

基于机器视觉的工件尺寸测量研究*

郑如新¹ 孙青云¹ 肖国栋²

(1.南京林业大学机械电子工程学院 南京 210037; 2.天津微深科技有限公司 天津 300000)

摘要:针对工件尺寸测量问题,大部分都是使用人工的方式去测量工件的尺寸,不仅劳动强度大,而且还容易出现错误。为了避免此类情况的发生,设计了机器视觉技术对工件进行尺寸测量。在此,本文利用 HALCON 图像处理软件对工件进行高度测量,采用双目相机对工件进行图像采集,分析了双目立体视觉的工作原理并对相机进行了标定,提出了一种提取鞍点法来对工件进行定位,并且利用求平面向量来确定工件高度尺寸的方法,结果成功测出了工件的高度尺寸为 50.3 mm。实验结果表明,经过一系列的双目立体视觉处理手段,最终可以求出工件的高度尺寸,不仅提高了效率,而且在自动化生产方面具有较大实用价值。

关键词:机器视觉;HALCON;相机标定;在线检测;自动化

中图分类号: TP242.6+2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on workpiece dimension measurement based on machine vision

Zheng Ruxin¹ Sun Qingyun¹ Xiao Guodong²(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. Tianjin Weishen Technology Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: For the issue of workpiece size measurement, most of them use manual method to measure the size of workpiece, which is not only labor-intensive, but also prone to errors. In order to avoid this kind of situation, machine vision technology is designed to measure the size of the workpiece. Here, this paper uses HALCON image processing software to measure the height of the workpiece, uses binocular camera to collect the image of the workpiece, analyzes the working principle of binocular stereo vision, calibrates the camera, and puts forward a method of extracting saddle point to locate the workpiece, and uses plane vector to determine the height dimension of the workpiece, results the height dimension of the workpiece was successfully measured to be 50.3 mm. The experimental results show that after a series of binocular stereo vision processing methods, the height and size of the workpiece can be obtained, which not only improves the efficiency, but also has great practical value for the automatic production of the assembly line.

Keywords: machine vision; HALCON; camera calibration; online detection; automation

0 引言

20世纪50年代,机器视觉在国外开始兴起,当时只是简单的在一些图像处理和模式识别上面的应用,到了60年代机器视觉技术开始慢慢往三维上面去发展。到目前为止,机器视觉能够运用于社会生产和人类生活的各个方面,特别适合运用于大量重复的动作,例如流水线上工件的测量和检测等^[1]。尤其针对非接触式测量,无论是在准确度还是劳动力方面,都优胜与人工测量。日前随着中国制造2025战略目标的提出,因此在现代化的流水作业中,对在线测量技术提出了更高的要求^[2-3]。

当前,利用机器视觉测量一些物体的尺寸和对物体进行识别定位已经成为了研究热点。文献[4]利用机器视觉技术对孔类零件尺寸进行了测量,通过图像灰度化和阈值分割法对图像进行了分割,再使用 Canny 算法对需要测量的零件边缘进行了定位,该方法能够测量出零件尺寸,但是会受到图像预处理的影响导致测量误差偏大,结果受到影响。文献[5]测量了轮毂外形参数,分别利用了机器视觉和红外光栅技术对其进行测量,通过形态学和 Hough 变换方法对轮毂进行拟合,最终能够测出轮毂的直径尺寸,但是该方法只能够用于标准轮毂尺寸进行测量,存在一定的局限性。文献[6]为了研究齿形结构齿顶圆检测方法,提出了一

收稿日期:2021-06-25

* 基金项目:教育部产学研合作协同育人项目(202002276033)、江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(2020NFUSPITP0128)资助

