

一种改进自适应权重稀疏区域立体匹配算法

卢 迪, 林 雪

(哈尔滨理工大学 电气与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 立体匹配是根据两幅或者多幅具有一定视差的图像, 获得图像之间视差图的过程. 针对自适应权重立体匹配算法难以同时满足精度和速度的不足, 提出一种符合人眼视觉特性的改进自适应权重稀疏区域立体匹配算法. 首先对权重公式进行改进, 改进后根据公式计算每个点的权重, 其次对图像进行稀疏的区域匹配获得稠密视差图, 然后将所得视差图进行左右一致性检测及遮挡填充, 最后对视差图进行中值滤波, 以去除孤立的误匹配点和噪声点. 实验结果表明, 改进方法比 Yoon 的自适应权重算法匹配效率提高了 90 多倍, 比 SSD 精度提高了 12.34%, 能够快速获得精确的视差图, 满足系统对实用性的要求.

关键词: 立体匹配; 改进自适应权重; 稀疏区域匹配; 左右一致性检测

DOI: 10.15938/j.jhust.2016.01.017

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2016)01-0083-06

LU Di, LIN Xue

(School of Electrical and Electric Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Stereo matching is to obtain disparity map from two or more images whose pixels show disparity between each other. Because adaptive support-weight algorithm is difficult to meet both accuracy and speed, an improved adaptive support-weight sparse region approach based on HVS (human visual system) is proposed. First, we improve the traditional support-weight formula, and the support-weight of the points can be calculated according to the improved support-weight formula. Second, the dense disparity map is obtained by using sparse region-based matching. Third, left-right consistency check and blocking filling is performed for the obtained disparity map. Finally, median filter is used to remove isolated mismatching points and noise points. Experiment results show that, by using the presented method, the matching efficiency is above 90 times faster than that of the adaptive support-weight algorithm proposed by Yoon, and the matching accuracy is 12.34% higher than that of SSD, so the improved algorithm is verified for obtaining accurate disparity map at a fast pace and meeting the requirements of system practicability.

Keywords: stereo matching; proposed adaptive support-weight; sparse region-based matching; left-right consistency check

收稿日期: 2015-03-10

作者简介: 卢 迪(1971—), 女, 博士, 教授, E-mail: ludizeng@hrbust.edu.cn;

林 雪(1991—), 女, 硕士研究生.

0 引言

双目立体视觉作为计算机视觉的一个重要分支,广泛应用于场景的三维重建,位姿检测,目标跟踪,无人机导航及增强现实等领域^[1-3]. 立体匹配是双目立体视觉中的重点与难点之一^[4],其准确性会影响实际应用的效果. 因此,快速地获取精度高的视差图对双目立体视觉具有重要意义^[5].

区域匹配根据优化方式的不同可以分为基于全局区域的立体匹配方法和基于局部区域的立体匹配方法^[6]. 全局立体匹配虽然精度高,但匹配效率很难满足实际应用的需求^[12-13]. 局部立体匹配的精度受到支持窗口大小的影响^[14],窗口越大,包含的信息越多,弱纹理区域的匹配精度越高,但同时也会导致强纹理区域和遮挡区域的匹配精度降低;反之,窗口越小,强纹理区域和遮挡区域的匹配精度越高,但弱纹理区域因为没有包含足够的信息,匹配精度降低.

在局部立体匹配算法中,基于固定窗口的立体匹配^[15]是以待匹配点为中心建立一个矩形窗口,从而进行立体匹配的算法. 它虽然计算速度快,但因为并没有考虑视差平滑性的约束,所以匹配效果并不好. Fusiello^[16]采用可移动的窗口进行立体匹配,即将待匹配点限制在支持窗口的中心,而是设置9个可以移动的窗口,它与固定窗口法相比,虽然匹配效果有所提高,但计算量也增加为原来的数倍,并且它也不能保证支持窗口内的其他像素点与待匹配点具有相同或相似的视差. Yoon^[17]提出了一种自适应权重的方法,它的实质是根据色彩相似性和几何距离确定权重,为支持窗口内各邻域像素点分配权重值. 使与中心点具有很强相似性的邻域点获得较大的权重. Yoon 的算法匹配精度很高,但匹配效率很低.

