

文章编号 1004-924X(2011)05-1110-08

用于目标测距的单目视觉测量方法

韩延祥, 张志胜*, 戴敏

(东南大学机械工程学院, 江苏南京 211189)

摘要: 为了克服对应点匹配和单个特征点提取误差对测量结果的影响, 本文在基于图像处理的基础上, 提出了一种基于特征点的单目视觉测距方法。首先利用小孔成像原理, 得出成像点与目标点的映射关系, 建立小孔成像模型。然后通过目标图像的分析, 得出目标物与目标图像的面积映射关系, 建立视觉测量的直线测距模型; 通过图像处理, 提取目标图像的特征点, 将光心与目标物的距离关系转化为光心与特征点的距离关系, 提出了基于特征点的单目视觉测距原理。最后对测距原理进行实验验证并对得出的数据进行分析, 针对测量误差随距离增加而变大的现象, 通过对数据的分析, 得出是由于光轴偏心而引起的误差; 将数据修正后, 测量结果的最大相对误差为 1.68%, 精度提高明显, 验证了原理的可行性和算法的有效性。

关键词: 计算机视觉; 单目视觉测量; 小孔成像; 图像处理; 目标测距

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.1110

Monocular vision system for distance measurement based on feature points

HAN Yan-xiang, ZHANG Zhi-sheng*, DAI Min

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

* Corresponding author, E-mail: oldbc@seu.edu.cn

Abstract: To alleviate the effect of matching of corresponding feature points and extraction error of single feature point, a method by using a single camera as monocular measurement is presented based on image processing. Firstly, this paper sets up the mapping relationship between image point and target point, and establishes pinhole imaging model. Secondly, it describes the mapping relationship between object area and image area of object by using image analysis, and establishes the model of distance measurement in optical direction. Then, the principle of distance measurement between optical center and feature point is proposed after image processing and feature point extracting are carried out. At last, the paper starts out verification experiments and analyzes the cause that error increases with further distance. After analyzing the data of experiment, the conclusion that error is related with the optical axis deviation is made. Sequentially, with the maximum relative error 1.68% of revised data, there is a remarkable improvement which proves the feasibility and the effectiveness of the proposed principle.

收稿日期: 2010-07-07; **修订日期:** 2010-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50805023); 江苏省“六大人才高峰”资助项目(No. 2008144); 东南大学优秀青年教师教学科研基金资助项目(No. 200902); 江苏省“青蓝工程”资助项目(No. 2008-30-1)

Key words: computer vision; monocular vision measurement; pinhole imaging; image processing; target location

1 引言

视觉测距作为机器视觉领域内基础技术之一而受到广泛的关注,其在机器人领域内占有重要的地位,广泛应用于机器视觉定位、目标跟踪、视觉避障等,尤其是作为视觉导航和伺服控制中不可或缺的基础技术。机器视觉测量主要分为:单目视觉测量、双目视觉测量、结构光视觉测量等。结构光由于光源的限制,应用的场合比较固定;双目视觉难点在于特征点的匹配,影响了测量的精度和效率,其理论研究的重点集中于特征的匹配上^[1-2];而单目视觉结构简单,运算速度快而具有广阔的应用前景。

单目视觉测距是利用一个摄像机获得的图片得出深度信息,按照测量的原理主要分为基于已知运动和已知物体的测量方法。基于已知运动的测量方法是指利用摄像机的移动信息和摄像机得到的图片测得深度距离,文献[3]中提出了一种单目视觉测量的新方法,其原理是利用物体的已知运动和采集到的前后两幅图像比例的变化得出镜头与目标的距离,在文献[4-5]中作者对不同纹理下的目标物进行测量,显示了算法在不同纹理下具有良好的性能。在此基础上,文献[6]利用多幅图像建立的模型对深度信息进行了预测。上述测量的缺点是要对一幅或几幅图片进行特征点的匹配,匹配误差对测量结果有明显的影响,同时处理时间长,对于多幅图像而言则必然需要更多的计算时间。

