

基于机器视觉的五坐标机床旋转轴误差检测方法*

孙惠娟¹ 蒋红海² 殷国富¹

(1. 四川大学制造科学与工程学院, 成都 610065; 2. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650093)

摘要: 提出了一种利用机器视觉技术对五坐标机床旋转轴转角定位误差进行检测的方法。首先,通过制作特定的标志,用 CCD 相机获取标志图像;然后,通过数字图像处理技术对所获得的图像进行分析处理;最后,根据标志在不同位置处的相对转角偏差计算机床旋转轴的转角定位误差,实现五坐标机床旋转轴转角定位误差的辨识和测量。同时,将该方法与传统检测方法进行对比,实验结果表明,所提出的检测方法简单、高效,可以实现机床旋转轴误差的快速检测,并为五坐标机床旋转轴误差的补偿提供了计算依据。

关键词: 五坐标机床 旋转轴 误差检测 机器视觉 图像处理

中图分类号: TH161+.21; TG659 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0293-06

Error Measurement Method for Rotation Axes of Five-axis Machine Tool Based on Machine Vision

Sun Huijuan¹ Jiang Honghai² Yin Goufu¹

(1. School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

2. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: A measurement method was proposed for rotation axes of five-axis machine tool based on machine vision. Firstly, the vision technology was adopted to obtain sign images by using CCD camera. Then, the digital image processing techniques were used to analyze these images. At last, the positioning errors of rotary axes were identified by calculating the relative rotary errors at different positions of rotation axes of machine tool. Comparing to traditional method, the experimental results showed that the proposed method with a simply, high efficiency and application value provided a computation basis for the error compensation of a machine tool.

Key words: Five-axis NC machine tool Rotary axis Errors measurement Machine vision Image processing

引言

五坐标机床比三坐标机床增加了两个旋转轴,由此机床加工的灵活性大大增强,材料切除率和工件的表面质量也得到了极大提高^[1]。五坐标机床具有许多普通机床无法比拟的优点,但是其加工精度却往往低于普通机床,主要原因在于,增加的2个旋转轴由于缺少精度标定及误差补偿的方法,因此旋转轴的误差成为五坐标机床准静态误差和动态误

差的主要来源。对五坐标机床旋转轴进行精度标定及误差补偿是提高机床旋转精度的关键问题^[2]。传统三坐标机床各项误差元素的检测技术已经较为成熟,对于五坐标机床旋转轴的检测技术尚无统一标准。目前国内外研究人员在机床旋转轴误差检测方面已作了大量研究^[3-12]。上述检测方法存在以下缺点:采用的检测仪器主要有专用的激光干涉仪和球杆仪,用激光干涉仪检测,方便快捷,但价格比较昂贵;用价格低廉的球杆仪进行旋转轴联动检测,

检测路径的计算条件及计算过程复杂;旋转轴与平动轴联动测量时,由于在测试过程中加入了平动轴的几何和运动误差,需对检测结果进行误差分离处理,辨识过程计算较复杂。而利用正12面或24面多棱镜及自准直仪对机床旋转轴进行误差检测,则需要制作特定的工装,检测过程繁琐,检测效率较低。此外,以上所述方法主要是针对工作台回转式五坐标机床进行检测,对于主轴头回转式和主轴头及工作台回转式五坐标机床回转轴的精度检测还很少见,因此目前的检测方法存在局限性。

本文提出一种采用机器视觉技术非接触测量检测机床旋转轴误差的检测方法,利用CCD相机获取机床旋转轴在不同位置处的图像,通过数字图像处理技术,计算分析机床旋转轴转角定位误差,最后,将该方法与传统检测方法进行对比来验证该方法的有效性。

1 基本理论

1.1 机器视觉技术

机器视觉检测系统是采用CCD相机将被检测的目标转换成图像信号,传送给专用的图像处理系统,根据像素分布、亮度和颜色等信息,转换成数字化信号,图像处理系统对这些信号进行各种运算来抽取目标的特征,如面积、数量、位置、长度,再根据预设的允许度和其他条件输出结果,包括尺寸、角度、个数、合格/不合格、有/无等,实现自动识别功能。机器视觉检测系统主要用于一些不适合于人工作业的危险工作环境或人工视觉难以满足要求的场合及一些大批量的生产、检测过程中。由于机器视觉系统可以快速获取大量信息,而且易于自动处理,也易于同设计信息以及加工控制信息集成,因此,机器视觉系统在现代自动化生产和农业生产等领域得到了广泛应用^[13~19]。

