

文章编号:1007-2780(2018)04-0357-08

基于改进稳态匹配概率的立体匹配算法研究

张建业, 朴 燕*

(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:针对稳态匹配概率(Steady-State Matching Probability, SSMP)立体匹配算法在处理视差范围大的测试图中产生的空洞现象以及使用该算法后由于右视差图中的错误视差导致的左视差图中正确视差丢失问题,提出一种基于稳态匹配概率和半全局匹配(Semi-Global Matching, SGM)相结合的立体匹配算法。首先使用 SSMP 算法求取初始视差图。接着,使用基于爬山法颜色分割的填充准则进行填充。然后使用 SGM 算法重新获取视差图,将两幅视差图中一致的视差信息填充到经过左右一致性检测后的含有空洞的视差图中。最后,使用 SSMP 算法中的空洞填充和中值滤波得到精化后的视差图。实验结果表明,改进后的 SSMP 算法在 Middlebury 测试平台上第 2 版本的四组图像的平均匹配误差从 5.38%减少到 5.23%,第 3 版本部分测试图像的平均匹配误差从 24.7%减少到 21.5%,该算法能很好地处理上述问题,有效提高匹配精确度,且具有鲁棒性。

关 键 词: 机器视觉; 立体匹配; 匹配概率; 爬山法; SGM

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183304.0357

Stereo matching algorithm based on improved steady-state matching probability

ZHANG Jian-ye, PIAO Yan*

(College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Steady-State Matching Probability (SSMP) stereo matching algorithm will generate hole phenomenon in the test charts with large parallax. And the correct disparity will be lost in the left disparity map due to the wrong parallax in the right disparity map after using the algorithm. In order to solve these problems, a stereo matching algorithm based on the combination of SSMP and semi-global matching (SGM) is proposed. First, the initial disparity map is obtained by using the SSMP algorithm. Next, the disparity map is filled with the filling criteria based on the Hill-climbing color segmentation. Then, the disparity map is retrieved by the SGM algorithm. The consistent disparity infor-

收稿日期:2017-11-20;修订日期:2018-03-02.

基金项目:国家自然科学基金(No.60977011);国家国际科技合作专项(No.2015DFR10670);吉林省科技项目(No.20180201091GX, No.20180623039TC)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.60977011); International Science and Technology Cooperation Program of China(No.2015DFR10670); Science and Technology Project of Jilin Province(No.20180201091GX, No.20180623039TC)

* 通信联系人, E-mail: piaoyan@cust.edu.cn

mation in the two disparity maps is filled in the disparity map with holes after the left-right consistency detection. Finally, the refined disparity map is obtained by the empty filling and median filtering in the SSMP algorithm. The experimental results demonstrate that the average false matching ratio of the improved SSMP algorithm decreases from 5.38% to 5.23% on the second version and decreases from 24.7% to 21.5% on the third version of Middlebury testing benchmark. The proposed algorithm is able to deal with the above problems well, improve the matching accuracy effectively and have good robustness.

Key words: machine vision; stereo matching; matching probability; hill-climbing algorithm; SGM

1 引言

立体匹配是机器视觉领域的研究热点之一,立体匹配的目标是从不同视点图像中找到匹配的像素点,通过计算对应的像素点间的视差值,获取场景中的三维深度信息,从而重建三维场景^[1]。在机器人、无人机、虚拟现实和三维重建等领域有着广泛的应用^[2]。

立体匹配一般分为 4 个步骤:匹配代价计算、代价聚合、视差计算和视差精化 4 个步骤。立体匹配可分为三类:全局算法、局部算法和介于全局和局部之间的算法。全局算法包括图割法(GC)^[3]、动态规划(DP)^[4-6]、置信度传播(BP)^[7-8]等,全局算法精度较高,但速度慢。常见的局部算法采用局部特征^[9]作为相似性度量,通常采用固定窗口和自适应窗口内像素点的亮度或者灰度差绝对值和(AD)、平方差和(SD)、归一化互相关(NCC)以及 AD-Census^[10]联合等作为相似性度量,具有速度快,但精度低,且对于干扰特别敏感。第三类立体匹配算法介于全局和局部之间,如半全局(SGM)、非局部(Non-Local, NL)以及基于 NL 算法思想的分割树(Segment-Tree, ST)^[11]等。

