光电技术与应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.018

基于改进 Census 变换的抗噪立体匹配算法

刘振友，郑茜颖*，程树英

（福州大学 微纳器件与太阳能电池研究所，福州 350108）

摘　要： 针对传统 Census 变换在匹配代价计算中易受噪声影响、匹配精度较低的问题，提出一种引入噪声容限的四状态 Census 变换算法。在匹配代价计算中，首先将改进的 Census 匹配代价与灰度绝对差值和梯度代价进行融合，并加入相应的截断阈值，以提高初始匹配代价空间的可靠性。然后通过引导图滤波进行代价聚合，并采用赢家通吃策略计算初始视差值。最后通过左右一致性检验、视差填充和加权中值滤波来优化初始视差值，得到最终视差图。实验结果表明，所提算法的噪声鲁棒性优于传统 Census 变换算法，且立体匹配算法的整体误匹配率降低至 5.59%。

关键词： 立体匹配；Census 变换；抗噪；代价融合；代价空间

中图分类号： TP391　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0100－06

Anti-noise Stereo Matching Algorithm Based on Improved Census Transform

LIU Zhenyou, ZHENG Qianying, CHENG Shuying

(Institute of Micro-Nano Devices and Solar Cells, Fuzhou University, Fuzhou 350108, CHN)

Abstract: Aiming at the problem that traditional Census transform is susceptible to noise and the matching accuracy is low in the matching cost calculation process, a four-state Census transform algorithm with noise tolerance is proposed. In the calculation of the matching cost, firstly, the improved Census matching cost is fused with the matching cost of the absolute difference of grayscale and gradient, and the corresponding cut-off threshold is added to improve the reliability of the initial matching cost volume. Then, the cost aggregation is performed through the guided image filtering, and the strategy of "Winner Takes All" is used to calculate the initial disparity value. Finally, the final disparity map is obtained by optimizing the initial disparity value through left-right consistency checking, disparity filling and weighted median filtering. Experimental results show that the noise robustness of the proposed algorithm is better than that of the traditional Census transform algorithm, and the overall error matching rate of the stereo matching algorithm is reduced to 5.59%.

Key words: stereo matching; Census transform; anti-noise; cost fusion; cost volume

0　引言

立体匹配的原理是从不同视角的图像中找到相互匹配的像素点，计算出目标像素点的视差，从而获取像素点的深度信息。立体匹配技术被广泛应用于 3D-SLAM 地图重建、虚拟现实和无人驾驶等领域[1-4]。Scharstein 等[5]将立体匹配算法总结为以下四个步骤：匹配代价计算、代价聚合、视差计算和视差后处理，其中匹配代价计算是立体匹配的基础，对立体匹配的精度提升起到关键作用。

常用的匹配代价计算方法有灰度绝对差值法（Absolute Difference，AD）、灰度绝对差和法以及归一化互相关法，但是由于这些算法对光照变化敏感，匹配精度往往较低。采用基于非参数的 Census 变

收稿日期：2020－11－26.

基金项目：国家自然科学基金项目(61471124)；福建省科技厅工业引导性重点项目(2020H0007).

* **通信作者：**郑茜颖　**E-mail：** zhengqy@vip.sina.com

换算法(Census Transform,CT)能够有效解决匹配代价空间对光照变化敏感的问题[6]。但传统的 Census 变换过于依赖窗口的中心像素值,抗噪声干扰能力较差,并且对像素点邻域结构的描述过于粗糙,因此匹配精度也有待提高。Ma 等[7]提出基于邻域信息的改进 Census 变换(Modified Census Transform,MCT)算法,以窗口均值代替中心像素值参与比较,在一定程度上改善了 Census 变换对噪声的鲁棒性。Mei 等[8]将 AD 匹配代价与传统 Census 变换进行融合,提出了 ADCensus 匹配代价计算算法,一定程度上克服了传统 Census 变换在重复纹理区域误匹配率较高的缺点。

基于以上分析,本文提出了一种基于改进 Census 变换的抗噪立体匹配算法,通过在比较函数中引入噪声容限变量,用四种状态值来描述比较结果,从而更加详细地描述出中心像素点的邻域结构特征。本文将改进的 Census 匹配代价与 AD 和梯度代价进行融合,并引入相应的截断阈值,提高了初始匹配代价空间的可靠性以及对噪声的鲁棒性。