1.2 图像处理方法

1.2.1 边缘提取算法

图像的边缘是图像最基本的特征之一,边缘处的图像集中了图像的大部分信息,对于整个图像场景的识别与理解非常重要,同时也是图像分割所依赖的重要特征^[20]。边缘检测的效果将直接影响到图像的分析、识别和理解,因此在对图像进行处理时常需对其边缘信息进行提取。最常用的边缘检测算法有Roberts算子、Prewitt算子、Sobel算子、Laplacian算子和LOG算子等,其中前3个属于一阶微分算子,后2个属于三阶微分算子。

1.2.2 最小二乘椭圆拟合中心

最小二乘法椭圆拟合是较常用的椭圆拟合方

法^[21~22],其基本原理是先假设椭圆参数,得到每个待拟合点到该椭圆的距离之和,并求出使这个和最小的参数。假设一般形式的椭圆方程为

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (1)$$

求目标函数

$$f(A, B, C, D, E, F) =$$

$$\sum_{i=1}^n (Ax_i^2 + Bx_iy_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F)^2$$

的最小值来确定式(1)中的各个系数,由此得出所拟合的椭圆。

2 机器视觉检测方法

采用机器视觉进行机床旋转轴定位精度检测的方法分为图像获取、图像处理及分析。图像获取包括检测标志制作与固定、相机和光源安装等;图像处理包括对图像边缘提取、圆心位置确定及图像在不同旋转角度下相对角度变化计算等。具体检测及处理流程如图1所示。



图1 机器视觉检测方法流程图

Fig. 1 Flow chart of machine vision measurement

2.1 标志设计

由于机床旋转轴与周围部件色差太小,如果直接利用相机对旋转轴上特定部位进行拍摄,则获取图像标志点与图像背景对比度不高,不利于图像后期处理。因此在利用机器视觉进行检测时,需要根据机床旋转轴的特点制作具有代表性的标志固定于机床旋转轴上,随着机床旋转轴的旋转,圆形标志在旋转平面发生转动,利用同一个标志在不同图像中旋转的相对角度差来计算机床旋转轴转动的转角误差。

2.2 图像获取和图像处理

机床旋转轴旋转一定的角度,用相机拍摄机床旋转轴上的标志在不同位置处的图像,并对图像进行标记以利于后续的处理和分析。

2.2.1 图像边缘提取

在透视相机模型下,实际获取得到的圆形图像是椭圆,因此需要对椭圆的边界进行检测,经过边缘检测和阈值处理过程后,得到椭圆边缘的二值图像。本文利用Canny算子对所获得的图像进行图像边缘像素位置信息提取。

2.2.2 最小二乘椭圆拟合中心

提取图像边缘点后,为了精确地定出圆心的位置,需对图像的边缘点进行拟合。本文根据最小二

乘原理(残差平方和最小),用椭圆来拟合圆轮廓并找出椭圆中心。

2.2.3 计算偏转角度误差

经椭圆拟合定出各同心圆的中心点后,利用图像中标志在旋转前后的变化量来计算两次旋转的角度差,即

$$\Delta\theta' = \theta'_{i+1} - \theta'_i$$

并与机床理论上两次转动的角度差

$$\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i$$

进行对比,计算机床的转角误差为

$$E_\theta = \Delta\theta - \Delta\theta'$$

3 机床旋转轴转角定位误差检测

3.1 实验设备及仪器

将本文提出的基于机器视觉技术检测五坐标机床旋转轴转角定位误差的方法应用于四川省某机床厂生产的五坐标加工中心上(图 2),以该机床 B 轴(转动范围为 0°~110°)转角定位精度检测为例,按照第 2 节提出的方法进行检测和分析。

