

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.01.052

基于机器视觉的轴承识别与定位算法研究

余浪^a, 苗鸿宾^{a,b}, 苏赫朋^a, 申光鹏^a

(中北大学 a. 机械工程学院; b. 山西省深孔加工工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘要:针对运用视觉技术对轴承进行质量检测与尺寸测量时,能够准确地识别定位到目标轴承,提出一种基于机器视觉的轴承识别与定位算法。通过对采集到的轴承图像进行预处理,分割出目标图像并提取图像的外轮廓边缘特征;设置轴承的模板图像,结合图像的Hu不变矩特征对轴承进行识别匹配;通过最小二乘法对图像边缘点进行圆拟合并采用迭代法进行修正,通过计算圆心的位置坐标,实现对轴承的定位。实验结果为:轴承的识别匹配度在0~0.03之间,定位误差在0.5像素以内,满足系统对轴承的识别定位精度要求。

关键词:机器视觉;图像处理;Hu不变矩;最小二乘法

中图分类号: TH133.33 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2024)01-0260-06

Research on Bearing Recognition and Positioning Algorithm Based on Machine Vision

YU Lang^a, MIAO Hongbin^{a,b}, SU Hepeng^a, SHEN Guangpeng^a

(a. School of Mechanical Engineering; b. Shanxi Province Deep Hole Machining Center, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Given that the vision technology can accurately identify and position target bearing in its application of bearing quality inspection and size measurement, a bearing identification and location algorithm based on machine vision was proposed. By preprocessing the collected bearing image, the target image was segmented and the outer contour edge features of the image were extracted. The template image of the bearing was set, and by combining with Hu moment invariant features of the image, the bearing was recognized and matched. The circle fitting of the image edge points was set by the least square method, and the iterative method was adopted for correction. By calculating the position coordinates of the center of the circle, the positioning of the bearing was realized. The experimental results show that the recognition matching degree of vehicle bearing is between 0 and 0.03, and the positioning error is within 0.5 pixel, which meets the requirements of the system for the accuracy of bearing recognition and positioning.

Keywords: machine vision; image processing; Hu moment invariant; least square method

0 引言

轴承是机械设备中一种重要的零部件,主要用于支撑机械旋转体,降低其运动过程中的摩擦因数并保证其回转精度,故被应用于不同的机械装置中。轴承的质量关系着整个装置的运行状态和使用寿命,所以在轴承的生产过程中需对轴承的多项参数进行质量检测以及尺寸测量^[1]。

基于机器视觉的快捷、灵活、抗干扰能力强以及可编程控制等特点,机器视觉技术在工业生产上得到了越来越多的应用^[2],结合机器视觉对轴承进行质量检测以及尺寸测量等操作也一直是自动化技术领域的研究热点。白芳等^[3]为了提高对

轴承的测量精度以及测量的速度,结合机器视觉技术设计了一种针对轴承的检测系统,实现了对轴承的定位、多位置的尺度测量以及轴承表面的缺陷检测。林海波等^[4]为了能够更加准确地定位到微小轴承的位置信息,在处理微小轴承图像的过程中,通过局部区域特征的三次曲线模型求解轴承图像的内外圈边缘亚像素信息,并以此计算得到更精确的图像边缘信息。温学军等^[5]通过轴承图像的灰度函数图以及一阶导数图来对轴承滚动体的缺失进行检测判断。

工业生产中在对轴承进行各项参数检测时,受现场工况的影响,待检测的轴承会在一定程度上偏离原先固定的位置,若此时继续对轴承进行

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金项目(YDZX20191400002765);山西重点研发计划项目(201903D421006)

第一作者简介: 余浪(1997—),男,贵州毕节人,硕士研究生,研究方向为工业机器人与机器视觉,2966099578@qq.com。

质量检测以及尺寸测量将导致检测的结果出现较大的偏差。基于此,为了保证轴承各项参数的检测准确性,本文提出一种基于机器视觉的轴承识别与定位算法,通过设置轴承的模板图像以及检测阈值,结合图像的Hu不变矩特征对轴承进行识别匹配;通过最小二乘法对图像的边缘点进行圆拟合并采用迭代法进行修正,通过计算圆心的位置坐标,实现对待检测轴承的定位。该方法可有效地识别、定位目标轴承,提高对轴承各项参数的检测精度。