1　改进的 Census 变换

传统 Census 变换是一种基于局部矩形窗口的非参数变换,其基本思想是以待匹配像素点 p 为中心建立矩形窗口,将窗口内的像素点灰度值逐一与中心像素点进行比较,当像素点的灰度值不小于中心像素点时,将该点标记为 1,否则标记为 0;比较完成之后,将窗口内的 0 和 1 按顺序拼接成二进制比特串,记为 $T_c(p)$,$T_c(p)$在一定程度上能够反映中心像素点 p 的邻域结构特征。该变换过程可以用如下公式表示:

$$T_c(p)=\bigotimes_{q\in N_p}\xi[I(p),I(q)] \tag{1}$$

式中,N_p 表示 p 的邻域,$I(p)$,$I(q)$分别为像素点 p,q 对应的灰度值,符号⊗表示按位连接,$\xi[\cdot]$为比较函数,其表达式为

$$\xi[I(p),I(q)]=\begin{cases}1, & I(q)\geqslant I(p)\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{2}$$

从上述比较函数可以看出,传统 Census 变换过分依赖中心像素点的灰度值,当中心像素点受到噪声干扰时,经过 Census 变换得到的二进制比特串会发生显著变化,这不利于保持算法性能的稳定性。针对这一缺点,文献[7]提出用窗口均值取代中心像素值,并采用两位二进制数来表示比较结果,在一定程度上改善了 Census 变换的噪声鲁棒性。本文在此基础上提出一种引入噪声容限变量的四状态 Census 变换算法,即采用邻域窗口内各像素点的灰度均值 $I(\bar{p})$来代替中心像素值 $I(p)$参与比较,并引入局部纹理差异信息[9]作为窗口噪声容限 α,构造出如下新的比较函数:

$$\xi[I(\bar{p}),I(q)]=\begin{cases}11, & I(q)\geqslant I(\bar{p})+\alpha\\ 10, & I(\bar{p})+\alpha>I(q)\geqslant I(\bar{p})\\ 01, & I(\bar{p})>I(q)\geqslant I(\bar{p})-\alpha\\ 00, & \text{else}\end{cases} \tag{3}$$

式中 α 的表达式为

$$\alpha=\frac{\text{sum}_1/n_1-\text{sum}_2/n_2}{\beta} \tag{4}$$

式中,sum_1 表示邻域窗口中灰度值大于窗口均值 $I(\bar{p})$的所有像素灰度值之和,n_1 表示灰度值大于 $I(\bar{p})$的像素值数目;sum_2 表示邻域窗口中灰度值小于等于 $I(\bar{p})$的所有像素值之和,n_2 表示灰度值

