

引用格式: 刘建明, 何晴, 陈辉. 基于改进 Census 变换与颜色梯度融合的立体匹配[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(9): 38-44.
[LIU J M, HE Q, CHEN H. Stereo matching based on improved Census transform and color gradient fusion [J]. Microelec-
tronics & Computer, 2021, 38(9): 38-44.]

基于改进 Census 变换与颜色梯度融合的立体匹配

刘建明, 何 晴, 陈 辉

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541000)

摘 要: 针对立体匹配中传统 Census 变换窗口中心点易受外界环境影响以及部分深度不连续区域匹配精度较低的问题, 提出了一种基于改进的 Census 变换和传播滤波的立体匹配算法. 在初始匹配代价计算中将改进的 Census 变换与颜色、梯度代价进行融合; 同时在代价聚合阶段引入传播滤波来保持视差空间图像边缘, 不受传统局部算法窗口大小的影响; 然后在视差处理部分采用“胜者为王”算法进行初始视差计算; 在后面的视差优化部分采用左右一致性检测和中值滤波的方法来获得最终的视差图. 在 Middlebury 上的测试实验表明: 与传统的 Census 算法相比, 本文算法匹配精度明显提高, 且具有良好的实时性和很好的稳健性.

关键词: 双目立体匹配; Census 变换; 颜色变换; 梯度变换; 传播滤波

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)09-0038-07

Stereo matching based on improved Census transform and color gradient fusion

LIU Jianming, HE Qing, CHEN Hui

(College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the center point of the traditional Census transform window in stereo matching is easily affected by the external environment and the matching accuracy of some depth discontinuous regions is low, a stereo matching algorithm based on improved Census transform and propagation filtering is proposed. In the initial matching cost calculation, the improved Census transform is fused with the color and gradient cost. At the same time, the propagation filter is introduced in the cost aggregation stage to maintain the edge of the parallax space image, which is not affected by the window size of the traditional local algorithm. Then, in the parallax processing part, the winner-takes-all (WTA) algorithm is used to calculate the initial parallax. In the following disparity optimization part, the method of left and right consistency detection and median filtering is used to obtain the final disparity map. Experimental results on Middlebury show that, compared with the traditional Census algorithm, the matching accuracy of the proposed algorithm is significantly improved, and the algorithm has good real-time performance and robustness.

Key words: binocular stereo matching; Census; color transformation; gradient transformation; propagation filtering

1 引言

立体匹配作为三维重建、立体导航等技术的关键步骤, 是通过匹配两幅或者多幅图像来获取深度信息^[1]. 立体匹配算法分为匹配代价计算, 代价聚合, 视差计算优化及校正四个过程^[2-3], 局部匹配算法主要通过局部像素的代价聚合实现, 传统的代价

键步骤, 是通过匹配两幅或者多幅图像来获取深度信息^[1]. 立体匹配算法分为匹配代价计算, 代价聚合, 视差计算优化及校正四个过程^[2-3], 局部匹配算法主要通过局部像素的代价聚合实现, 传统的代价

聚合算法有 SAD(Sum of absolute differences)^[4], SSD(sum of squared differences)^[5], NCC(normalized cross-correlation)^[6], Census^[7]等匹配算法。常见的局部立体匹配算法基于像素灰度值来实现初始匹配代价的计算,但是图像会因为外部光照变化出现辐射度失真,此时图像的匹配精度会下降。针对此类问题, Hirshmuller 等^[8]对不同的立体匹配算法进行光照测试,发现 Census 变换对光照变化有较强的鲁棒性,但 Census 变化主要依靠中心像素,当中心像素变化时,此方法匹配精度会降低^[9]。为提高非参数 Census 变换的抗噪能力,萧红等^[10]提出基于改进 Census 变换与梯度融合的立体匹配算法,将改进的 Census 代价与梯度代价进行融合。Jen-Hao Rick Chang 等^[11]利用传播滤波对图像背景良好的去噪能力,在保持上下文信息的同时平滑图像。Manuel G. Forero^[12]等对传播滤波进行改进,它在保留图像上下文信息的同时具有软化图像的特点,不仅实现了图像像素的权重配比,而且改善了滤波消除图像噪声效率低下的缺点。

