

## 基于融合代价和自适应惩罚项系数的立体匹配

邱建滨, 郑茜颖\*, 俞金玲

福州大学微纳器件与太阳能电池研究所, 福建 福州 350108

**摘要** 针对半全局立体匹配算法在视差不连续区域精度较低的问题, 提出一种基于融合代价和自适应惩罚项系数的半全局立体匹配算法。在代价计算部分, 提出一种融合代价计算方法, 引入输入图像  $y$  方向的梯度, 通过融合公式与输入图像  $x$  方向的梯度、绝对差以及 Census 变换结合形成代价计算数据项; 在代价聚合部分, 提出一种像素点分类机制, 通过颜色和梯度双阈值将每个像素点分类, 自适应地调整其惩罚项系数的大小; 最后通过多步骤视差优化方法对初始视差图进行处理。实验结果表明, 提出算法在视差不连续区域的平均误差降低 1.1 个百分点~12.8 个百分点, 在非遮挡和全部区域同样有一定的降低, 该算法具有较高的匹配精度和鲁棒性。

**关键词** 机器视觉; 半全局立体匹配; 融合代价; 像素点分类机制; 自适应系数; 引导图滤波

中图分类号 TP301.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1615008

## Stereo Matching Based on Fusion Cost and Adaptive Penalty Coefficient

Qiu Jianbin, Zheng Qianying\*, Yu Jinling

Institute of Micro-Nano Devices and Solar Cells, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China

**Abstract** A semiglobal stereo matching algorithm based on fusion cost and adaptive penalty coefficient is proposed to address the low-accuracy problem of semi-global stereo matching algorithms in discontinuous disparity regions. In the cost calculation part, a fusion cost calculation method is proposed introducing the gradient in the  $y$  direction of the input image and combining the fusion formula with the gradient in the  $x$  direction of the input image, absolute difference, and Census transform to form the cost calculation data item; in the cost aggregation part, a pixel classification mechanism is proposed that classifies each pixel by color and gradient dual thresholds and adaptively adjusts the size of its penalty coefficients; finally, the initial parallax map is processed using a multistep parallax optimization method. Results show that the average error of the proposed algorithm in the discontinuous parallax regions decreases by 1.1 percentage points to 12.8 percentage points, and it also decreases in non-occlusion and all regions. The proposed algorithm exhibits high matching accuracy and robustness.

**Key words** machine vision; semi-global stereo matching; cost fusion; pixel point classification mechanism; adaptive factor; guide filter

## 1 引言

从图像中提取视差图对于计算机视觉应用非常重要, 如自动驾驶、虚拟现实、三维重建以及同步定位与建图等领域<sup>[1]</sup>。立体匹配算法是通过一组对应的、校准好的左右图像计算得到目标像素点视差, 还可以获取其深度信息, 从而完成场景的三维重建。立体匹配过程分为 4 部分<sup>[2]</sup>: 匹配代价计算部分、匹配代价聚合部分、视差计算部分和视差优化处理部分。

一般情况下, 立体匹配算法被分为 3 大类: 基于深

度学习的立体匹配算法<sup>[3-4]</sup>、全局立体匹配算法<sup>[5]</sup>和局部立体匹配算法。局部立体匹配相比于其他两种算法, 计算速度更快, 更能适合实际应用。Hirschmuller<sup>[6]</sup>提出了一种半全局匹配(SGM)算法, 其综合了全局立体匹配算法的精度和局部立体匹配算法的快速性, 并且运用一维多路径方式近似解决二维动态规划问题, 降低了算法复杂度, 提高了运行速度和鲁棒性。萧红等<sup>[7]</sup>和刘振友等<sup>[8]</sup>针对代价计算方式进行改进, 采用  $x$  方向梯度、绝对差代价(AD)以及 Census 代价形成融合代价函数, 在一定程度上能降低噪声的影

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2021-08-10; 录用日期: 2021-08-19

