

基于 OpenCV 的双目测距系统

王 浩, 许志闻, 谢 坤, 李 杰, 宋成璐

(吉林大学 计算机科学与技术学院, 长春 130012)

摘要: 为解决利用双目设备实现测距并使测距时间控制在毫秒级的问题, 研究了摄像机标定、立体校正、极线约束下的块匹配和三维重建等关键技术。使用立体相机将拍摄多个角度的棋盘照片保存到计算机中进行角点检测和标定, 以获得摄像机参数。使用 Bouguet 标定立体校正算法、立体匹配使用块匹配方法。得到视差图后求出三维点云, 进行三维重建, 根据三角相似原理计算目标物体的距离。使用 OpenCV2.4.3, 在 VS2010 编译环境下, 用 VC++ 编程实现。该系统只需普通立体相机采集图像, 成本低, 与其他立体匹配方法相比, 块匹配方案测距速度快且准确度满足应用的要求。

关键词: 开源计算机视觉库; 块匹配; 立体视觉; 三维重建; 测距

中图分类号: TP317.4

文献标识码: A

Binocular Measuring System Based on OpenCV

WANG Hao, XU Zhiwen, XIE Kun, LI Jie, SONG Chenglu

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The main research is to get the distance by use of 3D-camera. This article will explain some key technologies, such as camera calibration, stereo rectification, SAD (Sum of Absolute Differences), three-dimensional reconstruction and so on. The chessboard pictures are taken by the 3D camera from different angles, then saved to computer, and used to corner detection and camera calibration in order to get the parameters of the camera. Bouguet algorithm is selected as the stereo rectification algorithm. Stereo matching use SAD method. When we get the disparity map and the points clouds we start three-dimensional reconstruction work, then the distance between the target and camera is calculated based on similar triangles principle. The experiment is finished by OpenCV2.4.3 (C++) and VS2010. This system only need an ordinary 3D-camera, which is not expensive. This system is time-saving and accurate when it is used.

Key words: OpenCV; sum of absolute differences (SAD); stereo vision; three-dimensional reconstruction; distance measurement

0 引 言

人眼的立体感知能力虽然很强, 能很轻松地正确判断出两个物体的深度顺序, 但却无法得到物体精确的距离信息。利用计算机立体视觉, 通过精确的标定, 在匹配正确的情况下可以得到非常精确的深度等信息。随着社会的发展和科技的进步, 立体测距的应用领域越来越广泛。目前具有代表性的测距方法有以下3种: 1) 单摄像头配合一个激光笔^[1]。该方法简单精确, 但通过一次计算只能得到一个点的距离。2) 单摄像头配合红外线。该方法应用前景广泛但实现难度大, 且成本较高。3) 利用双摄像头进行立体测距。该方法能同时得到图像上多个物体的距离, 但没匹配到的物体的距离无法得到。

双目立体视觉研究的关键在于标定摄像机和立体匹配两个方向。其使用单目成像设备从不同的位置

收稿日期: 2013-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60973091); 吉林省科技发展基金资助项目(20130101166JC)

作者简介: 王浩(1989—), 男, 河北邢台人, 吉林大学硕士研究生, 主要从事图像处理和机器视觉研究, (Tel) 86-45143088608 (E-mail) wunhao@foxmail.com; 通讯作者: 许志闻(1965—), 男, 长春人, 吉林大学教授, 博士生导师, 主要从事网络流媒体、计算机图形学与图像处理和生物信息学研究 (Tel) 86-43904310477 (E-mail) xuzw@jlu.edu.cn。

获取被测目标物体的多个图像,或利用双目成像设备(如立体摄像机、立体相机)的左右摄像头获取被测目标物体的同一时刻左右图像;利用得到的图像对,基于已经建立的立体视觉模型通过计算左右图像对应点间的位移偏差^[2-4];再结合摄像机焦距等参数,使用三角相似等数学方法计算被测目标物体离摄像机的距离。笔者基于PC机与立体相机利用该方法实现测距。