传统 Census 全部依赖窗口中心像素的灰度值,容易受外界因素影响,并且 Census 变换匹配窗口的权值相同,像素值大小、距离中心像素的点的距离等因素并不影响其在代价计算中的数值变换,因此导致视差图中对应像素点的误匹配。文献^[10]提出改进 Census 变换与梯度融合,接着采用引导滤波算法对图像进行多尺度代价聚合。本算法在此基础上在代价计算阶段不仅将改进的 Census 变换融合了梯度代价,另外加入颜色信息来约束;代价聚合阶段,为保留图像上下文信息和图像边缘信息,减弱外界因素的影响,提高图片的质量,采用传播滤波来完成代价聚合;最后通过视差计算和视差优化来得到最终的视差。

2 算法介绍

2.1 改进 Census 变换初始代价计算

传统的 Census 变换^[7]在图像区域定义一个矩形窗口,用此窗口遍历整幅图像,选取中心像素作为参考像素,将矩形窗口中每个像素的灰度值与参考像素的灰度值作为比较,灰度值小于等于参考值的像素记为 0,大于参考值的像素的记为 1,最后再将它们按位连接,得到变换后的结果,变换后的结果是由 0 和 1 组成的二进制码流。然后将所得图像利用汉明距离^[13]计算图像的匹配程度,得到初始匹配代价为:

$$C(p, q, d) = \text{Hamming}[M^l(p), M^r(p + d)], \quad d \in [d_{\min}, d_{\max}] \quad (1)$$

M^l, M^r 分别是像素点 $p, p + d$ 的汉明距离, d 是最大视差 $d_{\max}$ 和最小视差 $d_{\min}$ 之间的任何值, $C_{(p, q, d)}$ 为两个变换码的汉明距离。

为改善传统 Census 变换处理后视差图中对应像素点出现误匹配的问题,本文在传统 Census 变换的基础上,将 Census 变换窗口分为 4 个重复区域为中心像素的子区域。如图 1 所示,选择灰度分布均匀度最大和最小的两个子区域中像素均值作为中心像素灰度值^[10]。子区域灰度均匀度计算公式为:

$$Z = \sum |I(Q') - \overline{I(Q)}| \quad (2)$$

公式中, $I(Q')$ 表示子区域像素灰度值, $\overline{I(Q)}$ 表示子区域像素均值。然后根据上述公式,求出经过变换的窗口的中心像素的像素值,如下式:

$$R_c = \frac{\sum I(Q_{\max}) + \sum I(Q_{\min})}{n} \quad (3)$$

式中, R_c 是改进后中心像素值, n 为灰度分布均匀度最大及最小子区域中像素个数。

如图 1, 分别以变换窗口的中心值, 所有像素的均值和改进后的像素灰度值为中心像素值, 可分别得出 Census 变换结果, 最后改进的 Census 变换算法降低了对中心像素的依赖, 而且提高了算法的稳定性。

100 102 100	0 1 0	0 0 0	0 0 0
104 101 105	1 101 1	1 102.8 1	1 104 1
102 106 105	1 1 1	0 1 1	0 1 1

105 102 100	1 1 1	1 1 1	1 1 1
100 101 89	0 101 0	1 99.3 0	1 98.7 0
98 96 100	0 0 0	0 0 1	0 0 1

100 105 107	0 1 1	0 1 1	0 1 1
101 102 106	0 102 1	0 103.3 1	0 104 1
103 104 102	1 1 1	1 0 0	0 1 0

