

文章编号 1004-924X(2015)增-0497-07

基于图像处理的轮胎胎面自动测长系统

杨 凯, 陈祥光*, 金怀平

(北京理工大学 化工与环境学院, 北京 100081)

摘要: 为了实现对轮胎胎面长度的在线自动测量, 研究了生产过程中采用的图像处理及测量算法, 建立了基于图像处理的轮胎胎面测长系统。为了避免现场光源的影响, 分别采用了中值滤波、灰度拉伸等方法对图像进行预处理, 并采用大津(OSTU)算法对图像进行二值化处理。采用线性拟合的算法对像平面的轮胎边缘进行拟合, 建立像平面的轮胎边缘直线方程。针对现场标定给安装带不便, 系统预制了多个基准样本点, 采用多元线性回归的方法确定坐标变换参数。通过已确定的坐标变换得出物理坐标系中胎面首尾边缘直线的方程, 进而计算出胎面的长度。实验结果表明, 对于多种规格的胎面进行多次测量, 其测量系统的精度 ≤ 2 mm, 3σ 值在 1.1 mm 以内。该测量系统能够满足生产工艺的测量要求, 可实现胎面长度的在线自动测量, 并具有安装测试方便、运行稳定等特点。

关键词: 轮胎胎面; 长度测量; 边缘识别; 多元线性回归; 坐标变换; 图像处理

中图分类号: TP391.4; TH821.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0497

Automatic measurement system of tire tread length based on image processing

YANG Kai, CHEN Xiang-guang*, JIN Huai-ping

(School of Chemical Engineering & Environment, Beijing
Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding Author, E-mail: xgcl@bit.edu.cn

Abstract: To measure the tire tread length on-line automatically, a length measurement system was established for the tire tread, and image processing and measuring algorithms used in productive process were investigated. For the purpose of removing the influence of light in a real field, several methods such as median filtering, gray stretching *etc.*, were used to preprocess the image, and the OSTU algorithm was used to accomplish the image binary process. The edge of the tire tread is straight line, so linear fitting algorithm was used to fit the linear equation in the image plane. To avoid the inconvenience in installation caused by calibration on the site, a couple of measurement reference points were reserved. The coordinate transformation parameters were obtained using the multiple linear regression method. The line equation of the tread head and the tread tail in the physical coordinate system were determined by the coordinate transformation. Therefore, the length of tire tread could be calculated. Experimental results indicate that the precision of the measuring system proposed in this

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-07.

基金项目: 部级专项基金资助项目(No. 20091041005)

paper is less than or equal to 2 mm for multiple measurement of various tire treads, and the 3σ value is less than 1.1 mm. Although the tire tread is elastomeric, the measuring system can satisfy the production requirement. The system is characterized by convenient installation and testing, system stable operation, etc.

Key words: tire tread; length measurement; edge detection; multiple linear regression; coordinate transformation; image processing

1 引言

随着机器视觉技术的不断发展,基于图像处理的工件测量系统被广泛的应用于航天航空、高精度模具加工、汽车制造等领域^[1-2]。在工业系统中,对于工件尺寸的非接触 CCD 测量应用越来越多,这些系统在提高生产效率的同时也存在着测量算法复杂、相机视角和精度对相机选型的制约,相机安装校准不便等问题^[3-5]。在 CCD 测量和校准方面,许多学者做了大量研究。乔培玉利用加权整体最小二乘法完成了十字丝的直线拟合,实现对经纬仪的标定^[6]。Y. Furukawa 用 Bundle Adjustment 算法实现了多视角立体相机的参数标定^[7]。