1 算法流程

本文以 NSK 6204Z 轴承作为研究对象。NSK 6204Z 轴承是一种深沟球轴承,用于模具标准件、压力机、冷冲压设备等。本文基于机器视觉对待检测轴承进行识别与定位的算法流程如图 1 所示。要实现轴承的准确识别与定位,主要关键步骤包括:1)图像采集,调试视觉系统采集目标图像;2)图像预处理,消除与图像识别定位无关的图像信息以及噪声干扰;3)图像外轮廓边缘特征的提取;4)对目标轴承进行准确的识别判断以及定位计算。

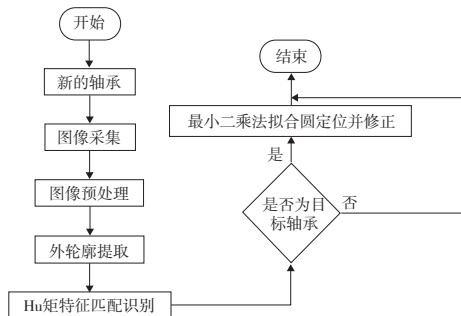


图 1 算法流程

2 轴承识别定位算法

2.1 图像预处理

图像预处理的目的是为了消除图像中多余的图像信息以及由环境因素影响所带来的干扰信息,突出感兴趣的图像区域,同时达到简化图像数据以及增强目标图像特征的目的。本文对轴承图像的预处理流程如图 2 所示^[6]。

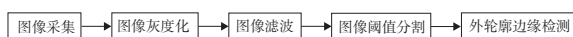


图 2 图像预处理

1) 图像灰度化

因为在对图像进行识别与定位的过程中只需考虑图像的形状特征而不需要考虑图像的颜色特征,所以在对轴承图像进行识别定位之前需对其进行灰度化处理。灰度化图像能达到简化图像,同时减少图像特征提取的时间,提高图像识别定位的速度^[7],灰度化效果如图 3 所示。



(a) 原始图 (b) 灰度图

图 3 图像灰度化

2) 图像滤波

在采集图像的过程中,受环境因素的影响,采集到的图像中往往会存在干扰的图像噪声,而这些噪声的存在会影响图像特征的提取效果。所以本文采用中值滤波算法对轴承图像进行滤波处理。中值滤波在对图像进行滤波处理的过程中不仅能够有效地对突变噪声进行降噪处理,同时能够很好地保存图像中的边缘特征^[8],滤波效果如图 4 所示。



图 4 中值滤波

3) 图像阈值分割

对图像进行阈值分割的目的是为了突出图像中感兴趣的区域,为后续的图像识别定位计算做好准备。图像阈值分割的过程主要通过设定阈值 T 来对图像进行二值化处理。在对图像进行阈值分割之前,首先对目标图像进行灰度直方图的统计,如图 5 所示。根据灰度直方图的分布情况,本文采用 Otsu 法对图像进行分割处理^[9],该方法分割效果好,计算简单。在对图像进行分割的过程中,动态地确定阈值 T ,使得在图像分割之后,目标图像与背景之间的方差最大,阈值分割效果如图 6 所示。

4) 图像外轮廓边缘检测

图像的边缘特征包含了图像的大部分信息,是对图像进行识别定位的关键因素。在边缘检测

的算法中 Canny 边缘检测受到噪声的影响较小,检测出来的边缘比较连续,边缘线条清晰,检测精度高并且受图像噪声的干扰较小,在对图像进行边缘的检测中得到了广泛的应用。所以本文结合此方法对轴承图像进行边缘检测。同时通过对轴承图像的外轮廓边缘特征进行识别匹配定位就可以达到对目标轴承进行识别定位的目的,还可以简化图像处理的信息,提高计算速度。为提取到目标图像的外轮廓边缘特征,本文对阈值分割后的图像先进行孔洞填充处理,再对图像进行 Canny 边缘检测,效果如图 7 所示。

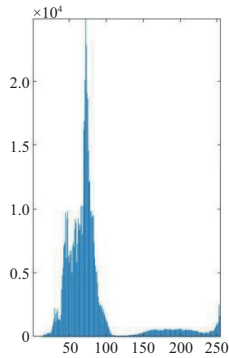


图 5 中值滤波后的图像灰度直方图

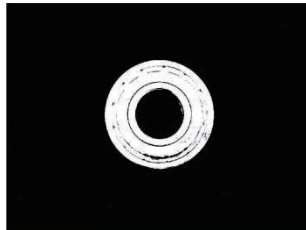
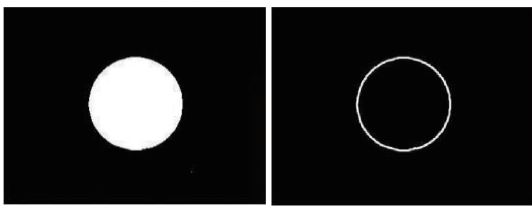