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

通信作者: zhengqy@vip.sina.com

响。改进代价聚合方式被认为有助于提高匹配精度。鲁光明等<sup>[9]</sup>在 SGM 算法的基础上提出加入图像分割改进代价聚合部分,有效地降低在弱纹理图像和图像遮挡区域的错误率。孙丽等<sup>[10]</sup>提出了分段代价聚合算法,通过计算边缘视差信息,约束代价聚合初始值,虽然误差有一定降低,但某些区域的匹配精度还有待提高。

针对 SGM 算法在视差不连续区域精度较低的问题,本文提出一种基于融合代价和自适应惩罚项系数的半全局立体匹配算法。在代价计算部分,提出一种融合代价计算方法,引入图像  $y$  方向梯度信息,并通过指数函数与图像  $x$  方向梯度信息、AD 以及 Census 变换结合形成融合代价数据项;在代价聚合部分,提出像素点分类机制(PCM)来克服固定惩罚项系数的缺点,

其根据某像素点的颜色和梯度信息将该像素点分区,自适应地调整惩罚项系数的大小;最后通过多步骤视差优化方法<sup>[11-13]</sup>进行优化。

## 2 算法描述

所提的改进立体匹配算法主要包含以下步骤:计算左右图像  $x$ 、 $y$  两方向的梯度差值信息,并且应用融合代价计算公式将 AD 和 Census 变换与其结合,形成融合代价计算数据项;使用输入图像的颜色阈值(Color-T)和梯度阈值(Grad-T),建立 PCM,自适应地调整惩罚项系数大小;使用赢家通吃<sup>[2]</sup>(WTA)策略选择最佳视差值;使用多步骤视差后处理流程对视差图进行优化,得到最终结果。算法流程如图 1 所示。

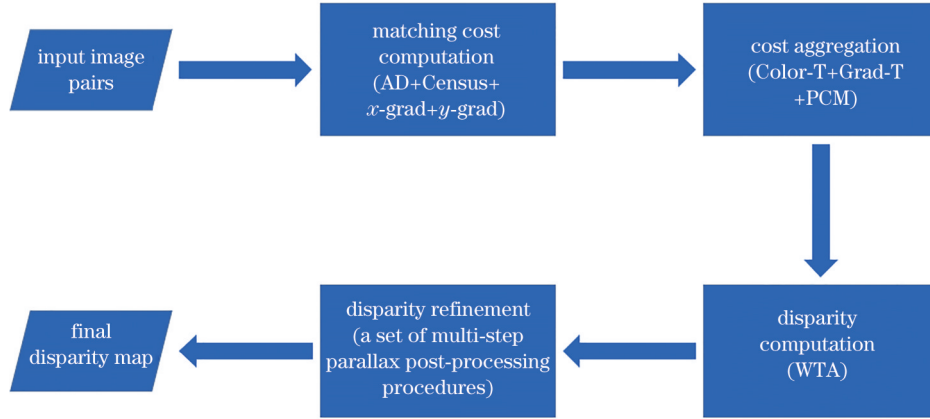


图 1 提出的立体匹配算法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed stereo matching algorithm

### 2.1 融合代价计算

双目图像的梯度数据中包含大量有价值的信息,所以在立体匹配算法中被大量应用<sup>[14-15]</sup>。通常梯度算法使用  $x$  方向梯度数据而忽略  $y$  方向的梯度数据,这将导致某些像素点的代价计算出现错误。故在代价计算中采用同时输入图像  $x$  方向和  $y$  方向的梯度的方法,保证充分利用像素点的局部信息。计算图像  $x$  方向和  $y$  方向的梯度表达式分别为

$$C_{gx}(p, d) = |\nabla g_x^{\text{L}}(p) - \nabla g_x^{\text{R}}(p_d)|, \quad (1)$$

$$C_{gy}(p, d) = |\nabla g_y^{\text{L}}(p) - \nabla g_y^{\text{R}}(p_d)|, \quad (2)$$