Min 和 Sohn 等在 2008 年使用自适应插值等方法构造多尺度匹配代价信息,使得视差图的精确度有很大提升^[12]。2011 年 Rhemann 等使用彩色图对初始匹配代价进行引导滤波,快速进行代价聚合,使得边缘有着很好的保持^[13]。2012 年杨庆雄开创性地使用最小生成树方法进行代价聚合,有效避免了传统的局部立体匹配方法的缺陷^[14]。2014 年 Ham 等人提出了 SSMP 算法求取视差图^[15],该方法首先将匹配代价函数转换成匹配概率函数,再根据重启随机游走(Random

Walk with Restart, RWR)算法最优化匹配概率函数,从而得到精确度较高的视差图,但是该方法往往会因为遮挡等问题导致正确视差信息的丢失。本文加入爬山法利用颜色一致性^[16]进行分割,用分割后相同标签页的视差填充视差不一致的像素点,并使用 SGM 算法中代价聚合的方法重新求得的视差与 SSMP 算法求得的视差的一致性,解决视差图中的空洞问题和由于右视差图中的不准确导致的左视差图中正确视差丢失的现象。

2 SSMP 算法

SSMP 算法^[17]流程如图 1 所示,首先使用 GRD 构造初始匹配代价函数,再使用 RWR 算法进行代价聚合,然后对代价聚合的结果利用胜者为王(Winner Takes All, WTA)算法求得初始视差图,再经过左右一致性检测得到带有空洞点的视差图,最后经过空洞填充和中值滤波得到精化后的视差图。



图 1 SSMP 算法流程图

Fig.1 Flow chart of SSMP algorithm

2.1 计算匹配代价

匹配代价的求取使用的是 GRD,也就是利用图像的亮度信息与其灰度图的梯度信息联合构建,图像的亮度信息包括 RGB 三通道的亮度信息。对于左图中任意一点 $p(x, y)$,其对应的视差值为 d ,该点在右图中对应的匹配点为 $pd(x-d, y)$ 。初始匹配代价函数如下:

$$C^0(p, d) = \delta \cdot \min\{\|\psi(p, d), \tau_1\|\} + (1 - \delta) \cdot \min\{\|\nabla_x \psi(p, d)\|, \tau_2\}, \quad (1)$$

$$\psi(p, d) = \frac{1}{3} \sum_{i \in \{r, g, b\}} |\psi^i(p, d)|, \quad (2)$$

其中: $\psi(p, d)$ 表示点 p 和对应的 pd 点之间的颜色差异; $\nabla \psi_x(p, d)$ 表示点 p 和对应的 pd 点沿 x 方向的梯度差异; δ 为权值系数; τ_1 和 τ_2 为截断值。

2.2 代价聚合

首先,将匹配代价转成匹配概率。匹配代价越小,匹配概率越高,反之,匹配概率越低。因此,点 p 的初始匹配概率可以由其初始匹配代价求得:

$$P^0(p, d) = \frac{1}{Z(p)} \exp\{-\nu C^0(p, d)\}, \quad (3)$$

$$Z(p) = \sum_d \exp\{-\nu C^0(p, d)\}, \quad (4)$$

其中: ν 表示控制匹配概率的增大的正数因子; $P^0(p, d)$ 表示点 p 的视差为 d 的匹配概率; $Z(p)$ 表示点 p 处视差值取视差范围内所有值的匹配代价总和。

其次,使用 RWR 算法求得稳定匹配概率,公式如下:

$$P^{t+1}(p, d) = (1 - \alpha) \frac{\sum_{q \in N_p} w(p, q) P^t(q, d)}{\sum_{q \in N_p} w(p, q)} + \alpha P^t(p, d), \quad (5)$$

其中: t 表示迭代次数; $q \in N_p$ 表示点 q 为点 p 邻域中一点,这里使用的四邻域; $P(p, d)$ 表示点 p 的视差值为 d 时的匹配概率; $w(p, d)$ 为点 p 和四邻域中任意一点 q 之间的权值; α 为重启概率。

