

改进的非参数 Census 变换立体匹配算法

梁海波, 邹佳玲

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

提出什么算法(其实就是论文题目)

指出现有算法问题

摘要: 针对多数立体匹配算法的相似性测度都建立在像素灰度特性基础上, 无法彻底消除匹配差异性, 易出现歧异性的问题, 提出一种改进的非参数 Census 变换匹配算法. 该算法通过传统非参数 Census 匹配过程中增加局部纹理反差值测度, 引入图像纹理度量的方向性, 使中心像素灰度值不再是唯一决定因素, 改进了匹配模版, 从而有效解决了传统匹配算法的歧异性问题. 实验结果表明, 改进算法是一种有效、合理的立体匹配方法, 提高了稠密匹配精度.

用事实表明该算法的有效性

关键词: 视觉检测; 立体匹配; 非参数 Census 变换; 匹配精度

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1671-5489(2019)05-1163-06

该算法操作上怎么做, 得到了什么效果

Improved Stereo Matching Algorithm Based on Nonparametric Census Transform

LIANG Haibo, ZOU Jialing

(School of Mechanic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Aiming at the problem that the similarity measure of most stereo matching algorithm was mostly based on gray characteristics of pixels, which could not completely eliminate the differences of matching, and was prone to ambiguity, we proposed an improved matching algorithm based on nonparametric Census transform. It increased the measure of local texture contrast value in the traditional nonparametric Census matching process, and the directionality of the image texture was introduced, so that gray value of the center pixel was no longer the sole determinant, and matching template of the transform mode was improved, thus the ambiguity problem of traditional matching algorithm was effectively solved. The experimental results show that the improved algorithm is an effective and reasonable method of stereo matching, which improves the accuracy of dense matching.

Keywords: visual detection; stereo matching; nonparametric Census transform; matching accuracy

立体匹配是在不同方位采用一个或多个摄像机对同一待测物体拍摄多幅图像, 在选取合适的度量函数后对空间中同一点进行约束准则校验, 获得该点在其他图像上投影得到的影像点、深度信息和视差值, 结合三角测量准则进行三维测量和三维重建的技术^[1-5], 在医学诊断、无人机导航、遥感图像测量等领域应用广泛. 但目前立体匹配技术仍存在无法彻底消除匹配差异性等问题. 像素区域缺乏大量纹理特征、图像本身具有噪声及幅度失真等非理想的图像采集环境都会导致匹配差异性. 在进行立体

收稿日期: 2018-04-25.

第一作者简介: 梁海波(1978—), 男, 汉族, 博士, 副教授, 从事计算机算法和仪器科学与技术的研究, E-mail: 15466438@qq.com.

通信作者简介: 邹佳玲(1992—), 女, 汉族, 博士研究生, 从事钻井与录井大数据、人工智能和图像处理的研究, E-mail: 201522000206@stu.swpu.edu.cn.

基金项目: 国家油气重大专项基金(批准号: 2011ZX05013-003; 2011ZX05061)和四川省应用基础研究项目(批准号: 2016JY0049).

匹配时,多数代价函数都只依赖中心像素灰度值,不能彻底消除这些差异性.针对该问题,本文提出一种改进的非参数 Census 变换立体匹配算法,在非参数 Census 变换的基础上,通过引入图像纹理度量的方向性,利用增加局部纹理反差值为测度改进匹配模版,使中心像素灰度值不再是唯一决定因素,从而解决了传统非参数 Census 变换的局限性.通过 Cones, Teddy, Venus 和 Tsukuba 四组理想图像实验表明,改进的非参数 Census 变换匹配算法提高了稠密匹配的精度,是一种合理、有效的立体匹配方法.

1 非参数 Census 变换

传统非参数 Census 变换的匹配度量准则是像素灰度的相对值,分别比较中心像素的灰度值与变换窗口内邻域像素的灰度值,编码每个像素的灰度信息,在不依赖像素灰度值匹配的情况下找到对应匹配点,各像素邻域灰度值间的互相关信息就包含在得到的比特串中.所以传统非参数 Census 变换具有良好的信号转换能力.