(a)中心像素值 (b)原始中心 (c)中心像素用窗 (d)改进计算得
不同的窗口 像素值 口像素值平均值 到的中心像素

图 1 中心像素不同时的像素值

Census 变换只是考虑了图像的灰度信息, 为了进一步提高图像的匹配代价的结果, 本文将颜色信息和图像梯度与改进后的 Census 变换相结合。本文将图像的三通道颜色信息加入匹配代价, 其匹配代价为:

$$C_{\text{ADC}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, d) = \frac{1}{3} \sum_{n \in (r, g, b)} (I_n^l(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - I_n^r(\mathbf{x} - d, \mathbf{y}), \tau_n) \quad (4)$$

式中, $C_{ADC}(x, y, d)$ 是像素 (x, y) 在视差为 d 时的颜色匹配代价, I_l^n, I_r^n 分别为左右图像在 n 通道的像素值矩阵。

图像梯度信息匹配代价^[10] 计算类似于颜色信息的原理, 可以有效地保留图像的边缘信息, 改善深度不连续区域的匹配不准问题, 公式如下:

$$C_G = \sum_{(x_i, y_i) \in M(x, y)} w_G(x_i, y_i) \min(|\nabla_x I_l(x_i, y_i) - \nabla_x I_r(x_i - d, y_i)|, \epsilon_G) \quad (5)$$

本文将上述改进的 Census 变换, 颜色信息和梯度信息融合在一起, 形成可靠性高的匹配代价, 并将其按比例加权混合得到如下其中 μ_1, μ_2, μ_3 分别代表对应特性的权重值, $C_{ADC}(x, y, d)$ 表示像素 (x, y) 在视差为 d 时的初始匹配代价。

2.2 代价聚合

第一步匹配代价计算只考虑了局部信息, 通过两个像素邻域内一定大小的窗口内的像素信息来计算代价值, 这就很容易受到影像噪声的影响, 并且当图像处于弱纹理或者重复纹理的区域, 这个代价值将受到影像噪声的影响, 并且当图像处于弱纹理或者重复纹理的区域, 这个代价值将很难准确反映像素之间的关系, 而代价聚合以一定的方法建立了相邻像素之间的关系, 对代价矩阵进行优化, 从而取得较高匹配度的匹配代价。S. Hsiao^[14] 等提出了一种低成本高质量的局部立体匹配设计方案, 利用均值滤波和引导滤波来提高深度计算的质量。Gaussian Filter 和 α 均值滤波分别只考虑了空间域和值域差别, 双边滤波^[15] 同时考虑了空间域和值域的差别, 可以平滑平坦区域, 同时保持边缘锐化, 但是其效率低。文献^[12]里提出对传播滤波的改进, 它保留了图像上下文信息, 软化图像的特点, 同时此滤波通过改变图像像素的权值, 来消除图像的噪声。为了在过滤过程中减弱相邻像素或者相邻像素的信息的影响, 本文在代价聚合阶段采用传播滤波^[11] 来更好地实现图像去噪, 图像增强和图像融合。

2.2.1 传播滤波

传播滤波器是一个概率滤波器, 从概率的角度出发, 它即使在期望的平滑程度相当强烈的情况下, 仍在努力地保持边缘信息。李捷等^[16] 提出空间两点的相似性不 初始匹配代价:

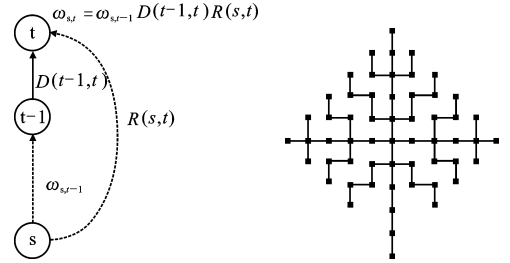
$$C(x, y, d) = \mu_1 C_{ADC}(x, y, d) + \mu_2 C_G + \mu_3 C(p, q, d) \quad (6)$$

