邢藏菊等^[8]提出了一种改进的NCC快速匹配方法,其基于序贯相似性检测,能够迅速而准确地匹配特征点。这一方法显著降低了计算时间,成功减少了误匹配的风险,然而,当运动目标运动过于激烈时,需要更多的目标细节的特征点来区分目标和背景。另外,朱希诚^[9]引入了一种基于局部稳定像素点的自适应模板匹配算法,以提升匹配速度和准确性。该算法通过构建图像自适应网格并筛选边缘像素点,提取出局部稳定的像素点作为特征点,从而进一步优化了匹配效果,然而,该方法主要适用于尺度不变或尺度变化极小情况下进行图像模板匹配,其适用范围较为有限。李阳等^[10]提出了一种基于模板匹配的孪生网络长时目标跟踪算法,其中引入了一种全局搜索的NCC模板匹配重检测方法进行目标粗定位,可以快速较准确获得重现或跟丢目标位置,但是其抗干扰性相对较差。万宏强等^[11]提出了一种基于规则边缘改进的快速模板匹配方法。通过对获取的零件图像进行数学形态学以及最小二乘法边缘拟合等操作,提取出只含零件内孔的感兴趣区域,最后建模对目标零件的内孔进行匹配检测,不仅减少了检测时间,还提高了检测精度。然而,该算法仅适用于具有类似规则边缘的零件,对于边缘不规则的零件,需要根据具体情况调整算法以满足检测需求。

本研究针对传统的基于模板匹配的位移提取方法存在模板创建耗时和计算量大等缺陷,提出了一种基于改进边缘信息的ZNCC位移提取方法(简称改进ZNCC算法)。首先,采用二元曲面拟合法以提高定位精度。随后,在处理每个视频帧时,进行边缘信息提取,通过图像梯度确定搜索方向区域。在保持定位精度不变的情况下,通过减少模板创建时间和模板搜索时间,优化搜索策略,以实现匹配算法的高效和准确。

本研究通过音叉振动频率测量实验验证了该方法的可行性和有效性。通过高速摄像机拍摄音叉振动视频,并对视频序列进行预处理。然后,使用改进ZNCC算法对每个视频帧进行位移提取,并与传统方法进行比较。在实验过程中,从音叉振动的图像序列中提取出振动位移曲线,并记

录算法的运行时间,经频谱分析得出振动频率。实验验证了改进ZNCC算法在显著减少计算时间的同时保持较高的定位精度,并与实际振动频率具有良好的匹配性能。

1 基于ZNCC的位移提取算法

基于ZNCC的位移提取算法(简称ZNCC算法)是一种基于灰度的匹配方法,利用归一化互相关函数来评估模板与待匹配区域的相似程度,从而实现位移提取。这一方法简单而有效,被广泛应用于图像匹配领域。

使用高速摄像机拍摄的视频流中,提取特定位置振动信息的核心思路采用了ZNCC算法,具体匹配过程如图1所示,其流程可描述如下:给定匹配图像 I 和模板图像 T ,在匹配图像 I 上逐区域扫描模板图像 T ,计算归一化互相关系数。该过程持续进行直到找到与模板 T 相关程度最大或误差最小的匹配位置,即为最佳匹配位置。图1中, W 和 H 分别为匹配图像 I 的宽和高; w 和 h 分别为模板图像 T 的宽和高。

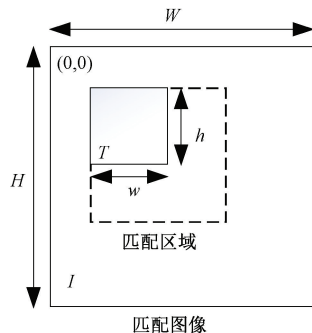


图1 二维互相关模板匹配示意图

ZNCC相关值的计算公式如下:

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h [I(x_i, y_j) - \bar{I}] \cdot [T(x'_i, y'_j) - \bar{T}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h [I(x_i, y_j) - \bar{I}]^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h [T(x'_i, y'_j) - \bar{T}]^2}} \quad (1)$$

式中: $I(x_i, y_j)$ 和 $T(x'_i, y'_j)$ 分别为某一点在匹配子区和模板子区中的灰度值; \bar{I} 和 \bar{T} 分别为匹配子区和模板子区中所有像素点的灰度均值。

由于ZNCC算法在计算量和定位精度方面存在挑战,尤其是在位移提取中计算量呈指数级增长,导致算法执行时间长,无法实现振动位移的实时快速提取,整体效率偏低等问题。为了解决这些难题,以下对ZNCC算法进行了改进。通过将边缘信息提取算法与曲面拟合法融合到ZNCC算法中,成功降低了计算量和模板创建时间,从而显著提升了匹配速度并改善了定位精度。