种自适应阈值的曲率尺度空间技术对轮齿进行亚像素角点检测,再采用超最小二乘法拟合齿顶椭圆,该方法能够完全提取出齿顶圆并且不受遮挡的影响。文献[7]为了测量普通工件的尺寸,搭建了双目视觉系统,利用了三维重建的方法,成功的测量出了工件的外围尺寸。但是由于三维重建精度太低,重建出来的轮廓非常模糊,导致测量的误差太大。文献[8]测量卡车车厢的体积,提出了两种求解不规则图形的截面面积方法,同时结合机器视觉,成功的测量出了车厢的体积。文献[9]通过使用测量算法构建三维测量系统以及视角转换测量了内燃机气缸盖上的孔径,并且使用自动变压器观测系统对实验结果进行了验证,最大误差为0.373 mm,最小误差为0.053 mm。文献[10]提出了一种精确测量圆柱形轴直径的机器视觉方法。并对圆柱轴的轴径的透视投影和几何特征进行了建模。其中一些模型参数是使用一个已知直径的轴来确定的,该方法测量精度高,但是摄像机相对轴位置的影响不可避免。

因此本文将采用一种基于双目立体视觉无接触式测量工件高度的方法。通过提取工件上的鞍点来对工件进行尺寸定位,再通过 HALCON^[11-12] 视觉软件开发一套测量工件高度的算法,包括图像采集,双目标定,极线矫正,图像校正,立体特征匹配,从而实现工件高度的精确测量。

1 系统试验条件

试验主要用到的硬件设施有:2台大恒水晶系列相机(型号为MER-500-7UC),其分辨率为 $2\ 592 \times 1\ 944$,帧率为14 fps,像元尺寸为 $2.2\ \mu\text{m} \times 2.2\ \mu\text{m}$,与镜头的接口为C接口。同时搭载了型号为gx-0816,焦距为8 mm的光学镜头,工作距离在300 mm左右,1台内存为8 G并且装配有Windows操作系统与HALCON软件的工业计算机,相机是通过USB2.0标准接口与计算机相连接并实时采集图像。将采集到的图像通过USB2.0传输到计算机上面,开始对图像进行处理操作,如图1所示。

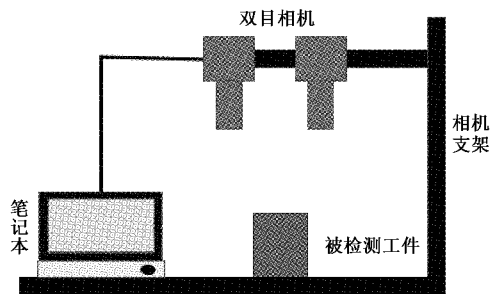


图1 图像信息采集

2 双目立体视觉测量原理

2.1 双目视差模型

如果无法通过二维平面完成检测任务,如测量目标的表面高度尺寸,则需要考虑使用双目立体视觉进行测量。

结合相机标定的内部参数和外部参数,可用双目相机测量目标对象中特定点的三维坐标,从而也能获得物体的尺寸。

所谓视差则是模拟人眼来进行来观察物体,人类之所以可以感受到立体视觉,是因为人类的左右眼睛之间的间距有大约6~7 cm,因此,从左眼出发去观察一个物体,和从右眼出发观察同一个物体,他们之间会存在些微的差异,这个差异就是“视差”。

双目立体视觉的测量就是基于视差原理,利用空间点在左、右两个摄像机成像面上对应点之间的像素差值,通过三角测量的原理,反算出空间点的三维坐标值^[13],如图2所示。