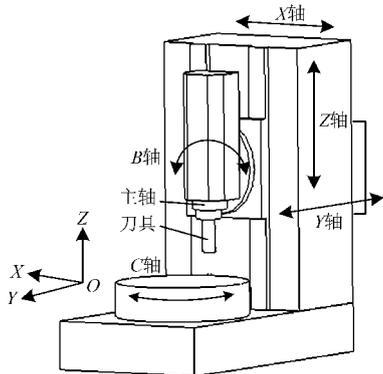


图 2 五坐标机床结构

Fig. 2 Structure of five-axis machine tool

机器视觉检测系统由圆形标志、光源和相机组成。检测系统的硬件部分如图 3 所示。其中数码相机(1 000 万像素)、所制作的(部分)圆形标志及标志尺寸(单位:mm)如图 4 所示。光源可以根据现场条件进行选择,本实验中由于现场光照条件比较好,因此未利用光源。

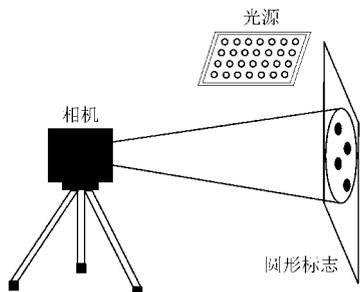


图 3 机器视觉检测系统

Fig. 3 Measurement system of machine vision

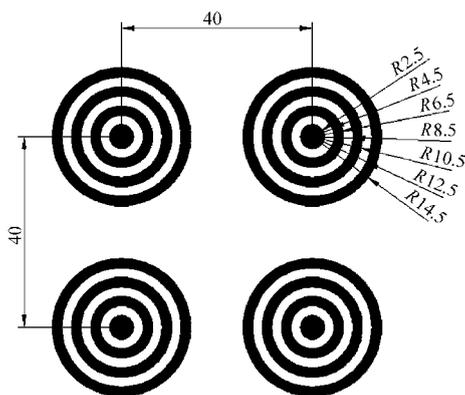


图 4 检测所用的标志

Fig. 4 Signs used for measurement

3.2 图像获取过程

(1)将所制作的标志(图 4)固定于机床旋转轴上,尽量保持标志面平整。

(2)安装好相机和光源,调整相机位置与焦距,保证标志在相机的成像区域内。

(3)机床旋转轴顺时针和逆时针转动不同的角度,当机床摆头转动到规定的角度时,摆头停止转动,相机拍摄此时机床旋转轴上的标志图片,并将图片存于计算机内用于图片的后续处理和分析。本文在进行实验时采集了机床旋转轴从 0°转动到 90°的图像,每隔 10°拍摄一次图片,共采集到 10 张图片。

3.3 图像处理过程

3.3.1 标志图像边缘提取

仅对机床 B 轴在 0°和 10°位置的图像进行分析说明,其他角度的图像处理方法与此相同。图 5 和图 6 分别为实验对象机床 B 轴在 0°和 10°位置所拍摄的现场图像,在对图像进行处理前已利用图 7 所示标定图像对相机进行标定。图 5 和图 6 中所有的同心圆都应进行计算和处理,为了更清晰地显示图中的内容,本文及后续图像处理介绍均以图 5 和图 6 中大圆圈内的 4 组同心圆为例进行说明。

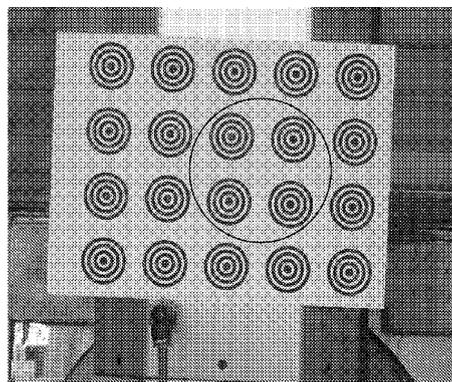


图 5 0°时标志

Fig. 5 Sign in 0°

利用 Matlab 自带的边缘提取函数对获得的图像(图 5 和图 6)进行边缘信息提取,提取边缘后的

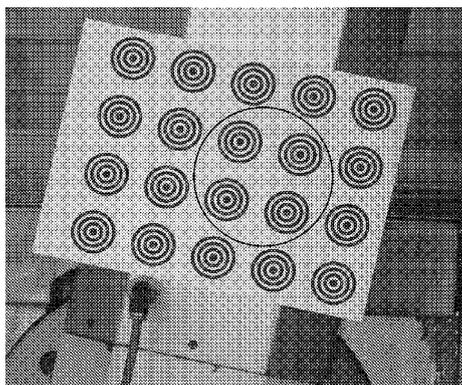


图6 10°时标志

Fig.6 Sign in 10°

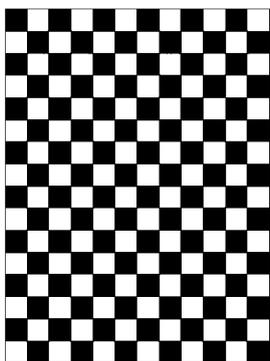


图7 标定图像

Fig.7 Calibration image

图像如图8和图9所示。从图中可以看出从原始图像中提取的边缘点组成的图形并不是光滑的圆,而是有一些断点和散点,因此为了精确地求出圆心的位置需对这些边缘点进行椭圆拟合。

