

DOI 10.13494/j.npe.20160053

陈松, 陈晓冬, 苏修, 等. 基于加权引导滤波的局部立体匹配算法[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(5): 394-399.

Chen Song, Chen Xiaodong, Su Xiu, et al. Local stereo matching algorithm based on weighted guided filter [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(5): 394-399 (in Chinese).

基于加权引导滤波的局部立体匹配算法

陈松, 陈晓冬, 苏修, 刘依林, 汪毅, 郁道银

(天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 立体匹配是双目立体视觉中的关键环节. 本文在现有局部立体匹配算法的基础上, 提出一种基于加权引导滤波的局部立体匹配算法. 该算法在代价聚合阶段采用加权引导滤波方法, 根据不同窗口像素纹理的丰富程度, 对引导滤波的规整化参数进行自适应调整, 实现更准确的代价聚合; 在视差选取阶段, 根据聚合后的代价空间信息对视差的可靠性进行判断, 对于视差不可靠像素, 利用自适应窗口方法进一步代价聚合后确定视差. 在 MATLAB 软件平台上利用标准立体图像对进行测试, 实验结果表明, 本文提出的算法平均误匹配率为 5.20%, 相比于现有的局部立体匹配算法具有更高的精度.

关键词: 双目立体视觉; 立体匹配; 加权引导滤波; 自适应窗口

中图分类号: TN911.73 文献标志码: A 文章编号: 1672-6030(2017)05-0394-06

Local Stereo Matching Algorithm Based on Weighted Guided Filter

Chen Song, Chen Xiaodong, Su Xiu, Liu Yilin, Wang Yi, Yu Daoyin

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Stereo matching is a key link in binocular stereo vision. With the existing local stereo matching algorithms, this paper proposes a local stereo matching algorithm based on weighted guided filter. This algorithm uses weighted guided filter in the cost aggregation phase and the uniform parameter of guided filter adjustments adaptively according to the abundance of texture in different windows to achieve a more accurate cost aggregation. In the disparity selection phase, the algorithm judges the reliability of the disparity according to the aggregated cost volume and determines the disparity after further cost aggregation using the adaptive window method for the disparity unreliable pixels. Standard stereo image pairs are used for testing on MATLAB. Experimental results show that the average matching error rate of the algorithm proposed in this paper is 5.20% and this algorithm has higher accuracy compared with existing local stereo matching algorithms.

Keywords: binocular stereo vision; stereo matching; weighted guided filter; adaptive window

双目立体视觉是计算机视觉的重要研究方向之一, 在工业检测、生物医学、虚拟现实等领域有着广泛的应用. 立体匹配是双目立体视觉中最为困难和关键的环节. 立体匹配的本质是在左右图像中寻找对应点

来计算视差, 进而得到深度信息. Scharstein 等^[1]将立体匹配概括为 4 个步骤: 代价计算、代价聚合、视差选取和视差精细. 目前国内外学者提出的立体匹配算法大致可以分为两类: 全局立体匹配算法和局部立体匹

收稿日期: 2017-04-06.

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项资助项目(61327007).

作者简介: 陈松(1992—), 男, 硕士研究生.

通讯作者: 陈晓冬, 教授, xdchen@tju.edu.cn.

配算法. 与全局立体匹配算法^[2-3]相比, 局部立体匹配算法由于计算量小、运行时间短、易于实现等优点而获得广泛应用.

局部立体匹配算法的关键在于选择合适的窗口, 通常要求窗口内的像素具有相同的视差. 为了达到最佳匹配效果, 一方面, 窗口要尽可能大, 以消除噪声的干扰, 获得可靠的匹配结果; 另一方面, 窗口要尽可能小, 避免在窗口内包含不同视差区域, 防止错误匹配. 许多学者对此进行了深入研究, 提出了不同的方法. 这些方法大致可以分为两类: 自适应窗口方法和自适应权重方法. 自适应窗口方法^[4-6]针对不同的像素, 自适应地改变窗口的大小和形状, 寻求最佳匹配窗口; 自适应权重方法^[7-9]采用固定大小的窗口, 对窗口内的不同像素赋予不同的权重, 寻求最佳权重分配.