图 6 Otsu 阈值分割



(a) 孔洞填充 (b) Canny边缘检测

图 7 外轮廓边缘特征检测

2.2 轴承的 Hu 不变矩特征识别匹配

在提取到目标图像外轮廓边缘特征后,本文采用图像的 Hu 不变矩特征来对目标轴承进行识别匹配。通过设置轴承的模板图像,计算模板图像与待识别轴承图像外轮廓的 Hu 不变矩特征值并进行比较计算,同时设定相应的检测阈值,以达

到对目标轴承进行识别判断的目的。

1) Hu 不变矩

图像的 Hu 不变矩特征具有在图像发生平移、缩放以及旋转的时候都不变的性质^[10],其分析计算过程如下。

a) 计算图像的 $(p+q)$ 阶几何矩 m_{pq} 和中心矩 μ_{pq} :

$$\begin{cases} m_{pq} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M x^p y^q f(x,y), & p,q = 0,1,2,\dots \\ \mu_{pq} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M (x-x_0)^p (y-y_0)^q f(x,y), & (1) \\ & p,q = 0,1,2,\dots \\ x_0 = m_{10}/m_{00}, y_0 = m_{01}/m_{00} \end{cases}$$

式中 N, M 分别为图像的行列数。

b) 对中心矩 μ_{pq} 做归一化计算:

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\gamma}, \gamma = \frac{p+q+2}{2}, p+q=2,3,\dots \quad (2)$$

式中 μ_{00} 是零阶中心矩。

c) 构造胡氏 7 个不变量

$$\begin{cases} \varphi_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \\ \varphi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ \varphi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \\ \varphi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{03} + \eta_{21})^2 \\ \varphi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \cdot [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2] \\ \varphi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{21}) \\ \varphi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{03} + \eta_{21}) [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \end{cases} \quad (3)$$

上述的 7 个特征量变化较大,并且可能出现负值。因此,本文采用式(4)对上式得出的结果再进行计算。

$$\varphi_i = \text{sign}(\varphi_i) \log |\varphi_i|, \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (4)$$

2) 工件的识别匹配

对待识别的轴承进行识别匹配的过程中,首先需建立轴承的模板图像 A 并获取到该图像外轮廓的 Hu 不变矩特征值;然后对待识别的轴承图像 B 进行处理,提取图像的外轮廓边缘特征,同样也计算出该轮廓的 Hu 不变矩特征值;最后对两组特征值通过式(4)进行计算并利用式(5)进行

计算比较,同时设定相应的检测阈值完成工件的识别匹配判断。

$$I(A,B) = \sum_{i=1}^7 \left| \frac{1}{\varphi_i^A} - \frac{1}{\varphi_i^B} \right| \quad (5)$$

式中: φ_i^A 为轴承模板图像的特征值; φ_i^B 为待识别轴承图像的特征值。

由式(5)可知:当 $I(A,B)$ 越小时,待识别的轴承图像与模板轴承的匹配度越高,反之则越低。

2.3 轴承工件的定位

传统的定位轴承工件圆心的位置有 Hough 变换^[11]、三点定圆法^[12]以及最小二乘法^[13]。Hough 变换具有鲁棒性好,但在其投票统计的累加过程中需要消耗大量的内存和时间;三点定圆法虽然计算简单,但其定位精度也较低;最小二乘法可以得到高精度的圆心位置,同时计算量少,占用的内存和消耗的时间均较少,但容易受到图像中干扰点的影响,降低最后的定位精度。基于此,本文提出在完成目标轴承的识别匹配之后,对提取到的图像外轮廓上的边缘点集 Q 采用最小二乘法进行圆的拟合,然后利用迭代法进行修正,最后通过计算圆心的位置坐标实现对目标轴承工件的位置定位,达到提高轴承工件的定位精度以及检测系统的检测效率的目的。