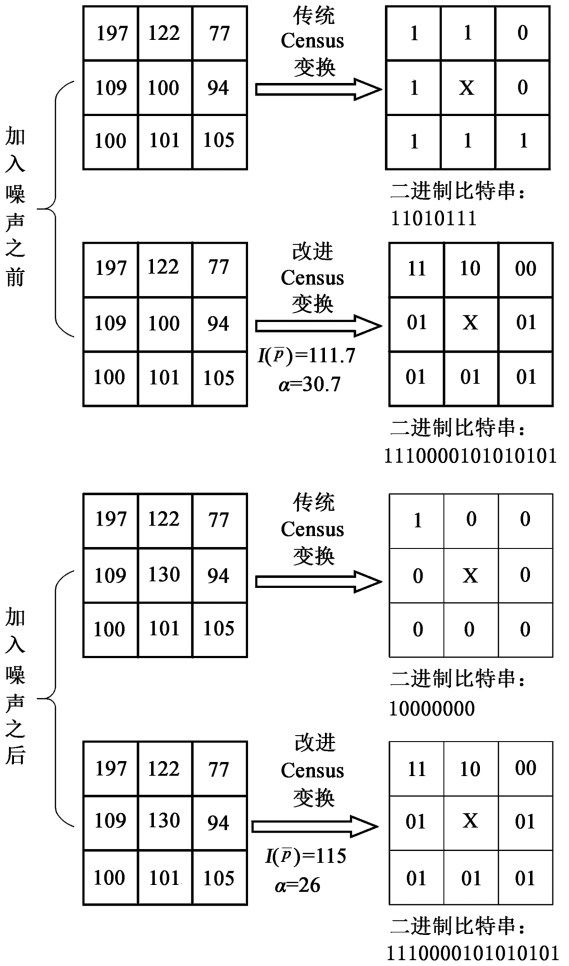


图 1　改进的 Census 变换计算过程

小于等于 $I(\bar{p})$ 的像素值数目；β 表示归一化参数，本实验中将其设置为 2。

以 3×3 大小的邻域窗口为例，图 1 展示了本文所提改进 Census 变换的计算过程。从图中可以看到，在中心像素点受到噪声干扰之后，传统 Census 变换计算得到的比特串发生了显著变化，而提出的改进 Census 变换计算得到的比特串保持不变。

2 改进 Census 变换立体匹配算法

本文提出的立体匹配算法同样遵循文献[5]总结的四个步骤，图 2 展示了本文提出的立体匹配算法的整体流程。

1)在初始匹配代价计算阶段，分别计算出改进 Census 匹配代价、AD 匹配代价和梯度匹配代价，利用代价融合公式，计算得到初始代价空间；2)在代价聚合阶段，利用保边特性较好地引导图滤波器对初始代价空间进行代价聚合[10]；3)采用赢家通吃策略(Winner Takes All，WTA)计算每个像素点的初始视差值；4)在视差后处理阶段，通过左右一致性检验[11]、视差填充和加权中值滤波对初始视差图进行优化，最终获得匹配精度较高的视差结果。

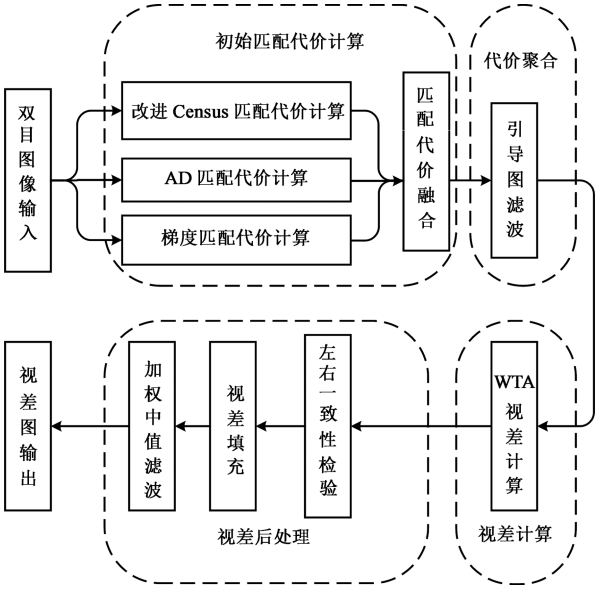


图 2 立体匹配算法整体流程

2.1 融合匹配代价计算

为了进一步提高算法的噪声鲁棒性以及改善图像在重复纹理区域的匹配精度，本文在改进的 Census 匹配代价、AD 匹配代价以及梯度匹配代价中分别引入相应的截断阈值，并提出以下融合的匹配代价计算算法。

在 Census 匹配代价的计算中，本文采用左右双目图像对应窗口比特串 $T_c^L(p)$ 和 $T_c^R(p)$ 之间的汉明距离来表示 Census 匹配代价，汉明距离越短，则匹配代价越小，代表两个像素点之间的相似度越高。同时，为了进一步降低噪声的影响，本文引入了 Census 匹配代价的截断阈值 T_{census}，即改进后的 Census 匹配代价计算公式为

$$C_{\text{census}}(p,d)=\min(\text{Hamming}[T_c^L(p),T_c^R(p_d)],T_{\text{census}}) \tag{5}$$

式中，d 表示待匹配像素点 p 的视差值，其取值范围介于最大视差 $d_{\max}$ 和最小视差 $d_{\min}$ 之间，$C_{\text{census}}(p,d)$ 表示左图中待匹配像素点 $p=(x,y)$ 与目标像素点 $p_d=(x-d,y)$ 之间的 Census 变换匹配代价值。本实验中截断阈值 T_{census} 设置为 18。

