

文章编号 1004-924X(2013)04-1054-08

基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量

全燕鸣*, 黎淑梅, 麦青群

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 由于传统测量方法及仪器设备无法满足在机实时检测工件三维尺寸的要求, 本文基于双目立体视觉视差原理, 搭建了一套可在车间现场操作的在机测量工件三维尺寸的视觉系统。首先, 介绍了改进的基于平面圆靶标的双目视觉测量系统标定方法。然后, 用阈值分割算法从背景中识别出待测工件, 采用 Canny 算子和多边形逼近法提取工件轮廓和轮廓关键特征点, 并在极线约束的特征点匹配算法基础上, 提出一种基于灰度相关的密集型精匹配算法, 获得了工件边缘轮廓关键特征点云的三维坐标数据。最后, 对匹配所得特征点云进行数据处理和特征拟合计算, 得到了工件的关键尺寸。在车间数控机床上对有斜面及孔结构的工件进行了在机测量实验, 结果显示, 该系统检测精度达 $\pm 1.3\%$ 以上。

关键词: 双目立体视觉 三维尺寸 在机测量 工件

中图分类号: TP391.4; TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.1054

On-machine 3D measurement of workpiece dimensions based on binocular vision

QUAN Yan-ming*, LI Shu-mei, MAI Qing-qun

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding author, E-mail: meymaquan@scut.edu.cn

Abstract: As traditional measuring methods and equipment can not meet the requirement of 3D measurement of workpiece dimensions on-machine in real-time, an on-machine 3D vision measuring system based on the principle of binocular stereo vision was established to work at the workshop. Firstly, A stereo vision system calibration method by using a plane calibration plate was introduced. Then, threshold segmentation algorithm was used for recognizing and extracting the workpiece from the background and the Canny operator and polygonal approximation method were used for extracting the workpiece contour and the contour feature points. Furthermore according to the matching algorithm based on the epipolar constraint, a gray dependent based intensive fine matching algorithm was proposed and the 3D coordinate data of the workpiece contour key feature points were obtained. Finally, the data of matched feature points were processed and fitted, and the key dimensions of workpiece were obtained. On a Computer Numerical Control(CNC) machine in the workshop, an experiment to measure the 3D dimensions of a workpiece with a cant and holes shows that the measurement accuracy

收稿日期: 2012-12-28; 修订日期: 2013-01-30.

基金项目: 广东省工业攻关重点项目(No. 2009A010200002)

can reach $\pm 1.3\%$ or more.

Key words: binocular stereo vision; 3D dimension; on-machine measurement; workpiece

1 引言

三维尺寸测量技术是现代制造业的关键基础技术之一,随着现代工业制造水平的发展,产品零件大量采用不规则复杂曲面,其设计、生产、检测、试验等环节需要进行大量的三维测量。传统的三维测量方法及设备主要有三坐标测量机、电子经纬仪、激光跟踪仪、激光扫描仪等,但这些方法及设备大多不能满足在机实时检测的要求,测量时工件必须离线,测量时间长,而且在卸下与测量过程中容易造成加工表面的损伤,影响测量结果。因此,在数控机床等自动化制造系统中,采用先进的在机三维测量技术对工件尺寸进行快速、准确的测量,对于提高切削加工效率、质量和降低成本具有重要的研究意义和广泛的应用前景。

双目立体视觉三维测量技术是在计算机视觉的基础上发展起来的一项新型非接触测量技术,它具有测量速度快、测量精度高、实时性强的显著优点,已成为国内外解决先进制造业中测量问题的研究热点。王健强等基于双目视觉原理提取车身空间位置参数,实现了汽车风挡玻璃的智能安装^[1]。李亮等提出了一种圆筒型热态锻件的立体视觉在线测量方法,可测量锻件的长度和直径^[2]。在工件测量方面,曲学军等研究了一种激光线扫描与双目视觉相结合的零件在线测量方法,但该方法需要往工件表面投射结构光,系统较为复杂^[3]。张虎等介绍了一种采用 Harris 算子提取工件若干特征点,并基于双目视觉原理计算其三维坐标的方法,但该方法测量精度较低^[4]。本文在前人的基础上,针对在机金属加工工件的特点,研究了一种可在数控机床上对金属加工工件几何尺寸进行三维测量的方法。