已知物体的测量方法是指在已知物体信息的条件下利用摄像机获得的目标图片得到深度信息。此类方法主要应用于单目视觉进行导航和定位,文献[7]采用人工标记法建立地图,利用单目摄像机采集图片进行分析对摄像机定位;文献[8]利用单目摄像机进行了视觉导航研究,该方法亦可应用在已知环境下移动机器人的目标识别及抓取;文献中[9]建立了基于视觉的移动机器人智能控制系统,介绍了基于视觉的移动机器人关键技

术,实现了目标的定位,目标的拾取和搬运。该类方法的缺点是利用单个特征点进行测量,容易因特征点提取的不准确性,产生误差。

本文在目标识别、抓取和视觉避障的背景下,提出了单目视觉测量方法,其基本原理是:基于小孔成像原理,建立在光轴方向上的测距模型,提出了基于特征点的单目视觉测距原理。本方法在轴向距离测量的基础上,进行点特征识别,不仅克服了特征匹配的缺点;同时,本文在对面积计算的基础上,进行点特征的提取,减小了误差,提高了测量的精度。

2 小孔成像原理

本文采用摄像头采集图片,将三维场景投影到摄像机二维像平面上。对于测量地球坐标系中的物体而言,小孔成像模型^[10](也称为线性摄像机模型)基本可以满足测量的要求,即任意点 P_1 在图像中的投影位置 P_2 为光心 O_c 与 P_1 点的连线 $O_c P_1$ 与图像平面的交点,如图 1 所示。由比例关系可得下式:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, (x, y) 为 P_1 点的以物理单位表示的图像坐标; (X_c, Y_c, Z_c) 为空间点 P_1 在摄像机坐标系下的坐标。

摄像机采集的图像变换为数字图像,以如图 2 直角坐标系 (u, v) 的形式存储,同时在图像中心坐标 (u_0, v_0) 处建立物理坐标系,则存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x & 0 & -u_0 d_x \\ 0 & d_y & -v_0 d_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 d_x, d_y 分别为每一个像素在 X 轴与 Y 轴方向上的物理尺寸。

摄像机坐标系和世界坐标系存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 (X_c, Y_c, Z_c) 和 (X_w, Y_w, Z_w) 分别表示 P_1 点在摄像机坐标系和世界坐标系下的坐标; \mathbf{R} 为 3×3 的正交矩阵; \mathbf{T} 为平移向量; $\mathbf{0} = (0, 0, 0)^T$; \mathbf{M}_1 为 4×4 矩阵。