1 系统环境要求与流程图

开源计算机视觉库(OpenCV: Open Source Computer Vision Library)实现了计算机视觉相关的许多算法,同时也实现了图像处理很多常见的通用算法。实现代码由C函数和C++类构成,运行十分高效。该系统的核心功能使用OpenCV实现。

为实现双目立体测距,笔者使用一个立体相机(见图1),用来同时获取目标物体两个不同角度的图像。

计算机负责处理来自立体相机的图像,计算并输出目标物体的距离。双目立体测距系统的主要框架如图2所示。



图1 实验中所用的立体相机

Fig. 1 The 3D camera used in our experiment



图2 双目测距系统框架

Fig. 2 Frame of the binocular measuring system

2 摄像机模型和标定

2.1 摄像机模型

在最简单的针孔模型中^[2-5],光线从目标物体发射出,然后通过针孔到达成像平面。针孔模型如图3所示,其中 f 为焦距, X 是目标物体的长度, x 是摄像机成像平面上形成的物体图像, Z 为目标物体与摄像机之间的距离。根据相似三角形原理有

$$\frac{-x}{f} = \frac{X}{Z} \quad (1)$$

整理为

$$Z = -f \frac{X}{x} \quad (2)$$

2.2 摄像机标定

在实际使用的摄像机中,因为制造工艺的限制主点不能保证在成像设备的正中心位置,所以引入两个参数 c_x 和 c_y 表示真实主点与理想主点间的偏移。因为像素点在一个普通摄像机上不能保证是正方形,所以使用两个不同的焦距 f_x 和 f_y 。假设成像平面上的点为 $q = [x \ y \ 1]^T$,目标物体点为 $Q = [X \ Y \ Z \ 1]^T$,引入参数 s (比例因子)和单应性矩阵 H ,其定义如下

$$q = sHQ \quad (3)$$

其中 H 由两个矩阵表示^[6]: $H = MW$ 。且

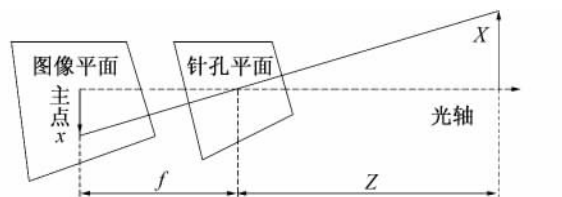


图3 针孔摄像机模型

Fig. 3 Pinhole camera model

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

为摄像机内参数矩阵。

$$W = [R \quad T] \quad (5)$$

用于目标物体平面与摄像机平面的旋转平移变换,即摄像机外参数矩阵。

考虑到透镜畸变,假设 $q_p(x_p, y_p)$ 为校正后的点, $q_d(x_d, y_d)$ 为畸变后的点,则有

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 x_d y_d + p_2(r^2 + 2x_d^2) \\ p_1(r^2 + 2y_d^2) + 2p_2 x_d y_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 $(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$ 构成一个 5×1 的矩阵,该矩阵就是摄像机的畸变矩阵。

标定是为得到摄像机的上述参数。OpenCV 使用平面物体(例如平面黑白棋盘)标定摄像机。使用立体相机从不同角度不同距离拍摄 16 对左右棋盘图像进行标定^[4],左右棋盘图对如图 4 所示。在黑白棋盘中,黑白方块是交替排列的,以便测量时不会造成任何一边的偏移。在 OpenCV 中调用 findChessboardCorners() 函数可找到棋盘角点信息的近似值,再使用 cornerSubPix()^[7] 函数得到棋盘角点的亚像素坐标。使用 drawChessboardCorners() 函数绘制出检测到的棋盘角点(见图 5),以便在实验中观察结果,然后使用 stereoCalibrate() 函数完成双目标定。