针对自适应权重算法的匹配精度和速度难以同时满足这一矛盾,提出一种改进的自适应权重稀疏区域立体匹配算法,该算法分为3步:1)用符合人眼视觉特性的自适应权重公式计算各点的权重值;2)计算权重后,对图像进行稀疏区域立体匹配,获得稠密的视差图;3)对所得视差图进行左右一致性检测,填充被检测出的遮挡点,最后对视差图进行中值滤波.

1 自适应权重

1.1 Yoon 的自适应权重算法

文^[17]中 Yoon 提出的自适应权重算法的核心

思想是以待匹配点为中心建立一个矩形窗口,根据窗口内各邻域像素点与中心点之间的颜色相似度和几何距离为各个邻域点分配权重. 因此,距离中心点越近,与中心点的颜色越相似的点具有越大的权重值. 权重的表达式为:

$$w(p, q) = \exp\left(-\left(\frac{\Delta c_{pq}}{\gamma_c} + \frac{\Delta g_{pq}}{\gamma_g}\right)\right) \quad (1)$$

其中, p 为中心点, q 为邻域像素点; Δc_{pq} 为 p 和 q 的颜色相似度, Δg_{pq} 为 p 和 q 的几何距离; γ_c 和 γ_g 分别为颜色和距离的参数. 计算完权重之后,按照下式得到两幅图像的相似性测度:

$$C(p, \bar{p}) = \frac{\sum_{q \in N_p, \bar{q} \in N_{\bar{p}}} w(p, q) w(\bar{p}, \bar{q}) e(q, \bar{q})}{\sum_{q \in N_p, \bar{q} \in N_{\bar{p}}} w(p, q) w(\bar{p}, \bar{q})} \quad (2)$$

其中: $p, \bar{p}$ 分别为左右两幅图像的对应匹配点; N_p 为左图像中以 p 为中心点的支持窗口, q 是 N_p 中的邻域像素点; $N_{\bar{p}}$ 为右图像中以 $\bar{p}$ 为中心点的支持窗口, $\bar{q}$ 是 $N_{\bar{p}}$ 中的邻域像素点; $e(q, \bar{q})$ 为 q 和 $\bar{q}$ 之间的匹配代价. Yoon 采用灰度差绝对值之和 SAD (sum of absolute differences) 计算匹配代价的初始值. Yoon 提出的自适应权重算法具有很高的匹配精度,但计算量非常大,且耗时长,不能满足实用性的要求.

Yoon 算法的权重特性曲线如图1所示.

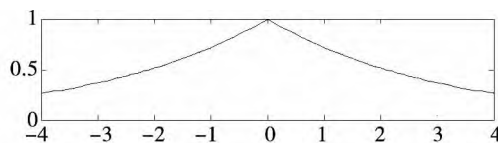


图1 Yoon 自适应权重特性曲线

图1中以0为中心点,横坐标代表中心点左侧和右侧的像素点,纵坐标代表权重值. 从图中可以看出,自适应权重值下降缓慢,并且无论距离中心点远近,曲线的下降趋势都是一样的,这与人眼的视觉特性不相符. 因此,为了让权重值能够更接近人眼视觉特性,本文提出了一种改进的自适应权重.

1.2 改进的自适应权重

人眼在观察物体时,对物体的中心能够自动聚焦,而对不关注的区域散焦. 人眼关注的区域比较清晰,不关注的区域比较模糊,且随着离关注中心距离的增大,模糊程度也增大. 人眼的视觉特性^[18]表明,距离人眼关注中心越近,关注度衰减的越慢,距离关注中心越远,关注度衰减的越快. 人眼关注度的示意图如图2所示.