2006 年, Yoon 等^[9]提出了自适应支持权重算法, 成为局部立体匹配算法中的经典算法之一. 该算法根据窗口内每个像素与中心像素的颜色相似性和距离相近性进行权重分配, 与中心像素颜色越相似、距离越相近, 则权重越高, 反之越低. 自适应支持权重算法的代价聚合过程本质上是一种双边滤波过程. 据此, Hosni 等^[10]提出一种用引导滤波代替双边滤波的局部立体匹配算法. 该算法在降低算法复杂度的同时提升了匹配精度. 然而该算法对不同的窗口应用相同的规整化参数, 没有考虑不同窗口像素纹理的差异性. 另外, 该算法采用 WTA(winner-take-all) 方法进行视差选取, 没有利用聚合后的代价空间信息. 因此, 本文提出了一种基于加权引导滤波的局部立体匹配算法. 根据不同窗口像素纹理的丰富程度, 对引导滤波的规整化参数进行自适应调整. 同时, 根据聚合后的代价空间信息对视差的可靠性进行判断, 对于视差不可靠像素, 利用自适应窗口方法进一步代价聚合后确定视差. 实验结果表明, 相比于现有的局部立体匹配算法, 本文所提算法可获得更高精度的视差图.

1 引导滤波

2013 年, He 等^[11]提出一种具有边缘保留特性的滤波方法, 称为引导滤波.

设 I 为引导图像, p 为待滤波图像, q 为滤波后图像. 引导滤波基于如下假设: 在以各个像素为中心的窗口 ω_k 内, q 由 I 线性转换得到:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (1)$$

式中: ω_k 表示以像素 k 为中心、以 r 为半径的方形窗口; a_k 和 b_k 表示线性系数, 在窗口 ω_k 内为固定值.

在窗口 ω_k 内, 线性系数 a_k 和 b_k 通过最小化式

(2) 得到:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2] \quad (2)$$

式中: 第 1 项为保真项, 在线性模型的基础上最小化 q 与 p 之间的差异; 第 2 项为平滑项, 防止线性系数 a_k 过大; ε 是一个规整化参数, 通常要求 $\varepsilon > 0$. 规整化参数 ε 起到对线性系数 a_k 进行惩罚的作用. ε 取值越大, 惩罚作用越强, 滤波后图像 q 越平滑; ε 取值越小, 惩罚作用越弱, 滤波后图像 q 边缘保留越完整.

式 (2) 的解为

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (3)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \quad (4)$$

式中: μ_k 和 σ_k^2 分别表示引导图像 I 在窗口 ω_k 内的均值和方差; $|\omega|$ 表示窗口 ω_k 内的像素数; \bar{p}_k 表示待滤波图像 p 在窗口 ω_k 内的均值.

2 基于加权引导滤波的局部立体匹配算法

2.1 代价聚合

代价计算得到原始代价空间之后, 利用引导滤波进行代价聚合. 左图像作为引导图像 I , 原始代价空间中每个视差对应的代价图像作为待滤波图像 p . 代价空间如图 1 所示.

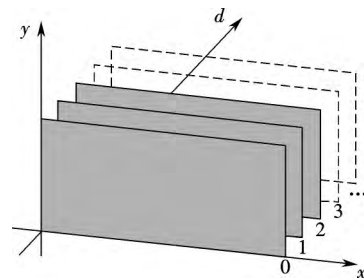


图 1 代价空间示意

Fig. 1 Schematic diagram of cost volume

如前文所述, 规整化参数 ε 起到对线性系数 a_k 进行惩罚的作用. 然而, 传统的引导滤波对不同的窗口 ω_k 应用相同的规整化参数 ε , 没有考虑不同窗口像素纹理的差异性. 对于纹理丰富、包含边缘的窗口, 需要较大的线性系数 a_k , 以保留边缘信息, 故需要较小的 ε 进行惩罚; 对于纹理不丰富、比较平坦的窗口, 需要较小的线性系数 a_k , 以滤除噪声, 故需要较大的 ε 进行惩罚. 因此, 如果针对不同的窗口, 使得规整化参数 ε 能够自适应调整, 将进一步提升引导滤波的效果. 基于上述思想, Li 等^[12]对引导滤波进行了改进, 提出一种

加权引导滤波方法. 该方法基于窗口内的方差定义加权因子, 对规整化参数 ε 进行自适应调整. 然而, 严格意义上讲, 方差并不能很好地反映图像边缘信息.

本文将加权引导滤波思想应用到立体匹配算法中, 并利用拉普拉斯边缘检测算子重新定义加权因子. 拉普拉斯算子能够较好地检测出图像中的边缘, 在图像的边缘区域, 将得到较大的幅值响应; 在图像的平滑区域, 幅值响应接近于 0.