随着汽车的大量生产,轮胎的使用量也越来越大。胎面是轮胎的重要组成部件,胎面的长度直接影响着轮胎结构,是轮胎生产过程中的重要质量指标。目前我国大多数轮胎厂对胎面的长度检测为离线手工测量抽检。测量效率低,劳动强度大且准确性差。胎面生产过程迫切需要测量速度快,操作简单及测量精度相对较高的测量装置,用以减少劳动强度,增大生产效率,提高检测的准确性^[8]。部分胎面测长系统采用在线旋转编码器的方式测量,通过光电编码器测量运送带电机的转角来测长。在生产过程中,胎面和运送带之间容易打滑,其测长精度通常难以保证。CCD 图像传感器的像素间距小,几何精度高,配置适当的光学系统,可以获得很高的分辨率,特别适用于各种精密非接触式在线检测,可以避免接触式测量中难以解决的打滑问题^[9-10]。本文通过对轮胎胎面生产工艺的摸索和研究,提出了 CCD 相机+PC (工业级)方案。该方案采用图像处理的方法来测量胎面长度,在保证测量精度的条件下,可实现胎面长度的非接触在线自动测量。考虑到轮胎胎面测量的实际需求,使用了效率较高的精简算法。针对胎面的实际测量长度,考虑到相机选型时视

角和分辨率的约束问题,提出了首末端分别针对基准线测量距离的方案,降低了对于镜头视角的要求。针对实际生产中安装和检修后重新校准相机参数的不便问题,提出了预制基准点,通过多元回归的方法自动校准相机参数的策略。

2 系统的构成原理及计算方法

2.1 胎面在线监控系统工作原理

系统由检测系统(PLC 系统),工业黑白 CCD 相机,图像采集卡,工业 PC 构成。检测与控制系统通过光电检测开关检测到胎面的位置将信号触发摄像机拍摄图像,图像通过采集卡传送至现场工业 PC 机,由图像处理软件进行识别、分析、计算得出图像中胎面的尺寸。图像中胎面尺寸(像素数)和实际的尺寸存在线性的对应关系。通过尺寸校准即可得到实际的轮胎胎面尺寸。PC 对长度和配方规定值进行比对并记录。遇到不合格品时,通过 PROFIBUS-DP 总线通信给控制系统指令进行废品分离。检测与控制系统采用了西门子 S7-300 PLC, CCD 相机采用了 DH-HV3151 工业相机,单色图像采集卡为 IMA PCI-14,信号采集速度可达 30 次/秒,可以满足实时性要求。胎面测长系统如图 1 所示。

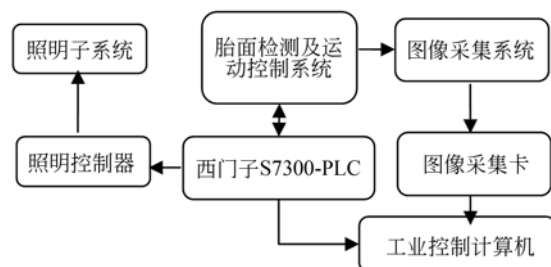


图 1 轮胎胎面测长系统原理图

Fig. 1 Block diagram of image measuring system for tire tread

2.2 实施方案的设计

胎面生产的流程及测量系统的方案如图 2 所示。胎面胶在挤出机挤出成型后,由控制系统进行定长裁断,由于胎面是高分子弹性体,所以需等裁断完成形变恢复后,在自动检测机构上测长。整个系统由生产机构、自动收取检测机构和流转机构构成。系统共安装 2 个 CCD 相机分别用来测量胎面首部和尾部相对于基准线的偏差距离来得到胎面总的长度。

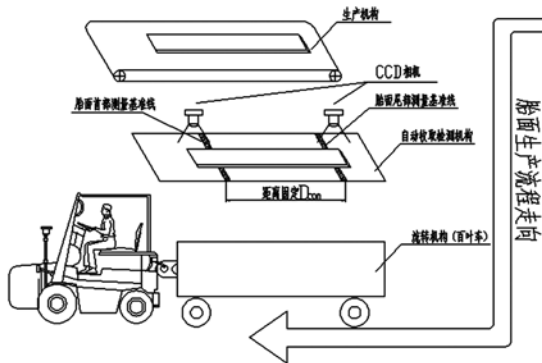


图 2 胎面在线测长系统的设计方案

Fig. 2 Design of online measuring system for tire tread

因为所需测量的所有规格的轮胎胎面的尺寸(长度)通常在 1.9~2.5 M 之间,考虑到摄像头的拍摄范围和测量精度需求等,在收取测量的基板上刻画基准线,在基准线上刻画多个坐标固定的基准点,用于后期坐标变换参数的标定。

