

文章编号:1007-130X(2019)06-1044-06

三种测度融合的加权引导滤波匹配算法^{*}

郭 鑫^{1,2}, 王延杰¹, 付东辉^{1,2}, 樊 博^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

在流程操作层面, 描述算法

针对什么问题, 提出什么算法

摘 要: 针对立体匹配算法中, census 变换在弱纹理区域具有较好效果, 但忽略了图像的灰度信息, 造成在重复纹理区域匹配效果不理想, 提出了一种改进的 census 变换。在初始匹配代价阶段, 设计了一种在 census 变换的基础上融合互信息和梯度信息的相似性测度算法。在代价聚合阶段, 采用自适应权重引导滤波聚合策略。最后, 通过视差计算、视差优化得到最终的视差图。在 VS2015 软件平台上对 Middlebury 网站上提供的标准测试图进行实验, 实验结果表明, 所提算法能够得到较为准确的视差图, 平均误匹配率为 5.29%, 可以满足三维重构的需要。

关键词: 立体匹配; census 变换; 引导滤波; 视差优化

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

用事实表明该算法的有效性

doi: 10.3969/j.issn.1007-130X.2019.06.012

A weight guided filtering matching algorithm combining three measures

GUO Xin^{1,2}, WANG Yan-jie¹, FU Dong-hui^{1,2}, FAN Bo^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The census transform in existing stereo matching algorithms has good effect in the weak texture region, but it neglects the gray level information of the image, causing unsatisfactory matching effect in repeated texture regions. We therefore propose an improved census transform. In the initial matching cost stage, we design a similarity measure algorithm based on census transform, mutual information and gradient information. Then in the cost aggregation stage, we adopt an adaptive weight guided filtering aggregation strategy. Finally, the final disparity map is obtained by calculating and optimizing disparity. We use the proposed algorithm to test the standard images provided on the Middlebury website on the VS2015 software platform. Experimental results show that it can get an accurate disparity map and the average mismatch rate is 5.29%, which meets the requirement of 3D reconstruction.

Key words: stereo matching; census transform; guided filtering; disparity optimization

立体匹配的步骤

自然过度到立体匹配

双目立体视觉是什么, 重要性, 应用

1 引言

双目立体视觉是一种模拟人类视觉的技术, 随着该技术的不断发展, 越来越多的学者以及研究人员陆续投入到该技术的研究当中。如今双目立体

视觉技术在机器人导航、虚拟现实等领域发挥着至关重要的作用。立体匹配是双目立体视觉系统中不可缺少的关键一步。2002 年, Scharstein 等人^[1]指出可用如下 4 个步骤来表示立体匹配过程: 匹配代价计算、匹配代价聚合、视差计算以及视差优化。根据优化的作用范围, 可将立体匹配算法分为局部

^{*} 收稿日期: 2018-08-24; 修回日期: 2018-12-29

通信地址: 130033 吉林省长春市中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

Address: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, P. R. China

立体匹配和全局立体匹配。全局立体匹配算法的准确率较高,但计算复杂度较大,耗时较长;局部立体匹配算法结构简单,易于实现,但匹配准确率较低。近几年来,一些优秀的局部立体匹配算法的准确率已逼近全局立体匹配算法的准确率。虽然已涌现出大量的局部立体匹配算法,但局部立体匹配算法的实现仍面临 2 个难点:匹配代价和聚合窗口的选取。

常用匹配代价的相似性测度包括基于灰度差异的灰度差绝对值和 SAD (Sum of Absolute Differences) 以及灰度差平方和 SSD (Sum of Squared Differences)^[2]、基于梯度的度量 GBM (Gradient Based Measure)^[3]、基于 census^[4-6] 变换的度量。其中, SAD 和 SSD 对光照变化和噪声较敏感。GBM 建立在图像的梯度差异上,能够较好地突出图像的边缘信息,但依旧对噪声和光照变化敏感。census 变换并不是直接对图像灰度值进行操作,而是采用比较灰度值大小的方式对灰度值进行二进制编码,因此该方法对光照和噪声变化具有鲁棒性,但由于丢失了灰度信息,对重复纹理区域的匹配效果并不理想。随着研究的深入,有学者提出了融合的思想,如文献[7]提出了一种将 SAD 与 census 相结合的匹配算法。

