

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.029

基于立体视觉技术的多种农田障碍物检测方法*

杨福增¹ 刘 珊¹ 陈丽萍² 宋怀波¹ 王元杰¹ 兰玉彬³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌 712100;
3. 德州农工大学农业工程系, 德克萨斯 77845)

【摘要】 从摄像机标定、图像获取、双目校正、立体匹配、深度计算等方面研究多种农田障碍物检测方法, 分别用 Bouguet 算法进行立体校正、用区域匹配方法获取视差图、用三角测量方法计算障碍物的深度, 获取了不同环境下的 5 种障碍物及其位置信息, 并使用计算机视觉函数库 OpenCV, 提高了算法的实时性。试验表明: 障碍物与摄像机的距离小于 2 000 mm 时, 准确识别率在 96% 以上, 深度的绝对误差在 ± 30 mm 内(即相对误差在 1.5% 以下), 且完成一次障碍物检测的时间小于 100 ms。

关键词: 农业机器人 双目立体视觉 立体匹配 障碍物

中图分类号: TP242.6⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0168-05

Detection Method of Various Obstacles in Farmland Based on Stereovision Technology

Yang Fuzeng¹ Liu Shan¹ Chen Liping² Song Huaibo¹ Wang Yuanjie¹ Lan Yubin³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Information Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Agricultural Engineering, Texas A & M University, Texas 77845, USA)

Abstract

Camera calibration, image acquisition, stereo rectification, stereo match and depth calculation were developed to research a detection method of various obstacles in farmland by using the methods such as Bouguet algorithm, area match, and triangulation and so on. As a result, five different obstacles and their position information in different environments were got, and open computer vision library OpenCV was used to improve the real time property. The experiment showed that the accuracy rate of the obstacle detection reached 96% and the absolute error of depth was maintained within ± 30 mm (under 1.5% of the relative error) when the depth was less than 2 000 mm, and it takes less than 100 ms to finish a obstacle detection.

Key words Agricultural robot, Binocular stereovision, Stereo match, Obstacle detection

引言

目前农业机器人视觉导航技术大部分是基于单目视觉, 而双目立体视觉技术具有信息丰富、精确度

高等优点, 更接近人类对环境的理解, 在障碍物检测方面有一定的优势, 因此被广泛应用于机器人视觉导航、目标检测与跟踪、障碍物检测等场合^[1-2]。国外开展这方面的研究比较早^[3-6], 国内在这方面也

收稿日期: 2011-08-10 修回日期: 2011-09-21

* 国家自然科学基金资助项目(30971690)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA100903-7)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B10-3)、中国烟草总公司陕西省烟草局资助项目(LX-28)、杨凌现代农业国际研究院首批项目(A213021007)

作者简介: 杨福增, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信息处理、现代装备开发研究, E-mail: yfz0701@163.com

取得了一些研究成果^[7-10],但由于农业机器人作业环境复杂、障碍物较多,目前的研究尚不全面,对于不同障碍物的识别准确率与速度仍有待提高,仍需要进行大量的应用基础性研究与试验。

本文在这种背景下提出一种快速的农田障碍物检测方法,实现农田中多种不同障碍物的检测。

1 系统组成及工作原理

双目立体视觉系统主要由两台相同型号摄像机(SX9001 型, SONY)和一台 Intel 2.33 GHz 计算机组成,两摄像机光轴平行,间距为 160 mm,且与地面平行,距地面高度均为 800 mm。

基于以上两摄像机,采用图像坐标系 (u_0, v) 、图像物理坐标系 (xOy) 、左摄像机坐标系 (XO_LYZ) ,建立如图 1 所示的双目立体视觉模型。其中,两摄像机镜头中心距为 b ,焦距同为 f ,目标点 P 在左摄像机坐标系下的坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) ,在左、右图像物理坐标系下的坐标分别为 $P_l(x_l, y_l)$ 、 $P_r(x_r, y_r)$ 。