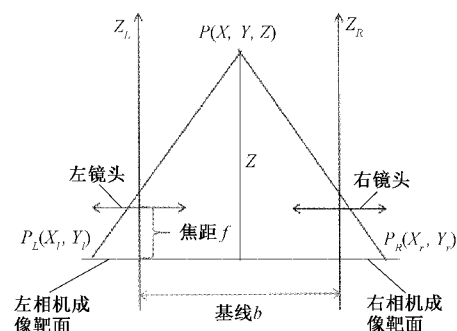


图2 双目视差模型

图2为平行的双目视觉模型,左、右相机互相平行放置。且令 O_R 和 O_L 为坐标系原点,分别在各自的光心处, b 为基线也就是两个相机之水平距离。

设空间中存在一点 P ,并且这个 P 点在左右相机成像面分别为 P_L 和 P_R ,由图2中的相似三角形原理关系可知:

$$\begin{cases} X_l = f \frac{x}{z} \\ X_r = f \frac{x-b}{z} \\ Y_l = Y_r = f \frac{Y}{z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (X, Y, Z) 为世界坐标系中点 P 的坐标; (X_l, Y_l) 和 (X_r, Y_r) 分别为点 P_L 和 P_R 的坐标; f 为相机的焦距; b 为基线距离,也就是两个相机之间的水平距离。对式(1)标表达式为:

$$\begin{cases} X = \frac{bX_l}{X_l - X_r} \\ Y = \frac{bY_l}{X_l - X_r} \\ Z = \frac{bf}{X_l - X_r} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X_l - X_r$ 为图像的视差值

因此,由式(2)可知,只要知道相机的内参数和视差,即可唯一求出空间中一点 P 的三维坐标。

2.2 外极线几何模型

由上一节可以知道,若是要计算一个空间点的三维坐

标,只需要知道相机的内参和视差即可。但是对于上述的模型均是处于理想状态下的,不考虑相机镜头的畸变、同时也不考虑双相机光轴不平行的情况^[14]。在实际的应用中,由于相机安装的误差和镜头的制造误差等原因,想要使得两个相机光轴处于完全平行的状态下是非常困难的,平行双目视觉的模型难以满足,即使看上去两个相机是平行的,成像面也不一定在同一平面上,因此需要对采集的图像做极线校正。

极线校正的目的为了得到两幅图像中同一点的横坐标,然后用左相机中的这一点横坐标减去右相机中的这一点横坐标,即可得到这一点的视差值,再根据三角相似原理算出空间中对应这一点的深度值,如图 3 所示。

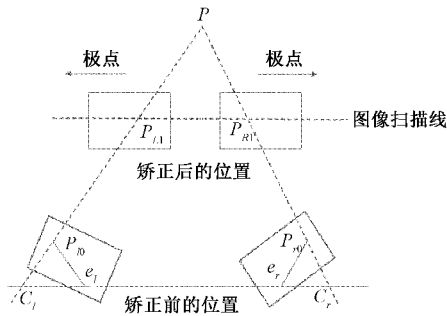


图 3 极限校正过程示意图

在图 3 中,其中 C_l 和 C_r 分别为左右两个相机的中心点, P 为空间中的一点,且 P 在 C_l 和 C_r 对应的像平面中的投影分别为 P_{l0} 和 P_{r0} , C_l 和 C_r 的连线与像平面的交点 e_l 、 e_r 称为极点, P 、 C_l 和 C_r 三点组成的平面成为极平面。

3 双目立体视觉的标定

3.1 双目标定的意义

为了将图像坐标系中的像素距离和世界坐标系中的坐标距离对应起来,需要了解相机的内外部参数信息,通过坐标系的转换,换算其世界坐标系中的实际距离,为了确定三维物体表面某一点的三维坐标到图像像素坐标之间的转换关系,必须建立从物理世界到图像像素坐标的几何模型,相机的标定就是获取摄像机内外部参数的过程。而且标定对预测量具有重要的意义,准确的标定能够提高测量的准确性,减少误差^[15]。

3.2 双目标定原理

在使用上述式(2)计算空间中物体某一点的三维坐标或者测距时,必须先对摄像机进行标定,得到整个双目系统的结构外参数,即旋转矩阵 R 和平移矢量 T ,因为无论两个相机怎么放置,以左相机为中心,右相机通过旋转和平移总会和左相机重合。