定义归一化拉普拉斯算子绝对幅值响应如下:

$$N \cdot \text{LAP}_i = \frac{|\text{LAP}_i|}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (|\text{LAP}_j|)} \quad (5)$$

式中: LAP_i 表示对引导图像 I 应用拉普拉斯算子得到的幅值响应; N 表示图像像素数.

定义权重因子如下:

$$\Gamma_i = A \cdot \exp\left(\frac{N \cdot \text{LAP}_i}{\sigma}\right) \quad (6)$$

利用指数函数定义权重因子以进一步增强权重因子的效果 A 和 σ 为固定值.

式(3)修改如下:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \frac{\varepsilon}{\Gamma_i}} \quad (7)$$

2.2 视差选取

代价聚合之后得到的代价空间, 同时包含了对应像素之间的相似度信息和对应像素邻域之间的相似度信息. 传统的局部立体匹配算法, 对于每个像素 i , 通常采用 WTA 方法从聚合后的代价空间选取最小匹配代价对应的视差值作为结果视差值.

然而, 由于各种因素的影响, 最小匹配代价对应的视差值未必等于真实视差值. WTA 方法单纯地选取最小匹配代价对应的视差值, 没有利用聚合后的代价空间信息. 根据聚合后的代价空间信息, 可以对视差的可靠性进行判断. 式(8)和式(9)是两种常用的视差可靠性判断依据^[13]:

$$C_{d1} = C_{i,2} - C_{i,1} \quad (8)$$

$$C_{d2} = \frac{C_{i,2}}{C_{i,1}} \quad (9)$$

对于任意像素 i , $C_{i,1}$ 表示最小匹配代价, $C_{i,2}$ 表示次最小匹配代价. C_{d1} 和 C_{d2} 越大, 则最小匹配代价对应的视差值越可靠; C_{d1} 和 C_{d2} 越小, 则最小匹配代价对应的视差值越不可靠. 本文提出的改进算法将式(8)和式(9)结合, 作为视差可靠性的判断依据, 以提高算法的鲁棒性. 设定阈值 C_{th1} 和 C_{th2} , 若 $C_{d1} > C_{th1}$ 且 $C_{d2} > C_{th2}$, 则认为最小匹配代价对应的视差值可靠, 将其作

为结果视差值; 否则, 认为最小匹配代价对应的视差值不可靠, 需要进一步处理.

受自适应窗口方法^[4]启发, 对于视差不可靠像素, 如图2所示, 进行如下处理.

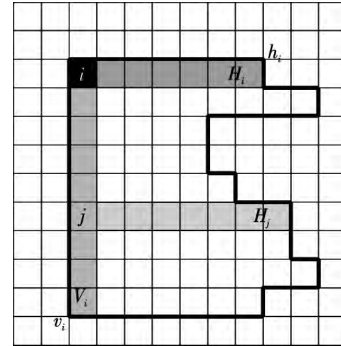


图2 自适应窗口示意

Fig. 2 Schematic diagram of adaptive window

从图像左上角开始, 按照从上到下、从左到右的顺序搜索视差不可靠像素. 对于搜索到的每一个像素 $i = (x_i, y_i)$, 向右方和下方构建自适应窗口. 首先, 确定右方和下方两个臂的长度, 两个臂长分别表示为 h_i 和 v_i .

h_i 和 v_i 根据图像的区域结构自适应地确定. 以 h_i 为例, 对像素 i 右侧的像素集进行颜色相似性检测, 目的是在相邻像素颜色相似的情况下找到最大右臂长度, 即 h_i . 设像素 $j = (x_j, y_j)$, $j-1 = (x_j-1, y_j)$, 则

$$h_i = \max \left[r \prod_{\substack{x_j \in [x_i+1, x_i+r] \\ y_j = y_i \\ r \in [1, L]}} \delta(j-1, j) \right] \quad (10)$$

$$\delta(j-1, j) = \begin{cases} 1, & \max_{c \in \{R, G, B\}} (|I_{j-1}^c - I_j^c|) \leq \tau \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: L 表示允许的臂长范围; I^c 表示 c 通道颜色强度值; τ 表示颜色相似性的判定阈值.