3 测量系统的计算方法

测量系统采用 VC++ 开发应用软件。其中图像的处理包含中值滤波预处理、图像灰度拉伸、二值化,分析计算等。测量系统的图像处理流程如图 3 所示。

3.1 图像的预处理

在工厂生产区域,照明条件有限。光线的分布不太均匀。拍摄的照片容易收到现场光照条件和机械震动的影响,造成胎面图像边缘模糊,影响所测长度的精度。因此需要先对所拍图像进行降噪处理。

为了在抑制随机噪声的同时,尽量不使图像边缘模糊,采用了中值滤波的方法。由于中值滤波对于预置点等细节多的图像不适用(边缘像素的中值往往不是在点上的像素)^[11-12]。因此,基准点设置需有一定直径,以避免降噪时对基准点像

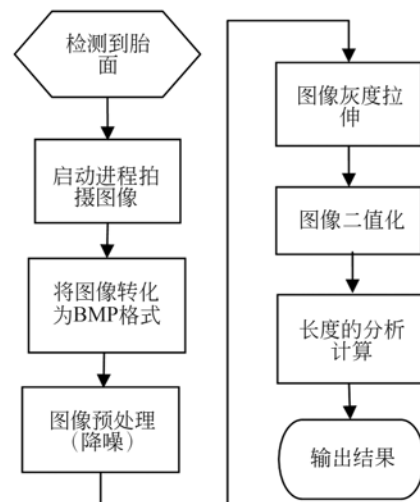


图 3 测量系统图像处理流程

Fig. 3 Flowchart of image processing

素造成影响。

中值滤波是一种非线性的图像平滑方法,与均值滤波器以及其他线性滤波器相比,它能够很好地滤除脉冲噪声,同时又能够保护目标图像边缘^[13-15]。它是一种邻域运算,类似于卷积,但其计算不是加权求和,而是把邻域中的像素按灰度级进行排序,然后选择该组的中间值作为输出像素值,中值滤波可定义为:

$$g(x, y) = \text{median}\{f(x-i, y-j) \mid (i, j) \in W\} \quad (1)$$

式中: $g(x, y)$ 和 $f(x-i, y-j)$ 分别为输出和输入像素灰度值, W 为模板窗口。 W 可以取线状、方形、十字形、圆形、菱形等。中值滤波实现过程如图 4 所示。

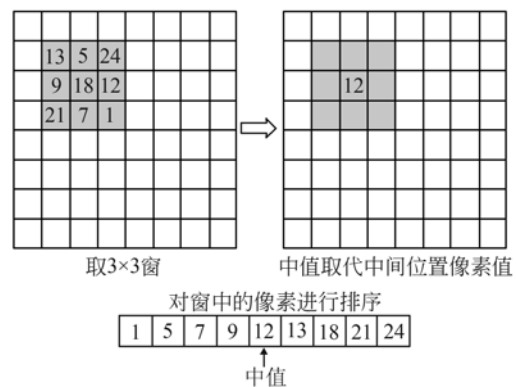


图 4 中值滤波原理

Fig. 4 Median filtering principle

标准的中值滤波器都是由一个奇数大小尺寸的滑动窗组成,通常为 3×3 窗或 5×5 窗等。为了保证边缘清晰,提高测长精度,采用 3×3 窗,该窗沿着图像数据的行方向逐像素滑动,在每一次滑动范围内,方形窗中的所有像素按照灰度值被排序,这组数据中的中值作为输出,替代原来窗函数的中心位置像素的灰度值。

3.2 图像灰度拉伸

由于受工业生产现场照明条件等限制,为了增强胎面及背景支撑面的对比度。抑制相对不感兴趣的灰度级,系统采用了分段线性灰度变换的方法对图像进行增强处理,如图 5 所示。

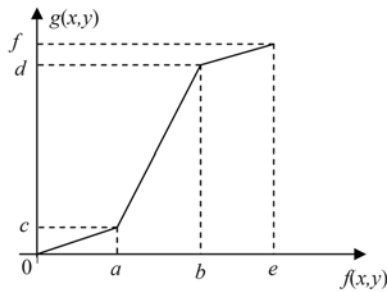


图 5 图像的灰度拉伸原理

Fig. 5 Principle of image gray stretch

变换的数学表达式为:

$$g(x, y) = \begin{cases} \frac{c}{a} f(x, y) & 0 \leq f(x, y) < a \\ \frac{d-c}{b-a} [f(x, y) - a] + c & a \leq f(x, y) \leq b \\ \frac{f-d}{e-b} [f(x, y) - a] + d & b < f(x, y) \leq e \end{cases} \quad (2)$$