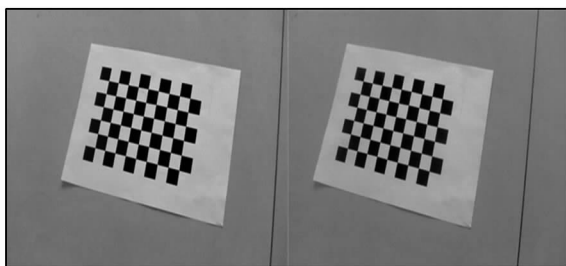


图 4 棋盘图

Fig. 4 Chessboard pattern

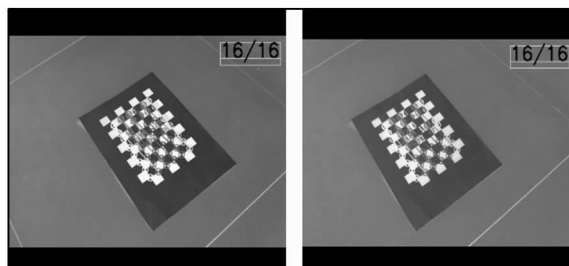


图 5 检测所有的角点

Fig. 5 Detect every corners

3 立体校正

有了旋转矩阵 R 和平移向量 T ,立体校正 Bouguet 算法就能简单地使左右图像中的每幅重投影次数最小且重投影畸变最大,所以使立体匹配更加准确和快速,并使左右图像的观测面积最大。

通过投影矩阵 P 把三维点转换成可以在平面上显示的二维点

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

投影平面上的点坐标为 $(x/w, y/w)$ 。同理,二维点也可通过重投影矩阵 Q 重投影为三维点^[8]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T_x & (c_x - c'_x)/T_x \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 (c_x, c_y) 为主点在左图像上的坐标, f 为焦距, T_x 为双目间距, c'_x 为主点在右图像的 x 坐标。根据式(8)得到三维坐标为: $(X/W, Y/W, Z/W)$ 。在 OpenCV 中可通过 stereoRectify() 函数完成以上校正功能,

该函数输入参数是前面标定返回的结果^[2]: 摄像机矩阵, 畸变向量, 左右旋转矩阵 R 和平移向量 T 。输出参数有式(7)中投影矩阵 P , 分别为 P_{left} 和 P_{right} , 以及重投影矩阵 Q 。可调用函数 $\text{InitUndistortRectifyMap}()$ 生成图像校正所需的映射矩阵。

4 立体匹配与测距

立体匹配完成匹配左右摄像机视图的相同特征, 并得到视差图, 视差值是匹配时相同特征点在 x 坐标轴上的差值 $x_l - x_r$ 。得到视差图后可通过三角相似的原理得到目标物体的距离。

4.1 立体成像原理

假设摄像机没有畸变, 左右摄像机的成像平面已经严格对准, 左右主点已经校准, 主光线也是平行的。理想立体摄像机模型如图6^[8]所示。

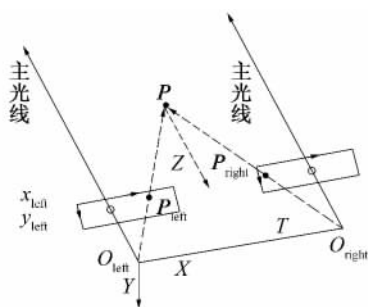


图6 立体摄像机模型

Fig.6 The model of 3D camera

OpenCV 中使用函数 $\text{StereoBM}()$ 实现了快速而有效的块匹配算法 (BM: Block Matching), 它使用绝对误差累计^[2]的小窗口 (SAD: Sum of Absolute Differences) 查找左右两幅校正的图像之间的最优匹配点。该算法对图像中的弱匹配点即弱纹理点的匹配效果一般, 但并不影响其总体匹配效果。块匹配立体匹配算法主要有归一化预过滤、沿极线使用小窗口查找匹配点和挑选高质量匹配点等重要过程。