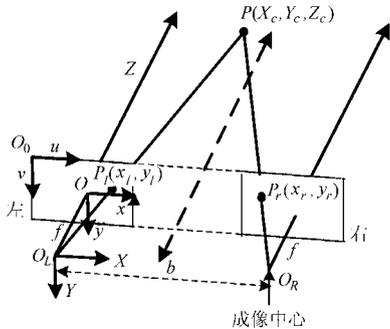


图 1 双目立体视觉模型

Fig. 1 Binocular stereovision model

由于两摄像机放置高度相同,则 P 点在图像物理坐标系中的纵坐标相同,令 $y_l = y_r = y$,则由三角几何关系可以得到

$$\begin{cases} x_l = fX_c / Z_c \\ x_r = f(X_c - b) / Z_c \\ y = fY_c / Z_c \end{cases} \quad (1)$$

定义视差 $D = x_l - x_r$,可计算出 P 点在左摄像机坐标系下的三维坐标为

$$\begin{cases} X_c = bx_l / D \\ Y_c = by / D \\ Z_c = bf / D \end{cases} \quad (2)$$

因此,目标点 P 的深度 Z_c 可通过计算视差 D 来确定,而要想获得视差 D ,只要找到目标点(即 P 点)在两幅图像中的匹配点(即 P_l 和 P_r)即可。基于此,提出了一种农田障碍物检测方法,具体包括摄像机标定、图像获取、双目校正、立体匹配和深度计算等 5 个部分,检测流程如图 2 所示。

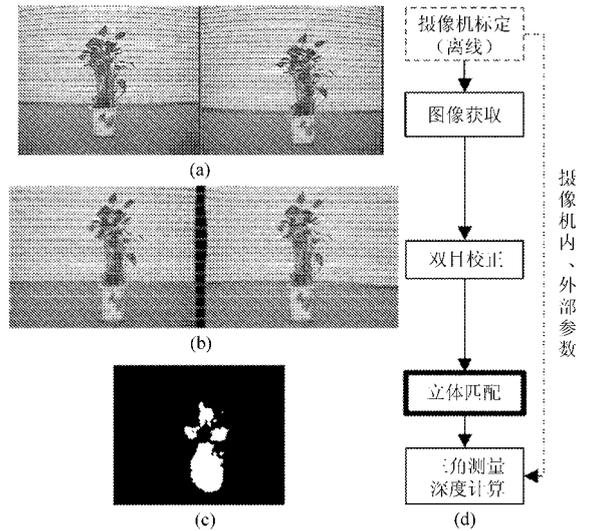


图 2 农田障碍物检测方法流程图

Fig. 2 Flowchart of obstacle in farmland detection method

(a) 原始图像对 (b) 校正后图像对 (c) 视差图 (d) 流程图

2 农田障碍物检测方法

2.1 摄像机标定

为了校正畸变效应,首先对双目摄像机进行标定。标定参数包括由摄像机内在属性决定的内部参数(焦距、成像原点、畸变系数)和双目摄像机位置关系决定的外部参数(平移向量和旋转向量)^[11]。

为了选用较合适的标定方法,分别用 Matlab 标定工具箱与 OpenCV 标定函数 StereoCalibration 两种方法进行标定,并将其结果进行比较。试验表明,OpenCV 标定的像素误差在 0.4 以上,而 Matlab 工具箱标定的像素误差在 0.1 左右(限于篇幅不再详述),因此最终选用 Matlab 标定工具箱进行标定。试验中采用的标定图样是单元方格大小为 27 mm × 27 mm 的 7 行 10 列棋盘格,采集 20 组不同位姿的图像进行标定。

标定所得的单目摄像机参数如表 1 所示,双目摄像机标定参数分别为旋转向量 $O_m = [-0.022\ 06, 0.017\ 18, -0.002\ 93]$ 和平移向量 $T = [-160.511\ 05, -0.001\ 16, 7.072\ 88]$,其中平移向量 T 第 1 个分量的绝对值为两台摄像机的中心距,与测量值 160 mm 相比较,相对误差为 0.32%,可用于后面的计算。

2.2 图像获取

采用中科院深圳先进技术研究院于仕琪提出的 DirectShow 视频采集方案获取图像^[12]。该方案中介绍的 CCameraDS 类调用帧获取函数 QueryFrame 可直接返回 IplImage 图像指针,算法简单,实时性较好,可采集分辨率为 352 像素 × 288 像素的彩色图像,图像格式为 jpg。

表1 单目摄像机标定的参数

Tab.1 Parameters of single camera calibration

摄像机	焦距	成像原点	畸变系数	像素误差
左	[433.58, 472.92]	[166.14, 142.38]	[-0.61015, 0.74328, -0.00638, 0.00850, 0]	[0.08207, 0.10723]
右	[435.62, 474.42]	[170.96, 148.39]	[-0.42507, -0.31290, -0.00459, 0.00741, 0]	[0.09210, 0.11530]