圆曲线方程的一般形式可以描述为

$$R^2 = x^2 - 2Ax + A^2 + y^2 - 2By + B^2 \quad (6)$$

令 $a = -2A$, $b = -2B$, $c = A^2 + B^2 - R^2$, 则可将式(6)转换为

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (7)$$

设 d_i 为边缘上的点 $a_i(X_i, Y_i)$ 到圆心的距离,则有:

$$d_i^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2 \quad (8)$$

设 $\sigma_i^2 = d_i^2 - R^2 = X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c$, 则

$$Q(a, b, c) = \sum (X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)^2 \quad (9)$$

通过 $Q(a, b, c)$ 分别对 a, b 和 c 求偏导并取偏导数为 0, 则可以计算出:

$$\begin{cases} a = \frac{Z_5 Z_2 - Z_3 Z_4}{Z_1 Z_4 - Z_2^2}; b = \frac{Z_5 Z_1 - Z_3 Z_2}{Z_2^2 - Z_1 Z_4}; \\ c = -\frac{\sum (X_i^2 + Y_i^2) + a \sum X_i + b \sum Y_i}{N} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $Z_1 = (N \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i)$; $Z_2 = (N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i)$; $Z_3 = N \sum X_i^3 + N \sum X_i Y_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum X_i$; $Z_4 = (N \sum Y_i^2 - \sum Y_i \sum Y_i)$; $Z_5 = N \sum X_i^2 Y_i + N \sum Y_i^3 -$

$\sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum Y_i$; $N(N \geq 3)$ 为点集 Q 中点的数量。

由此即可计算出拟合圆的圆心坐标 $O_0(X_c, Y_c)$ 以及圆半径 R_0 的大小。但是在实际的应用中发现,该算法有时候得出的结果与真实的结果存在较大的偏差。这是因为在进行圆拟合的过程之中受到某些方向上干扰点的影响,导致最终得出的结果出现了偏差。所以为了使计算出的结果更接近于真实值,本文采用迭代法对上述得出的结果进行迭代修正处理。设迭代函数为

$$f = \sum |(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2 - R_0^2|^p \quad (11)$$

式中参数 p 的作用在于当干扰点接近拟合圆时,放大误差值,使得 f 取到全局最小值。

通过式(11)分别对 X_c, Y_c 和 R_0^2 求偏导得偏导数分别为 F_1, F_2, F_3 。设迭代公式为

$$\xi^{(k+1)} = \xi^{(k)} - \Phi_F \xi^{(k)}; \mathbf{F} = [F_1 \quad F_2 \quad F_3]^T \quad (12)$$

$$\text{式中 } \Phi_F = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_c} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_c} & \frac{\partial F_1}{\partial R_0^2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial X_c} & \frac{\partial F_2}{\partial Y_c} & \frac{\partial F_2}{\partial R_0^2} \\ \frac{\partial F_3}{\partial X_c} & \frac{\partial F_3}{\partial Y_c} & \frac{\partial F_3}{\partial R_0^2} \end{bmatrix}.$$

在迭代计算的过程中取圆心坐标 $O_0(X_c, Y_c)$ 和半径 R_0 作为 $\xi^{(k)}$ 的初始值 $\xi^{(0)}$ 。同时结合迭代终止式(13),设置相应的初始步长以及迭代精度得出最终的圆心坐标和半径值。

$$\frac{\|\xi^{(k+1)} - \xi^{(k)}\|}{\|\xi^{(k)}\|} \leq t_{ol} \quad (13)$$

式中 t_{ol} 为迭代的相对误差。

3 实验验证与结果分析

本文结合实验室现有的 AUBO 机器人、海康 MV-CE050-31GM 相机、MVL-HF1228M-6MPE 镜头等设备,基于 Visual Studio 2017 平台、OpenCV3.4.6 视觉函数库进行开发与实验验证分析。其中 MV-CE050-31GM 相机的传感器类型为 CMOS,分辨率为 2592×1944 ,通信接口为 GigE;MVL-HF1228M-6MPE 镜头具有画面清晰度高以及对比度好等特点。将相机安装在 AUBO 机器人的执行末端,用于采集轴承图像,采用环形光源进行补光以使轴承图像更加清晰,以 PC 作为上位机,通过 GigE 接口接收相机发送过来的图像信息,实验环境如图 8 所示。