以目标像素 (u, v) 为中心,在匹配窗口内取一个大小为 $n \times m$ 的变换窗口 W . 像素灰度值用 $I(u, v)$ 表示,将该窗口内用 $I(u, v)$ 分别与各邻域像素 $I(u+i, v+j)$ 进行比较,各像素灰度值 $I(u, v)$ 变换得到对应的大小仍为 $n \times m$ 的比特串 $T(u, v)$ 为

$$T(u, v) = \bigotimes_{i=-n'}^{n'} \bigotimes_{j=-m'}^{m'} \xi(I(u, v), I(u+i, v+j)), \quad (1)$$

其中: $n' = \lceil n/2 \rceil$, $m' = \lceil m/2 \rceil$. 当 $I(u, v) < I(u+i, v+j)$ 时, $T(u, v)$ 对应的位置记为 0; 当 $I(u, v) > I(u+i, v+j)$ 时, $T(u, v)$ 对应的位置记为 1, 即

$$\xi(x, y) = \begin{cases} 0, & x \leq y, \\ 1, & \text{其他}. \end{cases} \quad (2)$$

按照一定顺序进行每位信息存储的比特串包含纹理结构信息,从而变换图像局部邻域在非参数 Census 处理后具有了较高的区分度.

对某对像素点在两幅视图中的相似性程度用非参数 Census 变换进行计算,如图 1 所示.各自对应的矩形变换窗口 $W_l(T)$ 和 $W_r(T)$ 是分别以这对像素点为中心的一个 3×3 矩阵,其中: $0 \leq G \leq 255$;

$$0 \leq H \leq 255; g = \begin{cases} 1, & G < 121, \\ 0, & G \geq 121; \end{cases} h = \begin{cases} 1, & H < 121, \\ 0, & H \geq 121. \end{cases}$$

$$\begin{aligned} W_l(T) &= \begin{bmatrix} 111 & 118 & 123 \\ 124 & 121 & 119 \\ G & 120 & 135 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Census 变换}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 121 & 1 \\ g & 1 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow T_l(11001g10), \\ W_r(T) &= \begin{bmatrix} 110 & 118 & 134 \\ 125 & 121 & 116 \\ H & 118 & 129 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Census 变换}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 121 & 1 \\ h & 1 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow T_r(11001h10). \end{aligned}$$

图 1 一般非参数 Census 变换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of general nonparametric Census transform

一般非参数 Census 变换得到的比特串为 $T_l = (11001g10)$, $T_r = (11001h10)$, 比特串中互异的位数由 g 值和 h 值确定. 当 g 值与 h 值不同时为 1 或 0 时, 互异位数为 1; 当 g 值和 h 值同时为 0 或 1 时, 互异位数为 0. 所以, 只需比较中心和邻域像素灰度值大小即可实现非参数 Census 变换. 在非参数 Census 变换中, 即使存在噪声等干扰因素的影响, 使邻域像素的灰度值在很大范围内变化, 其变换后的相应值也只变化了 1, 因此非参数 Census 变换抗噪能力和鲁棒性优于直接使用像素灰度值的变换.

2 改进的非参数 Census 变换

虽然 Census 变换可平衡光照变化对灰度值的影响, 但其仅利用中心像素的灰度值, 变换具有局限性. 主要表现在灰度值在像素受到环境噪声干扰时易发生畸变, Census 变换很难找到正确的匹配点, 且存在于像素间的互相关信息在 Census 变换中未被利用的情形, 只对单一的灰度值进行非参数

变换. 针对该问题, 本文提出一种改进非参数 Census 变换立体匹配算法, 使其变换既利用中心像素的灰度值, 又增加一个以图像纹理度量的方向性为中心像素的局部纹理反差值^[6], 这样在立体匹配中不仅利用了中心像素灰度值, 还利用了像素之间的互相关信息, 从而解决了非参数 Census 变换受环境噪声干扰时易畸变的局限性问题.

纹理的方向性不是一个特定方向, 而是指纹理边缘方向的一致性. 目标被遮挡及位移、视场中光照的变化、图像像素间的灰度变化等情形都能通过方向性直观地反映, 图像纹理用该方向性描述^[7], 本文提出一种引入局部纹理反差加权项 Δm 的非参数 Census 变换方法. 局部纹理反差值 Δm 定义为

$$\Delta m = \frac{\text{sum}_1/n_1 - \text{sum}_2/n_2}{32}, \quad (3)$$

其中: sum_1 表示 W 变换窗口中不小于 $I_m(u, v)$ 的灰度累加值, n_1 为其个数; sum_2 表示小于 $I_m(u, v)$ 的灰度累加值, n_2 为其个数.