式中:上标 L 和 R 分别指双目图像的左图和右图; $\nabla g_x$  表示当前像素点在  $x$  方向上的灰度值导数; $\nabla g_y$  表示当前像素点在  $y$  方向上的灰度值导数; $C_{gx}(p, d)$  和  $C_{gy}(p, d)$  分别表示左图中某点  $p = (x, y)$  和右图中在视差值  $d$  下的某点  $p_d = (x - d, y)$  之间的  $x$  方向上和  $y$  方向上的梯度代价值。

AD 代价值  $C_{\text{AD}}$  是利用输入图像的红绿蓝(RGB) 3 通道的颜色信息进行计算,其表达式为

$$C_{\text{AD}}(p, d) = \frac{1}{3} \sum_{i=R, G, B} |I_i^{\text{L}}(p) - I_i^{\text{R}}(p_d)|, \quad (3)$$

式中: $C_{\text{AD}}(p, d)$  代表左图上的点  $p = (x, y)$  在视差为  $d$  时的 AD 代价值; $I_i^{\text{L}}(p)$  代表左图第  $i$  个通道上的点  $p = (x, y)$ ;  $I_i^{\text{R}}(p_d)$  代表右图第  $i$  个通道上在视差为  $d$  时的点  $p_d = (x - d, y)$ 。

为了增强 Census 变换的鲁棒性,降低对中心像素点的依赖,采用  $5 \times 5$  窗口内均值  $\bar{p}$  代替中心像素点作为对比的阈值,其表达式为

$$C_{\text{census}}(p, d) = \text{Cen}(p, \bar{p}) \oplus \text{Cen}(p_d, \bar{p}_d), \quad (4)$$

式中,  $\text{Cen}(p, \bar{p})$  和  $\text{Cen}(p_d, \bar{p}_d)$  分别代表左图某点  $p = (x, y)$  的 Census 变换二进制编码和右图中在视差为  $d$  时的点  $p_d = (x - d, y)$  的 Census 变换二进制编码。

将上述 4 项代价数据项进行加权指数融合,得到最终的代价计算函数:

$$C(p, d) = 4 - \exp\left[\frac{C_{\text{AD}}(p, d)}{\lambda_{\text{AD}}}\right] - \exp\left[\frac{C_{\text{census}}(p, d)_{\bar{p}}}{\lambda_{\text{census}}}\right] - \exp\left[\frac{C_{gx}(p, d)}{\lambda_{gx}}\right] - \exp\left[\frac{C_{gy}(p, d)}{\lambda_{gy}}\right], \quad (5)$$

式中: $\lambda_{\text{AD}}$ 、 $\lambda_{\text{census}}$ 、 $\lambda_{gx}$ 、 $\lambda_{gy}$  分别为上述 4 种方法对应的常

量阈值;  $C_{AD}(p, d)$ 、 $C_{census}(p, d)$ 、 $C_{gr}(p, d)$ 、 $C_{gy}(p, d)$  分别为上述 4 种方法对应的代价值。

### 2.2 自适应代价聚合

对于给定的一张视差图  $D$ , SGM 算法定义其能量函数  $E(D)$  为

$$E(D) = \left\{ C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \right\}, \quad (6)$$

式中:  $C(p, D_p)$  表示视差图  $D$  中像素点  $p$  的匹配代价值;  $\sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1]$  和  $\sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1]$  分别表示当像素点  $p$  与其邻域像素点  $q$  视差值相差 1 时添加  $P_1$  的惩罚和视差值相差大于 1 时添加  $P_2$  的惩罚。