局部立体匹配算法的另一个难点是聚合窗口的选择。一些传统的算法采用固定窗口的聚合方法,该算法的难点在于如何确定窗口大小。窗口太大在增加计算量的同时会使更多的视差不连续区域包含在该窗口内,导致匹配准确率降低;窗口太小会为无纹理或弱纹理区域的匹配带来困难。近年来,随着学者的不断深入研究,在窗口的选择方面已涌现出大量算法,其中包括基于可移动窗口的匹配、多窗口的匹配和可变窗口的匹配。以上几种算法虽然较固定窗口的聚合方法提升了匹配准确率,但仍受窗口大小及形状的影响。为了获得更准确的视差,2006 年, Yoon 等人^[8]提出了自适应权重算法。该算法首先需要计算窗口内各像素点与中心像素点的距离以及颜色相似度并根据得到的结果为各像素点分配权值,即与中心像素颜色越相似、距离越相近的像素被分配的权重越高,反之越低。文献[9]提出了一种自适应权重 AD-census 变换的匹配算法。自适应权重算法的准确率很高,但窗口越大其运行时间越长,因此在实际应用中受到了限制。2013 年, He 等人^[10]提出了引导滤波 (Guided Filter) 算法。引导滤波^[11,12]具有保边去噪的作用,能够提高物体边缘处的匹配准确率,同

自适应权重算法相比,降低了时间复杂度,缩短了计算时间。传统的引导滤波并没有考虑不同窗口纹理的不同,而是简单地对各个窗口应用同一个参数,导致该算法对纹理变化较大区域的匹配效果并不理想。

鉴于上述经典算法存在的问题,本文提出一种改进的局部立体匹配算法,该算法分为以下 3 步:(1)在 census 变换的基础上融合互信息和梯度信息,并把融合后的结果作为匹配代价,利用这几种测度实现优势互补以求得更好的结果;(2)将引导滤波与自适应权重算法相结合对匹配代价进行聚合,根据各个窗口内纹理信息的不同自适应地调整每个窗口内的参数;(3)在视差选择与优化阶段,针对胜者为王 WTA (Winner Takes All) 策略带来的选择歧义性,提出可靠性判据及视差修正方法。

2 匹配代价

2.1 改进的 census 变换

本文提出了一种在 census 变换的基础上融合互信息和梯度信息的相似性测度算法。Census 匹配算法属于非参数区域算法的一种,该算法没有直接使用灰度信息而是对邻域灰度值进行比较,因此不易受到外界光照等环境变化的影响。该变换首先需要选取一个像素点并以其为中心建立一个矩形窗口,将窗口内除中心像素点外的其他像素点灰度值变为一个比特串。具体过程为:将每个邻域像素点的灰度值与中心像素点的灰度值进行比较,若该值小于中心像素点的灰度值,将其记为 1,否则记为 0。Census 变换的公式如下所示:

$$B_T(p) = \bigotimes_{q \in N_p} \xi(I(p), I(q)) \quad (1)$$

$$\xi(I(p), I(q)) = \begin{cases} 1, I(p) \geq I(q) \\ 0, I(p) < I(q) \end{cases} \quad (2)$$

其中, p 为中心像素点, q 为窗口内其余像素点, N_p 为以 p 为中心的矩形窗口, $B_T(p)$ 表示经 census 变换后得到的比特串, \bigotimes 表示将各位按位连接, $I(p)$ 表示中心像素点灰度值, $I(q)$ 表示窗口内除中心像素点外其余像素点灰度值。对于经过 census 变换后得到的比特串, Hamming 距离越小,两者匹配度越高。