2 ZNCC位移提取算法的改进

2.1 曲面拟合法

为了解决上述提取过程中低定位精度的问题,本文在

研究中引入了曲面拟合法^[12-13]以提高 ZNCC 算法的位移提取精度。

为了减少计算负担并增加拟合曲面的实用性,本文选择利用最大值位置及其周围 8 个点的相关系数进行拟合。考虑到相关系数曲面变化较为缓和,本文决定使用二元二次多项式来拟合曲面。假设已搜索到的整像素匹配位置为 (x_0, y_0) ,在已知其与周围 8 个点的相关系数的情况下,拟合曲面的表示如下:

$$C(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (2)$$

将相关系数矩阵中这 9 个位置的值代入式(2),得到一个线性方程组,通过应用最小二乘法对该方程组进行求解,能够得到曲面的表达式参数,记为 a_0, a_1, \dots, a_5 。得到曲面表达式后,可以直接确定曲面的最大(最小)值,其中在极值点有以下性质:

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial x} = a_1 + 2a_3x + a_4y = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial y} = a_2 + 2a_5y + a_4x = 0 \quad (4)$$

通过上述方程,可以求得二次拟合曲面的极值点位置:

$$x = \frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}, y = \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5} \quad (5)$$

下面通过一个简单的实例来展示曲面拟合亚像素算法的计算过程和实际效果。假设使用以下方程表示一个 3×3 的相关系数矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f(-1, 1) & f(0, 1) & f(1, 1) \\ f(-1, 0) & f(0, 0) & f(1, 0) \\ f(-1, -1) & f(0, -1) & f(1, -1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.911\ 2 & 0.924\ 6 & 0.864\ 2 \\ 0.941\ 7 & 0.969\ 4 & 0.877\ 5 \\ 0.880\ 9 & 0.890\ 1 & 0.838\ 4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

采用式(6)中的数值进行曲面拟合,则优化后过程如图 2 所示。图 2 以图像形式展示相关系数矩阵,其中图 2(a)为相关系数矩阵,图 2(b)为经过曲面拟合后的矩阵。符号“ Δ ”所处位置为拟合后曲面的峰值,即最佳匹配位置,其坐标为 $(-0.330\ 8, 0.187\ 2)$ 。换言之,经过曲面拟合操作后,最优匹配位置的亚像素计算结果为 $(x_0 - 0.330\ 8, y_0 + 0.187\ 2)$ 。可见曲面拟合法可以明显提高计算和匹配精度,不需要额外冗余计算。

2.2 基于改进边缘信息的 ZNCC 位移提取算法

目前,主流的边缘检测算子^[14-15]包括 Sobel 算子^[16]和 Canny 算子^[17]。Canny 算子具有较高的检测精度,但由于其算法较为复杂,实时性稍逊。相比之下,Sobel 算子计算量小、运行速度很快,还能平滑噪声,主要是根据像素点上下、左右邻点的灰度加权差,在边缘处获得极值,可用于边缘检测。当精度要求不是特别高时,Sobel 算子是一种可选的边缘检测方法。

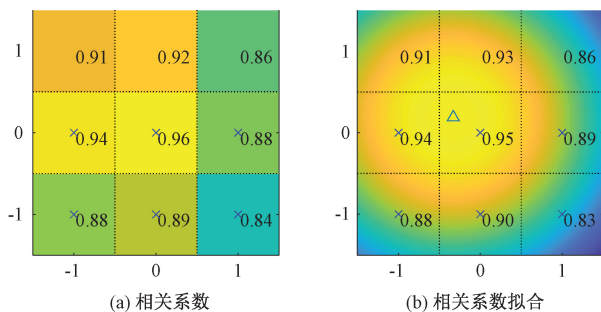


图 2 曲面拟合优化的过程

鉴于 ZNCC 算法在计算量、模板创建和匹配时间等方面存在挑战,本文提出了一种快速的 ZNCC 算法——基于改进边缘信息的 ZNCC 位移提取算法。该算法利用经过高斯滤波处理的 Sobel 算子边缘检测,提取具有重要信息特征,从而减少匹配点数量、调整步长,以降低整体计算量。