在视差变化不相同的区域, 施加固定的惩罚项系数是不合适的, 因此提出了 PCM。具体计算规则为: 在当前聚合路径方向上, 对每一个视差  $d (d_{\min} \leq d \leq d_{\max})$  计算当前左图像素点  $x_0$  与其相对应的右图像素点  $x_{cor}$  的梯度差值  $D_{\text{ifgrad}}$  (若聚合方向为上下聚合, 则使用双目图像在  $y$  方向的梯度进行计算; 若聚合方向为左右聚合, 则使用  $x$  方向的梯度进行计算), 同时计算当前像素点  $x_0$  与  $x_{cor}$  与各自聚合方向上上一个像素点的颜色差值  $D_{\text{ifcolor}}^{\text{L}}$  和  $D_{\text{ifcolor}}^{\text{R}}$ , 与颜色阈值和梯度阈值对比, 将像素点进行分区。根据每个像素点所处区域将其惩罚项系数乘以区域系数, 实现自动调整惩罚项系数  $P_1$  和  $P_2$  的大小。

最后, 通过多步骤的视差后处理方法对视差图进行处理, 首先使用视差唯一性检测、二次曲线插值、左右一致性检测以及移除异常连通区域对像素点进行检

测和错误分类, 将错误视差值设置为无效视差值; 然后使用基于 8 方向的视差填充对无效视差值进行填充; 最后再经过窗口大小为  $3 \times 3$  的中值滤波和以视差图本身为导向图的引导图滤波处理。

## 3 实验结果与分析

采用 Middlebury 双目立体视觉测试平台<sup>[4]</sup>上的 Cones、Teddy 和 Tsukuba3 组标准图像进行实验。实验参数设置:  $\lambda_{AD} = 5$ ,  $\lambda_{census} = 3$ ,  $\lambda_{gr} = 1$ ,  $\lambda_{gy} = 1$ , Color-T 为 32, Grad-T 为 3.9,  $P_{1, \text{init}} = 5.1$ ,  $P_{2, \text{init}} = 11$ , 此外, SGM 代价聚合路径数为 4。

### 3.1 融合代价计算验证

为验证所提融合代价计算方法的有效性和鲁棒性, 将所提融合代价计算方法与另外两种融合方法进行对比分析: 第一种融合代价计算方法为 AD 和 Census 变换融合形成代价函数 (简称 F2); 第二种融合代价计算方法为 AD、Census 变换和  $x$  方向梯度三者融合形成代价函数 (简称 F3); 第三种融合方法均使用相同的参数权重进行融合以及使用相同的代价聚合方法, 但是不进行任何视差优化处理。3 种方法得到的 Teddy 图像的视差图如图 2 所示。

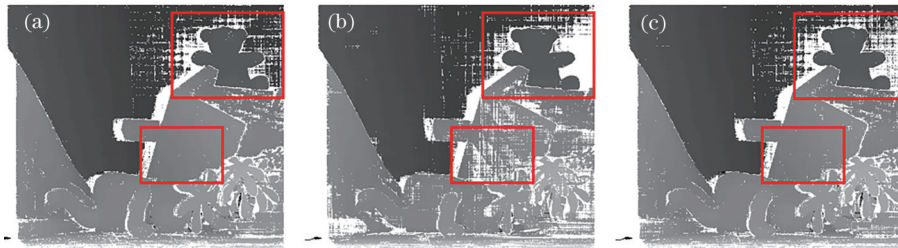


图 2 3 种融合方法的视差图。(a) 所提代价计算方法; (b) F2; (c) F3

Fig. 2 Disparity maps based on three fusion methods. (a) Proposed cost calculation method; (b) F2; (c) F3

从图 2 中可以看出, 在经过所提融合代价计算方法得到的视差图中错误匹配更少 (方框部分), 视差不连续区域以及非遮挡区域的效果较其他两种方法有一定的提升。为了更进一步地对算法优劣, 使用上述方式分别计算 Cones、Teddy 和 Tsukuba 对应的视差图, 得到 3 幅图像的所有区域平均误差 (Avg\_all)、非遮挡区域平均误差 (Avg\_nocc) 以及不连续区平均误差 (Avg\_disc), 如图 3 所示。从图 3 的结果中可以看出, 所提融合代价计算方法相较于其他两种融合算法, 在评价视差图质量的 Avg\_all、Avg\_nocc 以及 Avg\_disc 这三项指标上均取得最小误差, 整体匹配精度好。