先在匹配窗口内取变换窗口 W , 中心为目标像素 (u, v) , 大小为 $n \times m$. 计算变换窗口 W 内局部纹理反差值 Δm 和所有像素的灰度值均值 $I_m(u, v)$, 该像素灰度均值与局部纹理反差值之和即为目前中心像素灰度值, 即 $I'(u, v) = I_m(u, v) + \Delta m$. 然后分别比较 $I'(u, v)$ 与变换窗口内各邻域像素, 对应于各灰度值得到大小为 $n \times m$ 的比特串. 若 $I'(u, v)$ 大于变换窗口中像素的灰度值, 则该像素比特串对应位置为 1, 若 $I'(u, v)$ 小于变换窗口中像素的灰度值, 则记为 0. 以大小为 7×7 像素的匹配窗口为例, 在匹配窗口取变换窗口矩形像素大小为 3×3 , 中心像素和各邻域像素的灰度值如图 2 所示. 计算出该窗口的局部纹理反差值和灰度值均值即可计算得出 $\Delta m = 2$, $I_m(u, v) = 7$, 最后改进非参数 Census 变换得到比特串值为

$$MT(u, v) = \bigotimes_{i=-n'}^{n'} \bigotimes_{j=-m'}^{m'} \xi(I'(u, v), I(u+i, v+j)) = 011101111. \quad (4)$$

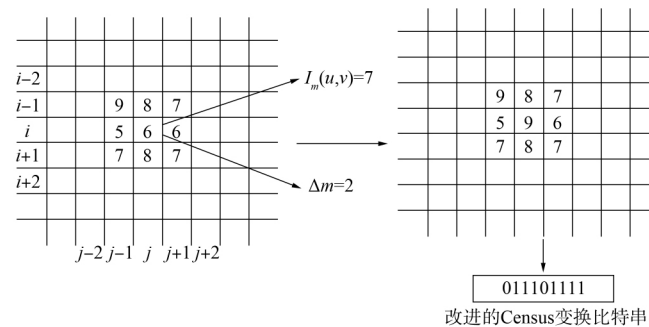


图 2 改进的非参数 Census 变换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of improved nonparametric Census transform

在像素 (u, v) 是纹理单一区域的情形下局部纹理反差值 $\Delta m = 0$, n_1 或 n_2 之一为 0; 当 (u, v) 位于纹理丰富区域时, Δm 是分布范围为 $0 \sim 7$ 的非零数, 局部纹理的反差信息通过该值反映. 这样在 3×3 窗口中可能生成的序列数为 512(29)种, 代替原来的 256(28)种, 其中排除了同样信息的序列(该序列编码为全 0 或全 1), 此时 Census 变换中图像每个像素在基于局部纹理度量的方式下序列范围扩大为 $0 \sim 511$.

在视差 $d \in D$ 的搜索范围内, 对每个视差值对应的右、左视图变换窗口的改进非参数 Census 变换后比特串的 Hamming 距及每个像素的匹配代价分别为

$$\text{Hamming}(T_r, T_l) = \sum_{i=1}^N T_{ri} \otimes T_{li}, \quad (5)$$

$$C(u, v, d) = \frac{\sum_{(u, v) \in I_r, (u+d, v) \in I_l} \text{Hamming}\{MT_r(u, v), MT_l(u+d, v)\}}{N(u, v)}. \quad (6)$$

利用式(5)可判断两个像素点之间的匹配程度, 其值越小, 则两点的匹配度越高; 用式(6)可计算得出每个像素的匹配代价. 其中: $MT_l(u, v)$ 和 $MT_r(u, v)$ 分别表示像素 (u, v) 在左、右视图中的改进非参

数 Census 变换比特串; $N(u, v)$ 表示比特串长度.