设世界坐标系中存在某一点 P ,坐标记为 X_w ,此点在左右相机坐标系中的坐标分别记为 X_l 和 X_r ,则:

$$\begin{cases} X_r = R_r X_w + T_r \\ X_l = R_l X_w + T_l \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_r 和 T_r 分别为右相机的旋转向量和平移矩阵; R_l 和 T_l 分别为左相机的旋转向量和平移矩阵。

由式(3)进一步推导出 X_l 和 X_r 之间的关系式为:

$$X_l = R R_r^{-1} X_r + T_l - R R_r^{-1} T_r \quad (4)$$

再令 $R = R R_r^{-1}$, $T = T_l - R R_r^{-1} T_r$, 则可以得到左相机和右相机之间的相关位置关系为:

$$X_l = R X_r + T \quad (5)$$

由式(5)就可以很明显地看出左右相机之间的位置关系是通过旋转和平移得到的。

3.3 双目标定过程

本文采用 HALCON 软件对摄像机进行标定,使用的标定板规格尺寸如表 1 所示。

表 1 标定板规格参数

长/mm	宽/mm	XNum/个	YNum/个	MarkDist/mm	标志点中直径/mm	标志点中心距/mm
70	70	7	7	7	3.5	7.5

如图 4 所示,为标定板实物图。

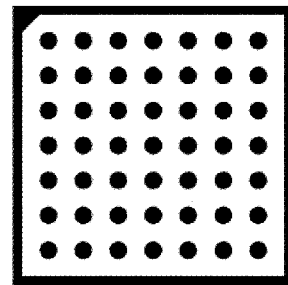


图 4 标定板实物图

首先用左右相机各拍摄了 16 张上述标定板离线图像,拍摄标定板的时候需要注意如下几个原则:

- 1)要使得标定板表面不得有污染和破损。
- 2)拍摄时标定板都同时需要呈现在两个相机的靶面上。
- 3)需要将标定板沿着 X、Y、Z 三轴进行旋转并采集图像,且旋转角度不超过 45°为宜。

4)将拍摄好的图像设置存放路径,在 HALCON 中使用算子 read_image()同时读取左右相机离线采集标定板的图像,并设置好左右相机的内部参数,例如 Focus(焦距)、Kappa(畸变系数)、Sx、Sy(像素的宽高)、Cx、Cy(芯片的中心坐标)等。再使用 find_caltab()算子来得到标定板的区域,对其进行识别,如图 5 所示。

最后使用算子 binocular_calibration()完成对摄像机的标定并得到摄像机的内外参数^[16]。下一步则是需要对图像进行极线校正,使得两幅图像的极限处于平行状态。最后使用算子 check_epipolar_constraint()去检查两幅图像的极线,可视化的结果如图 6 所示,能够使得左右相机的视

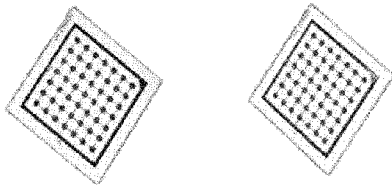


图 5 左右标定板的识别

差处于同一条直线上,实现了从非标准的外极线几何到标准的外极线几何转化。

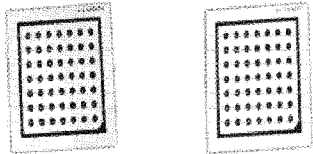


图 6 极限约束结果

具体的标定流程如图 7 所示。

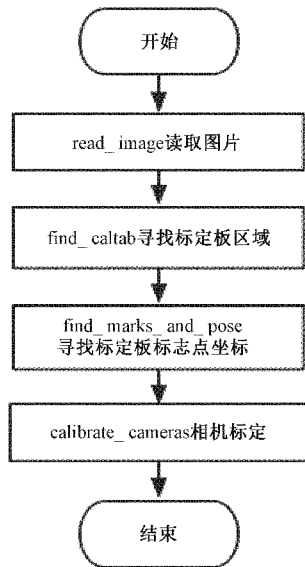


图 7 摄像机标定流程

经过标定和极限约束后得到的实验结果如表 2 所示。

表 2 相机内参数结果

参数	左相机	右相机
焦距 f/mm	9.2	9.2
畸变系数 K	0	0
像元尺寸宽 S_x/mm	0.002	0.002
像元尺寸高 S_y/mm	0.002	0.002
中心坐标 $C_x/像素$	2 744	1 974
中心坐标 $C_y/像素$	2 745	1 974