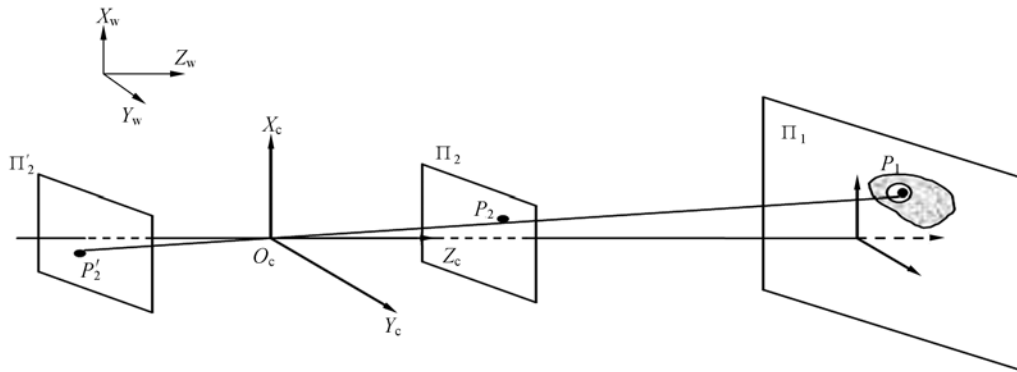


图 1 小孔成像原理图
Fig. 1 Pinhole camera model

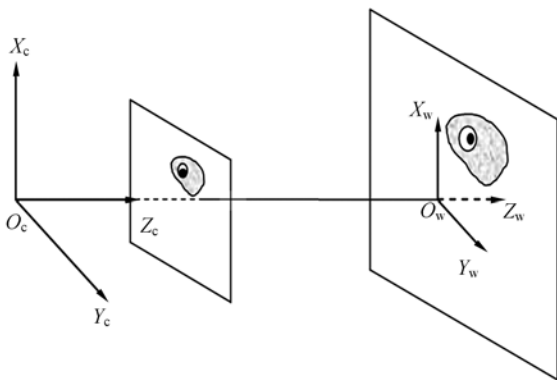


图 2 垂直于光轴中心线平面内目标的测量
Fig. 2 Distance measurement of object in plane

将式(2)和(3)代入式(1),得到以世界坐标系表示的 P_1 点坐标与图像平面上以像素为单位 P_2 的坐标 (u, v) 的关系:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 X_w = \mathbf{M} X_w \quad (4)$$

其中, $\alpha_x = f/d_x, \alpha_y = f/d_y, \mathbf{M}$ 为 3×4 矩阵。 $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$ 分别成为摄像机内参数和外参数。

通过上述分析可知:在对摄像机标定的前提下,若已知世界坐标系下的某点 $P_1(X_w, Y_w, Z_w)$, 则可根据上式求出该点的图像坐标 (u, v) 。

3 目标测距原理

假定世界坐标系位于如图 2 所示的位置,则 $\mathbf{R} = \mathbf{I}, \mathbf{T} = [0 \ 0 \ d]^T$, 式(4)化为:

$$\begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & u_0 d \\ 0 & \alpha_y & v_0 & v_0 d \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 1 & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x X_w + u_0 Z_w + u_0 d \\ \alpha_y Y_w + v_0 Z_w + v_0 d \\ Z_w + d \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在垂直于光轴平面内,点 P_1 的坐标为 $(x_w, y_w, 0)$,所以上式可化为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} \alpha_x X_w + u_0 d \\ \alpha_y Y_w + v_0 d \\ d \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将目标沿 Y_w 方向分为 N 份,则每一份近似为一个矩形,如图 3 所示。假设第 i 个矩形的 4

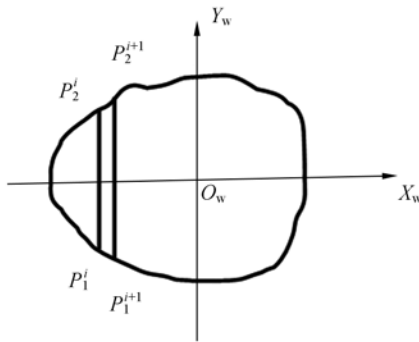


图 3 目标面积计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of area calculation

个顶点分别标记为 $P_1^i, P_2^i, P_1^{i+1}, P_2^{i+1}$,则目标的面积为^[11]:

$$S = \sum_{i=1}^N (P_{2y}^i - P_{1y}^i)(P_{1x}^{i+1} - P_{1x}^i). \quad (7)$$

将式(6)代入式(7),得

$$S = \left[\sum_{i=1}^N (v_2^i - v_1^i)(u_1^{i+1} - u_1^i) \right] \frac{d^2}{\alpha_x \alpha_y} = S_1 \frac{d^2}{\alpha_x \alpha_y}, \quad (8)$$

式中: S_1 表示目标在图像上的面积。

由此可得 d 的计算公式:

$$d = \sqrt{\alpha_x \alpha_y S / S_1}. \quad (9)$$

对于成像的物体来说,测量摄像机到目标的距离,实际是测量摄像机到目标前表面上某点的距离,对于无法成像的部分来说,是无法测量的。在选择某点时,应选择有意义的点作为特征点,即将目标物到摄像机的测距转化为摄像机光心到特征点的距离,如图 4 所示。在世界坐标系内,特

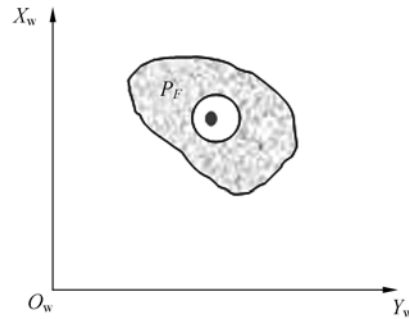


图 4 目标前表面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of front surface of object