2.3 双目校正

双目校正是根据标定后获得的单目摄像机参数和双目摄像机的相对位置关系,分别对左右视图进行畸变消除和行对准,使得左右视图的成像原点坐标一致、两摄像机光轴平行、左右成像平面共面、左右图像行对齐。

OpenCV中提出了2种校正算法:Hartley算法和Bouguet算法^[12],在可以使用标定参数的情况下,Bouguet算法更适合本文的研究。Bouguet算法是利用给定立体图像间的旋转和平移参数,使两图像中的每一幅重投影次数最小化,同时使得观测面积最大化。该算法首先计算左右摄像机平面间行对准的校正旋转矩阵 R_l 和 R_r 、投影矩阵 P_l 和 P_r (主要通过函数cvStereoRectify实现);其次通过校正映射将双目立体视觉系统所拍摄的立体图像映射到与摄像机光轴垂直的同一个平面上。

图3所示为校正前、后的图像对,可以看出,校正前的图像存在畸变且左右图像的行未对齐,而校正后的图像基本消除了镜头畸变,实现了行对齐,使得下一步的立体匹配更准确。

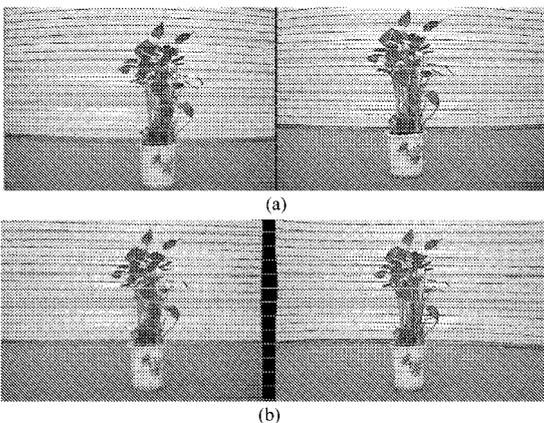


图3 校正前后的图像对比较

Fig.3 Contrast of stereo images before and after rectification

(a) 校正前 (b) 校正后

2.4 立体匹配与视差计算

立体匹配是在校正的基础上求取视差 D ,是立体视觉算法中最重要也是最难实现的部分。根据匹配基元的不同,立体匹配大致可分为3种:基于特征的匹配、基于区域的匹配和基于相位的匹配。

立体匹配实质是估计待匹配点和候选匹配点之

间的相似度,由于单个像素包含的信息太少,因此依据单个像素建立的匹配方法可靠性差,且速度慢。为了提高匹配的可靠性,需要依据匹配点的一个邻域建立匹配方法,本文选用基于区域的匹配算法。

绝对差值和(sum of absolute differences,简称SAD)匹配算法是一种基于区域的局部匹配算法,其关键是如何选择匹配窗口的大小,窗口过大会导致物体边界被模糊,且小的物体和细节会丢失;窗口过小会增大噪声,影响和增加误匹配。该算法在速度及匹配质量方面较其他算法更具有优势,其匹配步骤如下:

(1)匹配代价计算。以基准图像(左视图)中待匹配点为中心像素创建一个大小为 $n \times n$ 的矩形框作为匹配窗口,由该窗口内的像素灰度分布来表征该像素。在另一幅图像(右视图)中,沿水平线在搜索范围内取出窗口大小相同的像素邻域,采用匹配代价 C_{SAD} ^[13]依次与待匹配点的窗口进行比较,SAD算法的计算式为

$$C_{SAD}(x, y, d) = \sum_{x \in S} |L(x, y) - R(x + d, y)| \quad (d_{\min} \leq d \leq d_{\max}) \quad (3)$$

式中 $L(x, y)$ 、 $R(x, y)$ ——左、右图像的像素灰度
 S ——以像素 $L(x, y)$ 为中心的邻域窗口
 d ——搜索范围
 d_{\min} 、 d_{\max} ——最小视差与最大视差