同样，为了控制噪声对 AD 和梯度代价的影响，本文在 AD 和梯度的匹配代价公式中也引入了相应的截断阈值 T_{AD} 和 T_{grad}，表达式分别为

$$C_{\text{AD}}(p,d)=\min\left(\frac{1}{3}\sum_{i\in RGB}|I_i^L(p)-I_i^R(p_d)|,T_{\text{AD}}\right) \tag{6}$$

$$C_{\text{grad}}(p,d)=\min(|\nabla_x I^L(p)-\nabla_x I^R(p_d)|,T_{\text{grad}}) \tag{7}$$

式中，∇_x 表示像素灰度值在 x 方向上的导数，本实验中截断阈值 T_{AD}，T_{grad} 分别设置为 8 和 2。

基于文献[8]中提出的归一化融合思路，本文采用如下匹配代价融合公式计算初始匹配代价值：

$$C_{\text{fusion}}(p,d)=3-\exp\left(-\frac{C_{\text{census}}(p,d)}{\lambda_{\text{census}}}\right)-\exp\left(-\frac{C_{\text{AD}}(p,d)}{\lambda_{\text{AD}}}\right)-\exp\left(-\frac{C_{\text{grad}}(p,d)}{\lambda_{\text{grad}}}\right) \tag{8}$$

式中，λ_{census}，λ_{AD} 和 λ_{grad} 均为常量参数，分别控制着三种匹配代价在融合匹配代价中所占的权重。本实验中 λ_{census}，λ_{AD} 和 λ_{grad} 的值分别设置为 50，25 和 2。

2.2 基于引导图滤波器进行代价聚合

由于 2.1 节中的初始匹配代价空间是基于左右两幅图像中单个像素点之间的比较得到的结果，没有考虑相邻像素点之间的约束关系，因此初始代价空间的鉴别性依然比较低。为了提高立体匹配算法的匹配精度，对初始代价空间进行代价聚合是必不可少的。本文采用引导图滤波技术对代价空间进行滤波，即采用引导图滤波器生成的自适应权重完成代价聚合的过程，关于引导图滤波器的实现细节可以参考文献[10]，本文进行引导图滤波的实验参数

与该文献保持一致。

2.3 视差计算与后处理

在初始视差计算阶段，本文采用 WTA 算法计算每个像素点的初始视差值，并生成初始视差图。WTA 算法的思想是在聚合后的代价空间中，计算出与待匹配像素点 p 相对应的最小匹配代价所代表的视差值，作为像素点 p 的初始视差 d_0，表达为

$$d_0(p)=\text{argmin}[C(p,d)] \tag{9}$$

式中，$C(p,d)$表示视差值为 d 时的匹配代价值。

最后，采用一系列视差后处理手段优化初始视差图。首先，采用左右一致性检验算法找出初始视差图中的误匹配点，然后在行扫描线上选择最近邻较小可靠像素点的视差值对误匹配点进行视差填充，最后利用常量时间复杂度的加权中值滤波算法[12]对视差图进行滤波，得到最终视差图。

3 实验结果分析

本文采用 Middlebury 立体匹配算法测试平台[5]提供的四组标准立体图像对提出的算法进行实验和测试，四组标准测试图像的名称分别为 Tsukuba，Venus，Teddy 和 Cones，最大视差搜索范围分别为 15 像素、19 像素、59 像素、59 像素。本实验中 Census 变换窗口大小为 5×5。

3.1 匹配代价验证与抗噪性能分析

为了验证本文提出的匹配代价融合算法的有效性以及噪声鲁棒性，将本文算法分别与 CT，MCT 和 ADCensus 三种匹配代价算法进行了对比实验。具体实验流程为：1）对四组标准测试图分别加入 2%，5%，10%，15%的椒盐噪声和标准差为 2，4，6，8 的高斯噪声；2）分别利用四种匹配代价算法来计算不同噪声水平下的初始匹配代价值；3）对得到的四种初始匹配代价值分别采用引导图滤波技术进行代价聚合；4）利用 WTA 算法计算初始视差图，并分析初始视差图在非遮挡区域的平均误匹配率。表 1 和表 2 分别记录了四种算法在椒盐噪声和高斯噪声下的平均误匹配率。

表 1　椒盐噪声下，四种匹配算法的平均误匹配率(%)