4 工件高度的测量

4.1 特征点提取

本文采取提取鞍点(saddle point)的方法来定位工件的

三维坐标以及测量其高度。鞍点就是即沿一个方向图像强度最小,同时沿不同方向图像强度最大的点。为此,在每个点的输入图像是近似的二次多项式在 x 和 y ,然后多项式检查鞍点。建立多项式所需的偏导数可以用各种高斯导数计算,也可以用剖面模型计算,具体取决于滤波器^[17-19]。

首先在工件的顶部中心位置和工作台的表面贴上鞍点标志,在 HALCON 软件中,用左右相机分别去采集该工件,如图 8 所示。

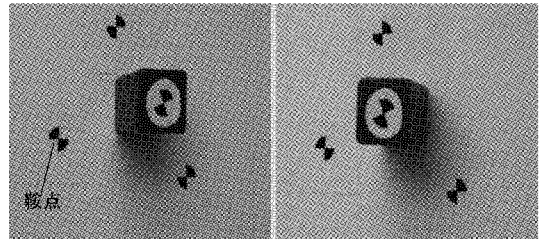


图 8 工件采集图

然后需要提取图中的特征点,也就是鞍点,通过确定 4 个鞍点的三维坐标,然后算出工件的高度。

在 HALCON 中使用算子 critical_points_sub_pix()来提取亚像素图像中的关键点,包括局部最小点、局部最大点和鞍点,本文中主要提取的是鞍点。在该算子中,滤波器采用了“facet”模型,并且根据 Hessian 矩阵行列式的特征值来检测多项式的极值和鞍点。其中 Hessian 矩阵的表达式为:

$$H(X_0) = \begin{pmatrix} L_{xx}(X_0) & L_{xy}(X_0) \\ L_{yx}(X_0) & L_{yy}(X_0) \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: $L_{xx}(X_0)$ 等 3 项表示图像的二阶方向导数。

Hessian 矩阵变化为特征值和特征向量的表达式为:

$$H(X_0)_\sigma U_{\sigma,i} = \lambda_{\sigma,i} U_{\sigma,i} \quad (7)$$

式中: $\lambda_{\sigma,i}$ 和 $U_{\sigma,i}$ 分别表示尺度 σ 下 Hessian 矩阵的特征值和特征向量,通过进一步的矩阵转换可以写成:

$$U_{\sigma,i}^T H(X_0)_\sigma U_{\sigma,i} = \lambda_{\sigma,i} \quad (8)$$

通过式(7)、(8)分析可以知道,如果 Hessian 矩阵的两个特征值的绝对值都大于阈值,则一个点被认为是临界点。特征值对应于灰度值曲面的曲率。如果两个特征值都为负,则该点为局部极大值;如果两个特征值都为正,则该点为局部极小值;如果两个特征值的符号不同,则该点为鞍点,提取到的鞍点如图 9 所示。