Census 变换受中心像素点影响较大,极易受到噪声的影响,基于均值的 census 变换把窗口内像素点灰度值的平均值作为参考值,在一定程度上能够缓解干扰噪声对匹配精度的影响。另有学者

局部匹配的准确率已经逼近全局匹配,但它仍然面临着两个难点:匹配代价和聚合窗口的选取

描述了基于灰度、梯度和 census 相似性测度的优缺点。引述了一种结合两者测度的方法。

窗口过大或者过小带来的问题

可移动窗口、多窗口、可变窗口较固定窗口提高了表现,但仍受窗口大小及形状的影响

介绍 ASW 算法

自适应权重 AD-census 法准确率高,但窗口越大,运行时间越长

介绍引导滤波算法的优缺点

针对前面描述的内容在代价函数和代价聚合方面提出两个改进,而额外在视差选择阶段提出改进方案

描述 Census 算法的操作过程(从公式层面)

指出传统 Census 算法的缺点,自然引出改进 Census 算法

提出将窗口灰度中值作为参考值,但当窗口区域受光照影响较大时,简单地选取灰度中值作为参考值也并不准确。因此,本文提出将窗口内像素点灰度值按大小排序后,选取中间 3 值的平均值作为参考值,这样在一定程度上能够缓解灰度中值出现在较亮或较暗区域带来的影响。改进的 census 变换公式如下所示:

$$B_{CT}(p) = \bigotimes_{q \in N_p} \xi(I'(p), I(q)) \quad (3)$$

$$\xi(I'(p), I(q)) = \begin{cases} 1, I'(p) \geq I(q) \\ 0, I'(p) < I(q) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $B_{CT}(p)$ 是改进后得到的比特串, $I'(p)$ 是像素参考值,即上文提到的中间 3 值的平均值,其余符号含义同式(1)和式(2)。当视差为 d 时,两个比特串的 Hamming 距离计算公式为:

$$H_H(p, d) = \text{Hamming}(C_{CTL}(p), C_{CTR}(p, d)) \quad (5)$$

其中, C_{CTL} 、 C_{CTR} 分别是左、右图像经 census 变换后的图像。归一化后的相似性测度为:

$$C_{CT}(p, d) = 1 - \exp(-\lambda_C H_H(p, d)) \quad (6)$$

其中, λ_C 为归一化常数。

2.2 互信息

互信息 MI(Mutual Information)由 Shannon 提出,Viola 和 Wells^[13]将其引入到计算机视觉中。互信息能够反映出 2 个随机变量集的相关性,进而可得到左、右图像互为匹配的窗口。将左、右图像对应窗口的灰度直方图分别表示为 h_L 与 h_R ,并用 h 表示联合直方图,则有:

$$h = \begin{bmatrix} h(0,0) & h(0,1) & \cdots & h(0,n-1) \\ h(1,0) & h(1,1) & \cdots & h(1,n-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h(m-1,0) & h(m-1,1) & \cdots & h(m-1,n-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, m 、 n 分别是左、右图像的最大灰度值。

根据联合熵,可将 MI 表示为:

$$MI = H(R) + H(T) - H(R, T) \quad (8)$$

其中, $h_L(r)$ 和 $h_R(t)$ 分别为左图中灰度值为 r ,右图中灰度值为 t 的像素点个数, $H(R)$ 和 $H(T)$ 分别为 $h_L(r)$ 和 $h_R(t)$ 的熵, $H(R, T)$ 为联合熵,根据熵和概率论的知识,可得基于互信息的相似性测度公式为:

$$C_{MI}(p, d) = \frac{1}{M} \sum (h(r, t) \log \frac{M h(r, t)}{h_L(r) h_R(t)}) \quad (9)$$