通过 $t + 1$ 次迭代后使得 $P^{t+1}(m, d) = P^t(m, d)$, 匹配概率就达到稳定状态。此时的 $P^t(m, d)$ 即为点 p 视差值为 d 时的稳定匹配概率。

上式中两点之间的权值 $w(p, q)$ 与 p, q 两点的颜色相似性有关,公式如下:

$$w(p, q) = \exp\left(-\frac{\|I_l(p) - I_l(q)\|_2^2}{\gamma_c}\right), \quad (6)$$

其中:参数 γ_c 的值与图像的亮度方差有关。

2.3 视差计算

视差由 WTA 算法求得:

$$d = \operatorname{argmax}(P(p, 1), P(p, 2), \dots, P(p, d_{\max})), \quad (7)$$

其中: $d_{\max}$ 为视差搜索范围; $P(p, d)$ 表示点 p 处的视差值为 d 的匹配概率; $\operatorname{argmax}()$ 表示在匹配概率 $P(p, d)$ 最大时 d 的取值。

3 改进后的算法

3.1 算法结构

图2为本文算法框图。首先使用 SSMP 算法获取初始视差图,并加入基于颜色相似性的填充准则,再通过左右一致性检测将不一致的视差点处的视差设为0,于是得到存在空洞点的左视差图。再使用 SGM 算法中的代价聚合方式重新求取视差图,与使用 SSMP 算法获取的左视差图进行一致性检测,将一致的视差点视为准确的视差点,并作用于存在空洞点的左视差图中,最后经过原 SSMP 算法的空洞点填充和中值滤波得到最终的视差图。图2中虚线区域为改进之处。

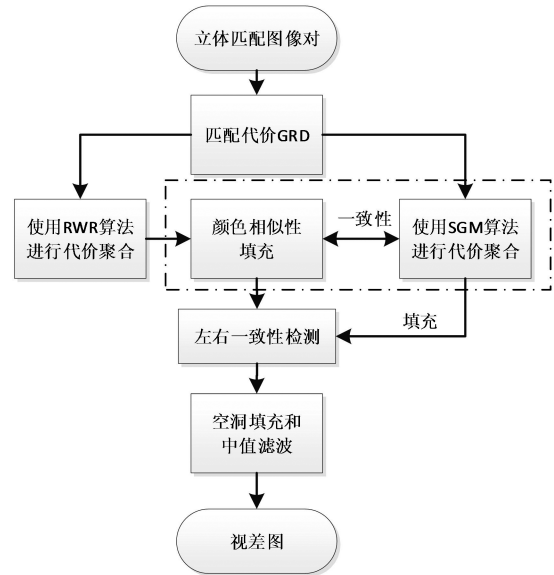


图2 改进后的 SSMP 算法框图

Fig.2 Improved SSMP algorithm diagram

3.2 使用 SGM 算法中的代价聚合方式求取视差图

根据 SGM 算法^[18-19]代价聚合方式,构造能量函数如下:

$$E(D) = \sum_p \left(\frac{C(p, d_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|d_p - d_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|d_p - d_q| > 1]}{\sum_{q \in N_p} P_2 T[|d_p - d_q| > 1]} \right), \quad (8)$$

其中: $C(p, d_p)$ 代表初始匹配代价项; P_1 代表视差连续时的惩罚因子; P_2 代表视差不连续时的惩罚因子, P_2 应远大于 P_1 ; $T[]$ 判断函数。

$$L_r(p, d) = C(p, d) + \min \left(\begin{matrix} L_r(p-r, d), \\ L_r(p-r, d-1) + P_1, \\ L_r(p-r, d+1) + P_1, \\ \min_i L_r(p-r, i) + P_2 \end{matrix} \right) - \min_k L_r(p-r, k), \quad (9)$$