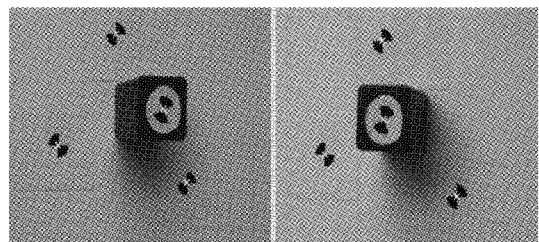


图 9 鞍点提取结果

4.2 三维坐标求解

利用双目标定得到了左右相机的内外参数之后,来计算出 4 个鞍点的三维坐标值。假设鞍点的质心在左右相机的图像坐标系中投影点的图像坐标分别为 (U_L, V_L) 和 (U_R, V_R) ,且左右两个相机的投影矩阵分别为 M_L 和 M_R ,鞍点的质心在世界坐标系中的坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) ,根据相机的投影矩阵可知:

$$Z_L \begin{bmatrix} U_L \\ V_L \\ 1 \end{bmatrix} = M_L \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Z_R \begin{bmatrix} U_R \\ V_R \\ 1 \end{bmatrix} = M_R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过 HALCON 软件中的算子 `intersect_lines_of_sight()` 来实现这一操作,坐标值的计算如图 10 所示。

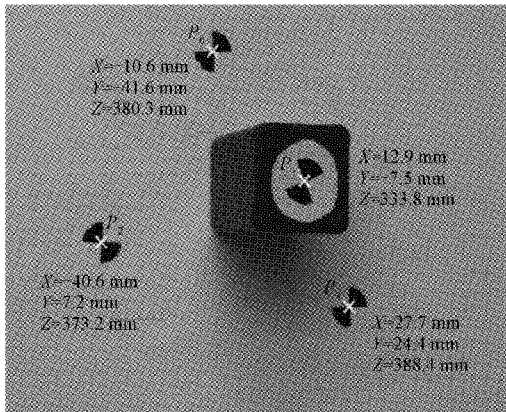


图 10 坐标计算结果

4.3 工件高度测量

在 4 个点的三维坐标都求出来之后,如果说直接用 P_3 或者 P_0, P_2 点的 Z 坐标值减去 P_1 点的 Z 坐标值得到工件的高度的话,测出来的工件高度误差偏大。

由于相机镜头安装时不可能同时满足处在 4 个鞍点的正上方,是呈有一定的角度安装,因此要求出以 P_0, P_2, P_3 三点组成平面的法向量,将这个平面记为 Z_0 ,继而计算出 P_2 和 P_1 两点在 Z_0 平面的法向量上面的投影,最后求出工件高度。具体算法如下:

$$NX := [X[3] - X[2], Y[3] - Y[2], Z[3] - Z[2]]$$

$$NY := [X[0] - X[2], Y[0] - Y[2], Z[0] - Z[2]]$$

$$NZ := [NX[1] * NY[2] - NX[2] * NY[1],$$

$$NX[2] * NY[0] - NY[2] * NX[0],$$

$$NX[0] * NY[1] - NY[0] * NX[1]]$$

$$NZ := NZ / \text{sqrt}(\text{sum}(NZ * NZ))$$

$$P_2 P_1 := [X[1] - X[2], Y[1] - Y[2], Z[1] - Z[2]]$$

$$\text{工件高度} := \text{sum}(NZ * P_2 P_1)$$

如图 11 所示,求得工件高度为 50.3 mm。

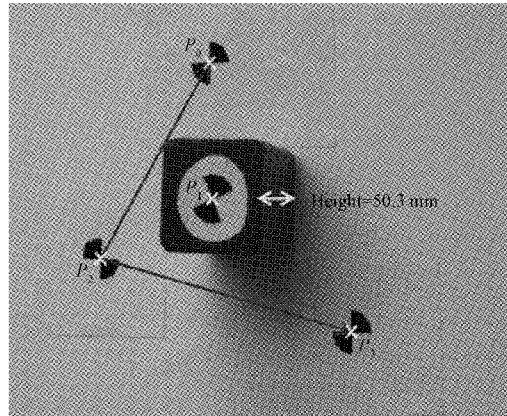


图 11 工件高度显示

最终在没有任何接触的情况下成功的测出了工件的高度。

5 结 论

本文研究了基于双目立体视觉的工件高度测量方法。首先对工件图像进行采集,再对双目相机进行标定,将图像坐标系中的像素尺寸和世界坐标系中的坐标尺寸对应起来,从而能够测出工件高度,同时提出了一种通过识别工件上鞍点的方法来对工件进行定位,在工件中心和工作台表面贴上鞍点,进行了鞍点的识别和鞍点三维坐标的求解,得出工件中心和工作台表面上鞍点的三维坐标之后,由于相机镜头到工件的距离并不是垂直距离,会存在一定的偏差角度,因此使用工作台表面上鞍点坐标的 Z 值减去工件中心坐标的 Z 值,求出的工件高度并不准确。因此我们需要求出以 P_0, P_2, P_3 三点组成平面的法向量,将这个平面记为 Z_0 ,继而计算出 P_2 和 P_1 两点在 Z_0 平面的法向量上面的投影,成功在没有人工的接触之下测到了工件的高度,具有更高的实用价值。但是本文使用的双目标定算法处理时间过长,则需要对双目标定算法进行改进,以便能够快速处理图像标定问题,为后面的测量节省时间。希望本文研究方法可以为智能化、自动化工件尺寸测量提供技术支持。

参考文献

- [1] 王玉槐,王琦晖,寿周翔,等.应用改进 Canny 法检测工业零件含噪图像边缘[J].轻工机械,2012,30(4):77-80.
- [2] 张如如,葛广英,申哲,等.基于 HALCON 的双目立体视觉工件尺寸测量[J].计算机测量与控制,2018,26(1):59-63.
- [3] 魏舜昊,章家岩,冯旭刚.三坐标测量机高速测量过程动态误差分析与补偿[J].电子测量与仪器学报,2020,34(5):43-50.
- [4] 谢俊,李玉萍,左飞飞,等.基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J].电子测量技术,2021,44(2):93-98.

- [5] 郭智杰,王明泉,张俊生,等. 轮毂外形参数的在线测量技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(5): 142-145.
- [6] 孔盛杰,黄翔,周蒯,等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 247-255.
- [7] 朱先锋. 基于双目视觉的工件尺寸三维测量[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.
- [8] 闫霞. 基于机器视觉的体积测量系统研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2011.
- [9] NGO N V, HSU Q C, HSIAO W L, et al. Development of a simple three-dimensional machine-vision measurement system for in-process mechanical parts[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(10): 1-11.
- [10] WEI G, TAN Q. Measurement of shaft diameters by machine vision[J]. Applied Optics, 2011, 50(19): 32-46.
- [11] 朱荣华,葛广英,张广世,等. 基于双目视觉的引磁片定位与测量研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(8): 40-43, 73.
- [12] 李玉荣,刘英,汪力,等. 基于人工智能的苗木质量无损检测研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 27-32.
- [13] 席云飞,吴双,徐健,等. 基于双目立体视觉的IC板深度测量[J]. 制造业自动化, 2020, 42(5): 129-132.
- [14] 邱志成,汪先锋. 基于双目视觉的振动测量及控制[J]. 振动. 测试与诊断, 2018, 38(1): 51-58, 205.
- [15] 贾帅,王涛,张金. 基于双目视觉的轴类零件直径测量方法[J]. 煤矿机械, 2021, 42(8): 221-223.
- [16] 杨少波. 基于Halcon工业相机标定系统的研究[D]. 荆州: 长江大学, 2020.
- [17] 高北斗. 面向工业机器人的双目视觉系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [18] 黄凤山,刘恩福,方忆湘,等. 基于智能三坐标测量机的零件位姿单目立体视觉识别[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1326-1332.
- [19] 黄琳,冯柯茹,杨岩,等. 滚动接触疲劳的机器视觉检测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(10): 90-92, 96.

作者简介

郑如新, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。

E-mail: m15951677878@163.com

孙青云(通信作者), 副教授, 主要研究方向为机械设计及其理论。

E-mail: sunqingyun@njfu.edu.cn