

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.10.018

基于双目视觉的接触网绝缘子三维位置重建

邓 斌, 林文文, 于兰英, 吴文海

(西南交通大学机械工程学院, 成都 610031)

摘要: 水冲洗是解决因接触网绝缘子尘土造成的电气化铁路污闪事故的重要方法, 自动水冲洗是代替目前人工冲洗劳动环境差、冲洗效率低的主要途径, 而接触网绝缘子三维位置重建是实现自动冲洗的关键。文中提出一种基于双目视觉的接触网绝缘子三维位置重建方法, 识别双目摄像机图像中的绝缘子特征。通过摄像机内外参数标定, 采用特征匹配算法得到左右图像的匹配点对, 利用投影变换矩阵得到绝缘子形心的三维坐标, 获得绝缘子的深度距离信息。实验表明: 在1 200~3 200 mm距离范围内对绝缘子进行三维位置还原, 还原绝对误差最大为226 mm, 满足冲洗精度要求。

关键词: 接触网绝缘子; 三维重建; 双目视觉; 绝缘子提取; 像机标定; 特征匹配

3D Reconstruction of Catenary Insulator Based on Binocular Vision

DENG Bin, LIN Wenwen, YU Lanying, WU Wenhai

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Water washing is the important method to solve the flashover accident cause by catenary insulator pollution, at present, the automatic washing is the main way to replace manual washing with poor working conditions and low flushing efficiency. The catenary insulator's 3D reconstruction is the key of automatic washing. This paper proposes a 3D reconstruction method based on binocular vision to get the catenary insulator position, identifies insulator characteristics from binocular camera image. Based on internal and external parameters calibration of the binocular camera, the match points of left and right images are obtained by feature matching algorithm, The 3D coordinates of insulator centroid and the distance information of insulator are gotten by using the projection transformation matrix. The experimental results show that the distance between 1 200~3 200 mm, insulator have been 3D position reduction, maxium value of reduction of absolute error is 226 mm, which meets the requirement of washing accuracy.

Key words: catenary insulator; 3D reconstruction; binocular vision; insulator extraction; camera calibration; feature matching

0 引言

铁路接触网绝缘子是电气化铁路系统的重要工程设施, 污闪是接触网绝缘子事故发生的主要原因^[1-3], 为预防污闪事故的发生, 需定期对绝缘子进行清洗。目前, 接触网绝缘子清洗依靠人工操作带电绝缘子水冲洗车完成, 存在冲洗效率低、劳动强度大、人为因素导致的误操作, 造成水资源浪费等问题。人工冲洗绝缘子见图1。采用水冲洗车自动冲洗绝缘子是解决人工冲洗问题的有效途径。利用双

目视觉原理重建绝缘子的三维位置, 获得冲洗水枪末端与绝缘子之间的距离信息, 通过计算机控制水枪末端位姿使其对准绝缘子的中心, 从而实现接触网绝缘子自动冲洗。

目前双目视觉技术被广泛应用于目标的定位跟踪与三维位置重建, 美国麻省理工学院通过将双目视觉系统应用于智能交通工具, 实现了在高速环境下对目标物体的实时监测与跟踪^[4]。文[5]利用双目视觉系统实现了针对水下环境的视觉定位, 文[6]应用双目视觉技术提高了番茄采摘机器人视觉系统的定位精度。利用双目视觉对绝缘子进行识别定



图 1 人工冲洗接触网绝缘子

Fig. 1 Flush the catenary insulators by manual operation

位的研究主要针对航拍和巡检绝缘子图像,文[7]提出了一种基于图像的三维重建的绝缘子覆冰在线监测方法,但该方法只能还原单个绝缘子的三维位置信息,而接触网支架上往往有多个绝缘子。文[8]设计的履带式带电水冲洗车通过双目视觉系统能够准确获得牵引变电站的绝缘子三维坐标。但由于接触网绝缘子与变电站绝缘子颜色形状的差异,该双目视觉系统不适用于接触网绝缘子的三维位置重建。