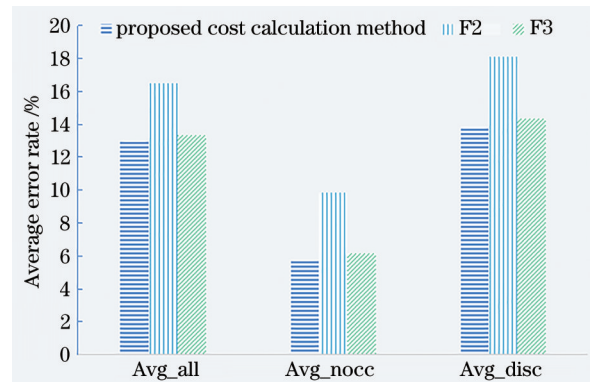


图 3 3 种区域的平均误差率

Fig. 3 Average error rates of three regions

### 3.2 自适应代价聚合验证

为验证所提自适应代价聚合方法的性能好坏,将该方法与另外两种代价聚合方法进行对比:第一种代价聚合方法为SGM代价聚合<sup>[6]</sup>(简称A2);第二种代价聚合方法为扫描线优化<sup>[16]</sup>(简称A3)。它们使用相同的融合代价计算方法、相同的聚合路径数,A2中系数 $P_1$ 和 $P_2$ 分别设置为20和100,A3中则分别设置为15和40,且均不进行视差优化后处理,得到Cones图像的视差图,如图4所示。

在图4结果中可以看出,由所提代价聚合方法

得到的视差图在视差不连续区域和非遮挡区域上精度更高,且整体图像的边缘还原得更加明显(方框部分),视差图效果较A2、A3方法更优。为了更加直观地体现所提算法与其余两种算法的差异,同样计算得到Cones、Teddy和Tsukuba这3幅图像的Avg\_all、Avg\_nocc以及Avg\_disc 3项指标,结果如图5所示。在图5的结果中,所提代价聚合算法在3项指标上均取得最低的平均误差率,特别是在非遮挡区域和视差不连续区域,误差降低幅度明显,匹配精度更好。

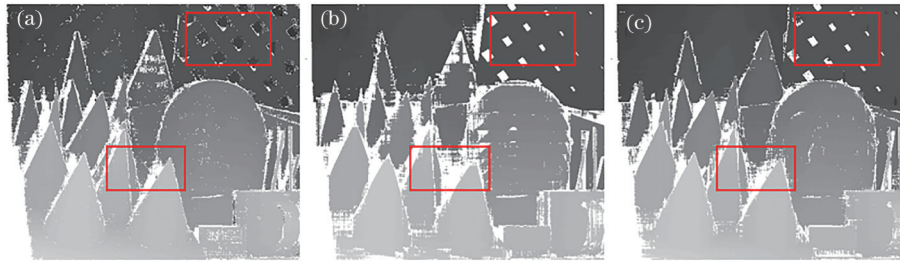


图4 3种聚合方法的视差图。(a) 所提代价聚合方法;(b) A2;(c) A3

Fig. 4 Disparity maps based on three aggregation methods. (a) Proposed cost aggregation method; (b) A2; (c) A3