(2)视差计算。计算出匹配代价后,取匹配代价最小的点作为匹配点,即 $\min(C_{SAD}(x, y, d))$ 对应的点,该点对应的 d 值为所求视差。

(3)视差细化。计算出来的视差为一些离散的整数值,可采用图像滤波、匹配代价的曲线拟合等方法对获得的初始视差进行细化^[14]。

图4所示为图3b校正后的左右图像经过匹配获得的视差图,花盆被准确地提取出来。



图4 视差图

Fig.4 Disparity images

2.5 深度测量

得到视差数据后,可计算任意点的三维深度, Q 为 4×4 的重投影矩阵^[12]

$$Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - c_x \\ y - c_y \\ f \\ \frac{-d + c_x^l - c_x^r}{T_x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} \Rightarrow Z = \frac{-T_x f}{d - (c_x^l - c_x^r)} \quad (4)$$

其中

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_x} & \frac{c_x^l - c_x^r}{T_x} \end{bmatrix}$$

通过式(4)可得出不同障碍物的深度计算值,表 2 是对两种障碍物测量结果的比较,可以看出,视差与深度成反比,所得理论计算值与实际测量值相近,且距离越近,误差越小,因此在检测过程中一般将障碍物的检测范围控制在 2 000 mm 以内。

表 2 深度计算值与测量值的比较

Tab. 2 Contrast of distance between measured and calculated values

图像坐标 (u, v)	视差 /像素	深度/mm		绝对误差 /mm
		计算值	测量值	
(221, 62)	124	2 510	2 559	49
(213, 105)	126	2 431	2 388	43
(206, 225)	119	2 690	2 741	51
(142, 256)	172	1 252	1 227	25
(151, 228)	168	1 319	1 300	19
(196, 250)	167	1 341	1 358	17

3 试验结果与分析

以西北农林科技大学农机试验田中一条道路和一片烟草田为研究区域,文中的图像获取、双目校正、立体匹配、深度计算在 VS2008 环境下编程实现^[15]。

采集 100 对图像进行试验,包括实验室内、水泥道路、农田环境等不同场景中不同障碍物的检测,这里选取 5 组试验进行说明。图 5 所示为试验中选取的 5 组校正后的图像对,检测场景分别为:道路中有人(图 5a),农田中有人(图 5b)、砖块(图 5c)、铁锹(图 5d)、陷坑(图 5e)等障碍物。

匹配过程中,最小视差设为 0,通过滑动 SAD 窗口完成匹配,对左图像中每个特征点,搜索右图像对应行以找到最佳匹配。试验中校正后的图像严格行对齐,因此对于左特征像素(x_0, y_0),其匹配点一定

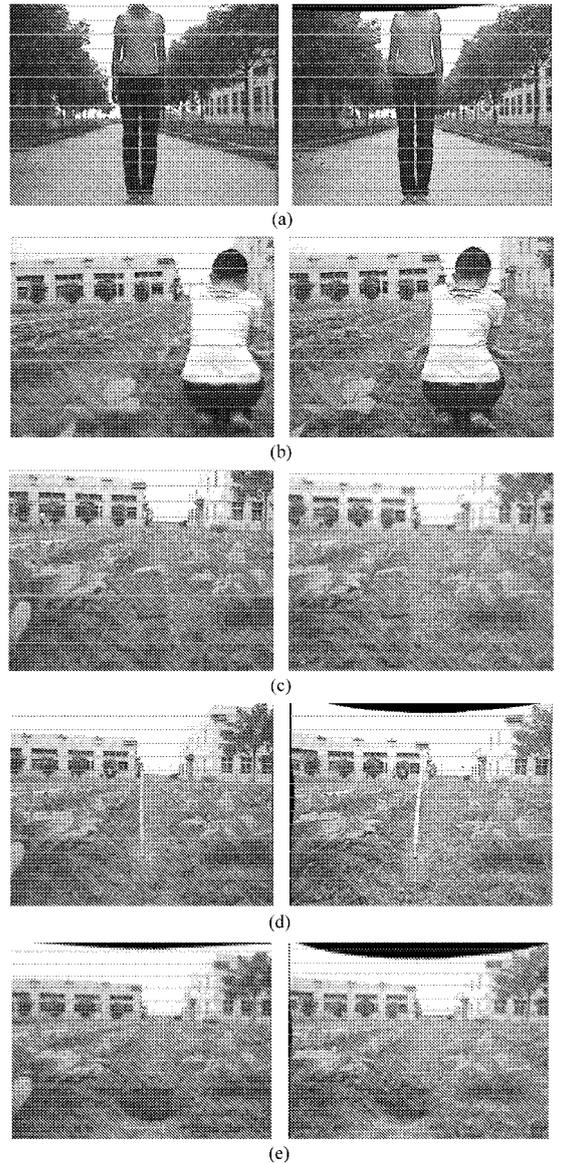


图 5 校正后的图像对

Fig. 5 Rectified images

(a) 道路中障碍(人) (b) 农田中障碍(人) (c) 农田中障碍(砖块) (d) 农田中障碍(铁锹) (e) 农田中障碍(陷坑)