文中提出了一种基于双目视觉的接触网绝缘子三维位置重建方法,2台摄像机从不同角度获得同一绝缘子图像,利用三维视差原理和投影变换矩阵还原绝缘子在世界坐标系下的三维坐标,计算出绝缘子到水冲洗车末端水枪的距离,从而为自动冲洗提供依据。绝缘子三维重建分为4个部分:绝缘子提取、双目摄像机标定、特征点匹配以及三维重建。

1 基于双目视觉的三维重建关键技术

三维重建是指基于视差原理,从多幅图像中恢复空间点三维坐标信息的过程^[9]。双目摄像机的2台成像设备从不同的角度拍摄绝缘子图像,绝缘子的三维位置信息被包含在两幅成像图中,结合双目摄像机成像原理,计算出绝缘子形心的三维坐标。

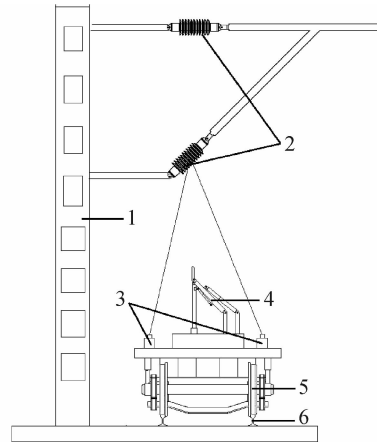
1.1 接触网绝缘子的提取

通过安装在水冲洗车上的双目摄像机采集绝缘子图像,图像采集见图2。

接触网绝缘子采集图像见图3。图像背景相对简单。对图像进行滤波处理去除干扰,数学形态学处理增强绝缘子轮廓。定位出接触网支架右边边缘,以支架作为参照,利用绝缘子与接触网支架之间的相对位置关系提取出支架上的2个绝缘子。绝缘子提取结果见图4。

1.2 双目摄像机标定

摄像机标定是研究双目视觉的基础^[10]。空间坐



1—接触网支架; 2—接触网绝缘子; 3—双目摄像机;
4—冲洗水枪; 5—冲洗车主体; 6—铁轨。

图 2 双目摄像机图像采集

Fig. 2 Image acquisition by binocular camera



图 3 接触网绝缘子成像图

Fig. 3 Catenary insulators figure



图 4 左右相机绝缘子提取结果

Fig. 4 Insulator extraction results of binocular camera

标系中物体点的几何位置 and 其在图像中的对应点的几何关系是由摄像机的成像几何模型决定的,对这些成像模型参数的计算我们就称之为摄像机标定。成像模型参数包括内参数和外参数,内参数是指由摄像机内部几何光学特性决定的固有参数,如图像中心、焦距、镜头畸变等,内参数描述的是景物点与图像点之间的关系^[11]。外参数是指摄像机与世界坐标系之间的相对位置和方向关系^[12],具体见图5。

理想情况下摄像机模型可以用针孔模型来表示^[13-14],摄像机模型如图5所示。其中, X_w, Y_w, Z_w 为世界坐标系, X_c, Y_c, Z_c 为摄像机坐标系, u, v 为图像坐标系。 P 点世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 与其摄像机坐标

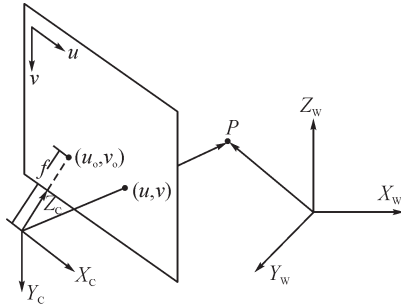


图5 摄像机模型

Fig. 5 The camera imaging model

(X_c, Y_c, Z_c) 之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}. \quad (1)$$

式(1)中; $\mathbf{R}$ 为世界坐标到摄像机坐标的旋转矩阵; $\mathbf{T}$ 为平移向量。 $\mathbf{R}$ 与 $\mathbf{T}$ 即为摄像机的外部参数,表示了摄像机在世界坐标系里的位置和方向。