算法	不加噪声	椒盐噪声			
		2%	5%	10%	15%
CT	5.35	6.18	7.68	10.66	13.94
MCT	4.71	5.49	6.53	8.42	10.45
ADCensus	3.76	4.46	5.65	7.85	10.21
本文算法	3.67	4.08	4.44	5.11	5.52

表 2　高斯噪声下，四种匹配算法的平均误匹配率(%)

算法	不加噪声	高斯噪声			
		2	4	6	8
CT	5.35	6.75	9.29	11.89	14.61
MCT	4.71	5.58	6.94	8.49	10.15
ADCensus	3.76	4.72	6.13	7.72	9.67
本文算法	3.67	4.55	6.15	7.92	10.10

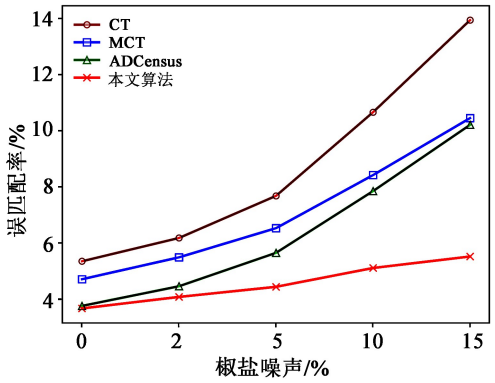


图 3　椒盐噪声下，不同算法的误匹配率折线图

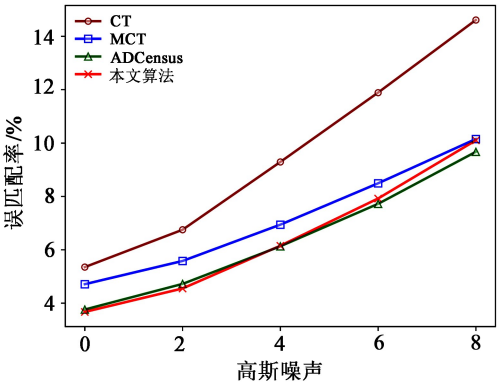


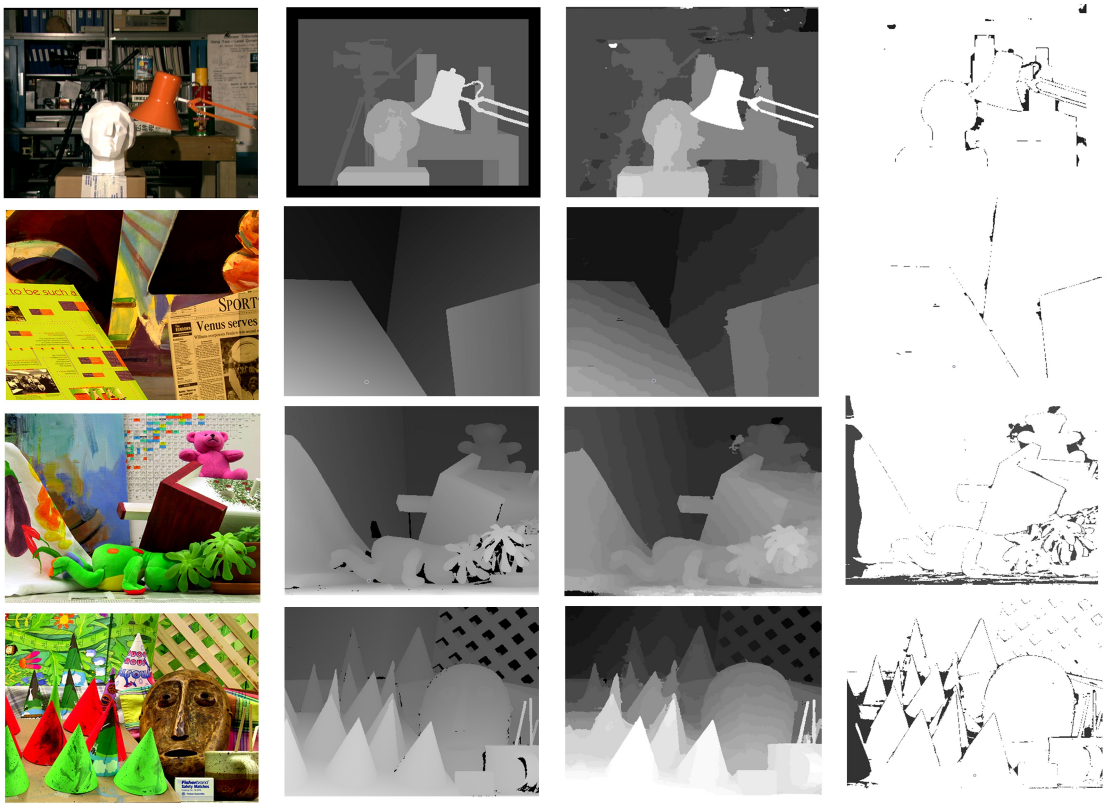
图 4　高斯噪声下，不同算法的误匹配率折线图

为了更加直观地比较四种算法的抗噪性能，图 3、图 4 绘制了四种算法在不同噪声下的非遮挡区域平均误匹配率折线图。

从表 1 和图 3 可以看出，相对于 CT，MCT 和 ADCensus 算法，本文所提算法在 2%，5%，10%和 15%的椒盐噪声水平下均具有最低的平均误匹配率，对椒盐噪声表现出良好的鲁棒性，并且随着椒盐噪声水平的提高，本文算法的优势会越来越明显。从表 2 和图 4 可以看出，对于标准差为 2，4，6 的高斯噪声，本文算法依然表现出了良好的抗噪性能，平均误匹配率和 ADCensus 算法接近，但优于 CT 算法和 MCT 算法。综合以上对比实验可以看出，本文提出的基于改进 Census 变换的融合匹配代价计算方案可以有效地抑制非遮挡区域的不同噪声带来的干扰，该算法的噪声鲁棒性较好。

3.2 不同立体匹配算法对比分析

图 5 展示了本文提出的立体匹配算法计算得到的最终视差图。其中图 5(a)为标准测试图,从上至下依次为 Tsukuba,Venus,Teddy,Cones,图 5(b)为真实视差图,图 5(c)为本文算法计算得到的视差图,图 5(d)为本文算法计算得到的误匹配像素图,其中大片白色区域表示正确匹配的像素点,灰色区域表示发生误匹配的像素点。



(a) 标准测试图 (b) 真实视差图 (c) 本文算法视差图 (d) 误匹配像素图