与其同行,且在 x_0 左边。还可以通过限制匹配点的搜索范围 d 来减少搜索的视差数,从而缩短计算的时间,经过优化,试验中完成一次匹配所需时间约为 100 ms。另外,通过修改 SAD 窗口大小来改善匹配效果,设定 SAD 窗口大小为 29,得到了较满意的效果,如图 6 所示。可以看出,摄像机视野范围内的人、砖块、铁锹、陷坑均被准确地检测出来,但由于铁锹把手特征不鲜明,尚未识别出。100 组试验中,障碍物检测准确率达到了 96%,满足算法要求。

试验中部分障碍物的深度计算值与测量值之间的差异如图 7 所示。可以看出,障碍物深度小于 2 000 mm 时,深度的误差在 ± 30 mm 内。

通过农田中试验,充分证明了本方法是可行的、有效的,可用于农业机器人的避障。

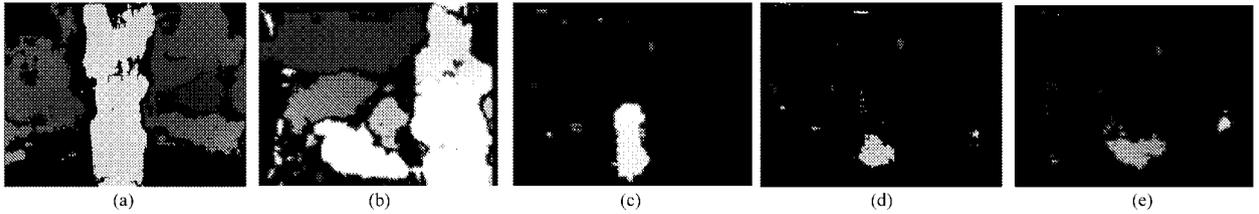


图6 障碍物检测结果

Fig. 6 Results of detecting obstacles

(a) 道路中有人 (b) 农田中有人 (c) 农田中有砖块 (d) 农田中有铁锹 (e) 农田中有陷坑

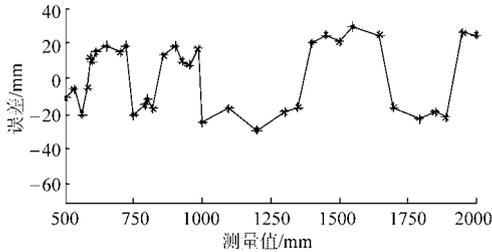


图7 障碍物的深度测量值与误差

Fig. 7 Measured depth values and errors of obstacles

4 结论

(1) 提出了基于双目立体视觉技术的多种农田

障碍物的检测方法,并在农田环境下对该方法进行了验证。

(2) 研究了双目立体图像对的匹配方法,实现了障碍物的精确定位,对采集的100对图像进行试验,障碍物距离小于2000 mm时,识别准确率达到了96%,定位平均绝对误差在 ± 30 mm以内,对高于和低于地面的障碍物均能很好地识别,完成一次匹配所用的时间在100 ms以内。试验表明,该方法稳定、可靠,实时性较好,但在检测到铁锹的同时丢失了铁锹把手的信息,还需要进一步完善。