摄像机的内参数模型描述的是摄像机坐标系下的景物点与图像坐标系下的图像点之间的关系。文中采用摄像机的四参数模型。

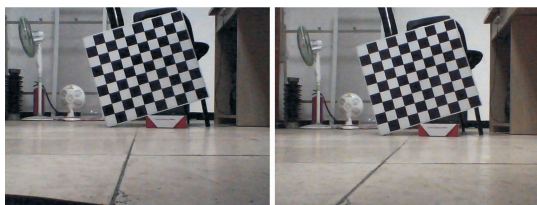
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(2)中; f_u 是 X 轴方向的放大系数; f_v 是 Y 轴方向的放大系数; u_0, v_0 分别为主点的图像坐标。

一般情况下,景物点 P 在摄像机坐标系下的坐标用 (x_c, y_c, z_c) 表示,由透视变换可以得到 P 点在图像坐标系中的图像坐标 (u, v) 。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

标定在MATLAB7.0中实现,采用棋盘格作为2D平面靶标,靶标大小为每隔50 mm,格数10×10,变换靶标角度拍摄10张标定图像,棋盘格采集见图6。选取棋盘格顶点作为特征点标定摄像机各项参数,最后得到双目摄像机的内外参数以及左右相机的相对位置关系,见图7。



(a)左摄像机采集靶标

(b)右摄像机采集靶标

图6 相机标定靶标采集实验

Fig. 6 The experiments of camera calibration

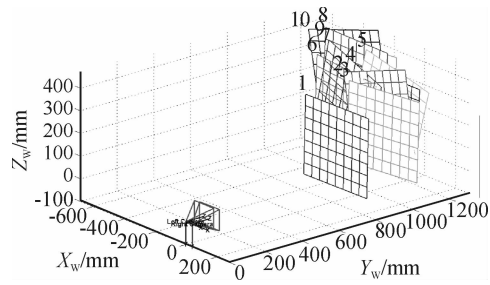


图7 双目摄像机与靶标之间位置关系示意图

Fig. 7 The relationship between binocular camera and target

标定得到左右相机的内参数矩阵 $\mathbf{A}_l, \mathbf{A}_r$,以及旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 、平移矩阵 $\mathbf{T}$,标定结果见式(4)–(7)。

$$\mathbf{A}_l = \begin{bmatrix} 675 & 0 & 321 \\ 0 & 673 & 254 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} 666 & 0 & 333 \\ 0 & 665 & 271 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\text{rodrigues}(\mathbf{R}) = \begin{bmatrix} 0.9999 & -0.0003 & 0.0163 \\ 0.0003 & 1.0000 & 0.0051 \\ -0.0163 & -0.0051 & 0.9999 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\mathbf{T} = [-39.524 \ 0 \ -1.901 \ 0 \ -2.964 \ 2]^T. \quad (7)$$

1.3 立体匹配

为了得到接触网绝缘子的三维坐标信息,需要进行立体匹配,立体匹配的作用是在双目视觉拍摄的左右图像中找到对应的特征点。常用的匹配方法有基于灰度信息的区域匹配和基于纹理的特征匹配,区域匹配算法用于灰度变化明显的图像能有比较好的效果,但遇到图像深度信息出现断续情况的时候,容易出现误匹配。在特征匹配中,必须要提取目标的边缘轮廓、角点等特征信息,所以其匹配时间较长,实时性得不到保障^[15-16]。

针对接触网绝缘子纹理性强以及对实时性要求的特点,文中利用一种绝缘子形心匹配和区域灰度信息匹配相结合的立体匹配算法^[9],从而实现准确匹配。首先,从提取的绝缘子图像中找出绝缘子形心坐标,算法见式(8)。

$$\begin{cases} x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (8)$$

式(8)中; (x, y) 为绝缘子形心坐标; n 为绝缘子区域像素点个数; (x_i, y_i) 为绝缘子像素点坐标。

左摄像机拍摄图像提取的绝缘子形心坐标为 (x_l, y_l) ,右摄像机拍摄图像提取的绝缘子形心坐标为 (x_r, y_r) 。由于左右摄像机本身存在的差异以及拍摄深度的不同,通过形心匹配只能得到一个粗略的结果,