2 在机视觉测量系统的搭建

双目立体视觉是基于视差原理,由多幅图像获取被测物体三维几何信息的方法^[5]。如图 1,对于空间物体表面任意一点,如果在左右 2 个摄像机同时观察点 P ,并能确定在左摄像机图像上

的点 p_l 与右摄像机图像上的点 p_r 是空间同一点 P 的图像点(称 p_l 与 p_r 为共轭对应点),则可计算出空间点 P 的三维坐标。

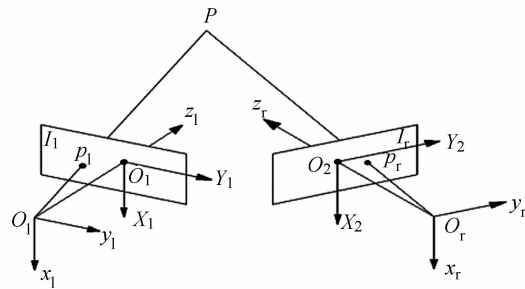
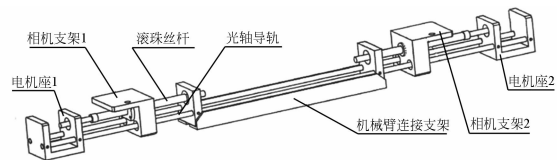


图 1 双目视觉测量原理

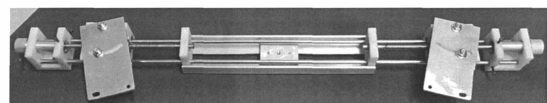
Fig. 1 Principle of binocular vision measurement

本文提出的视觉测量系统的设计目标是能够在数控机床上,无需拆卸工件和刀具即实现对在机加工工件的快速、准确测量。视觉测量硬件系统主要包括摄像系统、图像采集卡、光源、相机支架等,相机支架结构设计图及实物图见图 2。



(a) 相机支架结构设计图

(a) Blueprint of camera support



(b) 相机支架实物图

(c) Photo of camera support

图 2 相机支架

Fig. 2 Camera support

根据在机测量特点设计的双目视觉测量系统如图 3 所示。2 个摄像机通过多关节多自由度机械臂固定在数控机床上,可根据工件的大小和位置调节摄像系统的位置。

测量流程如图 4 所示,根据待测工件的大小和位置,调节好 2 个摄像机离工件的距离、摄像机间的距离和角度后,对测量系统进行内部参数和

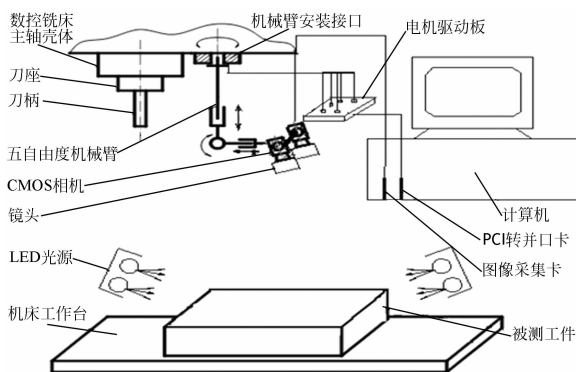


图 3 双目视觉测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of binocular vision measuring system

结构参数的标定,采集工件图像对。提取待测工件图像,去除背景后提取工件图像对的边缘轮廓关键特征点并进行匹配,计算出各特征点的三维坐标,进行空间圆、椭圆、边长平面等几何基元的拟合,完成对工件各待测尺寸的三维测量。

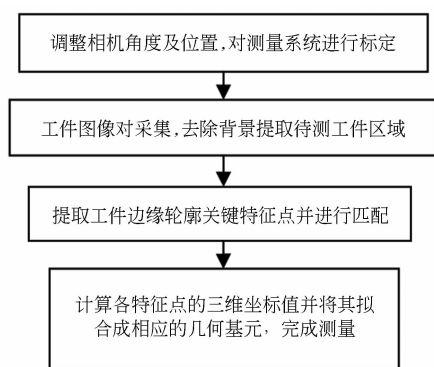


图 4 测量流程

Fig. 4 Measuring process

3 测量系统标定及工件图像采集

由于实际的镜头并非理想的透视成像,为了得到精确的测量结构,本文在线性针孔模型的基础上,采用考虑了镜头畸变的非线性模型作为摄像机标定的几何模型^[6]。根据摄像机的成像模型进行标定,必需满足以下两点要求:

(1)已知世界坐标系中足够多的三维空间点的坐标;

(2)找到这些空间点在图像中的投影点的三维图像坐标,并建立对应关系。

本文使用的平面靶标如图 5 所示,该靶标具有以下特点:

(1)在标志对象周围的黑色矩形边界框可以使标定对象的中心部分很容易从背景中提取出来;

(2)在矩形边界框的一个角落里放置一个小三角形来确定标定板的唯一方向,使其得到的方向以 360° 为模。如果没有这个方向标记,对于正方形的标定模板得到的方向只能以 90° 为模,对于长方形标定对象得到的方向只能以 180° 为模;

(3)在标定对象表面上使用圆形标志,这样可以非常精确地提取出圆的中心点坐标;

(4)所有圆形特征点按行列排列成矩形阵列,这样可以使相机标定算法在图像中提取与这些特征点对应的像素点坐标时更加简便。

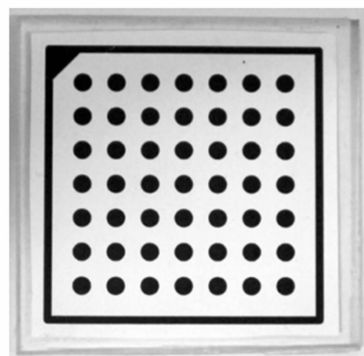


图 5 带有三角标志的圆形特征点平面靶标

Fig. 5 Plane calibration plate with circular feature points

张正友提出的标定算法^[7]既避免了传统标定方法设备要求高、操作繁琐等缺点,又比自标定法精度高、鲁棒性好,但只是在理论上解决了单个相机的标定问题,不能直接应用到双目视觉测量系统中。本文在张氏标定算法的理论基础上,采用了一种基于带有三角标志的圆形特征点平面靶标(如图 5)的改进的双目视觉测量系统标定方法。该标定方法通过采用方向唯一确定的标定板,并精确提取标定板各标志点的圆心坐标来提高标定结果的精度;添加了双目视觉中左右相机的相对位姿求解部分。其算法基本流程图见图 6。

根据该方法对测量系统进行标定后,采集工件图像对。由于是在车间数控机床上对工件进行在机测量,所以采集到的图像除了包含被测工件外,还不可避免地存在其它干扰,如数控机床的工

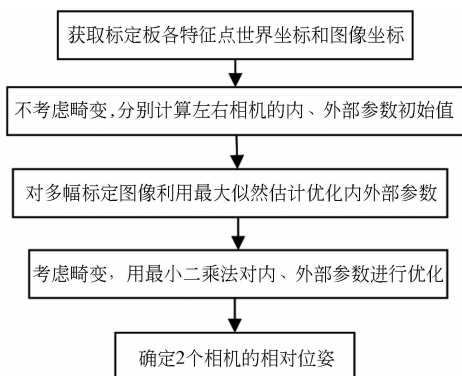


图 6 基于平面圆靶标的标定算法流程

Fig. 6 Process of calibration algorithm based on plane calibration plate

作台、工件夹具等,因此,还需要将被测工件或待测量的工件区域从背景中分离提取出来。由于被检测对象是正在加工或刚加工好的工件,其表面呈现较单一颜色,如铝、铁、钢呈现银白色,铜呈现黄色,而其他干扰物体如机床工作台、工件夹具等因其表面有润滑油或生锈腐蚀,一般为较暗些的灰色或黑色;而且同一种材质的工件,其灰度值在同一范围内,因此,可利用这些特点采用阈值分割算法将待测工件从背景中识别提取出来。本文采用一种自适应最优阈值方法确定阈值:先根据双峰法^[8]选取波谷阈值范围,再根据最大类间方差法^[9]从该范围中确定最优阈值。

4 工件轮廓关键特征点提取及匹配

双目视觉测量系统的测量对象为具有明显几何特征的一些工件,感兴趣的特征是工件的角点(如工件棱线的交点、圆孔的中心等)和边缘轮廓(如工件的棱线、圆孔的边缘等)。工件的边缘轮廓关键特征点包含了丰富的工件特征信息,代表了工件的基本几何形状。