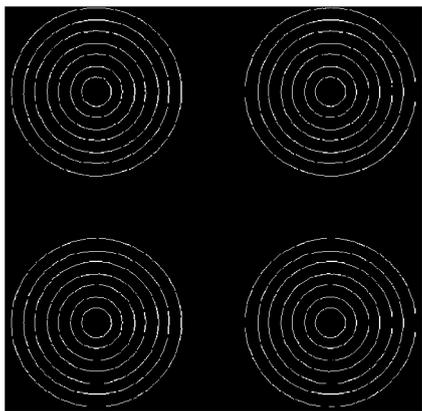


图8 提取图形边缘(0°)

Fig.8 Boundary information extraction (0°)

3.3.2 椭圆拟合求圆心位置

根据最小二乘椭圆拟合算法对提取边缘后的图像(图8和图9)进行椭圆拟合,拟合后图像如图10和图11所示。图中线条为拟合后的椭圆,从图中也可以看到一些白色的散点,这些散点是从原始图像提取出的边缘点中未被拟合的点。

由拟合后的椭圆分别求出标志在0°和10°处各

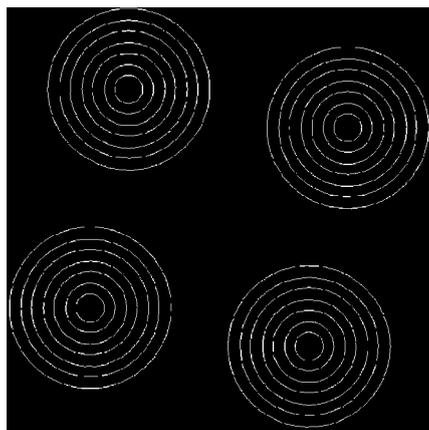


图9 提取图形边缘(10°)

Fig.9 Boundary information extraction (10°)

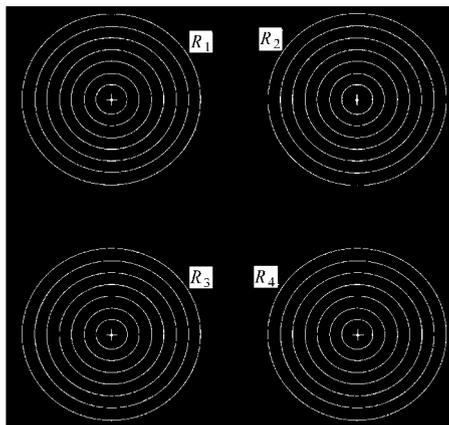


图10 椭圆拟合(0°)

Fig.10 Ellipse fitting (0°)

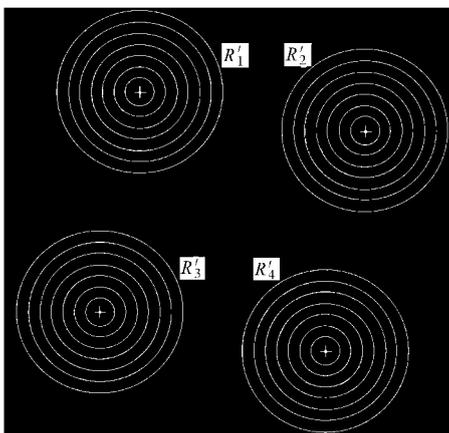


图11 椭圆拟合(10°)

Fig.11 Ellipse fitting (10°)

组同心圆的圆心 R_1, R_2, R_3, R_4 和 R'_1, R'_2, R'_3, R'_4 的位置。标志在0°和10°处各组圆心点的变化如图12所示。