仅取决于两像素及所在位置, 而且跟连接两条路径的像素值有关。假设有 n 个单独连通的点 1, 2,

3, ..., n , 并且像素点 s 和 t 满足 $1 \leq s \leq t \leq n$ 。滤波像素 s 和 t 的权重 $\omega_{s,t}$ 的概率值 t 和 s 有关, 即 $P(s \rightarrow t)$ 。当 $t = s$ 时, 可以得到 $\omega_{s,s} = P(s \rightarrow s) = 1$, 当 $t \neq s$, 根据贝叶斯规则, 计算如图 2(a) 所示的权重 $\omega_{s,t}$:

$$\begin{aligned} \omega_{s,t} &\equiv P(s \rightarrow t) \\ &\equiv \omega_{s,t-1} D(t-1, t) R(s, t) \end{aligned} \quad (7)$$

$D(t-1, t)$ 表示两个像素之间的相似性程度, 传播滤波的权值不仅取决于像素的相似度, 还取决于连接路径上像素的相似度。



(a) 滤波权值 $\omega_{s,t}$ 的定义 (b) 当距离 ≤ 5 时的传播路径

图 2 初始匹配代价的计算

两个相邻像素在灰度上的相似度与像素值差的高斯函数值成正比, 因此定义相似度测量如式(8), 式(9)所示:

$$\begin{aligned} D(t-1, t) &= g(\|I_{t-1} - I_t\|; \sigma_b) \\ &= \exp\left(-\frac{\|I_{t-1} - I_t\|^2}{2\sigma_b^2}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} R(x, y) &= g(\|I_x - I_y\|; \sigma_a) \\ &= \exp\left(-\frac{\|I_x - I_y\|^2}{2\sigma_a^2}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

对于考虑二维图像的传播路径, 由图 2(b) 的路径图和 Chang 提出的多树传播模型^[11] 可以得知, 如果像素 s 和像素 t 水平或者垂直对齐, 路径将是一条连接像素 s 和 t 的直线, 如果像素 s 和 t 不是简单的水平或者垂直连接, 根据它们在曼哈顿距离来确定路径。如果像素 s 和 t 之间的曼哈顿距离为奇数, 则选择该像素在垂直方向上遍历其前一个的路径; 否则将选择水平路径。若给定输入图像 I , 经过传播滤波后输出为 I_s :

$$I_s = \frac{1}{Z_s} \sum_{t \in N(s)} \omega_{s,t} I_t \quad (10)$$

式中, I_t 表示图像 I 中像素点 s 的灰度值, Z_s 为归一化引子, $N(s)$ 为以像素点 s 为中心的邻域像素点的集合。

2.2.2 基于传播滤波的代价聚合

本文在 DSI 空间采用传播滤波的方法进行滤波处理, 假设在 DSI 空间对第 n 个切片进行代价聚合, 输入 $C(x, y, d)$ 与输出 $C_{ADC}(x, y, d)$ 的关系式如下:

$$CA_{p,d} = \frac{1}{z_p} \sum_{q \in N_n(p)} \omega_{p,q} C_{q,d} \tag{11}$$

式中, $\omega_{p,q}$ 由式(7) 决定, 本文选择 $d = 5$ 时匹配代价图来验证传播滤波在代价聚合中的效果, 并且采用窗口大小为 9 传统双边滤波, 引导滤波以及传播滤波来进行匹配代价的对比, 如图 3 所示。