工件的边缘轮廓具有丰富的特征信息,边缘检测的算子有很多,如 Canny 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Roberts 算子等,其中,Canny 亚像素边缘检测算子具有低失误率、边缘检测位置精确、边缘唯一等特点,因此本文采用 Canny 亚像素边缘检测算子提取工件边缘轮廓。基于边缘的工件轮廓关键特征点提取步骤见图 7。

4.1 多边形逼近法提取工件轮廓关键特征点

多边形逼近法^[10-11]提取轮廓关键特征点具有

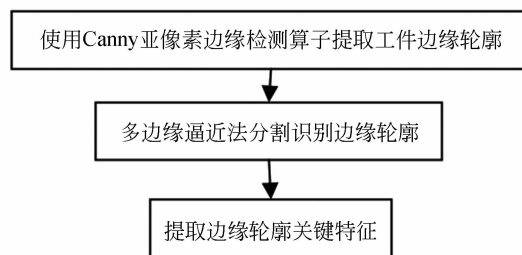


图 7 基于边缘的工件轮廓关键特征点提取步骤

Fig. 7 Extraction steps of key edge feature points according to workpiece contour

简单、快速,避免了二阶导数等复杂的数学计算等优点,其算法基本思路是:采用一个阈值来判别轮廓某段上的点与连接这段轮廓端点的直线的共线性,若某一段上的点到它对应直线的垂直距离在阈值内,则这段边界可用这条直线来逼近,否则应以该段上距直线最大距离的点作为一个新的分段点,重新进行阈值计算,最终得到目标轮廓的特征点。如图 8 所示,设定直线到轮廓的垂直距离阈值为 T ,直线段 $l_0, l_1, \dots, l_i, \dots, l_n$ 将轮廓 \hat{L} 分成一系列子轮廓 $\hat{l}_0, \hat{l}_1, \dots, \hat{l}_i, \dots, \hat{l}_n$,连接各子线段的起点和终点构成了对轮廓 \hat{L} 的多边形逼近,各子轮廓 \hat{l}_i 的起点和终点就是提取的轮廓关键特征点。

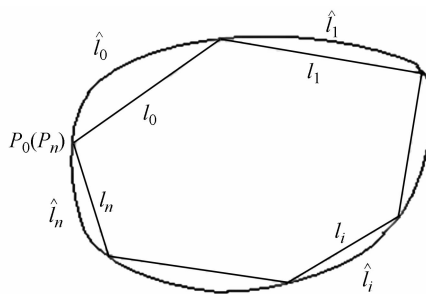


图 8 多边形逼近法提取特征点

Fig. 8 Extraction of key feature points by using polygonal approximation method

4.2 基于极线约束的轮廓关键特征点匹配

基于极线约束的轮廓关键特征点匹配算法流程如图 9 所示。

由于第二幅图像相对第一幅图像有一定的平移和旋转,则需根据重复区域的位置设定搜索范围的大小以及搜索范围的平移量和旋转量。根据极线几何约束可知,某点 P_{ii} 的对应匹配点 P_{ir} 必

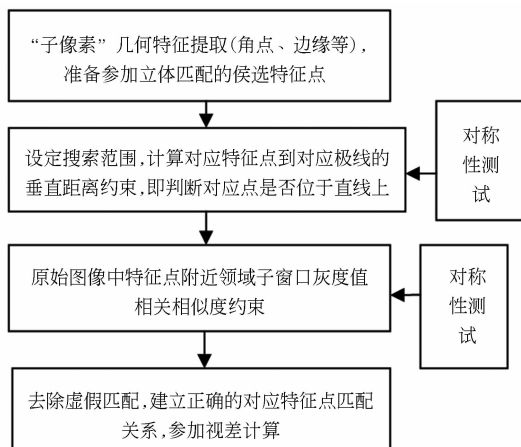


图 9 基于极线约束的特征点匹配算法流程

Fig. 9 Process of contour key feature point matching algorithm based on epipolar constraint