但是形心匹配大大缩小了匹配范围,将区域匹配限定在某一小范围内进行,从而提高匹配速度。形心匹配结果见图8。

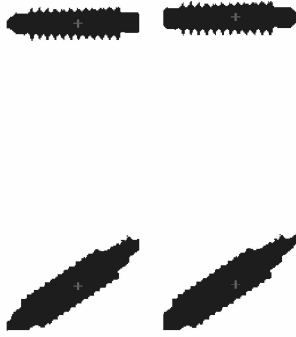


图8 形心匹配结果

Fig. 8 The result of centroid matching

区域灰度信息匹配是在形心匹配的基础上,以左摄像机拍摄图像提取的绝缘子形心坐标 (x_l, y_l) 为中心,建立一个局部窗口 Φ_l ,计算出该窗口内每个像素点的灰度值 $I_l(x, y), (x, y) \in \Phi_l$ 。再以右摄像机拍摄图像提取的绝缘子形心坐标 (x_r, y_r) 为中心确定搜索范围 Ω ,设点 (m, n) 为该搜索范围内的点,则以 (m, n) 为中心,建立一个同左摄像机拍摄图像中相同大小的局部窗口 Φ_r ,计算出该窗口内每个像素点的灰度值 $I_r(m, n)(x, y)$,定义互相关函数如下。

$$SAD = \left| \sum_{(x, y) \in \Phi_l} I_l(x, y) - \sum_{(m, n) \in \Omega} I_r(m, n)(x, y) \right| \quad (9)$$

当 SAD 最小时,说明2个窗口内的灰度信息相似度最高,即表示达到了最佳匹配。区域匹配结果见图9。

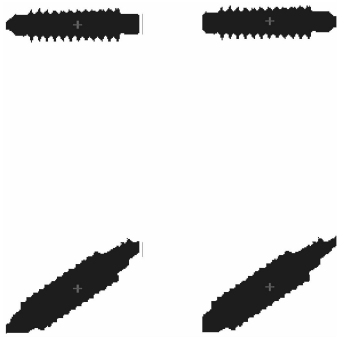


图9 区域灰度信息匹配结果

Fig. 9 The result of regional gray information matching

2 接触网绝缘子三维重建

基于双目视觉的三维重建方法所依据的原理来源于生物的双目视觉系统^[17-18],从双目视觉的左右图像中相对应的匹配点得到其在世界坐标中的三维坐标值,以此确定水冲洗车操作末端与接触网绝缘子之间的位姿关系,见图10。

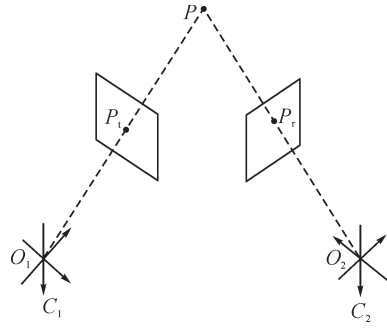


图10 双目立体视觉基本原理

Fig. 10 The principle of binocular stereo vision

如图10所示^[19],空间点 P 在2摄像机像面上的投影点分别为 P_1, P_2 , P 点既在 O_1P_1 连线上,同时也会位于 O_2P_2 连线上,2条线的交点既为空间点 P , P 点是唯一的。空间点 P 的三维坐标根据双目相机成像模型,利用投影变换矩阵得到^[20]。