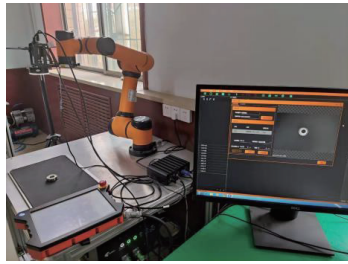


图8 实验环境

实验的过程之中将 NSK 6204Z 轴承摆放在试验台上并在每一次实验之前在一定范围内改变

其在实验台上的位置,然后设置轴承的模板图像与检测阈值,利用本文的算法对待检测的轴承进行匹配识别,设置当检测得到的匹配度阈值小于 0.05 时,则认为该工件为目标轴承工件。同时利用本文的定位算法计算出轴承的位置坐标 (x_i, y_i) ,将此结果与真实值 (x_0, y_0) 做比较,计算在 x 轴方向和 y 轴方向的偏差值 Δx 和 Δy 。

$$\begin{cases} \Delta x = x_i - x_0, & i = 1, 2, 3, \dots, n \\ \Delta y = y_i - y_0, & i = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (14)$$

共进行了 50 次的实验,实验结果如表 1 (部分结果)和图 9—图 11 所示。

表 1 部分实验结果

项目	实验编号		
	1	2	3
轴承匹配度	0.012 56	0.007 82	0.002 67
识别结果	轴承	轴承	轴承
标准坐标 (x_0, y_0) /像素	395, 236	398, 242	403, 243
计算坐标 (x_i, y_i) /像素	395.160, 236.112	398.039, 241.921	402.840, 242.901
Δx /像素	0.160	0.039	-0.160
Δy /像素	0.112	-0.079	-0.099
耗时/ms	211.3	214.2	220.8

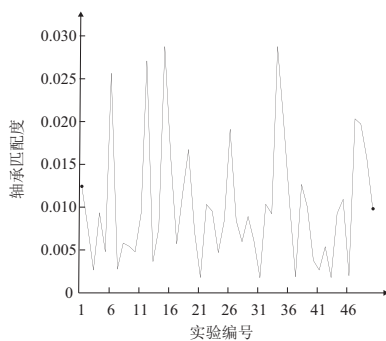


图9 轴承工件识别匹配度曲线

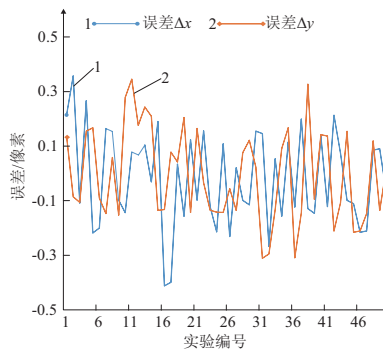


图10 定位误差曲线

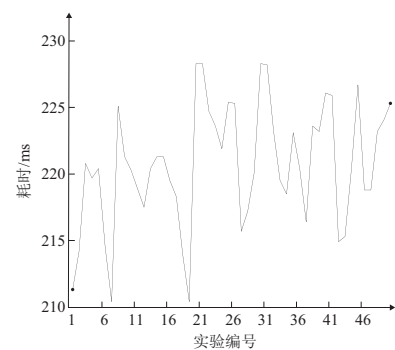


图11 耗时曲线

由图 9 可知轴承匹配度的范围在 0~0.03 之间,皆小于设定的匹配度阈值 0.05,50 次轴承的识别匹配正确率为 100%;图 10 中在 x 轴方向和 y 轴方向上的位置误差波动范围的绝对值都在 0.5 像素以内;图 11 中每次实验所用的时间都在 [210, 230] ms 之间,识别定位误差皆满足系统对轴承的识别定位精度要求。由此可知在误差范围之内,本文算法可实现对目标轴承的准确识别与定位。

4 结语

针对在结合视觉技术对轴承进行质量检测以

及尺寸测量的过程之中,待检测的轴承易发生位置的偏移导致测量的结果出现较大的偏差,所以在对轴承进行各项参数检测之前需对目标轴承进行准确的识别定位。基于此,本文提出了一种基于机器视觉的轴承识别与定位算法,通过对采集到的图像进行预处理,分割出目标图像并提取图像的外轮廓边缘特征,然后结合计算待识别图像和模板图像的 Hu 不变矩特征值对图像进行识别匹配;最后通过最小二乘法拟合圆计算图像的位置信息,并通过迭代法进行修正。实验结果表明:本文针对轴承的识别与定位提出的算法满足系统