定在 P_i 对应的极线上。一个点 m_i' 到它的对极线 $l_i' = F\tilde{m}_i = [l_1' \quad l_2' \quad l_3']^T$ 的距离如下式^[6]：

$$d(m_i', l_i') = \frac{\tilde{m}_i'^T l_i'}{\sqrt{l_1'^2 + l_2'^2}} = \frac{\tilde{m}_i'^T F\tilde{m}_i}{\sqrt{(F\tilde{m}_i)_1^2 + (F\tilde{m}_i)_2^2}} \quad (1)$$

计算搜索范围内的特征点到对应极线间的距离是否在给定的阈值范围内,若是,则认为该特征点为候选匹配点。

由于极线约束只能确定待匹配特征点是否位于该特征点的对应极线上,所以在搜索窗口内根据极线约束寻找的候选匹配点可能有若干个,因此需要使用基于灰度相关的密集型匹配方法对候选匹配点进行进一步的精确匹配,剔除误匹配点,使匹配精度达亚像素。设在第一幅图像中的一个特征点为 P_i ,以该特征点 P_i 为中心设定一个尺寸为 $(2m+1, 2n+1)$ 的邻域窗口,在第二幅图像中以候选匹配点为中心设定一个尺寸为 $(2m+1, 2n+1)$ 的邻域窗口进行灰度相关相似度计算,将误匹配点剔除,从而实现特征点的精确匹配。

5 在机测量实验与结果分析

为了验证本文方法的有效性,在车间数控机床上对带有斜面及多个孔特征的工件进行在机测量实验。实验测量系统由两台性能参数完全一样的 DH-HV2000FC 工业相机、Computar M2514-MP 镜头、1394a 图像采集卡、规格为 100×100 已知三维坐标的圆型靶标、计算机及相应图像处理

软件组成。如图 10 所示。

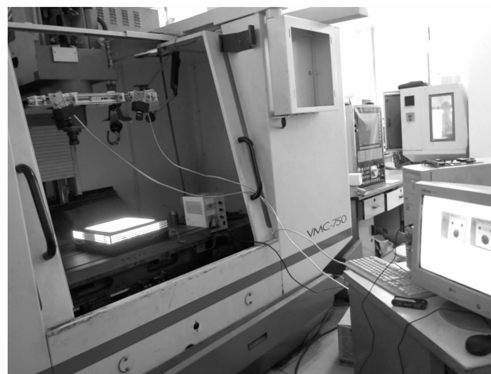


图 10 双目视觉测量系统

Fig. 10 Binocular vision measuring system

调整好相机的位置及角度后,使用平面圆靶标对测量系统进行标定。通过移动数控机床工作台使工件置于合适的位置采集工件图像对,如图 11。

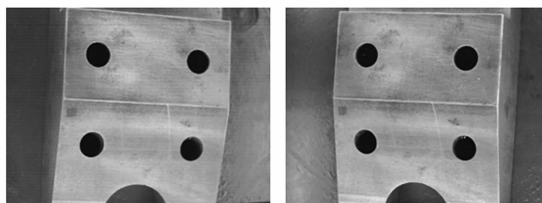


图 11 待测工件图像对

Fig. 11 Images of measured workpiece

采用 Canny 边缘检测算子提取工件轮廓,使用多边形逼近法提取轮廓关键特征点,如图 12 所示。

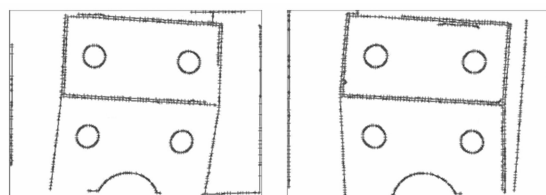


图 12 多边形逼近法提取工件轮廓关键特征点

Fig. 12 Extraction of key feature points for workpiece contours by using polygonal approximation method