其中, $M = m * n$ 表示联合直方图元素总和, $h(r, t)$

为 h 中灰度值为 r 或 t 的像素点个数。

2.3 梯度信息

简单描述梯度信息

梯度信息能够有效地利用纹理信息,突出图像的边缘。基于梯度的相似性测度公式为:

$$C_G(p, d) = |\nabla I_L(p) - \nabla I_R(p, d)| \quad (10)$$

其中, ∇I_L 、 ∇I_R 分别是左、右图像的梯度图像。

2.4 3 种测度融合的匹配代价

前文分别对改进的 census 变换、互信息以及梯度信息这 3 种测度进行了介绍。由于 census 变换测度与梯度测度采用的是最小者最优的聚合策略,而互信息测度采用的是最大者最优的聚合策略,故而综合这 3 种测度得到的最终匹配代价计算公式如下所示:

$$C(p, d) = \gamma_1 C_{CT}(p, d) + \gamma_2 C_G(p, d) - \gamma_3 C_{MI}(p, d) \quad (11)$$

其中, γ_1 、 γ_2 、 γ_3 分别为改进 census 度量、梯度信息及互信息的权重值,且 $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1$ 。通过分析得到, γ_1 在 $[0.001, 0.002]$ 内时,算法对 γ_1 不敏感; γ_2 在 $[0.6, 0.8]$ 内时,算法对 γ_2 不敏感,在深度不连续区域及弱纹理区域均能得到较高的匹配准确率。在各自的取值区间内,分别以步长 0.000 1 及 0.01 选取 γ_1 和 γ_2 的值,最终得到 γ_1 为 0.001 5, γ_2 为 0.7。

3 代价聚合

描述3中测度融合的匹配代价

计算完输入图像的初始匹配代价后,需要对其在匹配窗口内进行代价聚合。聚合的过程可以理解为滤波,用于滤除计算匹配代价时引入的噪声。在众多的聚合策略中,引导滤波以其优越的性能受到了更多学者的关注^[14]。引导滤波过程如下所示:设 I 为引导图像,通常取左图像为引导图像, Y 为待滤波图像,即上述构造的匹配代价 $C(p, d)$, U 为滤波后图像,并假设在以各个像素为中心的窗口 ω_k 内, U 由 I 线性转换得到:

$$U_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (12)$$

其中, k 为窗口内的中心像素点, U_i 和 I_i 分别为窗口内不同像素点在滤波后和引导图像中的对应点, ω_k 为矩形窗口, a_k 和 b_k 为线性系数。 a_k 和 b_k 通过最小化式(13)得到:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} [(a_k I_i + b_k - r_i)^2 + \epsilon a_k^2] \quad (13)$$

其中, ϵ 为规整化参数,通常 $\epsilon > 0$,且其取值越大,

描述改进的Census算法
(从公式层面)

从操作公式层面详细描述互信息

介绍引导滤波算法

滤波后得到的图像越平滑；取值越小，滤波后图像边缘性越好。

传统的引导滤波算法没有考虑不同窗口像素纹理的差异性，因此本文将自适应权重的思想引入到引导滤波中，并提出如下的改进策略。

在窗口 ω_k 内，为使 ϵ 能够根据像素纹理自适应地改变，将引入梯度信息并以此来定义权重因子。定义公式如下所示：

$$\Gamma_I = \frac{A |\nabla_I|}{\sum_{j=1}^N |\nabla_j|} \quad (14)$$

其中， Γ_I 为权重因子， ∇_I 为对引导图像求梯度图像后得到的幅值响应， N 为图像像素数， A 为调整参数，为固定值。由上，得到 $\epsilon' = \epsilon / \Gamma_I$ ，用 ϵ' 代替式 (13) 中的 ϵ 即可。

在对匹配代价进行聚合之后，使用 WTA 算法得到初始视差图。WTA 策略即对于每个像素点选择最小的聚合代价所对应的视差值作为该点的视差值。由于 WTA 策略的选择歧义性，得到的部分初始视差并不等于该像素点的真实视差，因此需要对初始视差图进行视差修正。