其中: $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 分别表示坐标为 (x, y) 点的像素在灰度拉伸前后的灰度值。通过对现场图像的分析可以找到合理的分段点 a 、 b 和 e 的值。

3.3 图像的二值化

对图像进行处理,得出直方图。进行图像的二值化处理时,阈值的选择比较关键。在胎面加工检测环境中背景(底板)的颜色为橙色,胎面为黑色,二者对比较为明显。为了较准确的选择阈值,本文采用大津算法(OSTU法)。具体步骤如下:

(1) 计算直方图并归一化

可以得到图像灰度等级 $1 \sim M$, 第 i 级像素为

n_i 个,总像素数为 N ,则第 i 级灰度出现的概率为:

$$p_i = \frac{n_i}{N}. \quad (3)$$

(2) 计算图像的灰度均值:

$$\mu = \sum_{i=1}^M i \times p_i. \quad (4)$$

(3) 计算直方图的零阶距 $w[i]$ 和一阶距 $\mu[i]$:

$$W_0 = W[k] = \sum_{i=1}^k p_i, \quad (5)$$

$$\mu[k] = \sum_{i=1}^k i \times p_i, \quad (6)$$

$$w_1 = 1 - w[k]. \quad (7)$$

对一阶距作如下处理,即:

$$\mu_0 = \frac{\mu[k]}{w[k]}, \mu_1 = \frac{[\mu - \mu[k]]}{1 - w[k]}. \quad (8)$$

(4) 计算并找出最大类间方差,对应此最大方差的灰度值即为要找的阈值。其类间方差为:

$$\sigma^2[k] = w_0 (\mu - \mu_0)^2 + w_1 (\mu - \mu_1)^2. \quad (9)$$

即:

$$\sigma^2[k] = \frac{[\mu \times w[k] - \mu[k]]^2}{w[k] \times [1 - w[k]]}. \quad (10)$$

k 从 $1 \sim M$ 变化,当类间方差取得最大时的 k 即为所求的最佳阈值。

3.4 胎面边缘的识别

胎面的边缘是直线,通过对边缘直线的识别,建立像平面的边缘直线方程。通过坐标变换可以求出物理坐标系下的物件边缘直线方程,从而获取胎面的长度。

在取得二值化图像后,通过程序对图像的像素查询判断,可以得到胎面断面直线的像素点的坐标 $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots$, 可以用直线拟合(线性回归)的方法来得到像平面的直线方程 $y = a + bx$ 。

拟合过程运用最小二乘法,采用多个样本点,使平方和误差函数 $Q(a, b)$ 最小,即:

$$\text{Min } Q(a, b) = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2. \quad (11)$$

根据最小二乘原则,可解出:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, a = \bar{y} - b\bar{x}. \quad (12)$$

其中: n 为像素点数, \bar{x}, \bar{y} 为像素点对应坐标

的均值。

在获得直线方程后,为了剔除在二值化和曲线拉伸或噪声造成的个别偏离较大的点的影响,可按距离对远离拟合直线的样本点进行剔除:

$$d_t(x_t, y_t) = [y_t - (a + bx_t)]^2. \quad (13)$$

由于轮胎胎面具有弹性伸缩,在此,对 $d_t(x_t, y_t)$ 进行了排序,剔除距离较大的(阈值)样本点,重新进行线性回归,得到像平面的直线方程(对于精度要求更高的场合,可对阈值的选取进行进一步的分析)。

3.5 长度的分析计算

在工业现场,由于设备维修等原因,摄像机可能涉及到拆卸、重新安装等问题。如果采用固定的坐标标定方法,重新安装后需重新确定参数,很不方便,所以我们采用了数据拟合的方法来确定坐标变换矩阵的参数^[16-18]。