目前消除噪声的滤波方法主要有均值滤波、形态学滤波、高斯滤波^[18]等,其中高斯滤波广泛应用于图像处理的消噪过程,效果最好,故本文采用了高斯滤波的卷积核,使用 3×3 领域的高斯模板 \mathbf{S}_G ,其公式如下:

$$\mathbf{S}_G = \begin{bmatrix} \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sobel 算子采用两组 3×3 的滤波算子。在实际应用中,通常使用以下两个滤波算子来进行边缘检测:

$$\mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, \mathbf{S}_x 和 \mathbf{S}_y 分别为水平和垂直部分滤波算子。

将式(7)与(8)分别综合得到:

$$\mathbf{S}_{Gx} = \begin{bmatrix} -\frac{15}{16} & \frac{1}{8} & \frac{17}{16} \\ -\frac{15}{8} & \frac{1}{4} & \frac{17}{8} \\ -\frac{15}{16} & \frac{1}{8} & \frac{17}{16} \end{bmatrix}, \mathbf{S}_{Gy} = \begin{bmatrix} \frac{17}{16} & \frac{17}{8} & \frac{17}{16} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} \\ -\frac{15}{16} & -\frac{15}{8} & -\frac{15}{16} \end{bmatrix} \quad (9)$$

将图像模板 T 分别与 \mathbf{S}_{Gx} 、 \mathbf{S}_{Gy} 进行卷积运算,得到新的模板图像 P_1 和 P_2 :

$$P_1(x, y) = T \otimes \mathbf{S}_{Gx}, P_2(x, y) = T \otimes \mathbf{S}_{Gy} \quad (10)$$

最终经过 Sobel 算子处理后的模板图像 P 为:

$$P(x, y) = |P_1(x, y)| + |P_2(x, y)| \quad (11)$$

通过上述过程,能够得到其关键信息,在此设置一个阈值大小,根据 L_{\min} 筛选出信息点数,根据信息点总数选择合

适的搜索步长,并设置 3 个阈值 T_1 、 T_2 、 T_3 ($T_1 < T_2 < T_3$)。具体而言,当信息点数小于 T_1 时,搜索步长设为 3;当信息点数大于 T_1 且小于 T_2 时,搜索步长设为 2;当信息点数大于 T_2 且小于 T_3 时,搜索步长设为 1;当信息点数大于 T_3 时,认为该位置为候选匹配位置,逐点搜索。阈值 T_1 、 T_2 、 T_3 的具体取值由实际工作环境确定。

为验证本文提出的改进边缘信息的 ZNCC 位移提取算法的优越性,设计了一个基于高速视觉的音叉振动频率测量实验。通过该实验,本文利用所提出的基于改进边缘信息的 ZNCC 位移提取算法从音叉振动的图像序列中提取出振动位移曲线,并进一步计算出振动频率。将测量得到的频率与音叉的自振频率进行对比,通过计算误差进行比较,以验证所提出算法的有效性,并进一步评估其在实际应用中的性能和可靠性。

3 音叉振动频率测量实验

本次实验在室内环境中进行,调整环形 LED 补光灯的亮度,确保良好的照明条件。将高速摄像机固定在合适的位置,并调整其角度和高度,使其能够准确地对准音叉的两端。将自振频率为 20 Hz 的音叉固定在谐振盒上,使用橡胶球锤轻敲音叉,激发其产生微小振动。启动高速摄像机,以高帧率(1 200 fps)拍摄音叉振动的视频。确保摄像机设置合适的曝光时间和帧速率,以捕捉到振动的细微变化。持续拍摄音叉振动的视频,拍摄时间为 20 s,视频的帧大小为 1 920×1 080。将拍摄到的视频传输到计算机上,用于后续的分析处理。实验中用到的主要仪器与其性能参数如表 1 所示。

表 1 使用设备与性能参数

设备名称	性能参数
计算机	型号:AMD Ryzen 7 5800H with
	Radeon Graphics 3.20 GHz
	系统类型:64 位操作系统,
高速摄像机	基于 x64 的处理器
	千眼狼 M220c
	型号:IGNA 24~70 mm F2.8 DG
光学镜头	镜头全长:99.9 mm
	最近对焦距离:40 cm
	组成:8 组 13 片镜片
	放大倍率:1:5.6
	视角:46.8°
环形 LED 补光灯	型号:EF-200

本文使用 Matlab 编程软件对实验视频进行分析,选取音叉金属表面的 80×80 像素正方形区域作为子图像的采集区域,如图 3 所示。图 3(a)展示了音叉左侧和右侧的视频帧图片,图 3(b)、(c)则分别展示了音叉左侧和右侧的相