参 考 文 献

- 张方明,应义斌. 机器视觉在农业车辆导航系统中的研究进展[J]. 农业机械学报,2005,36(5):133~136.
Zhang Fangming, Ying Yibin. Review of machine vision research in agricultural vehicle guidance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5):133~136. (in Chinese)
- 李建平,林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2006,22(9):232~236.
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9):232~236. (in Chinese)
- Reed J N, Miles S J, Butler J, et al. Automatic mushroom harvester development [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(1): 15~23.
- Kise M, Zhang Q, Más F Rovira. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4):357~367.
- Kondo N, Nishitsuji Y, Ling P P. Visual feedback guided robotic cherry tomato harvesting[J]. Transactions of the ASAE, 1996,39(6):2331~2338.
- Takhashi Teruo, Zhang Shuhuai, Hiroshi Fukuchi. Acquisition of 3-D information by binocular stereo vision for vehicle navigation through an orchard[C]// Automation Technology for Off-Road Equipment (ATOE), Proceedings of the 26~27 July,2002 Conference. Chicago, Illinois, 2002: 337~346.
- 张磊,王书茂,陈兵旗,等. 基于双目视觉的农田障碍物检测[J]. 中国农业大学学报,2007,12(4):70~74.
Zhang Lei, Wang Shumao, Chen Bingqi, et al. Detection of obstacles in farmland based on binocular vision[J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(4):70~74. (in Chinese)
- 蒋焕煜,彭永石,申川,等. 基于双目立体视觉技术的成熟番茄识别与定位[J]. 农业工程学报,2008,24(8):279~283.
Jiang Huanyu, Peng Yongshi, Shen Chuan, et al. Recognizing and locating ripe tomatoes based on binocular stereo vision technology[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8):279~283. (in Chinese)
- 胡天翔,郑加强,周宏平. 基于双目视觉的树木图像测距方法[J]. 农业机械学报,2010,41(11):158~162.
Hu Tianxiang, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping. Measurement method of depth information of tree images based on binocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):158~162. (in Chinese)

(下转第202页)

- Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(2): 271 ~ 279. (in Chinese)
- 7 Babu T Ramesh, Rao K S P, Maheshwaran C Uma. Application of TOC embedded ILP for increasing throughput of production lines [J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2007, 33(7 ~ 8): 812 ~ 818.
 - 8 Pegels C Carl, Watrous Craig. Application of the theory of constraints to a bottleneck operation in a manufacturing plant [J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2005, 16(3): 302 ~ 311.
 - 9 Acero-Dominquez M J, Paternina-arboleda C D. Scheduling jobs on a K-stage flexible flow shop using a TOC-based (bottleneck) procedure [C] // Proceedings of the 2004 Systems and Information Engineering Design Symposium, Charlottesville, VA, Canada, 2004: 295 ~ 298.
 - 10 Moss H K, Yu W B. Toward the estimation of bottleneck shiftiness in a manufacturing operation [J]. Production and Inventory Management Journal, 1999, 40(2): 53 ~ 58.
 - 11 Lu Jiansha, Shen Miaomiao, Lan Xiuju. Study of the shifting production bottleneck: possible causes and solutions [C] // 2006 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI '06), Shanghai, China, 2006: 684 ~ 688.
 - 12 Liu Mingzhou, Tang Juan, Ge Maogen. Dynamic prediction method of production logistics bottleneck based on bottleneck index [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(5): 710 ~ 716.
 - 13 苏伟, 刘景双, 李方. BP神经网络在水资源承载能力预测中的应用 [J]. 水利水电技术, 2007, 38(11): 1 ~ 4.
Su Wei, Liu Jingshuang, Li Fang. Application of BP neural network to prediction of carrying capacity of water resources [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(11): 1 ~ 4. (in Chinese)
 - 14 张公绪. 新编质量管理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
 - 15 叶涛锋, 韩文民. 确定瓶颈资源的仿真方法研究 [J]. 华东船舶工业学院学报, 2003, 17(4): 80 ~ 84.
Ye Taofeng, Han Wenmin. Method of simulation on determining bottleneck resource [J]. Journal of East China Shipbuilding Institute, 2003, 17(4): 80 ~ 84. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 172 页)

- 10 丁幼春, 王书茂, 陈红. 农用车辆作业环境障碍物检测方 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 23 ~ 27.  
Ding Youchun, Wang Shumao, Chen Hong. Obstacle detection in the working area of agricultural vehicle based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40 (Supp.): 23 ~ 27. (in Chinese)
- 11 Heikkilä J. Geometric camera calibration using circular control points [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(10): 1 066 ~ 1 077.
- 12 于仕琪, 刘瑞祯. 学习 OpenCV [M]. 中文版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- 13 Stefano Mattoccia. Stereo vision: algorithms and applications [M]. Enschede: University of Twente, 2009.
- 14 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 15 斯内尔, 鲍尔美, 刘彦博, 等. Visual Studio 技术大全 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.