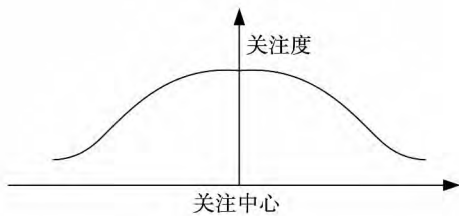


图 2 人眼关注度示意图

一般的立体匹配算法都假设窗口内的点具有相同的视差,但基于这种假设的匹配算法在视差不连续区域的匹配精度都比较低,文 [9] 认为窗口内的视差服从高斯分布. 基于以上两点,提出一种改进的自适应权重. 以邻域像素点到窗口中心像素点的几何距离作为权重进行立体匹配. 权重 W 的公式如下:

$$W(x+i, y+j) = ae^{-kf^2} \quad (3)$$

其中: W 服从高斯分布, x 和 y 是中心点的坐标, $f = \sqrt{i^2 + j^2}$ 为邻域像素点与中心像素点的几何距离, a 、 k 为调节参数, a 调节幅值, k 用于调节 W 的特征曲线的宽窄. 中心点邻域内的像素点根据与中心点的几何距离大小自适应权重值. 权重 W 的特性曲线如图 3 所示.

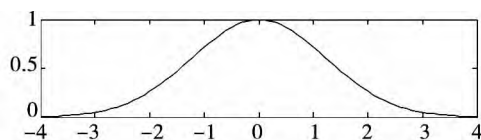
图 3 改进的自适应权重 W 的特性曲线

图 3 中以 0 为中心点, 横坐标代表中心点左侧和右侧的像素点, 纵坐标代表权重值. 对比图 1 和图 3, 可以看出改进后的权重 W 越靠近中心点曲线衰减的越慢, 该点的参考价值越大, 越远离中心点曲线衰减的越快, 该点的参考价值越小, 这也符合前面所说的人眼视觉特性.

2 稀疏区域立体匹配

本文主要研究灰度图像匹配, 采用截断绝对误差 TAD (truncated absolute differences) 作为匹配代价, 如式 (4) 所示:

$$TAD(x, y, d) = \min\{|I_L(x+i, y+j) - I_R(x+i+d, y+j)|, T\} \quad (4)$$

其中: I_L, I_R 分别为左图像和右图像的灰度值, d 为视差, $TAD(x, y, d)$ 为左右图像中对应点的灰度差的

绝对值, T 为截断阈值. 由于在视差不连续区域左右图像像素点之间灰度差值会很大, 若直接用这个结果进行后续计算, 会引入误匹配, 因此用 T 来弥补单纯使用灰度绝对值误差 AD (absolute differences) 的不足.

自适应权重以及后续进行的左右一致性检测能够有效的提高匹配精度, 但同时也增加了计算量. 针对于此, 本文提出一种对匹配代价稀疏的聚合方式. 因为本文提出的算法需要计算左到右以及右到左的视差图, 在这个过程中存在一定量的信息冗余, 因此在支持窗口内先每隔一行一列选择一个像素点计算权重, 因为中心点十字方向上的像素点与其他邻域点相比更能够表征中心点, 所以, 在每隔一行一列取完一个点后, 再取中心点十字方向上的所有像素点并计算权重. 以 5×5 窗口为例, 具体的聚合形状如图 4 所示.

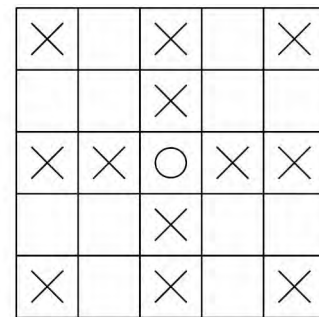


图 4 稀疏聚合方式示意图

图 4 中, 'o' 代表中心像素点, 'x' 代表最后需要计算权重并参与聚合的邻域像素点, 从图 4 可知, 采用稀疏的聚合方式对匹配代价进行聚合能够减少计算量, 尤其是当匹配窗口比较大时.