3.3.3 相对转角误差计算

由图12可知,理论上连接各圆心的6条线 $\overline{R_1R_2}, \overline{R_1R_3}, \overline{R_1R_4}, \overline{R_2R_3}, \overline{R_2R_4}, \overline{R_3R_4}$ 在0°和10°位置处的相对角度差为10°,由于装配、震动、热变形等因素影响,机床旋转轴在实际转动过程中与理论值

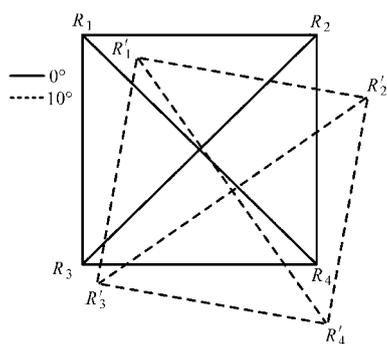


图12 图像处理结果

Fig. 12 Results of image processing

之间存在偏差,因此机床旋转轴在实际转动后所采集的标志图像与理论上旋转后应转动的位置之间必然存在偏差,该偏差主要由机床旋转轴的转角定位误差引起。根据各条直线旋转前后斜率的变化计算旋转的角度,并与机床旋转轴理论转动的角度相比较得出转角定位误差,取各条线旋转前后的误差平均值为机床旋转轴的旋转误差,其计算结果如图13所示。

3.4 检测结果分析

为了验证本文所提检测方法的有效性,将分别利用机器视觉方法和多面棱体与自准直仪相结合的方法对机床旋转轴B轴进行0°到90°转角定位精度检测,两种方法的检测结果对比如图13所示。

由图13可知,两种方法的检测结果比较接近,

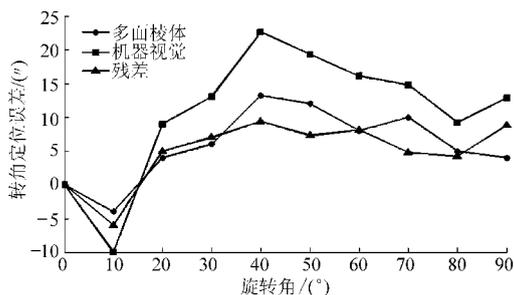


图13 检测结果

Fig. 13 Measurement result

其残差最小值为4.2",残差平均值为4.86"。与利用多面棱体方法相比,利用本文提出的旋转轴误差检测方法检测原理与检测过程更简单、检测效率更高,且对检测设备及检测条件的要求不高。

4 结论

(1)利用机器视觉技术对机床旋转轴检测的原理及方法简单、高效。与传统方法相比,仅需制作特定的标志固定于要检测的机床旋转轴上,利用相机对不同位置处的标志进行拍照即可实现非接触测量,且检测结果与传统检测方法比较接近。

(2)易于实现模块化集成。所提检测方法的关键是图像的处理与分析,对于获取的图像可通过编制相关图像处理程序并进行分析处理即可获得机床转角的定位误差,无需进行人工记录与分析计算。

参考文献

- Hsu Y Y, Wang S S. A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(2):352~360.
- 廖平兰. 机床加工过程综合误差实时补偿技术[J]. 机械工程学报, 1992, 28(2):65~68.
Liao Pinglan. The integrated error real-time compensation of machining process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1992, 28(2):65~68. (in Chinese)
- Lei W T, Paung I M, Chi Chen. Total ballbar dynamic tests for five-axis CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(6):488~499.
- Lei W T, Sung M P, Liu W L, et al. Double ballbar test for the rotary axes of five-axis CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(2):273~285.
- 张葳,王娟. 五轴联动数控机床旋转轴几何误差测量与分离方法[J]. 机电工程技术, 2008, 37(9):16~19.
Zhang Wei, Wang Juan. A novel kind of geometric errors measurement and identification methods of 5-axis machine tool rotary axes[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2008, 37(9):16~19. (in Chinese)
- 周玉清,陶涛,梅雪松,等. 旋转轴与平移轴联动误差的快速测量及溯源[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(5):80~84.
Zhou Yuqing, Tao Tao, Mei Xuesong, et al. Rapid error measurement and trace of simultaneous rotary-translational axes collaborative motion[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2010, 44(5):80~84. (in Chinese)
- 付璇,田怀文,朱绍维. 五轴数控机床旋转轴几何误差测量与建模[J]. 机械设计与制造, 2011(2):157~159.
Fu Xuan, Tian Huaiwei, Zhu Shaowei. Geometric error measurement and modeling for five-axis CNC machine tool with rotary axes[J]. Machinery Design and Manufacture, 2011(2):157~159. (in Chinese)
- 张宏韬. 双转台五坐标数控机床误差的动态实时补偿研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
Zhang Hongtao. Research on dynamic and real-time error compensation for two turntable five-axis NC machine tool[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- 张大卫,商鹏,田延岭,等. 五轴数控机床转动轴误差元素的球杆仪检测方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(22):2737~2741.