臂长 h_i 和 v_i 确定后, 水平部分 H_i 和竖直部分 V_i 定义如下:

$$H_i = \{ (x, y) \mid x \in [x_i, x_i + h_i], y = y_i \} \quad (12)$$

$$V_i = \{ (x, y) \mid x = x_i, y \in [y_i, y_i + v_i] \} \quad (13)$$

像素 i 的自适应窗口 U_i 定义如下:

$$U_i = \bigcup_{j \in V_i} H_j \quad (14)$$

由于窗口 U_i 中的像素颜色相似, 距离相近, 故可以认为它们位于同一物体上, 具有相同的视差值. 选择使得窗口 U_i 中的像素匹配代价和最小的视差值, 作为窗口 U_i 中的每个视差不可靠像素的结果视差值, 即

$$l_i = \arg \min_{l \in L} \sum_{j \in U_i} C_{j,l} \quad (15)$$

处理完毕后,将窗口 U_i 中的所有视差不可靠像素标记为可靠像素,继续搜索下一个视差不可靠像素进行处理,直至将全部视差不可靠像素处理完毕。

3 实验结果与分析

为验证本文所提算法的有效性,利用 MATLAB 对所提算法编程实现。实验中使用的计算机硬件配置为 Intel Core i5-3470 CPU 8 GB 内存。采用 Middlebury 大学计算机视觉研究中心网站提供的标准立体图像对对算法进行实验和测评,该网站提供了 4 组标准彩色立体图像对及对应的真实视差图,通过将实验结果视差图与真实视差图比较可以得到量化的匹配误差,从而客观地评价算法精度。实验中参数设置如下: $A = 0.001$ $\sigma = 0.1$ $C_{th1} = 0.0001$ $C_{th2} = 1.03$ $\tau = 0.04$,其余参数取值同文献[10]。

3.1 算法有效性分析

为说明采用加权引导滤波进行代价聚合以及采用可靠性判断方法进行视差选取对提高算法精度的作用,设置如下对比实验: Method 1 采用引导滤波进行代价聚合,采用 WTA 方法进行视差选取; Method 2 采用加权引导滤波进行代价聚合,采用 WTA 方法进行视差选取; Method 3 采用引导滤波进行代价聚合,采用可

靠性判断方法进行视差选取; Method 4 采用加权引导滤波进行代价聚合,采用可靠性判断方法进行视差选取。为了单独考虑相应因素的影响,以上实验均不进行视差精细后处理。

实验结果如表 1 所示,其中,“Tsukuba”、“Venus”、“Teddy”、“Cones”表示 4 组标准立体图像对,“Non”表示非遮挡区域误匹配率,“All”表示全部区域误匹配率,“Disc”表示深度不连续区域误匹配率(在相应位置上,实验结果视差值与真实视差值之差大于 1,则认为该点为误匹配点)，“Average error”表示 4 组标准立体图像对全部区域误匹配率的平均值。

与 Method 1 相比,Method 2 在 4 组标准立体图像对的非遮挡区域和深度不连续区域均具有更低的误匹配率,证明了加权引导滤波代价聚合方法的有效性;与 Method 1 相比,Method 3 在除 Venus 图像对之外的其余 3 组标准立体图像对的非遮挡区域和深度不连续区域均具有更低的误匹配率,证明了采用可靠性判断方法进行视差选取的有效性,对于 Venus 图像对,由于存在大面积的视差渐变平面,应用自适应窗口方法形成的窗口会包含不同视差的像素区域,进而导致误匹配点的产生,该问题通过视差精细步骤可以得到改善;与 Method 1、Method 2、Method 3 相比,Method 4 整体上具有更低的误匹配率,充分证明了所提算法的有效性。

表 1 对比实验的结果

Tab. 1 Results of contrast experiment

%

方法	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			Average error
	Non	All	Disc	Non	All	Disc	Non	All	Disc	Non	All	Disc	
Method 1	2.52	3.30	8.56	1.39	2.76	11.8	8.36	17.2	18.5	3.40	12.8	9.03	9.01
Method 2	2.05	2.86	8.33	0.97	2.33	10.6	7.81	16.5	17.8	3.09	12.3	8.21	8.50
Method 3	2.00	2.75	7.99	1.46	2.83	11.2	7.66	16.3	17.5	3.26	12.6	8.58	8.62
Method 4	1.68	2.44	7.85	1.20	2.39	9.69	7.48	16.2	17.4	3.01	12.3	8.75	8.33