空间点 $P=[X, Y, Z]$ 在左右像面的像点分别为 $P_l=[u_l, v_l]$ 和 $P_r=[u_r, v_r]$, $\tilde{P}_l=[u_l, v_l, 1]$, $\tilde{P}_r=[u_r, v_r, 1]$ 为对应的齐次坐标。根据摄像机针孔成像模型^[21],有

$$Z_l \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = M_l \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{l11} & m_{l12} & m_{l13} & m_{l14} \\ m_{l21} & m_{l22} & m_{l23} & m_{l24} \\ m_{l31} & m_{l32} & m_{l33} & m_{l34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$Z_r \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ 1 \end{bmatrix} = M_r \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{r11} & m_{r12} & m_{r13} & m_{r14} \\ m_{r21} & m_{r22} & m_{r23} & m_{r24} \\ m_{r31} & m_{r32} & m_{r33} & m_{r34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(10)–(11)中, M_l, M_r 为左右摄像机的投影矩阵。

$$\begin{cases} M_l = A_l \\ M_r = A_r [R \ T]^T \end{cases} \quad (12)$$

对式(10)–(12)联立,消去 Z_l, Z_r 得到关于 X, Y, Z 的4个线性方程,即

$$\begin{cases} (u_l m_{l31} - m_{l11})X + (u_l m_{l32} - m_{l12})Y + (u_l m_{l33} - m_{l13})Z = m_{l14} - u_l m_{l34} \\ (v_l m_{l31} - m_{l21})X + (v_l m_{l32} - m_{l22})Y + (v_l m_{l33} - m_{l23})Z = m_{l24} - v_l m_{l34} \\ (u_r m_{r31} - m_{r11})X + (u_r m_{r32} - m_{r12})Y + (u_r m_{r33} - m_{r13})Z = m_{r14} - u_r m_{r34} \\ (v_r m_{r31} - m_{r21})X + (v_r m_{r32} - m_{r22})Y + (v_r m_{r33} - m_{r23})Z = m_{r24} - v_r m_{r34} \end{cases} \quad (13)$$

转化为矩阵形式,即

$$\begin{bmatrix} u_l m_{l31} - m_{l11} & u_l m_{l32} - m_{l12} & u_l m_{l33} - m_{l13} \\ v_l m_{l31} - m_{l21} & v_l m_{l32} - m_{l22} & v_l m_{l33} - m_{l23} \\ u_r m_{r31} - m_{r11} & u_r m_{r32} - m_{r12} & u_r m_{r33} - m_{r13} \\ v_r m_{r31} - m_{r21} & v_r m_{r32} - m_{r22} & v_r m_{r33} - m_{r23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{l14} - u_l m_{l34} \\ m_{l24} - v_l m_{l34} \\ m_{r14} - u_r m_{r34} \\ m_{r24} - v_r m_{r34} \end{bmatrix} \quad (14)$$

利用最小二乘法求解出空间点 P 的坐标 (X, Y, Z) 。水冲洗车末端在世界坐标系中的坐标 (X_0, Y_0, Z_0) ,则水冲洗车末端到绝缘子的深度距离: $S =$

$$\sqrt{(X-X_0)^2+(Y-Y_0)^2+(Z-Z_0)^2}。$$

3 实验验证

为验证方法的有效性,文中搭建了与识别定位接触网绝缘子原理相同的实验平台,按照接触网支架和绝缘子的安装关系,用三角支架模拟接触网支架,首先识别出三角支架并定位出支架所在位置,再通过三角支架与绝缘子之间的位置关系识别出绝缘子目标,实验平台组成见图 11。



图 11 实验平台及拍摄图像

Fig. 11 The experimental platform and image

利用双目相机拍摄了若干绝缘子图像,计算出其深度距离,与实际测量距离比较,得到定位误差。实验采用双目视觉系统的相机的帧率为 30 FPS,分辨率为 640×480。算法在 Intel Core i5 处理器、4GB 内存的 PC 机上运行的 PC 机上运行,运行环境为 Windows7,算法编程环境为 MATLAB R2014b。选取 1 200~3 200 mm 之间的 20 个间距采集绝缘子图像,计算出绝缘子深度值,去除 2 个畸变点,其中,最大误差为 226 mm。不同距离下的测量距离与还原距离对比见图 12。试验结果发现,随着拍摄距离增大,深度定位误差变大,这是由于绝缘子图像采集距离增大,图像中的绝缘子区域越小,绝缘子的像素分辨率越来越低,导致定位误差变大。