对轴承的识别定位精度要求;可应用于轴承的生产线上;对提高对轴承各项参数的质量检测精度,具有实际意义。

参考文献:

- [1] 张明辉,王建武,张文,等. 机器视觉在轴承检测中的研究现状及发展趋势[J]. 机床与液压, 2019, 47(23):183-189.
- [2] 罗辉,崔亚飞. 基于机器视觉的工件识别与定位系统设计及实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(1): 101-105, 109.
- [3] 白芳,乔荣福. 基于视觉定位的轴承在线快速检测系统[J]. 机床与液压, 2017, 45(10):162-164, 169.
- [4] 林海波,杨建西. 基于机器视觉的微小轴承几何量精度检测研究[J]. 机电工程, 2023, 40(2):245-251.
- [5] 温学军,葛动元,姚锡凡,等. 基于机器视觉的轴承滚动体缺失检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(12):116-120, 124.
- [6] 黄超,茅健,徐斌,等. 基于最小外接矩形和 Hough 变换的定位算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(8):66-71.
- [7] JI J, LYU X J, YAO Y F. A SAR image segment method using gray level reduction based on graph in ICA

space[J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 26(4): 883-888.

- [8] SINGHD, KUMAR V. Single image defogging by gain gradient image filter [J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(7):1-3.
- [9] 王宏文,梁彦彦,王志华. 基于新遗传算法的 Otsu 图像阈值分割方法[J]. 激光技术, 2014, 38(3): 364-367.
- [10] 赵鹏宇,王宗彦,丁培燎,等. 基于机器视觉的并联机器人工件识别定位[J]. 制造技术与机床, 2021(12): 15-20.
- [11] 周勇亮,金燕,何萍,等. 随机 Hough 变换圆检测累计加速算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(4):574-580.
- [12] 陈跃飞,王恒迪,邓四二. 机器视觉检测技术中轴承的定位算法[J]. 轴承, 2010(4):54-56.
- [13] 骆腾斌,陈硕,赵紫阳,等. 基于机器视觉算法的轴承套端面缺陷检测研究[J]. 机电工程, 2018, 35(2): 148-152.

收稿日期:2023-01-13

(上接第 231 页)

4 结语

本文所提出的自控测距方法,使用激光仪布置了清洁机器人位姿跟踪装置,结合自控测距方法和误差补偿,精准跟踪液压启闭机油缸清洁机器人位姿,解决传统方法位姿跟踪精度低的问题。仿真结果表明:该方法在保证跟踪实时性前提下,精准跟踪了机器人运动轨迹,末端跟踪误差为 0,实现了机器人位姿的精准跟踪。

参考文献:

- [1] 王昊,张得礼,王宏涛. 基于遗传算法的机器人加工位姿优化研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(6): 174-177.
- [2] 何德峰,徐晨辉,朱威,等. 基于滚动时域优化的移动舞台机器人位姿估计[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(6):608-613, 622.
- [3] 李志鹏,程兰,王志飞,等. 卡尔曼滤波框架下基于最大相关熵的移动机器人位姿估计[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(6):936-944.
- [4] 刘志,陈恳,徐静. 基于模型和数据驱动的机器人 6D 位姿估计方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),

2022, 62(3):391-399.

- [5] 张磊,徐孝彬,曹晨飞,等. 基于动态特征剔除的图像与点云融合的机器人位姿估计方法[J]. 中国激光, 2022, 49(6):58-69.
- [6] 王琳玮,邵星灵,杨卫. 基于惯性传感器的球形机器人位姿控制系统及实验研究[J]. 中国测试, 2020, 46(3):123-127.
- [7] 周云成,许童羽,邓寒冰,等. 基于自监督学习的温室移动机器人位姿跟踪[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9):263-274.
- [8] 马芳武,倪利伟,魏路路,等. 具有悬架系统的全地形机器人位姿控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(4):1503-1516.
- [9] 杨学军,王然风,王怀法,等. 基于运动过程还原法的液压支架巡检机器人位姿检测[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(2):162-170.
- [10] 祝润泽,黄昕,高燕. 基于六维鼠标的机器人位姿控制研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(9):61-65.
- [11] 卢红煜,秦明旺,王浩坤,等. 自动翻越式玻璃幕墙清洁机器人设计[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(6):181-185.

收稿日期:2022-08-31