4 视差修正

介绍WTA，指出其问题，为下文介绍视差修正做铺垫

如前文所述，应用 WTA 算法可以得到初始视差图，WTA 算法只是简单地选取最小匹配代价对应的视差值，为使视差图更加准确，本文采用如下的可靠性判断依据^[15]：

$$C_{d1} = C_{i,2} - C_{i,1} \quad (15)$$

$$C_{d2} = \frac{C_{i,2}}{C_{i,1}} \quad (16)$$

对于任意像素点 i ， $C_{i,1}$ 表示最小匹配代价， $C_{i,2}$ 表示次最小匹配代价，可知 C_{d1} 和 C_{d2} 值越大，所得到的视差值越可靠。本文给定阈值 C_{th1} 和 C_{th2} ，当 $C_{d1} > C_{th1}$ 且 $C_{d2} > C_{th2}$ 时，认为得到的视差值较为可靠，反之，得到的视差值不可靠，需经后续步骤处理。

对于视差值不可靠像素，以该像素点为中心构建一个矩形窗口，本文中构建窗口大小为 5×5 。在该窗口内，搜索与中心像素点 i 距离最近且颜色最相似的像素点 i' ，并把 i' 的视差值作为更新后 i 的视差值，直至将全部视差不可靠像素点处理完毕。

针对立体匹配中的遮挡问题，本文采用左右一致性检测 LRC (Left-Right Consistency) 来校正遮挡点处的视差值。LRC 算法分别计算左图像到右图像的视差图和右图像到左图像的视差图，然后检

描述视差修正的步骤

验 2 图中对应点的视差值是否一致，对于视差值不一致的点，通常选取其左侧第 1 个非遮挡点的视差值和右侧第 1 个非遮挡点的视差值中较小的值作为更新后该点视差值，具体为：

$$D(P) = \min(D(P_L), D(P_R)) \quad (17)$$

其中， P 为视差值不一致的像素点， $D(P_L)$ 为左侧第 1 个非遮挡点的视差值， $D(P_R)$ 为右侧第 1 个非遮挡点的视差值。经过上述处理后便可得到更加准确的视差图。

综上，本文算法流程图如图 1 所示。

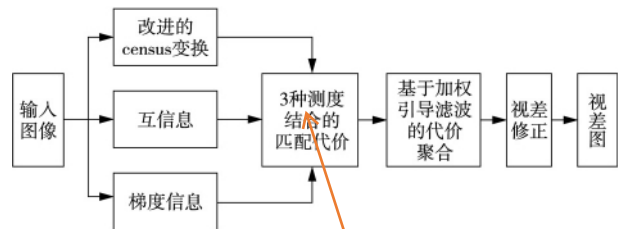


Figure 1 Flow chart of the proposed algorithm

图 1 本文算法流程图

5 实验结果及分析

用流程图总结整个算法

本节在 VS2015 上对所提出的算法编程来验证算法的性能。实验在配置为 Intel Core i3-2130 CPU, 2 GB 内存的计算机上完成。实验中所用到的标准立体图像对 Tsukuba, Venus, Teddy, Cones 由学术界公认的 Middlebury 测试平台提供，这 4 组图像的视差搜索范围依次为 $[0, 15]$, $[0, 19]$, $[0, 59]$, $[0, 59]$ ，参数设置如下： λ_c 为 0.35， A 为 0.01， C_{th1} 为 0.000 1， C_{th2} 为 1.05， γ_1 为 0.001 5， γ_2 为 0.7， γ_3 为 0.298 5，以上数据都是经过实验分析得到的。

5.1 算法有效性分析

在验证算法性能前，本文设置了如下 3 组对比实验：实验 1 采用改进的 census 变换计算匹配代价，并用加权引导滤波进行代价聚合，用 WTA 算法选取视差；实验 2 采用 3 种测度融合策略计算匹配代价，并用加权引导滤波进行代价聚合，用 WTA 算法选取视差；实验 3 采用 3 种测度融合策略计算匹配代价，并用加权引导滤波进行代价聚合，结合 WTA 算法和可靠性判断选取视差。实验结果如表 1 所示，其中“non”表示图像对中非遮挡区域匹配错误率，“all”表示图像对中全部区域匹配错误率，“disc”表示图像对中深度不连续区域匹配错误率，“Average error”表示 4 组图像对全部区域匹配错误率的平均值。