3 实验结果和分析

选取 Cones, Teddy, Venus, Tsukuba 四组理想图像, 其分别对应的最大视差范围值为 59, 59, 19, 15, 实验结果如图 3 所示. 实验中采用沿八方向聚合代价的半全局匹配法, 最小区域允许值为 35 像素, 分割窗口均为 3, 其中最小区域在 Tsukuba 图中取 20 像素.

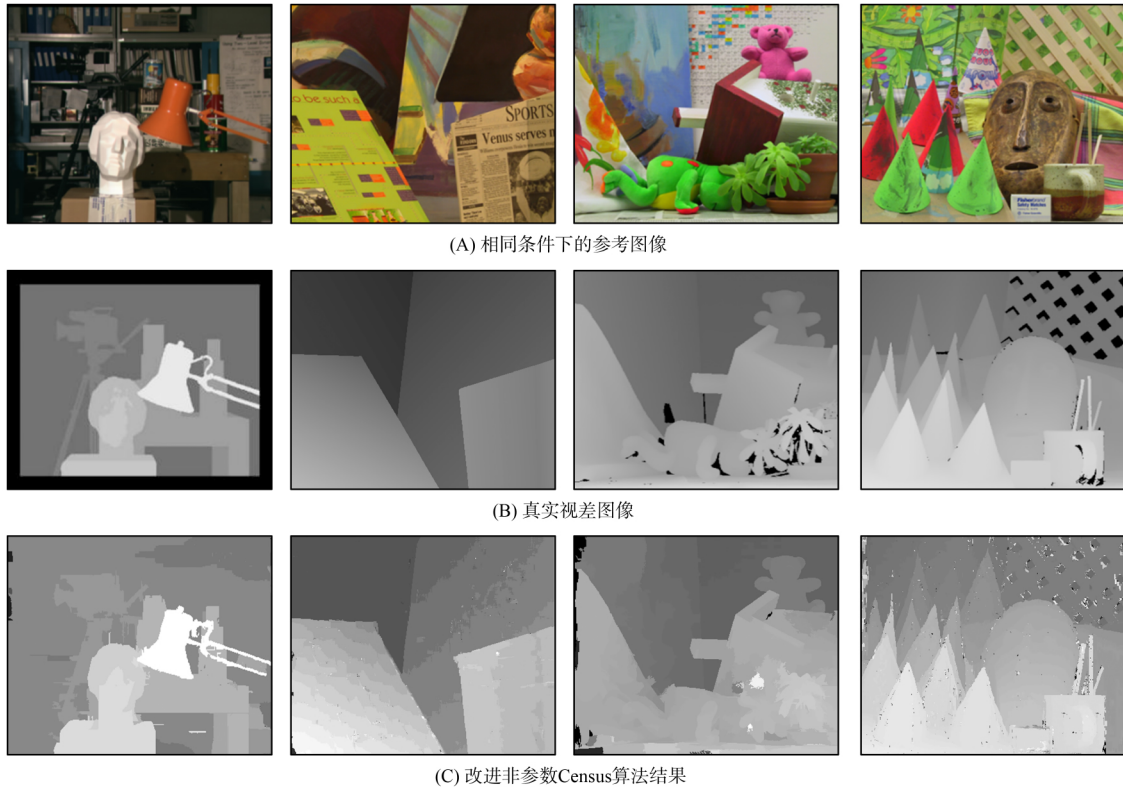


图 3 改进非参数 Census 算法对理想图像实验的匹配结果

Fig. 3 Experimental matching results of improved nonparametric Census algorithm with ideal image

为了客观地验证改进非参数 Census 变换算法的有效性, 采用 Middlebury 网站的测评数据, 与 RTCensus^[8], SSD + MF^[9], SemiGlob^[10], GC^[11], ADCensus^[12], Segment Support^[13] 和 Adapt Weight^[14] 算法的对比结果列于表 1. 其结果分别用该网站提供误匹配率的 all, nonocc 和 disc(整体、非遮挡和深度不连续)3 个区域值评价, 误差阈值为 1 像素.