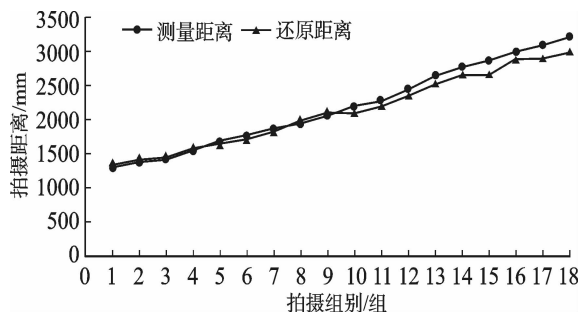


图 12 测量与还原值对比

Fig. 12 Comparison of measured and reduced values

4 结语

提出了一种基于双目视觉的接触网绝缘子三维重建方法,以接触网绝缘子为研究对象,首先从

拍摄的图像中提取出绝缘子,然后,标定双目摄像机,获得相机的内参数以及左右相机的相对位置关系。根据接触网绝缘子和接触网支架的位置关系,采用以接触网支架为参照的绝缘子提取方法,可同时提取出同一支架上的 2 个绝缘子。采用基于形心匹配和区域匹配相结合的立体匹配算法,由形心匹配缩小匹配范围,再由区域匹配提高匹配精度。最后,根据投影变换矩阵求解出绝缘子形心的三维坐标点。在 1 200~3 200 mm 距离范围对绝缘子进行三维位置还原,从而验证方法的有效性。

参考文献:

- [1] 盛良,王倩,孙忠国. 接触网腕臂瓷绝缘子放电特征参量与提取[J]. 电瓷避雷器. 2014(6)
SHENG Liang, WANG Qian, SUN Zhongguo. Discharge characteristic parameters of cantilever ceramic insulators for overhead contact system and their extraction[J]. Insulators and Surge Arresters. 2014(6).
- [2] 郝智宇. 电气化铁路绝缘子污秽状态在线监测系统设计与实现[D]. 北京:北京交通大学,2014.
HAO Zhiyu. Design of an on-line monitoring system of polluted electrified railway insulators[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [3] 何慧雯,戴敏,张亚萍,等. 污秽绝缘子泄漏电流在线监测及数据分析[J]. 高电压技术, 2010, 41(12):3007-3014.
HE Huiwen, DAI Min, ZHANG Yaping, et al. Online monitoring and data analysis on leakage current of insulators[J]. High Voltage Engineering, 2010, 12:3007-3014.
- [4] FANG Y, MASAKI I, HORN B. Depth-based target segmentation for intelligent vehicle: fusion of radar and binocular stereo[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(3):135-167.
- [5] 陈元杰,朱康武,葛耀峥,等. 基于双目视觉的水下定位系统[J]. 机电工程, 2011, 28(5):567-573.
CHEN Yuanjie, ZHU Kangwu, GE Yaozheng, et al. Binocular vision based locating system for underwater inspection[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(5):567-573.
- [6] 项荣,应义斌,蒋焕煜,等. 基于双目立体视觉的番茄定位[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5):161-167.
XIANG Rong, YING Yibin, JIANG Huanyu, et al. Localization of tomatoes based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5):161-167.
- [7] 杨浩,吴畏. 基于三维重建的绝缘子覆冰图像监测[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2):92-98.
YANG Hao, WU Wei. Insulator icing monitoring based on 3D image re-construction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2):92-98.
- [8] 蒋超猛,李哲,柯坚,等. 牵引变电站带电水冲洗机