结合 1.2 节中改进的自适应权重模型, 可得匹配代价聚合公式:

$$SSWTAD = \sum_{(i,j) \in w_L} W(x+i, y+j) \times TAD(x, y, d) \quad (5)$$

其中, w_L 为左图像中的匹配窗口, 用式 (5) 作为区域匹配的相似性度量函数, 使用 WTA (winner take all) 策略, 得到初始视差图, 即在目标图像中选择与待匹配点具有最小 SSWTAD 值的点所对应的视差作为待匹配点的视差值.

3 视差优化

遮挡问题在立体匹配中是不可避免的问题, 所

谓遮挡,是指某个点只出现在一幅图像上,因此它在另一幅图像上没有匹配点,而在匹配过程中算法肯定会赋予该点一个视差值,这时就出现了错误的匹配,导致匹配精度降低.因此,采用左右一致性检测(left-right consistency check, LRC)来检测图像中的遮挡点,然后对遮挡点进行填充.经过上述处理,视差图中可能还会残留孤立的噪声点或者误匹配点.因为中值滤波对滤除脉冲干扰及椒盐噪声最为有效,因此,对视差图进行中值滤波处理,滤除那些孤立的噪声点和误匹配点.

4 改进的立体匹配方法流程

改进的立体匹配方法具体流程概述如下:

- 1) 利用改进方法进行左图像→右图像的立体匹配,获得左图像→右图像的视差图 D_L ;
- 2) 再进行右图像→左图像的立体匹配,得到右图像→左图像的视差图 D_R ;
- 3) 若左图像中的一点 P 的视差为 $D_L(P)$,则它在右图像中的匹配点为 $P - D_L(P)$,检验是否满足 $|D_L(P) - D_R(P - D_L(P))| < \delta$,若不满足,则该点被标记为遮挡点;
- 4) 找到遮挡点左侧和右侧的第一个非遮挡点,它们的视差值分别记为 PL 和 PR ,选取二者中最小的值作为遮挡点的视差值,即 $D(P) = \min(D(PL), D(PR))$,选取较小的值是因为对于左图而言遮挡点通常为背景,而背景的深度比前景要大且深度与视差成反比,因此选择较小的视差值作为遮挡点的视差值;
- 5) 对4)中所得视差图进行中值滤波处理,获得优化后的视差图.

改进的立体匹配方法的流程图如图5所示.

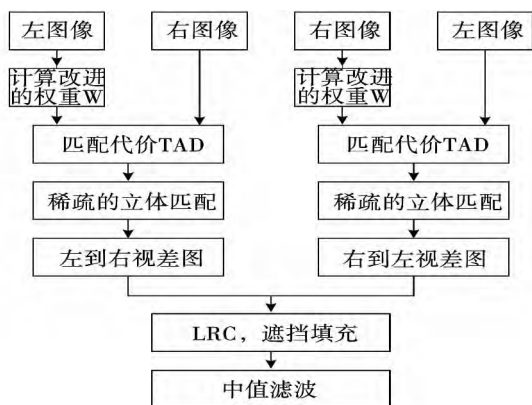


图5 改进方法流程图

5 实验与分析

采用卡内基梅隆大学的 Middlebury 平台上提供的标准立体图像对 tsukuba 对改进后的方法在匹配精度和计算时间两方面进行测试.所有测试过程都是在一台 CPU 为 AMD A6-3670 2.70GHz 主频,2G 内存的计算机上使用 Matlab R2010b 完成的.