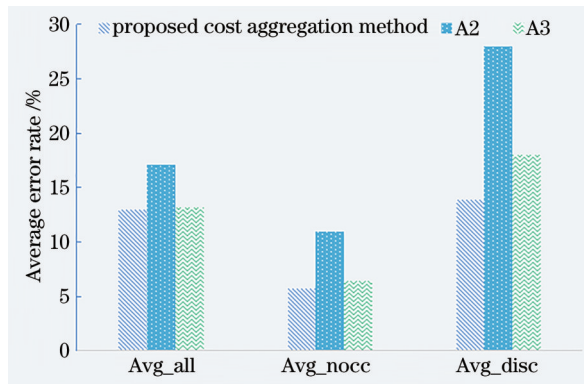


图5 3种区域的聚合平均误差率

Fig. 5 Aggregation average error rates of three regions

### 3.3 算法对比分析

为了更好地证明所提立体匹配算法的综合性能,选择其他立体匹配算法进行对比实验,包括NonLocalFilter<sup>[5]</sup>、FSCensus<sup>[8]</sup>、TextureCT<sup>[17]</sup>、SPFilter<sup>[18]</sup>、AdaptAggrDP<sup>[19]</sup>、LCVB-DEM<sup>[20]</sup>,实验得到的视差图像如图6所示。从图中可以看出,所提算法在视差不连续区域精度更高,物体边缘保持较好,比如在Cones图像的木板部分。

为了进一步的定量比较,将上述8种立体匹配算法的Avg\_all、Avg\_nocc和Avg\_disc进行汇总分析,结果如表1~3所示,其中黑体字表示每列的最低值。由表中数据可知,在所有区域,所提算法在色彩复杂、光照较高的图像Cones以及Teddy上取得较低的平均误差,而在色彩较为单一、亮度不高的图像Tsukuba上误差较大,说明所提算法针对色彩对比大、亮度高的图像具有较好的效果,鲁棒性较高;在非遮挡区域和视差不

表1 全部区域的Avg\_all对比  
Table 1 Avg\_all comparison of all regions unit: %

	Cones	Teddy	Tsukuba	Average
FSCensus	7.99	11.29	2.49	7.26
NonLocalFilter	8.45	11.60	<b>1.85</b>	7.30
AdaptAggrDP	13.20	14.30	3.50	10.33
SPFilter	13.77	11.44	5.40	10.20
LCVB-DEM	13.60	16.30	5.23	11.71
TextureCT	10.33	11.72	2.72	8.26
Proposed method	<b>7.93</b>	<b>10.89</b>	2.70	<b>7.17</b>

表2 非遮挡区域的Avg\_nocc对比  
Table 2 Avg\_nocc comparison of non-occluded regions unit: %

	Cones	Teddy	Tsukuba	Average
FSCensus	2.66	6.01	2.13	3.60
NonLocalFilter	2.87	6.01	1.47	3.45
AdaptAggrDP	5.53	6.79	1.57	4.63
SPFilter	6.15	6.27	4.57	5.66
LCVB-DEM	6.56	9.99	4.49	7.01
TextureCT	5.87	6.35	4.54	5.59
Proposed method	<b>2.36</b>	<b>4.86</b>	<b>1.43</b>	<b>2.88</b>

表3 视差不连续区域的Avg\_disc对比  
Table 3 Avg\_disc comparison of parallax discontinuous regions unit: %

	Cones	Teddy	Tsukuba	Average
FSCensus	7.78	15.98	9.22	10.99
NonLocalFilter	8.10	14.30	7.88	10.09
AdaptAggrDP	14.80	16.20	8.27	13.09
SPFilter	17.30	18.81	16.60	17.57
LCVB-DEM	18.20	26.10	21.30	21.87
TextureCT	8.32	17.16	10.11	11.86
Proposed method	<b>7.00</b>	<b>12.76</b>	<b>7.41</b>	<b>9.05</b>