征点 P_F 到 O_w 的距离 L_w 可为:

$$L_w = \sqrt{x_w^2 + y_w^2}. \quad (10)$$

则目标距离为:

$$L_c = \sqrt{L_w^2 + d^2}. \quad (11)$$

将式(6)和式(10)代入式(11)得

$$L_c = d \sqrt{(u_F - u_0)^2 / \alpha_x^2 + (v_F - v_0)^2 / \alpha_y^2 + 1}, \quad (12)$$

从上式中可以看出,测距原理的关键是找到代表性的特征点,本文以目标的形心作为特征点,利用图像处理进行特征点的计算,从而可得出特征点到摄像机的完全距离。

3 测量实验与分析

本文利用所提出的基于特征点的单目视觉测量原理,采用 Logitech QuickCam SphereAF(快看太空版 AF 网络摄像头)采集图片并进行重复性试验。固定目标在摄像头的前方,移动摄像头进行连续图片采集。利用 VC++ 6.0 编写的程序对图片进行处理,计算目标面积,同时提取目标的特征点。

对目标进行测量,首先要对摄像机标定。本文标定结果如下: $\alpha_x = 274.910\ 28$, $\alpha_y = 272.038\ 60$ 。

沿某一方向等距离采集目标图片,连续采集 10 张图片,并依次进行图像预处理,分别计算目标的图像面积和特征点在图像中的像素坐标。利用本文提出的基于特征点的目标距离测量原理计算目标与摄像头的实际距离,测量和计算数据对比如表 1 所示。

从表 1 中可以看出当直线距离(即摄像头到目标表面的垂直距离)为 40 cm 时,计算结果的误

差率仅为 0.83%,而当直线距离为 85 cm 时,误差率达到了 11.90%,即随着直线距离值越来越大,误差率会越来越高。显然,这样的结果是不能让人满意的。

进一步分析得出如下结论:在直线距离为 40 cm 时,误差率仅为 0.83%,而随着距离越近误差率会更小,所以对于算法本身而言,是没有问题的。对于摄像机而言,在测试过程中不能保证摄像头的轴线垂直于被测目标平面,发生了倾斜,对于这种倾斜用肉眼无法进行修正,因此随着摄像机距离目标越远,误差越大。

表 1 测量数据

Tab.1 Data of measurement

图片号	直线距离 /cm	实际距离 /cm	u 坐标 /pixel	v 坐标 /pixel	测量距离 /cm	误差	误差率
1	40.00	42.00	72	59	42.35	0.35	0.83%
2	45.00	46.90	64	52	48.31	1.41	3.01%
3	50.00	51.85	58	47	54.35	2.50	4.83%
4	55.00	56.70	52	43	60.24	3.54	6.24%
5	60.00	61.80	48	39	66.65	4.85	7.85%
6	65.00	66.80	44	36	72.92	6.12	9.16%
7	70.00	71.62	41	33	78.58	6.96	9.72%
8	75.00	76.75	38	31	84.81	8.06	10.50%
9	80.00	81.57	36	29	90.90	9.33	11.43%
10	85.00	86.70	33	27	97.02	10.32	11.90%

假定摄像机到目标的直线距离为 d ,摄像机轴线偏离的夹角(倾斜角)为 α ,则平面内误差为 ΔL_w :

$$\Delta L_w = d \times \tan \alpha. \quad (13)$$

假定光轴与目标平面的交点到特征点的距离为 D ,则平面内测量距离 L_w 为:

$$L_w = \Delta L_w + D = d \times \tan \alpha + D, \quad (14)$$

则任意两个位置之间的距离为:

$$L_{w(i+1)} - L_{wi} = (d_{i+1} - d_i) \times \tan \alpha. \quad (15)$$

从上式可以看出,沿某一方向移动间隔距离相等的条件下,相邻两点的距离差值应该相等,此结论验证数据见表 2。

表 2 平面内距离测量

Tab.2 Distance measurement in plane

图片号	直线距离	平面内测量
	D/cm	距离 L_w /cm
1	40	15.42
2	45	19.06
3	50	22.63
4	55	26.25
5	60	30.03
6	65	33.79
7	70	37.24
8	75	40.95
9	80	44.51
10	85	48.34