将 tsukuba 图像运用灰度差平方之和 SSD(sum of squared differences),文[7]中 Yoon 的自适应权重算法,改进的自适应权重与不稀疏的区域匹配相结合的方法(sum of weighted-support truncated absolute differences, 简称为 SWTAD)以及本文提出的改进方法获取视差图.经多次实验得到 SSD 在窗口大小为 15×15 时可获得较好的结果,因此选择 15×15 的 SSD 与其他算法比较.本文方法用 11×11 的窗口对测试图像进行匹配,截断阈值 $T=6$,权重模型中 $a=0.3$, $k=1/172$,左右一致性检测阈值 $\delta=1$.本文方法所采用的参数是由大量实验分析得来的.实验对比结果如图6所示.

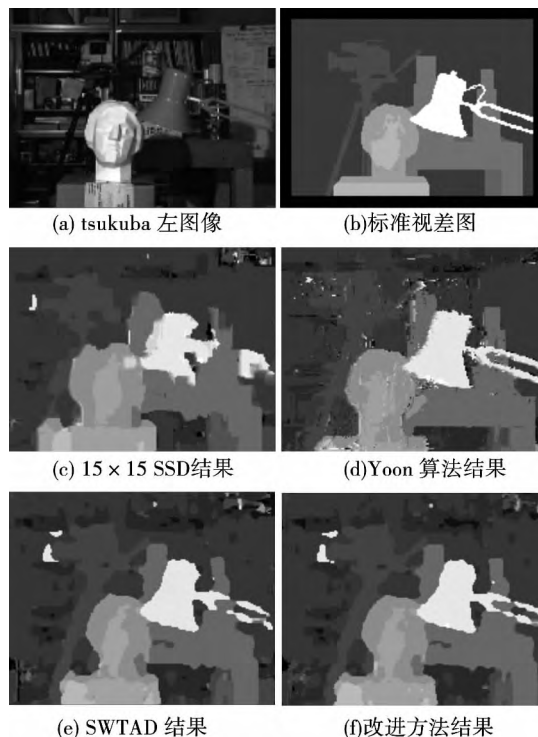


图6 实验结果对比

图6(a)为 tsukuba 左图像,图6(b)为 Middlebury 测试平台给出的 tsukuba 标准视差图.从图6(c)可以看出, 15×15 SSD 所得的视差图边缘轮廓不清晰,这是因为 SSD 算法匹配代价在窗口中聚合相当于

一个低通滤波的过程,窗口越大,截止频率越低,物体的边缘越模糊.图 6(d)的边缘轮廓最整齐,最清晰,图 6(f)的边缘要比图 6(c)的清晰许多,说明提出的改进方法能够弱化因窗口增大而导致的边缘模糊问题,能更好的保留图像的细节.虽然,图 6(d)的边缘比图 6(f)的要清晰,但 Yoon 算法的计算时间比较长,并不适合在对实时性要求较高的场所使用,关于各种算法在时间方面的性能将在后面进行分析.

以上是从主观方面对算法的性能进行比较,接下来对算法在客观方面进行比较.采用国际上公认的立体匹配算法性能评价指标 PBM(percentage of bad matching),即错误匹配像素的比率来评价算法,PBM 的公式为:

$$B = \frac{1}{N} \sum_{(x,y)} (|d_c(x,y) - d_T(x,y)| > \delta_d) \quad (6)$$

式中, $d_c(x,y)$ 为计算所得的视差值, $d_T(x,y)$ 为真实视差值, N 为像素的总个数, δ_d 为阈值,一般情况下,值为 1.将上述 4 种方法上传到 Middlebury 测试平台上,得到测试结果.每个方法的测试结果及所需的计算时间如表 1 所示.