使用基于极线约束的特征点匹配算法对提取的工件轮廓关键特征点进行匹配,结果如图 13 所示。

计算各匹配特征点的三维坐标值,图 14 为显

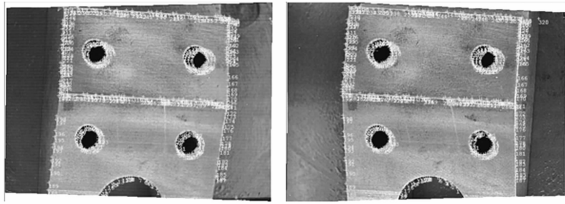


图 13 基于极线约束的特征点匹配

Fig. 13 Feature point matching based on epipolar constraints

示的特征点点云。

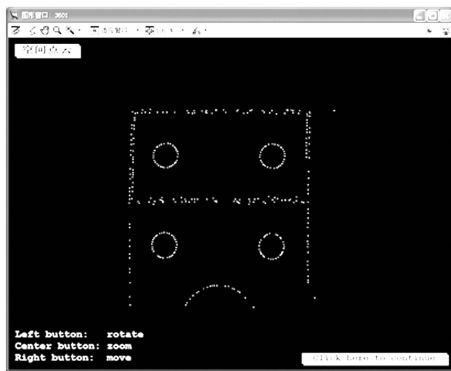


图 14 三维特征点云

Fig. 14 3D reconstruction of feature points

对空间点云数据进行空间曲线和直线^[12-13]的拟合处理,并计算出工件的关键尺寸。由于系统所用摄像机视场有限,图 11 所示图像对处理后只能得到图 15 中部分尺寸。利用该测量系统对车间加工现场工件不同部位进行多次拍照检测,测量结果如图 15 和表 1 所示。

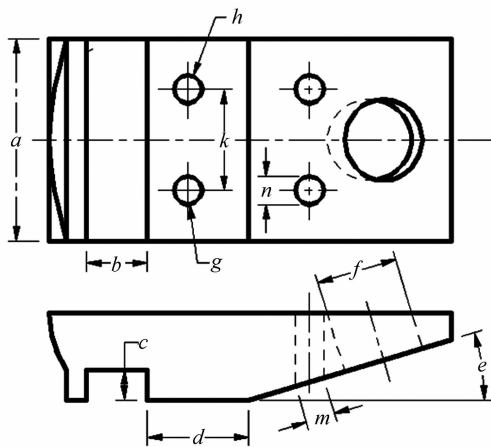


图 15 零件关键尺寸图

Fig. 15 Key dimensions of the workpiece

由表 1 数据可得,该双目视觉测量系统在本次试验中对三维空间线性尺寸的测量精度基本达 ±1% 以上,对三维空间非线性尺寸的测量精度达 ±1.3% 以上。

表 1 工件主要尺寸测量结果

Tab. 1 Measurement results for key

dimensions of the workpiece (mm)

	参考值	测量结果	误差	相对误差
尺寸 a	99.64	99.84	0.20	0.20%
		99.81	0.17	0.17%
		99.82	0.18	0.18%
尺寸 b	29.81	29.67	-0.14	-0.47%
		30.12	0.31	1.04%
		29.93	0.12	0.40%
尺寸 c	15.10	15.20	0.10	0.67%
		15.09	-0.01	-0.08%
		15.06	-0.04	-0.24%
尺寸 d	51.00	51.38	0.38	0.75%
		50.84	-0.16	-0.31%
		51.47	0.47	0.92%
尺寸 e	16.67	16.54	-0.13	-0.76%
		16.56	-0.11	-0.66%
		16.51	-0.16	-0.98%
尺寸 f	40.87	40.76	-0.11	-0.26%
		41.00	0.13	0.31%
		41.10	0.23	0.56%
尺寸 g	14.16	14.06	-0.10	-0.68%
		14.17	0.01	0.07%
		14.02	-0.14	-0.99%
尺寸 h	14.19	14.29	0.10	0.73%
		14.03	-0.16	-1.13%
		14.07	-0.12	-0.82%
尺寸 k	59.90	59.83	-0.07	-0.11%
		59.99	0.09	0.16%
		59.99	0.09	0.16%
尺寸 m	14.56	14.52	-0.04	-0.26%
		14.47	-0.09	-0.64%
		14.41	-0.15	-1.04%
尺寸 n	13.95	13.84	-0.11	-0.79%
		13.77	-0.18	-1.27%
		13.87	-0.08	-0.57%

注:表中参考值为三坐标测量机测量结果

6 结 论

双目立体视觉方法针对不同的问题背景,基

于不同的出发点和思路,已经取得了一系列成果,但将其应用于工件的在机三维测量较为少见,这是由于采用该方法在车间数控机床上对工件关键几何尺寸进行三维测量时会由于车间环境复杂,