图 5 标准测试图实验结果

为了更加客观地评价本文提出的立体匹配算法的性能,本文与近年来其他较好的立体匹配算法进行了比较,如表 3 所示。其中 Nocc 表示在标准测试图中的非遮挡区域的误匹配率,Disc 表示在深度不连续区域误匹配率,All 表示在整幅图像中总的误匹配率,Avg. err 表示在四幅标准测试图中总误匹配率的平均值。从表 3 可以看出,本文提出的立体匹配算法平均误匹配率为 5.59%,匹配精度高于近年提出的多种改进 Census 变换的立体匹配方案,如:文献[13]、文献[14],相对于文献[15]提出的基于图像分割的立体匹配算法有显著优势。

表 3 阈值为 1 像素时,不同算法的误匹配率(%)

算法	Avg. err	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones		
		Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All
本文算法	5.59	2.13	9.22	2.49	0.25	3.01	0.61	6.01	15.98	11.29	2.66	7.78	7.99
文献[13]	6.43	4.54	10.11	2.72	0.84	3.36	0.95	6.35	17.16	11.72	5.87	8.32	10.33
文献[14]	6.73	3.13	11.9	4.20	1.08	13.6	1.87	5.68	17.1	11.6	3.79	11.3	9.26
文献[15]	8.14	4.57	16.6	5.4	1.19	11.62	1.93	6.27	18.81	11.44	6.15	17.3	13.77

4 结论

本文针对传统 Census 变换过于依赖中心像素点,导致算法噪声鲁棒性较差的缺点,提出了一种引入噪声容限的四状态 Census 变换,该变换的抗噪性能优于传统 Census 变换和部分改进的 Census 变换。同时,在后继的融合匹配代价公式中加入相应的截断阈值,提高了初始匹配代价空间的可靠性,使匹配的精度更高。

参考文献：

[1] Dong Q, Feng J. Outlier detection and disparity refinement in stereo matching[J]. J. of Visual Communication and Image Representation, 2019, 60: 380-390.