由表 1 可见, 改进非参数 Census 算法精度较传统非参数 Census 测度和经典 SSD 算法显著提高, 且精度相比 SSD+MF 和 RTCensus 等局部算法与 GC 和 SemiGlob 等全局算法均表现出优越性, 虽然略低于目前最优秀的 Adapt Weight, ADCensus, Segment Support 等局部算法, 但均具有可比性, 且匹配精度较好. 视差图结果在一定程度上受匹配窗口选取大小的影响, 4 组标准图像受窗口尺寸影响采用上述整体、非遮挡和深度不连续 3 个区域的误匹配率 PBM 值表示, 结果如图 4 所示. 由图 4 可见, 窗口尺寸与误匹配率之间无明显关系, 错误率在不连续区域较非遮挡和低纹理两个区域均偏高. 随着窗口尺寸增大, Cones 和 Tsukuba 图的错误率先减小, 然后逐渐增大, Teddy 和 Venus 图窗口为 15 时错误率最小, 分别为 0.12 和 0.07, 这两幅图整体错误率均随窗口增大而减小. 因为 Cones 和 Tsukuba 两图场景中有较多的深度不连续部分, 具有纹理丰富测试图, 模版内灰度值随着窗口变大而增大, 深度存在间断部分的像素被忽略计算后, 错误率逐渐增大. 但相比目前已有方法, 改进非参数 Census 算

法的错误率明显降低, 所以虽然窗口尺寸会影响改进非参数 Census 算法, 但较其他算法仍是一种有效的匹配算法.

表 1 各算法的精度对比
Table 1 Accuracy comparison of algorithms

立体匹配算法	Tsukuba			Venus		
	nonocc	all	disc	nonocc	all	disc
Segment Support	1.23	1.60	6.68	0.28	0.55	2.56
ADCensus	1.11	1.46	5.75	0.11	0.24	1.17
Adapt Weight	1.36	1.75	6.92	0.73	1.25	6.13
GC	1.95	4.22	9.29	1.76	3.52	8.73
SemiGlob	3.22	3.98	12.77	1.01	1.45	11.50
SSD+MF	5.23	7.27	24.21	3.68	5.13	11.80
RTCensus	5.17	6.25	19.31	1.58	2.37	14.10
改进非参数 Census 算法	4.54	2.72	10.11	0.84	0.95	3.36

立体匹配算法	Teddy			Cones		
	nonocc	all	disc	nonocc	all	disc
Segment Support	8.43	14.23	18.18	3.75	9.84	9.87
ADCensus	4.13	6.22	10.91	2.42	7.25	6.94
Adapt Weight	7.85	13.33	18.44	3.95	9.76	8.25
GC	16.50	25.01	24.85	7.73	18.17	15.17
SemiGlob	6.14	12.11	16.14	3.26	9.73	8.94
SSD+MF	16.50	24.74	32.84	10.99	19.85	26.21
RTCensus	7.98	17.14	24.15	4.38	11.44	12.27
改进非参数 Census 算法	6.35	11.72	17.16	5.87	10.33	8.32