Table 1 Results of comparison experiment

表 1 实验比较结果

%

实验	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			Average error
	non	all	disc	non	all	disc	non	all	disc	non	all	disc	
1	2.48	3.25	7.56	1.94	2.83	10.8	7.47	15.7	16.8	3.23	9.76	10.4	7.89
2	2.01	2.63	7.18	1.44	2.34	9.71	6.92	14.6	15.9	2.79	9.16	9.80	7.18
3	1.59	2.16	6.78	1.01	1.92	9.10	6.19	12.9	14.6	2.10	8.46	8.77	6.36

5.2 结果与分析

图 2 为在标准立体图像对上应用本文所提算法得到的结果,从左到右依次为标准图像对的左图、标准图像对的真实视差图以及利用本文算法得到的视差图。综合 4 组图像对可知,本文所提算法在深度不连续区域及弱纹理区域均能得到较好的匹配结果,在遮挡处也有着较高的匹配准确率,相比于另外 3 组图像对,由于 Teddy 图像对存在大量的视差变化区域,因此在该图像对上应用算法得到的匹配准确率有所下降。

表 2 为本文所提出算法与其它局部立体匹配算法进行比较所得到的结果,表中数据均来自 Middlebury 网站。其中, Cost Filter 为 Hosni 等人提出的匹配算法, Avercensus 为基于均值的 census 变换, FB 算法由 Mattoccia 等人提出, EBP 算法由 Stefano 等人提出。

6 结束语

本文在现有局部立体匹配算法的基础上,提出了一种将改进 census 变换、互信息、梯度信息相结合的相似性测度来计算匹配代价,并在此基础上采用加权引导滤波进行代价聚合,为使得到的视差图更加准确,结合可靠性判据及视差修正方法来处理初始视差图。对标准立体图像的测试结果表明,本文所提算法有着较低的匹配错误率,在深度不连续区域能够得到更好的匹配结果,最终得到的视差图精度更高。

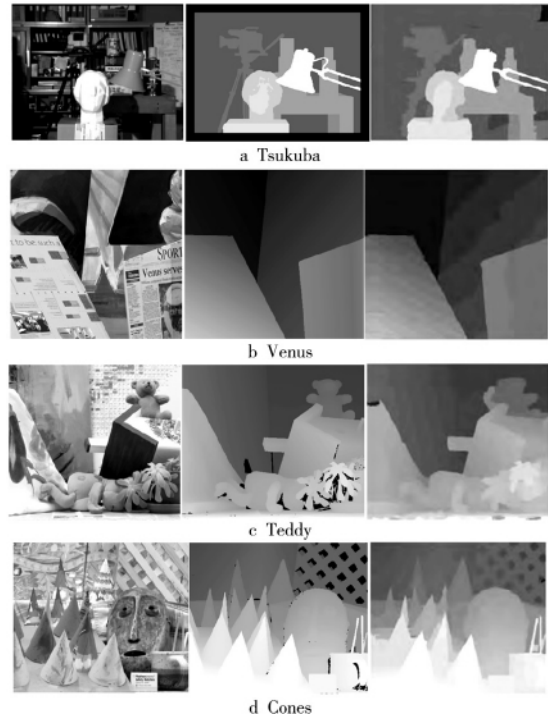


Figure 2 Experimental results of the proposed algorithm

图 2 本文算法实验结果

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] 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, 114(11): 1180-1202.
- [3] Scharstein D. Matching images by comparing their gradient

Table 2 Results of comparing the proposed algorithm with other matching algorithms