其中: $LL_r(p, d)$ 表示像素点 p 在方向 r 上视差为 d 匹配代价; $p-r$ 表示方向 r 上前一匹配像素点; 最后一项防止匹配代价溢出。

3.3 基于爬山法分割的填充准则

使用爬山算法^[20]对彩色图像进行颜色分割。首先, 将原图从 RGB 空间转成 LAB 空间, 并建立三维颜色直方图^[21], 统计每种颜色的像素点数量。然后, 从颜色直方图中选择一个像素点数量大于 0 的颜色开始爬山, 计算该颜色左右相邻的颜色的像素点数量。因维度为 3, 所以每种颜色都有 $3^3 - 1 = 26$ 个相邻颜色。如果相邻颜色的像素点数量不同, 则将该邻点作为当前点, 继续向像素点数量更多的相邻颜色位置爬山; 如果相邻颜色的像素点数量相同, 则再检查该相邻颜色的相邻颜色位置, 直到找到像素点数量不同的位置, 判断是否可以爬山。当爬山不能进行时, 则认为到达峰值。再然后, 选择其他没有爬过的像素点数量大于 0 的颜色, 重复爬山过程, 直到所有颜色都被爬过。被选出的峰值个数代表了初始的聚类簇数^[22]。所有的能爬到同一峰值的颜色都归为一类, 以此方法完成对彩色图像的分割。

完成图像分割后, 将分割后的像素点所属类的不同类贴上不同的标签。原图像中任意一点 p 的标签页表示为 L_p , $q \in N_p$, 即为 p 点八邻域像素点中的一点。 q 点标签页表示为 L_q 。在 p 点的视差 $d_p < 1$ 时, 使用如下步骤进行填充:

(a) 初始化: $n = 0$, $S = 0$

(b) $d_q > 1$ 且 $L_p = L_q$, $n = n + 1$, $\sum S + d_q$

(c) 填充 p 点视差:

$$d_p = \begin{cases} d_p & n < 3 \\ \left\lceil \frac{S}{n} \right\rceil & 3 \leq n \leq 8 \end{cases}$$

4 结果比较及分析

为了验证该算法的有效性, 本文采用 Middlebury 测试数据库中第 2 版本的 Tsukuba、Venus、Teddy、Cones 以及第 3 版本的 Art、Playtable、Recycle 进行实验。利用 Matlab 语言编程实现算法, 用于实验的计算机硬件配置 Intel (R) Core (TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz。实验中各参数值设置如下: $\delta = 0.11$, $\tau_1 = 15/255$, $\tau_2 = 2/255$, $\gamma_c = 50$, $v = 3\ 000$, $\alpha = 0.003$, $P_1 = 0.01$, $P_2 = 1\ 000$ 。并采用误匹配像素百分比来定量评价本文方法的匹配精度。

由图 3 可以看出 SSMP 匹配算法得到的视差图整体效果明显优于 SGM 算法得到的视差图, 但是 SSMP 算法在获取 Teddy 和 Cones 两组图像的视差图上却有着明显的空洞现象。而本文算法在 Tsukuba 和 Venus 两组图像上有着一定的改善的基础上, 对 Teddy 和 Cones 这两组图的获取的视差图效果有着明显改善。为了更好地对比 SSMP 算法和改进后的 SSMP 算法, 现将 SSMP 算法和本文算法得到视差图局部放大进行对比, 如图 4 所示。

从图 4 中可以很明显看出对 SSMP 算法的改进前后的差异, 本文算法既增加了视差图的正确信息, 又能很好地解决空洞问题。为了更好地将本文算法与其他算法进行比较, 现将本文算法与全局匹配中常用的几种方法的误匹配像素百分比进行统计, 如表 1 所示。

由图 3 和表 1 可以看出, 与传统全局算法相

比,SSMP 算法在一些图像的(例如测试图中 Tsukuba 和 Venus)匹配效果有着明显优势,但在一些图像(例如测试图中 Teddy 和 Cones)上匹配效果的优势并没有那么明显。而本文算法在 SSMP

的基础上,既保持了 SSMP 算法的优势,又明显地减少了 Teddy 和 Cones 图中的误匹配点。从以上各种算法的平均误差率来分析,本文算法的匹配效果优于其他算法。