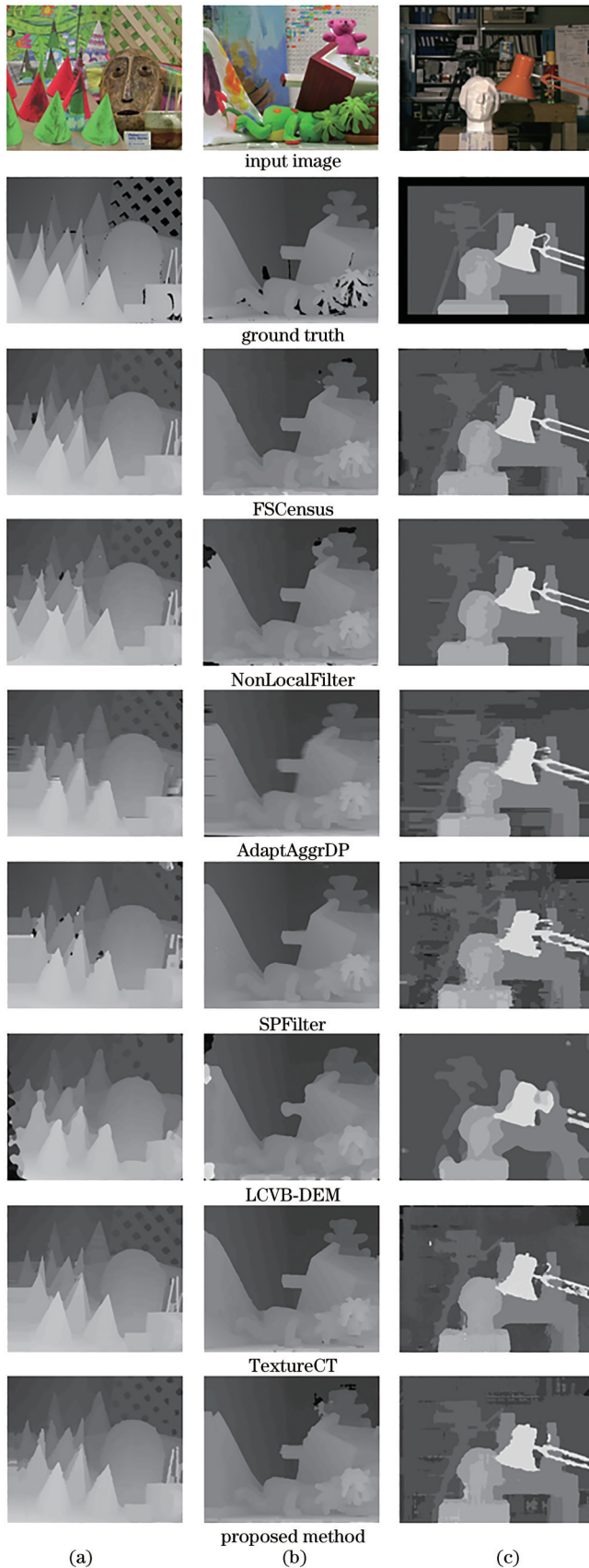


图 6 多步骤优化结果。(a) Cones; (b) Teddy; (c) Tsukuba  
Fig. 6 Multi-step optimization results. (a) Cones; (b) Teddy;  
(c) Tsukuba

连续区域,所提算法在 3 组图像上均取得非常低的平均误差,其中 Avg\_disc 比其他算法降低 1.1 个百分

点~12.8 个百分点,说明所提算法能够有效提高视差不连续区域的匹配精度,较好地保留物体边缘。

## 4 结 论

针对 SGM 算法在视差不连续区域精度不高、惩罚项系数固定导致边缘深度估计不准确等问题,提出了一种基于融合代价和自适应惩罚项系数的立体匹配算法。首先是在代价计算部分,提出了一种融合代价计算方式,通过使用输入图像  $x$  和  $y$  两个方向上的梯度信息,可以充分利用输入图像的边缘信息,并与 AD 代价、Census 变换代价结合形成代价计算数据项,有效地提高算法匹配精度,较单一方法能够取得较好的视差图;接着在代价聚合部分,提出了 PCM,根据当前像素点  $p$  与在视差  $d$ 、当前聚合路径上的前一个像素点  $q$  的颜色差值与颜色阈值相比较,以及当前像素点  $p$  与当前聚合路径上的前一个像素点  $m$  的梯度差值与梯度阈值相比较,对像素点  $p$  进行分类,根据所处区域自适应地调整惩罚项系数的大小。该方法能够降低由固定惩罚项系数造成在视差不连续区域出现的错误率,提高算法精度;最后利用基于引导图滤波的多步骤视差后处理流程对视差图进行处理。实验结果表明,所提的改进算法对不同的图像具有较好的鲁棒性,能够在视差不连续区域和非遮挡区域取得良好的视差精度,但是在全部区域所得结果并不理想,精度提高不多,故后续研究将注重着眼于解决这一问题。