通过对拍摄图像的处理,可以得到像平面轮胎胎面边缘的直线方程和基准点的坐标。

采用针孔模型作为相机模型,建立相机坐标系和物理坐标系。像平面的坐标 (x_c, y_c, z_c) 和物理坐标 (x_w, y_w, z_w) , 满足如下转换关系,即:

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} + \mathbf{T}, \quad (14)$$

其中: \mathbf{R} 为坐标变换旋转矩阵, \mathbf{T} 为平移向量,即:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \mathbf{T} = \begin{pmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$x_w = a_{11}x_c + a_{12}y_c + a_{13}z_c + b_1$, 利用在基准线上的 16 个预制好的特殊样本(标定了颜色,直径 1 mm 的预制点,坐标已确定)

利用多元线性回归确定如下参数。

$a_{11}, a_{12}, \dots, a_{34}$ 即确定 \mathbf{R}, \mathbf{T} ;按最小二乘原则可得参数估计为:

$$\begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{13} \\ \vdots \\ a_{14} \end{pmatrix} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}_i, \quad (16)$$

式中: \mathbf{X} 为结构矩阵。

在坐标转换参数确定后,可以通过像坐标的

胎面首末端直线的方程精确的算出物理坐标系中对应的直线方程,二者之间的距离就是胎面的长度。(通过计算直线距离,排除了胎面摆放倾角对测长的影响)

4 测量实验与结果

在轮胎胎面生产工艺中,由于橡胶本身是弹性体,轮胎胎面在定长裁断后具有伸缩特性,其工艺过程如图 6 所示。因此,实际生产工艺要求测量精度为毫米级,通常的测量误差在 ± 4 mm。



图 6 胎面的测量

Fig. 6 The measurement of tread

表 1 记录了对 3 种规格的胎面进行测量的结果。

表 1 胎面长度测量结果

Tab. 1 Result of tread length measurement (mm)

序号	测量次数	胎面实长	算法测量值	3σ值
1	20	2 492.3	2 493.7	0.7
2	22	2 495.2	2 494.6	1.0
3	20	2 494.2	2 495.3	0.9
4	22	1 793.2	1 793.6	0.8
5	20	1 795.3	1 797.2	0.6
6	23	1 797.1	1 798.2	0.8
7	20	1 794.2	1 795.1	1.1

从表 1 可以看出,图像测量值与真实测量值间误差在 2 mm 内,且分布方差的 3σ 值在 1.1 mm 以内,可以很好的满足测量的误差要求。

5 结 论

本文分析了轮胎胎面生产的特点,研究了

CCD 相机在线测量的方法,并将其应用于胎面生产过程。在满足生产加工精度的前提下,实现了胎面长度的在线自动测量。首先介绍了胎面在线测长系统的构成原理,论述了测长系统的测量算法,针对胎面边缘的识别采用一元线性回归的方

法,运用多元线性拟合的方法对测量坐标系转换的参数进行计算,减少了系统对于 CCD 安装精度的要求。实验结果表明:测量系统对于胎面长度的测量误差小于 2 mm, 3σ 值在 1.1 mm 以内,测量精度能够满足轮胎胎面测长工艺的要求。

参考文献:

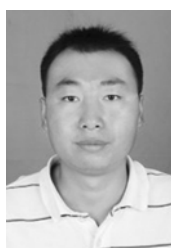
- [1] 王和顺,陈次昌,黄惟公. CCD测量误差的研究[J]. 光学技术,2009,35(3):402-403.
WANG H SH, CHENG C C, HUANG W G. Research on the error of CCD[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(3):402-405. (in Chinese)
- [2] Marvin Lindner, Ingo Schiller, Andreas Kolba, Reinhard Kochb. Time-of-Flight sensor calibration for accurate range sensing [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010, 114:1318-1328.
- [3] SAGAWAR, YAGIY. Accurate calibration of intrinsic camera parameters by observing parallel light pairs[C]. 2008 *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA: IEEE*,2008:1390-1395.
- [4] HAN I S, HAN C H, CHUNG C B J. Real-Time Property Prediction for an Industrial Rubber-Mixing Process with Probabilistic Ensemble Gaussian Process Regression Models[J]. *Appl. Polym. Sci.*, 2005, 95-967.
- [5] ZHOU H, LIU Y H. Accurate integration of multi-view range images using k-means clustering [J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(1):152-159.
- [6] 乔培玉,何昕,魏忠慧. 加权整体最小二乘法在光学自准直法测量挠曲角中的应用[J]. 光学精密工程,2012,20(9):1953-1960.
QIAO P Y, HE X, WEI Z H. Application of weighted total least squares in measurement of deflection angle with optical self-collimation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1953-1960. (in Chinese)
- [7] YASUTAKA F, JEAN P. Accurate Camera Calibration from Multi-View Stereo and Bundle Adjustment [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 84: 257-268.
- [8] 周义仁,殷勇辉. 轮胎外径和内径视觉测量系统[J]. 微计算机信息,2010,26(3):104-106.
ZHOU Y R, YIN Y H. The visual measurement system of Tyre outside diameter and inside diameter [J]. *Microcomputer Information*, 2010, 26(3): 104-106. (in Chinese)
- [9] 郝飞,史金飞,张志胜,等. 应用通用自回归模型实现图像的自适应滤波[J]. 光学精密工程,2014,22(1):186-192.
HAO F, SHI J F, ZHANG Z S *et al.*. Image adaptive filtering using general auto-regressive model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 189-192. (in Chinese)
- [10] MARC POLLEFEYS, REINHARD KOCH, LUC VAN GOOL. Self-Calibration and Metric Reconstruction In spite of Varying and Unknown Intrinsic Camera Parameters [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 32(1):7-10.
- [11] 王庆有,孙学珠. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社,1993.
WANG Q Y, SUN X ZH. CCD Application Techniques [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1993. (in Chinese)
- [12] UDUPA G, SINGAPERUMAL M, SIROHI R S, *et al.*. Characterization of surface topography by confocal microscopy : I. Principles and the measurement system[J]. *Meas. Sci. Technol.* 2000, 11: 305-314.
- [13] 刘书桂,姜珍珠,董英华,等. 采用移动光靶标的分区域相机标定[J]. 光学精密工程,2014,22(2): 259-265.
LIU S G, JIANG Z Z, DONG Y H, *et al.*. Sub-regional camera calibration based on moving light target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 259-265. (in Chinese)
- [14] LEE C H, WANG J P. Noninterferometric differential confocal microscopy with 2nm depth resolution[J]. *Optics Communications*, 1997, 35 : 232-234.
- [15] 邹定海,叶声华,王春和. 用于在线测量的视觉检测系统[J]. 仪器仪表学报,1995,16(4): 337-340.
ZOU D H, YE SH H, WANG CH H. A visual

- inspection system for on-line measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1995, 16(4): 337-340. (in Chinese)
- [16] Sergi F, Guillem A, CARME T. Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras: A Survey[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11[3]:1-11.
- [17] ZHAO Z J, LIU Y C, ZHANG ZH Y. Camera Calibration With Three Noncollinear Points Under Special Motions[J]. 2008, 17(12):2393-2402.
- [18] 赵连军,刘恩海,张文明,等. 单目三点位置测量精度分析[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5):1190-1197.
- ZHAO L J, LIU E H, ZHANG W M *et al.*. Analysis of position estimation precision by cooperation target with three feature points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1190-1197. (in Chinese)

作者简介:



杨 凯(1984—),男,陕西榆林人,博士研究生,2007 年于吉林大学获得学士学位,2012 年于中科院研究生院获得硕士学位,现在北京理工大学检测技术与自动化装置学科攻读博士学位,主要从事机器视觉、生产过程自动控制、建模优化方面的研究。E-mail: yangk12345@163.com



金怀平(1987—),男,云南曲靖人,博士研究生,2014 年于北京理工大学获得学士学位,在检测技术与自动化装置学科直接攻读博士学位,主要从事智能测控技术、软测量技术、建模优化方面的研究。E-mail: jinhuaiping@gmail.com

导师简介:



陈祥光(1953—),男,福建福安人,教授,博士生导师,1986 年于北京工业学院获硕士学位,2000 年于北京理工大学获博士学位。主要从事工业过程智能检测技术、自动控制、过程建模与优化。E-mail: xgc1@bit.edu.cn