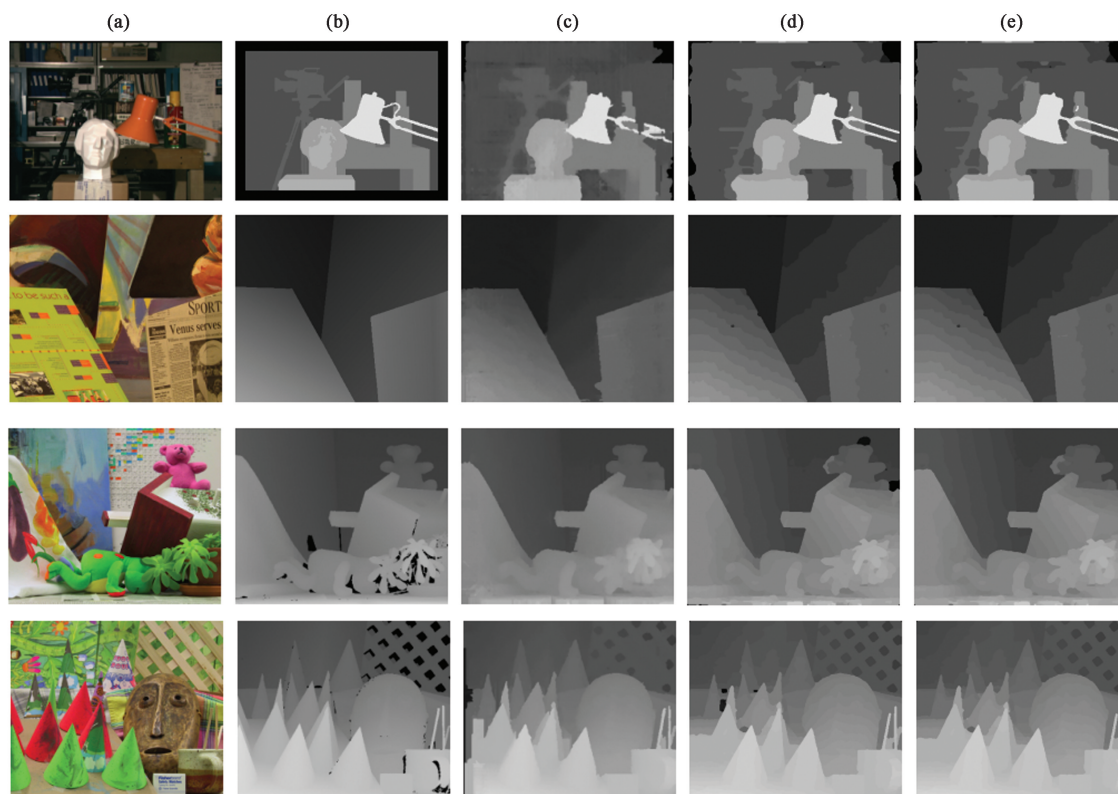


图3 不同算法在 Middlebury 2.0 图像对上的实验结果。(a)参考图像;(b)标准视差图;(c)SGM 算法;(d)SSMP 算法;(e)本文算法

Fig.3 Experimental results of different algorithms on Middlebury 2.0.(a)Reference image;(b)Standard disparity map;(c) SGM algorithm;(d)SSMP algorithm;(e) Proposed algorithm

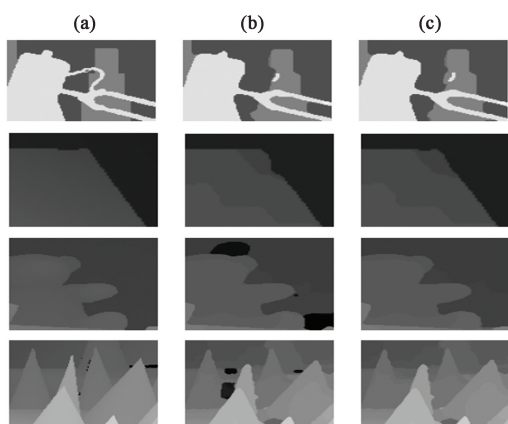


图4 局部视差图。(a)标准视差图;(b)SSMP 算法;(c)本文算法

Fig.4 Local disparity map.(a) A standard disparity map;(b) SSMP algorithm;(c) Proposed algorithm