归一化处理可减小弱匹配点的低匹配率, 增强图像纹理强度并减少亮度差异。经过图像预处理后, 通过 SAD 窗口滑动查找完成匹配点的搜索。因为校正左右图像后, 每行都是极线, 因此左右匹配位置肯定在同一行上; 对于左图像上的点, 最佳匹配点肯定在右图像上的对应行上。由于搜索过程复杂度不高, 且匹配效果较好, 因此, 块匹配算法是一种很优秀的匹配算法^[8]。最优匹配点的查找需要使用匹配代价

$$C(x, y, d) = \sum_{(x, y) \in D} |E_l(x, y) - E_r(x + d, y)| \quad (11)$$

其中 E 表示匹配窗口灰度均值, D 为匹配窗口, d 为窗口的位移量。代价越小, 匹配度越高。通过规定视差的搜索范围构成一个双目视界, 具体的数值根据实验环境和工具的实际情况进行设置。本系统设置的搜索范围值是 144 像素。找到匹配点, 也就得到了视差, 根据式(10)即可得到目标物体与摄像机的距离, 这与物体的横向平移位置无关。只要得到视差就可由三角相似原理求得距离, 这是因为一个固定的视差可表示为目标物体离摄像机距离恒定的平面(见图7)。

最后进行过滤处理, 过滤处理就是在两个视图的待选匹配点中过滤虚假匹配。与双目立体视觉匹配的预处理技术^[9,10]相比, 在函数 $\text{StereoBM}()$ 中设置参数 uniquenessRatio 实现过滤功能更加快速。当 $\text{uniquenessRatio} > (\text{match_value} - \text{min_match}) / \text{min_match}$ 时, 把它作为假匹配点并过滤, 反之, 则保存为真匹配点, 通过该功能大部分虚假匹配点能被过滤掉。

设图6中点 P_{left} 坐标为 (x_l, y_l) , P_{right} 坐标为 (x_r, y_r) , 则视差的定义为 $d = x_l - x_r$ 。根据相似三角形原理有

$$\frac{T}{Z} = \frac{T - (x_l - x_r)}{Z - f} \Rightarrow Z = \frac{fT}{x_l - x_r} \quad (10)$$

由式(10)易知视差 d 和距离 Z 成反比, 当视差很小时, 视差的变化对距离 Z 的影响较大; 当视差较大时, 视差的变化对距离 Z 的影响较小, 因此, 测距系统仅当距离较近时精度较高。左右摄像机的旋转是为了实现左右摄像机的数学对准。

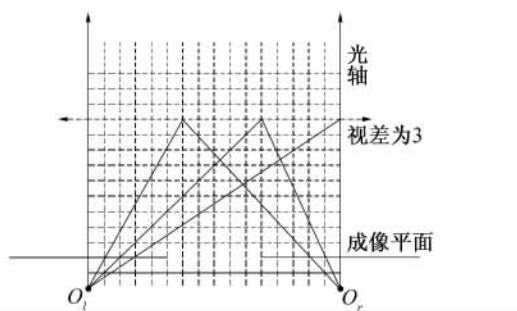


图7 视差为3时形成的固定平面

Fig.7 The formed plane when disparity is 3

textureThreshhold 参数的使用可减少噪声对匹配的影响,当匹配响应小于 textureThreshhold 值时,不予考虑。设置合理的 textureThreshhold 参数值对匹配效果至关重要,该值太大会使左右图像的匹配点很少,导致匹配失真,当然也不能太小,否则,会出现大量的误匹配区域。基于块的匹配在物体边界匹配时,可能会同时产生大小视差的局部区域,若不做处理将导致匹配失真。因此,设置散斑探测器在散斑窗口探测,窗口大小由参数 speckleWindowSize 设置,只有探测到的最大最小视差在规定范围内的匹配才被保留,这个范围由参数 speckleRange 设置。

4.2 获得目标距离

在获得视差映射后,利用式(8)、式(9),通过简单的矩阵相乘就可提取深度信息。三维坐标就是 $(X/W, Y/W, Z/W)$ 。OpenCV 中使用 reprojectImageTo3D() 函数实现该功能,该函数输入上面得到的视差数据,输出所需的三维点阵,然后提取深度信息。

5 测距系统实验结果

双目立体测距系统的界面利用 VS2010 环境的 MFC(Microsoft Foundation Classes) 设计(见图 8)。测试环境是在实验室内,可获得鼠标点击处目标物体的距离。