## 参 考 文 献

- [1] Dong Q C, Feng J Q. Outlier detection and disparity refinement in stereo matching[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2019, 60: 380-390.
- [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.
- [3] 王玉锋,王宏伟,刘宇,等.基于多任务学习的立体匹配算法[J].激光与光电子学进展,2021,58(4):0415010. Wang Y F, Wang H W, Liu Y, et al. Algorithm for stereo matching based on multi-task learning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0415010.
- [4] 王旭初,刘辉煌,牛彦敏.融合多尺度局部特征与深度特征的双目立体匹配[J].光学学报,2020,40(2):0215001. Wang X C, Liu H H, Niu Y M. Binocular stereo matching by combining multiscale local and deep features [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0215001.
- [5] Yang Q X. A non-local cost aggregation method for stereo matching[C]//2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1402-1409.
- [6] Hirschmuller H. Accurate and efficient stereo processing by

- semi-global matching and mutual information[C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 20-25, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 807-814.
- [7] 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.  
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.
- [8] 刘振友, 郑茜颖, 程树英. 基于改进 Census 变换的抗噪立体匹配算法[J]. 半导体光电, 2021, 42(1): 100-105.  
Liu Z Y, Zheng Q Y, Cheng S Y. Anti-noise stereo matching algorithm based on improved census transform [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(1): 100-105.
- [9] 鲁光明, 王竞雪. 结合图像分割的半全局立体匹配算法[J]. 遥感信息, 2020, 35(6): 85-91.  
Lu G M, Wang J X. Semi global stereo matching algorithm combined with image segmentation[J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(6): 85-91.
- [10] 孙丽, 孙彦玮, 李浩. 视差边缘优化的 SGM 密集深度估计算法[J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(11): 2729-2733.  
Sun L, Sun Y W, Li H. SGM-based dense depth estimation algorithm for disparity edge optimization[J]. Computer & Digital Engineering, 2020, 48(11): 2729-2733.
- [11] Stentoumis C, Grammatikopoulos L, Kalisperakis I, et al. On accurate dense stereo-matching using a local adaptive multi-cost approach[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 91: 29-49.
- [12] Ma Z Y, He K M, Wei Y C, et al. Constant time weighted Median filtering for stereo matching and beyond [C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 49-56.
- [13] Tan P, Monasse P. Stereo disparity through cost aggregation with guided filter[J]. Image Processing on Line, 2014, 4: 252-275.
- [14] 孔令寅, 朱江平, 应三丛. 基于引导图像和自适应支持域的立体匹配[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0915001.  
Kong L Y, Zhu J P, Ying S C. Stereo matching based on guidance image and adaptive support region[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0915001.
- [15] 程德强, 李海翔, 寇旗旗, 等. 融合边缘保持与改进代价聚合的立体匹配算法[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(2): 438-451.  
Cheng D Q, Li H X, Kou Q Q, et al. Stereo matching algorithm based on edge preservation and improved cost aggregation[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(2): 438-451.
- [16] Mei X, Sun X, Zhou M C, et al. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware[C]//2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2011: 467-474.
- [17] 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]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2019, 57(5): 1163-1168.
- [18] Baek E T, Ho Y S. Cost aggregation with guided image filter and superpixel for stereo matching[C]//2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), December 13-16, 2016, Jeju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2016: 16602792.
- [19] Wang L, Yang R G, Gong M L, et al. Real-time stereo using approximated joint bilateral filtering and dynamic programming[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2014, 9(3): 447-461.
- [20] Martins J A, Rodrigues J M F, du Buf H. Luminance, colour, viewpoint and border enhanced disparity energy model[J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0129908.