- 器人设计[J]. 液压与气动, 2015(5):96-99.
- JIANG Chaomeng, LI Zhe, KE Jian, et al. Design of hot-line washing robot for traction substation[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(5):96-99.
- [9] 尚 倩. 基于双目立体视觉的目标识别与定位[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- SHANG Qian. Target recognition and location based on binocular stereo vision[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [10] 张克兵. 基于双目视觉的特征目标三维信息构建[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- ZHANG Ke-bing. 3D Construction of target characteristics based on binocular vision technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [11] 王苏娅. 双目立体视觉中摄像机标定技术的研究[J]. 机电一体化, 2013(10):36-39.
- WANG Suya. Research on corner detection technique for stereo vision[J]. Mechatronics, 2013(10):36-39.
- [12] 高纯玲. 基于双目立体视觉的手术器械跟踪定位研究[D]. 华中科技大学, 2008.
- GAO Chunling. Tracking and positioning of surgical instrument based on binocular stereo vision[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [13] 王建强, 张海花. 基于 MATLAB 工具箱的摄像机标定[J]. 实验室研究与探索, 2013(6):37-39.
- WANG Jianqiang, ZHANG Haihua. Camera calibration based on MATLAB toolbox[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013(6):37-39.
- [14] 陈天飞, 马 孜, 李 鹏, 等. 一种基于非量测畸变校正的摄像机标定方法[J]. 控制与决策, 2012(2):243-246.
- CHEN Tianfei, MA Zi, LI Peng, et al. A camera calibration method based on non-metric distortion correction[J]. Control and Decision, 2012(2):243-246.
- [15] 贺 振. 基于立体视觉的树木三维重建关键技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- HE Zhen. A study on 3D reconstruction of tree based on stereo vision[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [16] 李竹林, 张根耀. 一种基于区域特征的景象匹配算法研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(9):3578-3580.
- LI Zhulin, ZHANG Genyao. Research of scene matching algorithm based on regions[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(9):3578-3580.
- [17] SHRIVASTHAVA P, VUNDAVILLI P R, PRATIHAR D K. An approach for 3D reconstruction of environment using stereo-vision system[C]//IEEE Region 10 and The Third International Conference on Industrial and Information Systems. [S.l.]: IEEE, 2008:1-7.
- [18] JIA W D, YI W J, JAFAR S, et al. 3D image reconstruction and kin-ect technology[C]//2012 IEEE International Conference on Electro/Information Technology. [S.l.]: IEEE, 2012: 1-4.
- [19] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- ZHANG Guangjun. Machine Vision[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Group Ltd, 2005.
- [20] LIN Y M, LU N G, LOU X P, et al. A novel approach to sub-pixel corner detection of the grid in camera calibration[J]. ICCASM, 2010, 5(5):18-21.
- [21] 党 乐. 基于双目立体视觉的三维重建方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- DANG Le. Study on 3D reconstruction method based on binocular stereo vision[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- 邓 斌(1964—), 男, 教授, 博士, 研究方向为机电液一体化控制技术。

(上接第 104 页)

- 串的均压屏蔽技术[J]. 高电压技术, 2007, 33(12):9-13.
- WANG Jinchao, FAN Baozhen, HOU Jiyong, et al. Grading rings and shielding rings of 1 000 kV AC transmission line insulator strings[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 9-13.
- [17] 薄学微, 卞星明, 王黎明, 等. 750 kV 交流复合绝缘子均压环优化设计[J]. 高压电器, 2010, 46(12):5-8.
- BO Xuewei, BIAN Xingming, WANG Liming, et al. Optimal design of grading rings for 750 kV AC composite insulator [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12):5-8.
- [18] 江 汛, 王仲奕. 330 kV 带均压环的棒形悬式复合绝缘子电场有限元分析[J]. 高压电器, 2004, 40(3):215-217.
- JIANG Xun, WANG Zhongyi. Analysis of the electric field of 330 kV composite insulator with grading rings[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3):215-217.
- [19] STEFANINI D, SEIFERT J M, CLEMENS M, et al. Three dimensional FEM electrical field calculations for EHV composite insulator strings[C]//Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). [S.l.]: IEEE, 2010:238-242.
- 张佰庆(1978—), 男, 高级工程师, 长期从事输变电运维及检修管理工作。
- 刘思逸(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘术。