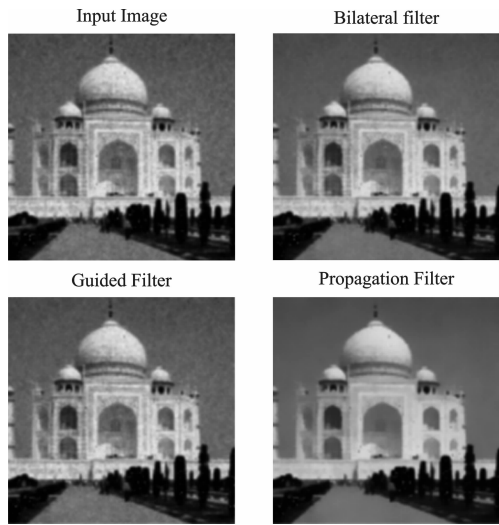


图 3 $d=5$ 时窗口大小为 9 时原图和各个算法代价聚合图

从图中可以看出原图存在噪声点, 经过双边滤波和引导滤波处理后图像仍存在噪声点, 而传播滤波获得了更清晰的边缘, 并且边缘也被更有效的保护, 传播滤波相比其他两种滤波聚合后更有效的保护了边缘, 抑制跨区域混合现象。

2.3 视差计算和优化

经过代价聚合之后, 对得到的视差值采用胜者

为王(WTA)策略^[17] 进行处理, 得到初始视差值, 该策略使每个像素选择最小聚合代价值时并得到所对应的的视差值. 由于初始视差图中和输入图像的遮挡区域和其深度不连续区域相对应的区域的匹配点可能会存在一些错误, 常用左右一致性检测^[18] 来对经过代价聚合后的左图某点的视差值和右图某点的视差值进行判断, 将不满足条件的点视为异常点, 并对该点利用加权中值滤波进行后处理进行计算填补, 最后得到高质量的视差图。

3 实验结果与分析

为了对本文实验算法进行测试评估, 选取 Middlebury v3.0^[19] 数据集, 实验中所用参数 τ_n 和 ϵ_G 分别设置为 10 和 0.1, 总匹配代价的各个系数值分别为 μ_1, μ_2 和 μ_3 分别为 0.1, 0.1 和 1.

本文利用数据集的标准立体图像对进行实验来验证匹配代价的有效性, 将所得结果与本文算法的结果进行对比, 通过对比在阈值为 1 时的误差像素的百分比, 其中 nonocc 表示非遮挡区域, all 代表所有区域, 结果如表 1 所示。

利用本文算法经过测试得到的半遮挡或无纹理区域和全部区域的各个误差像素百分比的平均值分别为 24.8%, 26.2% 都小于上述三个算法的处理结果, 对比参考算法得到的结果最佳, 故可以得出本文算法相比其他算法具有更高的匹配代价可靠性。

表 1 图像密集训练下错误像素百分比为 1 的测试数据集比较结果

匹配图像	MANE		FC-DCNN		GANetREE_RVC		Proposed	
Training dense	nonocc	all	nonocc	all	nonocc	all	nonocc	all
Tsukuba	43.3	47.7	31.3	28.0	26.7	29.0	21.6	23.1
Venus	21.5	37.9	17.1	13.4	11.6	19.4	12.2	14.5
Teddy	42.3	55.3	38.5	27.1	51.5	55.9	21.4	36.4
Cones	38.7	45.1	29.8	27.7	25.1	29.5	16.2	17.8
MotorcycleE	36.9	43.5	29.5	27.6	18.4	22.2	16.0	17.7
Piano	44.6	48.9	36.2	28.4	23.7	27.0	25.0	27.2
PianoL	55.4	58.8	47.5	26.9	36.4	38.8	39.0	43.2
Pipes	32.9	44.1	25.2	21.2	19.6	27.6	13.9	16.8
Playroom	56.6	62.5	42.8	32.5	31.6	36.8	33.1	36.2
Playtable	69.5	72.6	48.6	32.2	25.4	27.8	39.6	41.5
PlaytableP	38.8	45.2	31.5	26.3	18.4	22.5	17.1	18.6
Recycle	41.6	45.8	31.8	27.6	22.7	24.5	24.9	26.5
Shelves	68.4	70.4	59.7	43.2	35.3	37.3	47.1	51.6
Teddy	16.5	25.1	12.5	10.3	11.0	13.7	10.0	11.2
Vintage	62.3	65.4	51.5	34.7	41.6	44.8	35.7	41.1
Weight Avg	41.0	48.3	32.6	25.8	25.1	29.1	24.8	26.2

表 2 是标准图像匹配对 Adirondack、Motorcycle、Piano 和 Teddy,从视差的误匹配率和计算视差的用时来将 MANE^[20-21]、GANetREE_RVC^[22]和本文算法进行对比,从表中可以看出本文算法的误匹配率为 1.16%,和另外三种算法进行对比,本文的算法综合来看,具有较大优势.