3.2 结果及分析

利用标准立体图像对所提算法进行实验,实验结果如图 3 所示。图中第 1 列为标准立体图像对中的左图,第 2 列为真实视差图,第 3 列为所提算法得到的实验结果视差图,第 4 列为误匹配点图(黑色区域表示误匹配点)。

表 2 为所提算法与其他局部立体匹配算法结果对比。其中,“AdaptWeight”表示 Yoon 等^[9]提出的自适应支持权重算法,“CostFilter”表示 Hosni 等^[10]提出的基

于引导滤波的局部立体匹配算法,“VariableCross”表示 Zhang 等^[4]提出的自适应支持窗口算法,以上算法的实验数据均来自 Middlebury 网站。

以上几种算法与所提算法相关性较大,具有较高的可比性。从表 2 数据可以看出,所提算法在非遮挡区域和深度不连续区域均具有较低的误匹配率,平均误匹配率为 5.20%,相比于其他局部立体算法具有更高的精度。

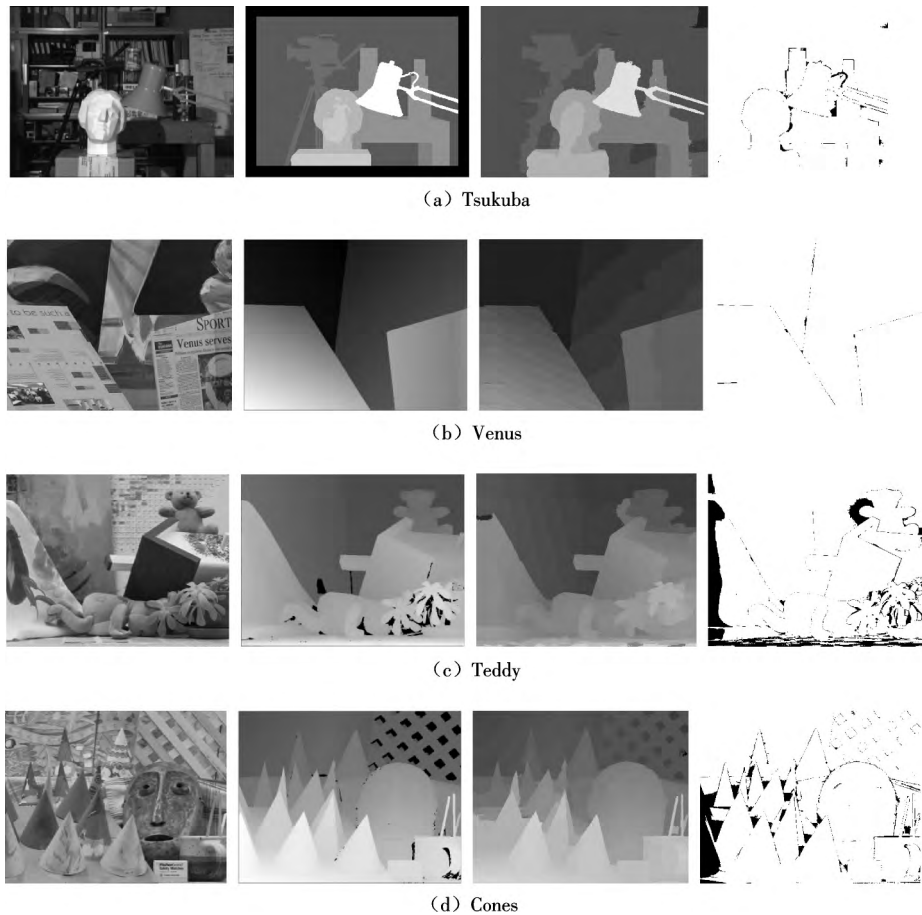


图 3 本文所提算法实验结果

Fig. 3 Experimental results of the proposed algorithm

表 2 所提算法与其他局部立体匹配算法结果对比

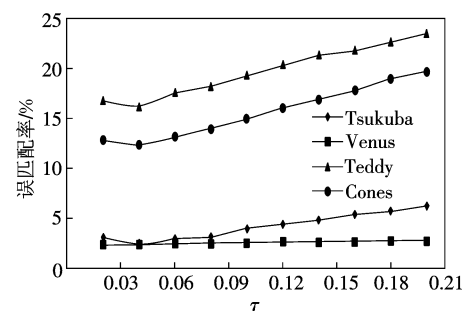
Tab. 2 Comparison of experimental results of proposed algorithm and other local stereo matching algorithms %