表 1 Middlebury 测试结果及计算时间

Tsukuba	n-occ/%	All/%	Disc/%	平均错误匹配率/%	计算时间/s
Yoon 算法	1.38	1.85	6.90	3.38	1719.88
改进算法	4.94	5.85	13.8	8.20	18.18
SWTAD	5.22	6.15	15.3	8.89	30.71
SSD	10.1	11.9	41.7	21.23	18.38

(注: n-occ 为非遮挡区域的误匹配率,all 为所有区域的误匹配率,disc 为视差不连续区域的误匹配率)

表 1 中 n-occ,all,disc 均通过式(5)计算得出.由表 1 和图 6(e)及图 6(f)可知,本文提出的改进方法虽然采用的是稀疏的聚合方式,但匹配准确率比不采用稀疏聚合方式的方法(即 SWTAD)还要高一些,且时间缩短了将近一半.匹配精度没有降低反而提高的原因是在正方形的匹配窗口中不是所有的点都与中心点具有相同或者相似的视差,稀疏的聚合方式一定程度上能够减少一些这样的点参与聚合,从而使匹配精度有较小的提高.由此可知,采用稀疏的聚合方式是有意义的.经 Middlebury 测试平台得到的 SSD 的平均错误匹配率为 21.23%,所提的改进方法的平均错误匹配率为 8.20%,在非遮挡区域,全部区域,视差不连续区域的匹配精度都有明显的提高.由表 1 可知,SSD 与提出的改进方法耗时几

乎相同,而改进方法的精度要比 SSD 高 13.03%,因此改进方法比 SSD 更具有竞争力.Yoon 的自适应权重算法虽然匹配精度较高,但需要 1 719.88s 大约 29 min 才能完成,因此它的计算时间不能满足一些实际应用的需求.而改进方法能够较快的获得精度较高的视差图,在一些对匹配精度和匹配效率要求都较高的场合,改进方法具有很大的优越性.

所提的改进方法对 Middlebury 测试平台的其他图像对也有很好的匹配结果,如图 7 所示.

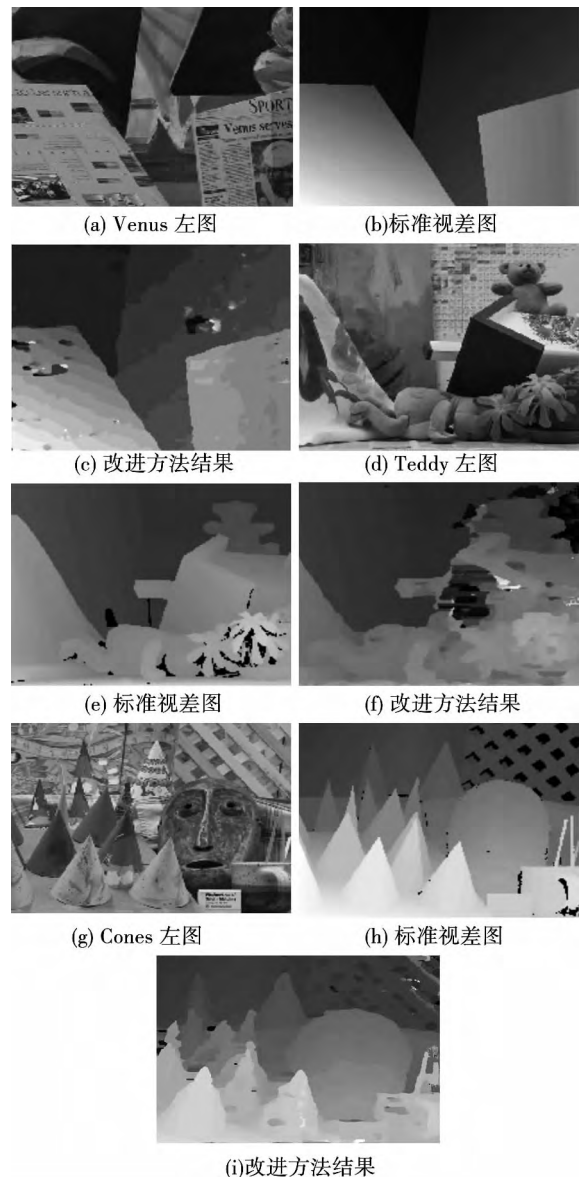


图 7 其他立体图像对实验结果

6 结 论

本文提出了一种符合人眼视觉特性的改进自适

应权重稀疏区域立体匹配算法. 首先计算改进的自适应权重, 然后对输入图像进行稀疏的区域匹配, 获得视差图, 最后再利用 LRC 和中值滤波对视差图进行优化, 得到以下结论:

1) 采用高斯函数作为自适应权重, 使邻域内每个点的权重能够更接近人眼的视觉特性, 从而得到更好的结果;

2) 提出了一种稀疏的聚合方式, 以减少 LRC 检测时的信息冗余, 提高匹配效率;

3) 与 Yoon 的自适应权重算法和 SSD 相比, 改进方法在满足匹配效率要求的基础上, 能够较大程度的提高匹配精度, 降低错误匹配率, 更能满足实际应用的需求;

4) 所提方法的不足之处在于, 匹配时采用的是固定窗口, 在以后的工作和研究中, 将自适应窗口, 进一步提高算法的性能.

参 考 文 献:

- [1] 王欣, 袁坤, 于晓, 等. 基于运动恢复的双目立体视觉三维重建系统设计 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1379-1387.
- [2] 张梁, 徐锦法, 夏青元. 双目立体视觉的无人机位姿估计算法及验证 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(5): 66-72.
- [3] 张娟, 潘建寿, 吴亚鹏, 等. 基于双目立体视觉的运动目标跟踪与检测 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(25): 191-194.
- [4] 周龙, 徐贵力, 李开宇, 等. 无人机导航场景中立体匹配算法研究 [J]. 航空兵器, 2012, 1: 48-52.
- [5] 赵敏, 刘秉琦, 武东升. 增强现实装配和维修系统的技术研究 [J]. 光学仪器, 2012, 34(2): 16-20.
- [6] STENTOU MIS C, GRAMMATIKOPOULOS L, KALISPERAKIS I, et al. A Local Adaptive Approach for Dense Stereo Matching in Architectural Scene Reconstruction [C] // 5th International Workshop on 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures. Netherlands: Elsevier, 2013.
- [7] 刘和祥, 边信黔, 范士波. 多自由度试验台架的 AUV 避障模拟研究 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 143-148.
- [8] 许腾, 黄铁军, 田永鸿. 车载视觉系统中的行人检测技术综述 [J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(4): 359-367.
- [9] 隋婧, 金伟其. 双目立体视觉技术的实现及其进展 [J]. 电子技术应用, 2004, 10: 3-7.
- [10] 何桢, 达飞鹏. 置信度传播和区域边缘构建的立体匹配算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(11): 2060-2066.
- [11] 王洋, 范剑英, 林立军, 等. 物流配送路径优化理论在立体匹配技术中的应用研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(2): 24-28.
- [12] SCHARSTEIN D, SZELISKI R, ZABIH R. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-frame Stereo Correspondence Algorithms [J]. International Journal of Computer vision, 2002, 47(1): 7-42.
- [13] 霍智勇, 朱秀昌. 基于区域的立体匹配算法研究 [J]. 南京邮电大学学报, 2011, 31(3): 44-49.
- [14] HUMENBERGER M, ZINNER C, WEBER M, et al. A Fast Stereo Matching Algorithm Suitable for Embedded Real-time System [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010: 1180-1202.
- [15] 李静, 于虹. 区域的实时立体匹配的改进算法 [J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(3): 231-235.
- [16] FUSIELLO A, ROBERTO V, TRUCCO E. Efficient Stereo with Multiple Windowing [C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 1997: 858-863.
- [17] YOON K J, KWEON I S. Adaptive Support-weight Approach for Correspondence Search [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(4): 650-656.
- [18] NUR G, DE SILVA V, ARACHCHI H K, et al. Sensitivity of the HVS for Binocular Disparity Cue in 3D Displays under Different Ambient Illumination Conditions [C] // IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). USA: IEEE, 2012: 459-460.
- [19] KANADE T, OKUTOMI F M. A Stereo Matching Algorithm with an Adaptive Window: Theory and Experiment [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(9): 920-932.

(编辑: 关 毅)