通过 Matlab 对上述数据进行直线拟合,结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,各点几乎是在一条直线上,完全符合分析。由此得到拟合直线为:

$$L_w = \frac{5\ 023}{6\ 875}x - \frac{76\ 129}{5\ 500}, \quad (16)$$

由此推出,

$$\tan\alpha = \frac{5\ 023}{6\ 875} = 0.730\ 6, D = -\frac{76\ 129}{5\ 500} = -13.841\ 6.$$

由于 D 已知,可以计算出修正后的目标距离值,如表 3 所示。

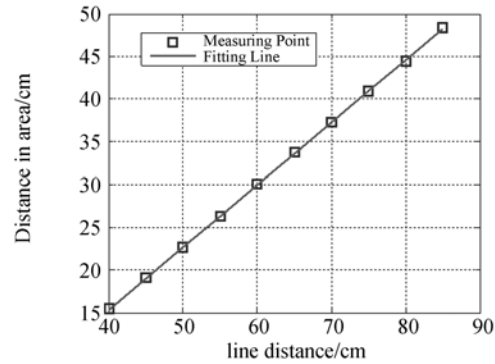


图 5 目标平面内距离测量误差分析

Fig. 5 Error analysis of distance measurement in object plane(d vs. L_w)

表 3 修正后的目标测距比较

Tab. 3 Comparison of revised results

图片号	实际直线距离 d/cm	直线距离测量值/cm)	目标距离的修正值/cm)	实际目标距离/cm)	误差	误差率
1	40	39.445	41.80	42.0	0.20	0.47%
2	45	44.39	46.50	46.9	0.40	0.86%
3	50	49.42	51.32	51.85	0.53	1.02%
4	55	54.218	55.96	56.7	0.74	1.31%
5	60	59.502	61.09	61.8	0.71	1.15%
6	65	64.619	66.08	66.8	0.72	1.07%
7	70	69.199	70.57	71.62	1.05	1.47%
8	75	74.266	75.54	76.75	1.21	1.57%
9	80	79.255	80.45	81.57	1.12	1.37%
10	85	84.116	85.25	86.7	1.45	1.68%

综上所述可知,本文测量误差产生的原因为:首先,图 5 表明测量误差呈规律性变化,其原因是由于光轴的倾斜(倾斜角)导致平面内测量产生了偏差,从而引起目标测距的不准确性,本文通过对目标所在平面内测量值的修正,测量误差已明显减小;其次,由于实验采用的是非广角镜头,未考虑摄像头本身的非线性畸变,图像处理过程中存在噪声及计算特征点在图像平面内像素坐标出现偏差。

从修正数据看,利用本文提出的方法所测得的结果,其最大相对误差为 1.68%,证明了算法的可行性。

4 结 论

为了克服对应点匹配和单个特征点提取误差对测量结果的影响,本文在视觉的目标识别、抓取和避障的应用背景下,提出了一种单目视觉测量的新方法。首先介绍了小孔成像原理,然后利用小孔成像原理得出图像与目标距离的关系,最后提出了基于特征点的测量方法。本方法避免了双目视觉中对应点匹配引起的测量误差和效率问题,提高了测量的有效性。最后,分析了误差产生的原因。首先通过实验验证发现,测量的误差随着直线距离的增大而增大,通过测量的数据分析

得出实验误差产生的原因是由于在测距过程中摄像机光轴的倾斜造成在目标平面内测量的偏差;其次,由于摄像机本身的非线性畸变以及图像中的噪声对测量产生的影响。从修正数据看,测量

结果达到了相对较小的误差,从而验证了算法的可行性,同时本文中最大相对误差为 1.68%,证明算法的有效性。

参考文献:

- [1] 叶海加,陈昱,荆渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 71-75.
- YE H J, CHEN G, XING Y. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 71-75. (in Chinese)
- [2] 张业鹏,何涛,文昌俊,等. 机器视觉在工业测量中的应用与研究[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 324-328.
- ZHANG Y P, HE T, WEN CH J, *et al.*. Applications of machine vision in industry inspection and its research [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 324-328. (in Chinese)
- [3] Naoki YAMAGUTI, Shunichiro OE, Kenji TERADA. Method of distance measurement by using monocular camera[C]. *SICE '97. Proceedings of the 36th SICE Annual Conference. International Session Papers*, 1997: 1255-1260.
- [4] Naoki YAMAGUTI, Shunichiro OE, Kenji TERADA. A Distance Measurement Method available to Texture Surface by Using Complex-Log Mapping [C]. *Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 1997. *IECON 97. 23rd International Conference*, 2006: 1142-1147.
- [5] 石春琴,张丽艳,韦虎,等. 随机模式投影双目测量系统中的单目测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 257-264. (in Chinese)
- SHI CH Q, ZHANG L Y, WEI H, *et al.*. Monocular measurement in binocular measurement system with instantaneous random illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 257-264.
- [6] SAXENA A, CHUNG SH, NG A. Learning depth from single monocular images [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2006.
- [7] Eric Krotkov. Mobile robot localization using a single image [C]. *Robotics and Automation, 1989. Proceedings, 1989 IEEE International Conference*, 1989, 2: 978-983.
- [8] Nguyen Xuna Dao, Bum-Jae You, Sang-Rok Oh. Visual navigation using a single camera [C]. *Computer Vision, 1995. Proceedings, Fifth International Conference*, 1995: 645-652.
- [9] PENG G, HUANG X H, GAO J, *et al.*. Vision based intelligent control for mobile robot [C]. *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress*, 2006, 2: 9124-9128.
- [10] 马颂德,张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- MA S D, ZHANG ZH Y. *Computer Vision-The Theory of Computation and Basis of Algorithm* [M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)
- [11] 徐德,谭民,李原. 机器人视觉测量与控制 [M]. 背景: 国防工业出版社, 2008.
- XU D, TAN M, LI Y. *Visual Measurement and Control for Robots* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



韩延祥(1984—),男,山东潍坊人,博士研究生,2009年于安徽工业大学获得硕士学位,主要研究方向为机器视觉,图像处理。E-mail:hyx606@126.com



戴敏(1977—),女,江苏泰兴人,讲师,2002年、2006年于东南大学分别获得硕士和博士学位,主要研究方向为机器视觉技术,多工步制造过程质量保证,机器人技术等。E-mail: ddt@seu.edu.cn

导师简介:



张志胜(1974—),男,江苏泰州人,教授,博士生导师,1997年、2004年于东南大学分别获得硕士和博士学位,主要研究方向为机器视觉理论与应用,多工步制造过程质量保证等。E-mail: oldbc@seu.edu.cn

●下期预告

三波段电晕检测光学系统设计

刘建卓^{1,2},陈朝东³,黄剑波^{1,2},郭帮辉^{1,2},
曲锋^{1,2},王健^{1,2},方伟¹,孙强¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春130033;
2.中国科学院研究生院,北京100049;3.第二炮兵工程设计研究院,北京100011)

电晕放电严重影响电力系统的正常运行,并且容易造成重大损失。为了对电晕放电进行全天候的检测,设计了一套包含日盲紫外、可见光和长波红外的三波段电晕检测光学系统。为了减小系统体积,提高系统性能,日盲紫外和可见光波段采用共光路结构;长波红外段采用独立的光路,利用衍射面特殊的色散特性和非球面技术对系统进行单色像差和色差校正,减少系统的镜片数量。为了保证系统在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 清晰成像,系统采用单镜片调焦设计。系统设计结果表明,20 $^{\circ}\text{C}$ 时,在空间频率60 lp/mm处,全视场内,日盲紫外波段系统 $\text{MTF}>0.37$,可见光波段系统 MTF 大于0.35;在空间频率20 lp/mm处,全视场内,长波红外波段系统 $\text{MTF}>0.6$,3个波段均能清晰成像,满足电晕检测的要求。