表 2 密集训练下图像视差的误匹配率和时长

Training dense	Adirondack		Motorcycle		Piano		Teddy	
	time	avgerr	time	avgerr	time	avgerr	time	avgerr
MANE	0.09	11.6	0.02	12.4	0.02	15.1	0.09	12.5
FC-DCNN	10.9	2.87	10.9	4.65	10.1	4.45	29.6	2.17
GANetREE_RVC	8.87	1.09	9.94	1.41	8.86	1.33	3.70	0.92
Proposed	0.960	1.55	1.27	1.66	1.15	2.05	0.46	1.16



(a)左图 (b)真实视差图 (c)MANE (d)FC-DCNN (e)GANetREE_RVC (f)本文算法

图 4 结果视差对比图

4 结束语

本文提出了一种基于改进 Census 变换与颜色、梯度融合的传播滤波的立体匹配算法,用选择窗口中灰度均匀度最大和最小的两个子区域中像素的均值作为 Census 变换的参考值,引入图像的颜色信息和梯度信息,将颜色代价和梯度代价与改进后的 Census 代价进行融合,得到初始的匹配代价,降低了图像在深度不连续,弱纹理区域的干扰,提高了算法的匹配精度;在代价聚合阶段,利用传播滤波,有效降低了图像的误匹配率,减少了噪音的干扰.实验结果表明,本文所用算法的匹配精度有所提高,并且具有很好地鲁棒性和实时性.

参考文献:

[1] DO P N B, NGUYEN Q C. A review of stereo-photo-

为了更加全面地验证本文的算法,选取 Middlebury 中的测试数据集进行实验,分别采用 NANE、FC-DCNN、GANetREE_RVC 与本文所提算法测试 Adirondack、Motorcycle、Piano 和 Teddy 四对图像,图 4 是四对图像的视差图.

grammetry method for 3-D reconstruction in computer vision[C]//Proceedings of the 2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies, Ho Chi Minh City, Vietnam: IEEE, 2019: 138-143. DOI: 10.1109/ISCIT.2019.8905144.

[2] 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. DOI: 10.1023/A:1014573219977.

[3] SHI C B, WANG G J, YIN X W, et al. High-accuracy stereo matching based on adaptive ground control points[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24 (4): 1412-1423. DOI: 10.1109/TIP.2015.2393054.

[4] ABREU B, PAIM G, GRELLERT M, et al. Exploiting absolute arithmetic for power-efficient sum of absolute differences[C]//Proceedings of the 2017 24th

- IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. Batumi, Georgia: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICECS.2017.8292062.
- [5] HISHAM M B, YAAKOB S N, RAO F R A A, et al. Template matching using sum of squared difference and normalized cross correlation[C]//Proceedings of 2015 IEEE Student Conference on Research and Development. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/SCORED.2015.7449303.
- [6] WU Q, LAW R. The forecasting model based on modified SVRM and PSO penalizing Gaussian noise[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3): 1887-1894. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.07.120.
- [7] FIFE W S, ARCHIBALD J K. Improved census transforms for resource-optimized stereo vision[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2013, 23(1): 60-73. DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2203197.
- [8] HIRSCHMULLER H, SCHARSTEIN D. Evaluation of cost functions for stereo matching[C]//Proceedings of 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis: IEEE, 2007: 1-8. DOI: 10.1109/CVPR.2007.383248.
- [9] LIM J, KIM Y, LEE S. A census transform-based robust stereo matching under radiometric changes[C]//Proceedings of 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference. Jeju, Korea (South): IEEE, 2016. DOI: 10.1109/APSIPA.2016.7820841.
- [10] 萧红, 田川, 张毅, 等. 基于改进 Census 变换与梯度融合的立体匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(2): 0215008. DOI: 10.3788/LOP202158.0215008.
- XIAO H, TIAN C, ZHANG Y, et al. Stereo matching algorithm based on improved Census transform and gradient fusion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(2): 0215008. DOI: 10.3788/LOP202158.0215008.
- [11] CHANG J H R, WANG Y C F. Propagated image filtering[C]//Proceedings of 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298595.
- [12] FORERO M G, RESTREPO-TABORDA C A. Generalization of propagated image filtering[C]//Proceedings of the 7th Latin American Conference on Networked and Electronic Media. Valparaiso: 2017: 6-8. DOI: 10.1049/ic.2017.0033.
- [13] 程子怡, 卢荣胜, 毛翠丽. 光亮表面双目立体视觉三维形貌测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071202.
- CHENG Z Y, LU R S, MAO C L. Measurement method of three-dimensional shape of bright surface with binocular stereo vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071202. DOI: 10.3788/LOP57.071202.
- [14] HSIAO S F, CHANG C H. Hardware design of disparity computation for stereo vision using guided image filtering[C]//Proceedings of 2018 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test. Hsinchu, China: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/VLSI-DAT.2018.8373266.
- [15] KORNPROBST P, TUMBLIN J, DURAND F. Bilateral filtering: theory and applications[J]. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2009, 4(1): 1-73. DOI: 10.1561/06000000020.
- [16] 李婕, 巩朋成. 结合传播滤波的立体匹配算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(19): 189-196.
- LI J, GONG P C. Cost aggregation based on propagated filtering in stereo matching[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(19): 189-196.
- [17] ZEGLAZI O, RZIZA M, AMINE A. An enhanced cross-scale adaptive cost aggregation for stereo matching[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications. Rabat, Morocco: IEEE, 2017: 1-5. DOI: 10.1109/WINCOM.2017.8238214.
- [18] 欧永东, 谢小鹏. 基于改进 Census 变换的多特性立体匹配算法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(6): 1030-1036. DOI: 10.3969/j.issn.1007-130X.2020.06.010.
- OU Y D, XIE X P. A multi-feature stereo matching algorithm based on improved Census transform[J]. Computer Engineering and Science, 2020, 42(6): 1030-1036. DOI: 10.3969/j.issn.1007-130X.2020.06.010.
- [19] SCHARSTEIN D, SZELISKI R, ZABIH R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[C]//Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision (in conjunction with IEEE CVPR 2001), Kluwer Academic Publishers, 2001: 131-140.
- [20] VAZQUEZ DELGADO H D, PEREZ PATRICIO M, AGUILAR GONZALEZA, et al. Real-time multi-window stereo matching algorithm with fuzzy logic[J]. IET Computer Vision, 2021, 15(3): 208-223. DOI: 10.1049/cvi2.12031.

[21] HIRNER D, FRAUNDORFER F. FC-DCNN: a densely connected neural network for stereo estimation [C]//Proceedings of the 2020 25th International Conference on Pattern Recognition. Milan, Italy: IEEE, 2020. DOI: 10.1109/ICPR48806.2021.9413281.

[22] ZHANG F H, PRISACARIU V, YANG R G, et al. GA-Net: guided aggregation net for end-to-end stereo matching[C]//Proceedings of 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Long Beach:IEEE,2019. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00027.

作者简介:

刘建明 男,(1975-),博士,教授.研究方向为计算机通信网络组网工程、综合智能系统.

何 晴 女,(1994-),硕士研究生.研究方向为智能信息处理.

陈 辉(通讯作者) 男,(1974-),博士,副高级研究员.研究方向为机器学习、机器视觉、智能检测与智能控制非线性控制、物联网、模式识别与图像处理、图像处理、无人驾驶技术. E-mail:1061790644@qq.com.