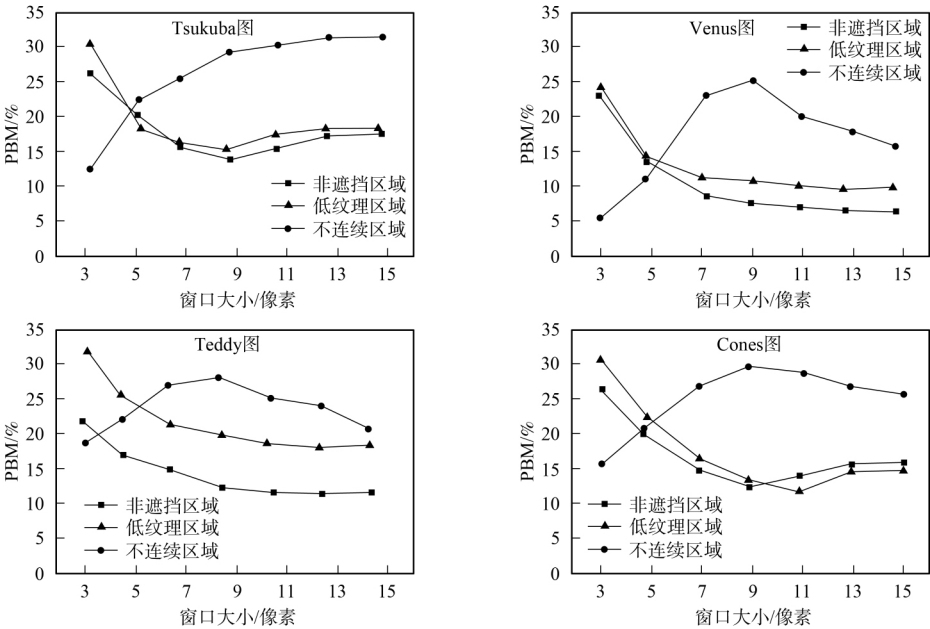


图 4 窗口尺寸对改进非参数 Census 算法的影响

Fig. 4 Effects of window size on improved nonparametric Census algorithm

综上所述, 本文针对立体匹配算法的相似性测度大多数都建立在像素灰度特性基础上, 存在匹配差异性的问题, 提出了一种改进的非参数 Census 变换匹配算法. 改进算法用局部纹理反差值与平均灰度的加权和及相邻像素间的互相关信息, 使匹配不再只依赖像素的灰度特性, 能消除环境变换给图像采集带来的匹配歧异性, 解决了目前区域匹配算法的局限性. 视差求精通过图像分割算法和半全局匹配算法处理后, 更多的场景细节被显示, 低纹理区域的匹配准确度得到提高. 通过 Cones, Teddy,

Venus, Tsukuba 四组理想图像实验验证了改进的非参数 Census 变换匹配算法的有效性. 采用 Middlebury 网站的测评数据, 与其他对比算法的实验结果表明, 本文方法有效提高了匹配精度.

参 考 文 献

- [1] KANADE T, OKUTOMI M. A Stereo Matching Algorithm with an Adaptive Window: Theory and Experiment [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(9): 920-932.
- [2] SUN Jian, SHUM H Y, ZHENG Nanning. Stereo Matching Using Belief Propagation [C]//European Conference on Computer Vision. London: Springer-Verlag, 2002: 510-524.
- [3] BAYDOUN M, AL-ALAOUI M A. Enhancing Stereo Matching with Classification [J]. IEEE Access, 2017, 2(2): 485-499.
- [4] HOSNI A, BLEYER M, GELAUTZ M, et al. Local Stereo Matching Using Geodesic Support Weights [C]//Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 2093-2096.
- [5] SHAKED A, WOLF L. Improved Stereo Matching with Constant Highway Networks and Reflective Confidence Learning [C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 6901-6910.
- [6] 周佳立, 武敏, 周华平. 自适应面具的快速稠密立体匹配技术研究 [J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(1): 11-20. (ZHOU Jiali, WU Min, ZHOU Huaping. Research on Fast Dense Stereo Matching Technique Using Adaptive Mask [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 27(1): 11-20.)
- [7] GALAVIS P E, HOLLENSSEN C, JALLOW N, et al. Variability of Textural Features in FDG PET Images Due to Different Acquisition Modes and Reconstruction Parameters [J]. Acta Oncologica, 2010, 49(7): 1012-1016.
- [8] HUMENBERGER M, ZINNER C, WEBER M, et al. A Fast Stereo Matching Algorithm Suitable for Embedded Real-Time Systems [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(11): 1180-1202.
- [9] SCHARSTEIN D, SZELISKI R. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1): 7-42.
- [10] HIRSCHMULLER H. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-global Matching and Mutual Information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 328-341.
- [11] CHEN Bichao, SUN Ying, ONG S H. Liver Vessel Segmentation Using Graph Cuts with Quick Shift Initialization [C]//The 15th International Conference on Biomedical Engineering. Berlin: Springer International Publishing, 2014: 188-191.
- [12] MEI Xing, SUN Xun, ZHOU Mingcai, et al. On Building an Accurate Stereo Matching System on Graphics Hardware [C]//2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 467-474.
- [13] TOMBARI F, MATTOCCIA S, STEFANO L D. Segmentation Based Adaptive Support for Accurate Stereo Correspondence [C]//Proceedings of IEEE Pacific Rim Symposium on Video and Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 427-438.
- [14] YOON K J, KWEON I S. Adaptive Support-Weight Approach for Correspondence Search [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(4): 650-656.

(责任编辑: 韩 啸)