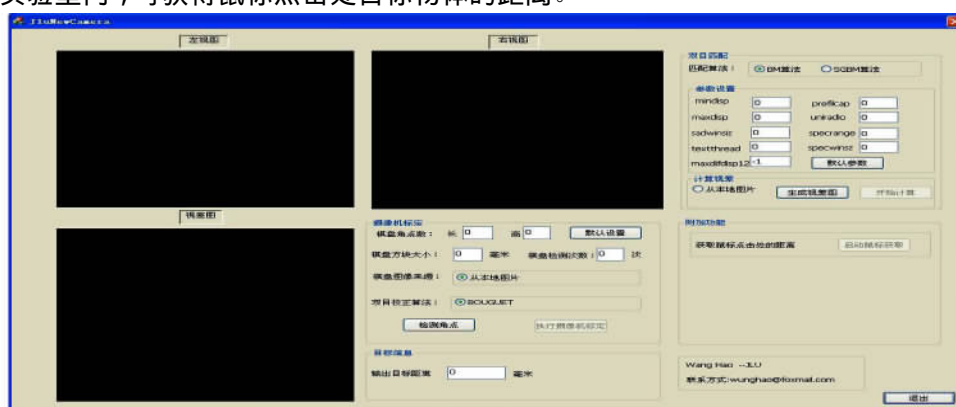


图 8 测距系统界面

Fig. 8 The interface of the measuring system

使用该系统测量多个目标物体的距离并用直尺进行实际测量,把物体摆放到合适的位置,使用直尺测量的值为整数,以保证结果的准确性。图 9 为目标物体图像,因为使用了轮廓检测相关的技术,系统用矩形标记出了明显的物体。图 10 为进行立体匹配后系统输出的左右图像对视差图,这并不是深度图,需要利用式(13)得到物体的真正深度信息。图 11 为笔者用鼠标点击图像上杯子时系统输出杯子的距离。更多实验结果如表 1 所示。

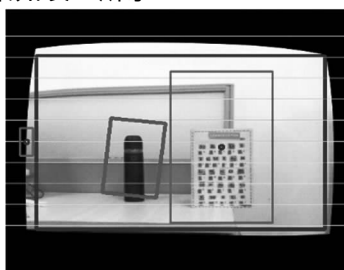


图 9 目标图像

Fig. 9 The targets



图 10 伪彩色视差图

Fig. 10 The pseudo-color disparity map

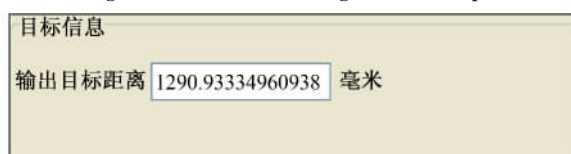


图 11 结果

Fig. 11 Output

表 1 实验结果
Tab.1 Experiment result

物体编号	系统测量值/mm	软尺测量值/mm	误差/%	物体编号	系统测量值/mm	软尺测量值/mm	误差/%
1	302.43	300	0.81	7	1 526.09	1 500	1.74
2	504.62	500	0.92	8	1733.34	1 700	1.96
3	709.87	700	1.41	9	1939.38	1 900	2.07
4	915.45	900	1.72	10	2 143.71	2 100	2.08
5	1 119.81	1 100	1.80	11	2 346.21	2 300	2.01
6	1 325.04	1 300	1.93				

考虑到标定误差和实际测量误差,近距测距结果达到了预期要求。使用 BM 算法测距速度很快,可以达到实时应用的要求,而 SGBM(Semi-Global Block Mathing) 算法和 GC(Graph Cuts) 算法的测距速度较慢(见表 2)。

表 2 3 种算法对比
Tab.2 Comparison of the three algorithm

照片编号	时间/ms			测距误差/%		
	BM 算法	SGBM 算法	GC 算法	BM 算法	SGBM 算法	GC 算法
1	92	480	5 111	0.81	0.79	0.27
2	130	621	6 128	0.92	0.83	0.31
3	147	684	8 892	1.41	1.15	0.23
4	122	691	7 009	1.72	1.83	0.19
5	150	686	7 339	1.80	1.09	0.29