[2] Hadfield S, Lebeda K, Bowden R. Stereo reconstruction using top-down cues [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2017, 157: 206-222.

[3] Yan T, Gan Y, Xia Z, et al. Segment-based disparity refinement with occlusion handling for stereo matching[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2019, 28(8): 3885-3897.

[4] 王云峰，吴　炜，余小亮，等. 基于自适应权重 AD-Census 变换的双目立体匹配[J]. 工程科学与技术，2018，50(4)：153-160.
Wang Y F, Wu W, Yu X L, et al. A stereo matching system with the adaptive weight AD-Census [J]. Adv. Engin. Sciences, 2018, 50(4): 153-160.

[5] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. Inter. J. of Computer Vision, 2002, 47(1/3): 7-42.

[6] Hirschmuller H, Scharstein D. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometric differences[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 31(9): 1582-1599.

[7] Ma L, Li J, Ma J, et al. A modified census transform based on the neighborhood information for stereo matching algorithm [C]// Proc. of 2013 Seventh Inter. Conf. on Image and Graphics, 2013: 533-538.

[8] Mei X, Sun X, Zhou M, et al. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware[C]// Proc. of 2011 IEEE Inter. Conf. on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011: 467-474.

[9] Zhu S, Yan L. Local stereo matching algorithm with efficient matching cost and adaptive guided image filter[J]. The Visual Computer, 2017, 33(9): 1087-1102.

[10] Tan P, Monasse P. Stereo disparity through cost aggregation with guided filter[J]. Image Processing on Line, 2014, 4: 252-275.

[11] 彭新俊，韩　军，汤　踊，等. 基于改进 Census 变换和异常值剔除的抗噪立体匹配算法[J]. 光学学报，2017，37(11)：223-231.
Peng X J, Han J, Tang Y, et al. Anti-noise stereo matching algorithm based on improved Census transform and outlier elimination[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 223-231.

[12] Ma Z, He K, Wei Y, et al. Constant time weighted median filtering for stereo matching and beyond[C]// Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Computer Vision, 2013: 49-56.

[13] 梁海波，邹佳玲. 改进的非参数 Census 变换立体匹配算法[J]. 吉林大学学报(理学版)，2019，57(5)：1163-1168.
Liang H B, Zou J L. Improved stereo matching algorithm based on nonparametric Census transform [J]. J. of Jilin University(Science Edition), 2019, 57(5): 1163-1168.

[14] 门宇博，马　宁，张国印，等. 非参数变换和改进动态规划的立体匹配算法[J]. 哈尔滨工业大学学报，2015，47(3)：60-65.
Men Y B, Ma N, Zhang G Y, et al. A stereo matching algorithm based on Census transform and improved dynamic programming[J]. J. of Harbin Institute of Technol., 2015, 47(3): 60-65.

[15] Baek E-T, Ho Y-S. Cost aggregation with guided image filter and superpixel for stereo matching[C]// Proc. of 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), 2016: 1-4.

作者简介：

刘振友(1996－)，男，硕士研究生，主要研究方向为计算机视觉；

郑茜颖(1970－)，女，博士，副教授，主要研究方向为人工智能与计算机视觉。

(上接第 51 页)

[16] 王　岩. Monte Carlo 方法应用研究[J]. 云南大学学报(自然科学版)，2006(S1)：33-36.
Wang Y. Application of Monte Carlo method[J]. J. of Yunnan University: Natural Science Page, 2006(S1): 33-36.

[17] 朴　雪. 电子轰击有源像素传感器电荷收集效率理论模拟研究[D]. 长春：长春理工大学，2016：37-38.
Piao X. Theoretical simulation of charge collection efficiency of electron bombarded active pixel sensor [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016: 37-38.

[18] 宋　德，石　峰，李　野. 基底均匀掺杂下 EBAPS 电荷收集效率的模拟研究[J]. 红外与激光工程，2016，45(2)：0203002.
Song D, Shi F, Li Y. Simulation of charge collection efficiency for EBAPS with uniformly doped substrate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(2): 0203002.

作者简介：

田佳峰(1996－)，男，吉林吉林人，硕士研究生，研究方向为光电成像器件与系统；

宋　德(1981－)，男，吉林靖宇人，理学博士，副教授，研究方向为光电成像器件与系统。