- Zhang Dawei, Shang Peng, Tian Yanling, et al. A DBB-based alignment error measurement method for rotary axis of 5-axis CNC machine tool[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(22): 2737~2741. (in Chinese)
- 10 刘飞. 五轴数控机床回转轴的误差检测技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2009(4): 133~135.
Liu Fei. Error calculation for rotation axes of five-axis machine tool[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2009(4): 133~135. (in Chinese)
- 11 高秀峰, 刘春时, 李焱, 等. 基于激光干涉仪的 A/C 轴双摆角铣头定位误差检测与辨识[J]. 机械设计与制造, 2011(12): 212~214.
Gao Xiufeng, Liu Chunshi, Li Yan, et al. Positioning errors detection and identification for A/C axes bi-rotary milling head based on laser interferometer[J]. Machinery Design and Manufacture, 2011(12): 212~214. (in Chinese)
- 12 崔勇, 徐岩. 精密转台角位移精度的测量方法研究[J]. 计量与测试技术, 2012, 39(2): 1~2.
Cui Yong, Xu Yan. Research of angular displacement accuracy measuring method for precise turntable[J]. Metrology & Measurement Technique, 2012, 39(2): 1~2. (in Chinese)
- 13 伍济钢, 宾鸿赞. 薄片零件尺寸机器视觉检测系统研究与开发[J]. 机床与液压, 2010, 38(17): 86~88.
Wu Jigang, Bin Hongzan. Research and development of dimensional inspection system for thin sheet part based on machine vision[J]. Machine tool and Hydraulics, 2010, 38(17): 86~88. (in Chinese)
- 14 何博侠, 张志胜, 徐孙浩, 等. 大尺寸机械零件的机器视觉高精度测量方法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1): 5~10.
He Boxia, Zhang Zhisheng, Xu Sunhao, et al. Research on high-precision machine vision measurement method for large scale parts[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(1): 5~10. (in Chinese)
- 15 贺雅琴, 李琳. 基于机器视觉的零件尺寸检测的研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(6): 102~104.
He Yaqin, Li Lin. Research for part size inspection base on machine vision[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(6): 102~104. (in Chinese)
- 16 司永胜, 乔军, 刘刚, 等. 基于机器视觉的苹果识别和形状特征提取[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 161~167.
Si Yongsheng, Qiao Jun, Liu Gang, et al. Recognition and shape features extraction of apples based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 161~167. (in Chinese)
- 17 陈兵旗, 孙旭东, 韩旭, 等. 基于机器视觉的水稻种子精选技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 168~174.
Chen Bingqi, Sun Xudong, Han Xu, et al. Rice seeds selection based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 168~174. (in Chinese)
- 18 王海青, 姬长英, 顾宝兴, 等. 基于机器视觉和支持向量机的温室黄瓜识别[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 163~168.
Wang Haiqing, Ji Changying, Gu Baoxing, et al. In-greenhouse cucumber recognition based on machine vision and least squares support vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 163~168. (in Chinese)
- 19 Li Daoliang, Yang Wenzhu, Wang Sile. Classification of foreign fibers in cotton lint using machine vision and multi-class support vector machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 274~279.
- 20 黄剑玲, 邹辉. 一种精确的自适应图像边缘提取方法[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(9): 53~55.
Huang Jianling, Zou Hui. An exact method for adaptive image edge detection[J]. Computer Engineering & Science, 2009, 31(9): 53~55. (in Chinese)
- 21 Gander W, Golub G H, Strelbel R, et al. Least-squares fitting of circles and ellipses[J]. BIT Numerical Mathematics, 1994, 34(4): 558~578.
- 22 Rosin P L. Ellipse fitting by accumulating five-point fits[J]. Pattern Recognition Letters, 1993, 14(8): 661~669.