由表 2 可知,BM 算法测距速度比 SGBM 算法和 GC 算法测距速度快很多,而误差只比 SGBM 算法稍大,这也正是该系统采用 BM 算法测距的主要原因。

6 结 语

笔者基于 OpenCV,实现了对立体相机拍摄的图片中的物体测距。为实现测距的功能,对摄像机的标定、立体校正、图像去噪、极线约束下的块匹配、从视差图中提取深度信息等关键技术进行了研究。并使用 C++ 语言编程实现,使用 MFC 设计界面,使用文中的块匹配算法进行匹配,可得到图片上所有匹配到的物体的距离信息。通过鼠标点击得到图片上每个点位置的距离,对近距离物体测距速度快且精度高。但对图片上的不明显的小物体不敏感,若需要检测小物体还需要手动调整相应参数,且对于远距离物体的测距误差较大,这需要在今后的研究工作中加以改进。

参考文献:

[1]宋立明,李秀华,李万龙. 基于计算机视觉的储备粮智能稽核方法 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版,2013,31(1): 107-112.
SONG Liming, LI Xiuhua, LI Wanlong. Survey on Reserved Grain Intelligent Audit Methods Based on Computer Vision [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2013, 31(1): 107-112.

[2]布拉德斯基,克勒. 学习 OpenCV [M]. 于仕琪,刘瑞祯,译. 北京: 清华大学出版社,2009: 1-16,406-437,441-493.
GARY BRADSKI, ADRIAN KAEHLER. Learning OpenCV [M]. Beijing: Tsinghua University, 2009: 1-16,406-437,441-493.

[3]井建辉. 业视觉系统中摄像机定标策略问题 [J]. 河北工业大学学报,2003,32(6): 93-98.
JING Jianhui. The Camera Calibration Strategy in Industrial Vision System [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2003, 32(6): 93-98.

[4]罗丹,廖志贤. 基于 OpenCV 的双目立体视觉测距 [J]. 大众科技,2011(4): 52-53,71.
LUO Dan, LIAO Zhixian. The Binocular Stereo Vision Measuring System Based on Opencv [J]. Popular Science & Technology, 2011(4): 52-53,71.

- [5] 罗桂娥. 双目立体视觉深度感知与三维重建若干问题研究 [D]. 长沙: 中南大学信息科学与工程学院, 2012.
LUO Guie. Some Issues of Depth Perception and Three-Dimension Reconstruction from Binocular Stereo Vision [D]. Changsha: School of Information Science and Engineering, Central South University, 2012.
- [6] 夏茂盛, 孟祥磊, 宋占伟, 等. 基于双目视觉的嵌入式三维坐标提取系统 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2011, 29(1): 61-66.
XIA Maosheng, MENG Xianglei, SONG Zhanwei, et al. Embedded 3D-Coordinate Extraction System Based on Binocular Vision [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2011, 29(1): 61-66.
- [7] CHEN Dazhi, ZHANG Guangjun. A New Sub-Pixel Detector for X-Corners in Camera Calibration Targets [J]. WSCG (Short Papers), 2005(5): 97-100.
- [8] 刘盼, 王金海. 基于平行双目立体视觉的测距系统 [J]. 计算机应用, 2013, 32(S2): 162-164.
LIU Pan, WANG Jinhai. Distance Measurement System Based on Parallel Binocular Stereo Vision [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 32(S2): 162-164.
- [9] 汪珍珍, 赵连玉, 刘振忠. 基于 MATLAB 与 OpenCV 相结合的双目立体视觉测距系统 [J]. 天津理工大学学报, 2013, 1: 45-48.
WANG Zhenzhen, ZHAO Lianyu, LIU Zhenzhong. Binocular Stereo Vision Distance Measurement System Based on a Combination of Matlab and OpenCV [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2013(1): 45-48.
- [10] 常淑华, 宋艳秋, 杨永敏. 双目立体视觉匹配的预处理技术 [J]. 吉林大学学报: 理学版, 2012, 50(1): 95-100.
CHANG Shuhua, SONG Yanqiu, YANG Yongmin. Matching Preprocessing Technology of Binocular Stereo Vision [J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2012, 50(1): 95-100.

(责任编辑: 刘俏亮)