应的原模板图像和创建的新模板图像。

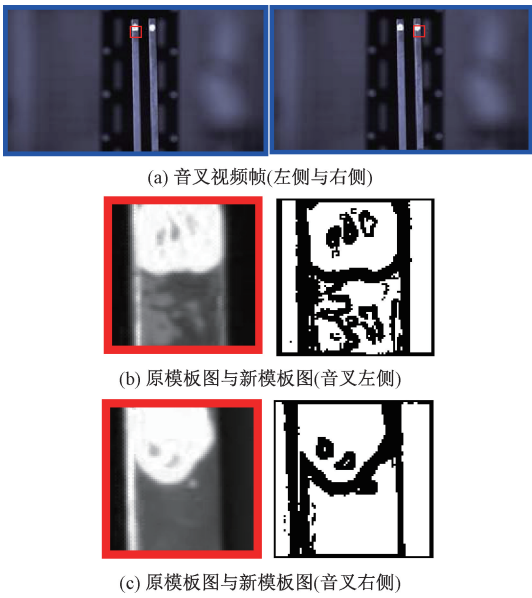


图 3 音叉视频帧与子采集区域

利用改进前和改进后的 ZNCC 振动提取算法提取出音叉左侧和右侧的振动位移波形,如图 4 所示。

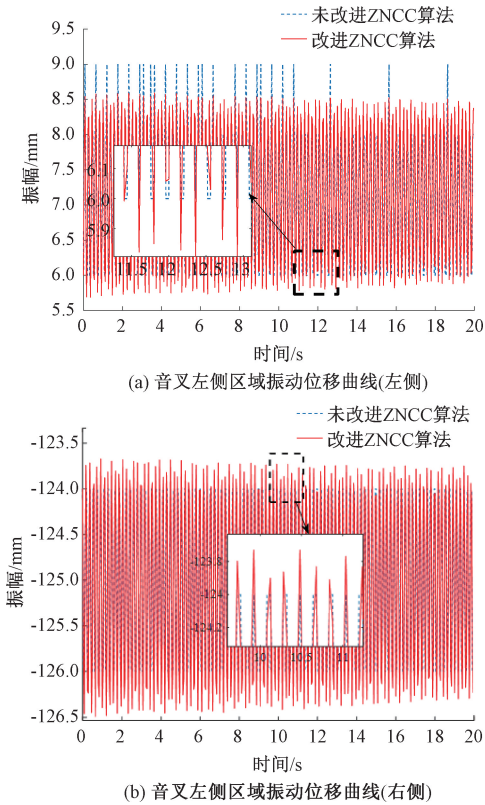


图 4 音叉左侧和右侧振动位移曲线

从图 4(a)和(b)中可以看出,未改进 ZNCC 算法提取的音叉振动整个曲线呈现出阶梯状特征,改进后的 ZNCC

算法提取的音叉振动信号波形与原波形相比,呈现出更加平滑和精准的特征,不再呈现明显的阶梯状。这表明改进后的 ZNCC 算法在定位精度上更高、更加稳定。

改进前与改进后的 ZNCC 算法匹配时间如表 2 所示。对改进前后算法的耗时时间进行比较,可以观察到经过改进后的 ZNCC 算法明显减少了模板匹配时间,速度提高了 77.46%。特别是在具有模糊特征或边缘信息较少的情况下,改进效果更为显著。

表 2 改进前与改进后的 ZNCC 算法耗时时间记录表

匹配算法	视频帧大小	模板大小	总耗时/s
ZNCC 算法	1 920×1 080	80×80	15.35
改进 ZNCC 算法	1 920×1 080	80×80	3.46

本文采用快速傅里叶变换处理图 4 中提取的音叉振动位移信号。通过将时域的位移轨迹转换到频域,并对频域的运动信号进行傅里叶变换,得到其幅度频谱。频谱图如图 5 所示。

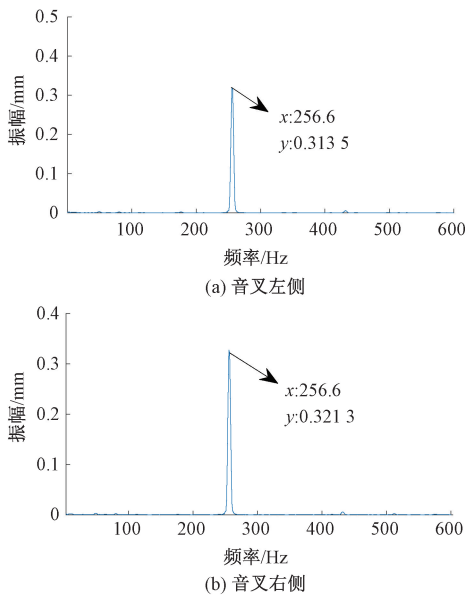


图 5 音叉振动频谱图

由图 5 可知,实验测得的音叉振动频率为 256.6 Hz,与音叉的自然振动频率 256 Hz 非常接近,实验误差仅为 0.234 4%。这表明了本文所采用的测量方法的高度准确性和可靠性。