表 2 所提算法与其它匹配算法结果对比

%

算法	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			Average error
	non	all	disc	non	all	disc	non	all	disc	non	all	disc	
自适应权重	1.36	1.82	6.92	0.70	1.19	6.11	7.86	13.6	18.4	3.96	9.79	8.24	6.53
Cost Filter	1.49	1.85	7.63	0.21	0.39	2.40	6.14	11.8	16.1	2.70	8.24	7.64	5.57
Avercensus	5.06	6.25	19.0	15.6	2.42	14.4	7.93	13.8	20.5	4.12	9.54	12.0	8.00
FB	2.36	2.79	10.5	0.34	0.93	4.47	9.83	15.3	20.2	3.10	9.31	8.59	7.08
EBP	0.92	1.74	5.03	0.34	0.86	4.34	8.10	13.3	18.3	5.10	11.1	10.8	6.75
本文算法	1.28	1.58	6.69	0.18	0.39	1.94	5.70	11.6	14.7	2.42	7.60	6.86	5.29

- fields [C]//Proc of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition, 1994: 572-575.
- [4] Irijanti E, Nayan M Y, Yusoff M Z. Fast stereo correspondent using small-color census transforms [C]//Proc of the 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems, 2012: 685-690.
- [5] Zabin R, Woodfill J. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence [C]//Proc of the 3rd European Conference on Computer Vision, 1994: 151-158.
- [6] Chang Y C, Tsai T H, Hsu B H, et al. Algorithm and architecture of disparity estimation with mini-census adaptive support weight [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2010, 20(6): 792-805.
- [7] Zou Jin-gui, Wan Ying, Meng Li-yuan. A new stereo matching algorithm based on adaptive weight SAD algorithm and Census algorithm [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018, 0(11): 11-15. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] Wang Yun-feng, Wu Wei, Yu Xiao-liang, et al. A stereo matching system with the adaptive weight AD-Census [J]. Advanced Engineering Science, 2018, 50(4): 153-160. (in Chinese)
- [10] He Kai-ming, Sun Jian, Tang Xiao-ou. Guide image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [11] Li Jin-feng, Bian Ji-long. A stereo matching method based on iterative guided filter [J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(9): 178-182. (in Chinese)
- [12] Yan Li, Wang Rui, Liu Hua, et al. Stereo matching method based on improved cost computation and adaptive guided filter [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1115007. (in Chinese)
- [13] Viola P A, Wells W M. Alignment by maximization of mutual information [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 24(2): 137-154.
- [14] Wang Jian-bo, Yang Hang, Wu Xiao-tian. Segmentation based improved guided filter [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(5): 380-386. (in Chinese)
- [15] Hirschmuller, 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.

附中文参考文献:

- [7] 邹进贵, 万炎, 孟丽媛. 一种基于自适应权重 SAD 与 Census 融合的匹配算法 [J]. 测绘通报, 2018, 0(11): 11-15.
- [9] 王云峰, 吴伟, 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.
- [11] 李金凤, 边继龙. 基于迭代引导滤波的立体匹配方法 [J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(9): 178-182.
- [12] 闫利, 王芮, 刘华, 等. 基于改进代价计算和自适应引导滤波的立体匹配 [J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1115007.
- [14] 王健博, 杨航, 吴笑天. 结合图像分割的改进引导滤波 [J]. 液晶与显示, 2017, 32(5): 380-386.

作者简介:



郭鑫(1993 -), 男, 辽宁大石桥人, 硕士生, 研究方向为数字图像处理。E-mail: nameguoxin@163.com

GUO Xin, born in 1993, MS candidate, his research interest includes digital image processing.



王延杰(1963 -), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为数字图像处理。E-mail: wangyj@ciomp.ac.cn

WANG Yan-jie, born in 1963, PhD, research fellow, PhD supervisor, his research interest includes digital image processing.



付东辉(1991 -), 男, 吉林白城人, 博士生, 研究方向为数字图像处理。E-mail: 781611866@qq.com

FU Dong-hui, born in 1991, PhD candidate, his research interest includes digital image processing.



樊博(1987 -), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士生, 研究实习员, 研究方向为数字图像处理。E-mail: namefanbo@163.com

FAN Bo, born in 1987, PhD candidate, research assistant, his research interest includes digital image processing.