算 法	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			Average error
	Non	All	Disc	Non	All	Disc	Non	All	Disc	Non	All	Disc	
AdaptWeight ^[9]	1.38	1.85	6.90	0.71	1.19	6.13	7.88	13.3	18.6	3.97	9.79	8.26	6.67
CostFilter ^[10]	1.51	1.85	7.61	0.20	0.39	2.42	6.16	11.8	16.0	2.71	8.24	7.66	5.55
VariableCross ^[4]	1.99	2.65	6.77	0.62	0.96	3.20	9.75	15.1	18.2	6.28	12.7	12.9	7.60
本文算法	1.31	1.62	6.73	0.16	0.33	1.91	5.72	11.2	14.9	2.48	7.65	6.85	5.20

3.3 参数 τ 对匹配精度的影响

参数 τ 为自适应窗口方法中相邻像素颜色相似性的判定阈值, τ 越小, 形成的自适应窗口越小, 反之, 形成的自适应窗口越大. 自适应窗口的大小将直接影响匹配精度, 需要通过实验确定一个合理的 τ 值, 以使匹配精度达到最高. 对 τ 从 $[0.02, 0.20]$ 之间的取值进行了实验, 计算误匹配率, 为了单独考虑参数 τ 的影响, 实验中不进行视差精细后处理. 实验结果如图 4 所示.

可以看到, 对于 Venus 标准立体图像对, 误匹配率受 τ 值的影响很小; 对于 Tsukuba、Teddy、Cones 3 组标

图 4 不同 τ 取值下的误匹配率Fig. 4 Matching error rates under various τ values

准立体图像对 $\pi = 0.04$ 时, 匹配效果达到最好.

4 结 语

本文在现有局部立体匹配算法的基础上, 提出了一种基于加权引导滤波的局部立体匹配算法. 该算法在代价聚合阶段采用加权引导滤波方法, 根据不同窗口像素纹理的丰富程度, 对引导滤波的规整化参数进行自适应调整, 实现了更准确的代价聚合; 在视差选取阶段, 根据聚合后的代价空间信息对视差的可靠性进行判断, 对于视差不可靠像素, 利用自适应窗口方法进行代价聚合后确定视差. 在 MATLAB 软件平台上利用标准立体图像对进行了测试, 实验结果表明, 相比于现有的局部立体匹配算法, 本文所提算法在非遮挡区域和深度不连续区域均具有更低的误匹配率, 可获得更高精度的视差图.

参考文献:

- [1] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47(1/2/3): 7-42.
- [2] Veksler O. Stereo correspondence by dynamic programming on a tree [C]// *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition*. San Diego, CA, USA, 2005: 384-390.
- [3] Besse F, Rother C, Fitzgibbon A, et al. PMBP: Patch-match belief propagation for correspondence field estimation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2013, 110(1): 2-13.
- [4] Zhang K, Lu J, Lafruit G. Cross-based local stereo matching using orthogonal integral images [J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2009, 19(7): 1073-1079.
- [5] Boykov Y, Veksler O, Zabith R. A variable window approach to early vision [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1998, 20(12): 1283-1294.
- [6] Veksler O. Fast variable window for stereo correspondence using integral images [C]// *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Madison, Wisconsin, USA, 2003: 556.
- [7] Shi H, Zhu H, Wang J, et al. Segment-based adaptive window and multi-feature fusion for stereo matching [J]. *Journal of Algorithms & Computational Technology*, 2016, 10(1): 3-11.
- [8] Tombari F, Mattoccia S, Di Stefano L. Segmentation-based adaptive support for accurate stereo correspondence [G]// Mery D, Rueda L. *Advances in Image and Video Technology. PSIVT 2007*. Berlin, Germany: Springer, 2007, 4872: 427-438.
- [9] Yoon K J, Kweon I S. Adaptive support-weight approach for correspondence search [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2006, 28(4): 650-656.
- [10] Hosni A, Rhemann C, Bleyer M, et al. Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2012, 35(2): 504-511.
- [11] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Guided image filtering. [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [12] Li Zhengguo, Zheng Jinghong, Zhu Zijian, et al. Weighted guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(1): 120-129.
- [13] Hirschmüller H, Innocent P R, Garibaldi J. Real-time correlation-based stereo vision with reduced border errors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47(1/2/3): 229-246.

(责任编辑: 孙媛媛)