实验结果显示,本文算法在保留了传统 ZNCC 算法的鲁棒性的同时,表现出优秀的抗噪性,并显著提高了匹配速度。这验证了改进的 ZNCC 算法能够有效地提取运动目标的位移,从而减少匹配时间。算法流程简洁直观,为运动目标的位移提取提供了有效而高效的解决方案。这种测量方法具有实际的应用价值,可以在各种科学和工程领域中得到广泛应用。

4 结 论

本文首先利用曲面拟合法提升了 ZNCC 算法的亚像素精度,然后将边缘信息提取算法与 ZNCC 模板匹配算法相融合,提出了一种基于改进边缘信息的 ZNCC 位移提取算法。通过提取图像中的重要特征信息,成功减少了模板创建时间。同时,根据信息点数的调整搜索步长,有效减少了计算量。最终,通过音叉振动频率测量实验验证了该方法在定位精度和计算时间方面取得了显著的改进,并为其在实际工程中的应用提供参考依据。

然而,本文提出的方法还存在一些不足之处。例如,阈值的调整需要耗费较多时间,且应用于其他实验对象时,需要进一步调整参数以适应不同情况,增加了额外的工作量。另外,边缘信息提取可能会导致部分图像特征的损失,尤其是对于具有复杂纹理或边缘信息的图像,可能无法完全表达其特征。因此,在未来的研究中,可以探索自适应调整阈值的方法还有多特征融合方法,以提高算法的普适性和实用性,使其更加适用于不同场景和应用需求。

参考文献

[1] 刘念. 基于视觉机器人的目标定位技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.

[2] 程淑红, 管永来, 张典范. 基于形状匹配及纹理筛选的汽车轮毂型号识别[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2299-2306.

[3] 盛兆亮, 高军伟. 基于区域统计和 BP 神经网络的车牌识别[J]. 电子测量技术, 2019, 42(8): 78-82.

[4] 邓黎, 张博, 冯丹彤, 等. 基于模板匹配的物体间距实时检测系统[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(6): 128-132.

[5] 安国臣, 刘娟娟, 王雁, 等. 基于模板匹配及粗糙度纹理指标的液位检测算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(23): 168-174.

[6] 张一梵. 基于灰度相关的快速模板匹配算法研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.

[7] ZHANG Y, ZHANG Z, PENG S, et al. A rotation invariant template matching algorithm based on Sub-NCC[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2022, 19(9): 9505-9519.

[8] 邢藏菊, 温兰兰, 何苏勤. 基于序贯相似性检测的 NCC 目标跟踪快速匹配方法[J]. 电子设计工程, 2015,

23(3):187-190.

[9] 朱希诚. 基于自适应多尺度的模板匹配算法研究[D]. 广州:广州大学,2021.

[10] 李阳,侯颖,李娇,等. 动态模板匹配的孪生网络长时目标跟踪算法[J]. 计算机工程与应用,2023,59(17):159-168.

[11] 万宏强,张晨辉,孙正阳. 基于改进的模板匹配在规则边缘零件内孔检测中的应用[J]. 电子测量技术,2021,44(7):88-92.

[12] 雷秀军. 高速视觉动态测量系统关键技术与应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.

[13] 冯威. 基于高速视觉系统的振动及位移场测量[D]. 合肥:中国科学技术大学,2018.

[14] XIAO Y, ZHOU J. Overview of image edge detection[J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(5): 40-54.

[15] 程宁,侯德林. 基于尺度与对比度不变的图像边缘检测算法[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(1):140-148.

[16] 刘源,夏春蕾. 一种基于 Sobel 算子的带钢表面缺陷图像边缘检测算法[J]. 电子测量技术,2021,44(3):138-143.

[17] 赵朝朝,江明,殷宗琨. 改进 Canny 算子下的工件尺寸测量[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(8):52-59.

[18] 张昂,黄立勤. 基于机器视觉的导盲杖辅助识别系统设计[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2019,36(6):63-67.

作者简介

褚冬亭, 硕士研究生, 主要研究方向为视觉振动测量。
E-mail:dt3431171735@163.com

刘丙友, 教授, 研究生导师, 主要研究方向为先进控制理论及应用、机器人、高速图像跟踪应用领域。
E-mail:lby@ahpu.edu.cn