待测工件图像易存在噪声、干扰等,使测试难度很大。本文用所搭建的测量系统在车间加工现场对工件进行了检测,实验结果表明,检测精度达 $\pm 1.3\%$ 以上。

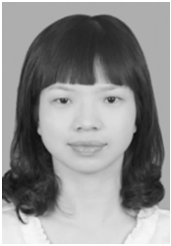
参考文献:

- [1] 王健强,刘宝柱,任玉峰,等. 基于双目视觉的汽车风挡玻璃智能涂胶系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2010(1):5-10.
WANG J Q, LIU B Z, REN Y F, *et al.*. Research on automotive windshield gluing system based on binocular vision[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2010(1):5-10. (in Chinese)
- [2] 李亮,赵转萍. 圆筒型热态锻件尺寸的立体视觉测量方法研究[J]. 传感器与微系统,2010,29(4):49-51.
LI L, ZHAO Z P. Research on dimensional measurement of heavy cylindrical forging at high temperature based on binocular stereo vision[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(4):49-51. (in Chinese)
- [3] 曲学军,张璐. 基于双目视觉的三维测量方法[J]. 计算机仿真,2011,28(2):373-377.
QU X J, ZHANG L. 3D measurement method based on binocular vision technique [J]. *Computer Simulation*, 2011,28(2):373-377. (in Chinese)
- [4] 张虎,肖中凯,方建军. 基于双目视觉的工件三维坐标提取方法研究[J]. 西安文理学院学报:自然科学版,2006,9(4):62-65.
ZHANG H, XIAO Z K, FANG J J. A construction method of binocular vision system by three-dimensional coordinates [J]. *Journal of Xi'an University of Arts & Science: Nat. Sci. Ed.*, 2006,9(4):62-65. (in Chinese)
- [5] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2008:96-128.
ZHANG G. *Machine Vision*[M]. Beijing: Science Press, 2008:96-128. (in Chinese)
- [6] 王中任. 大型工件在机视觉测量关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2009.
WANG Z R. *Study on key technologies of on-machine vision measurement for large-scale work piece*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [8] LEE S, CHUNG S. A comparative Performance Study of Several Global Thresholding Techniques for Segmentation [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1990,52:171-190.
- [9] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979,9(1):62-66.
- [10] 郑军,刘正文,马兆瑞,等. 基于最小误差逼近的轮廓特征点提取[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008(2):165-168.
ZHANG J, LIU Z W, MA Z R, *et al.*. Extraction of outline feature points based on the minimum approach error [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2008(2):165-168. (in Chinese)
- [11] 张镇,吕秋娟,郑重. 基于几何结构的零件切片轮廓特征点提取方法[J]. 工具技术,2009,43(10):31-35.
ZHANG Z, LV Q J, ZHENG Z. Extraction methods of slicing outline feature points of parts based on geometrical structures [J]. *Tool Engineering*, 2009,43(10):31-35. (in Chinese)
- [12] 张晶,黄琴,兰红军,等. 工程测量中空间圆的拟合方法研究[J]. 计量与测试技术,2011,38(9):31-32.
ZHANG J, HUANG Q, LAN H J, *et al.*. Fitting method for 3D circular object in engineering surveying [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2011,38(9):31-32. (in Chinese)
- [13] AHN S J, RAUH W, WARNECKE H J. Least-squares orthogonal distances fitting of circle, sphere, ellipse, hyperbola and parabola [J]. *Pattern Recognition*, 2001,34(12):2283-2303.

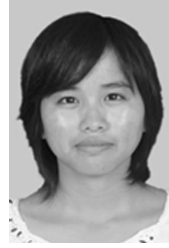
作者简介:



全燕鸣(1957—),女,江西南城人,博士,教授,博士生导师,1982年于江西工学院获得学士学位,分别于1993年和1997年在华南理工大学获得硕士、博士学位,主要从事机械制造及其自动化技术、制造过程中的检测技术、机器视觉应用研究。E-mail: meymquan@scut.edu.cn



黎淑梅(1986—),女,江西赣州人,硕士,2008年于合肥工业大学获得学士学位,2011年于华南理工大学获得硕士学位,主要从事机器视觉,智能检测等方面的研究。E-mail: smlis307@126.com



麦青群(1989—),女,广东吴川人,博士研究生,2011年于华南理工大学获得学士学位,主要从事机械制造及其自动化方面的研究。E-mail: qingq.mai@mail.scut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)