为了进一步验证算法的有效性,现使用 Middlebury 网站上第三版本的 Art、Playtable、Recycle 三组图像进行实验,效果如图 5 所示。从实验结果上来看,在视差大的情况下,SSMP 算法很容易造成空洞现象,视差丢失现象更加严重,而本文改进后算法的实验效果有着明显的改善。表 2 为图 5 的误匹配像素百分比的统计,误差限为 1 像素。

从表 2 可以看出,在 Middlebury3.0 的部分图像的效果上,改进后的 SSMP 算法在平均误匹配像素百分比上提高了 3.2%。以上数据均表明,本文算法对 SSMP 算法有着明显的改进,较好地解决了空洞现象,使得正确视差得以保留,提高了匹配精度。

表 1 不同立体匹配算法在所有区域(all)的误匹配像素百分比(%)(误差限为 1 像素)

Tab.1 Different stereo matching algorithms in all region false match rates (%) (error limit 1 pixels)

Algorithm	Tsukuba	Venus	Teddy	Cones	Average error
Proposed	1.87	0.36	11.1	7.60	5.23
SSMP	1.97	0.38	11.5	7.92	5.38
NL	1.88	0.42	11.6	8.45	5.48
ST	2.76	0.60	15.2	7.86	6.82
SGM	3.96	1.57	12.2	9.75	7.50
BP	3.40	1.90	13.2	11.6	7.69
GC	4.12	3.44	25.0	18.2	11.4
DP	5.04	11.0	21.6	19.1	14.2

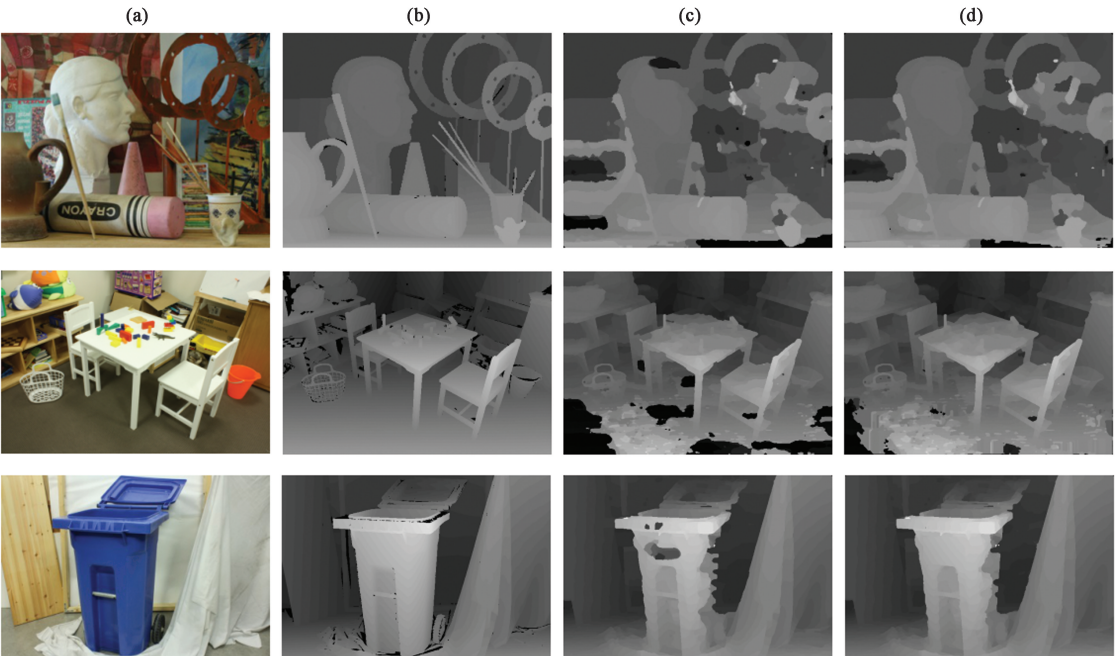


图 5 改进前后的算法在 Middlebury 3.0 部分图像对上的实验结果.(a)参考图像;(b)标准视差图;SSMP 算法;(d)本文算法

Fig.5 Experimental results of different algorithms on Middlebury 3.0.(a)Reference image;(b)Standard disparity map;(c) SSMP algorithm;(d) Proposed algorithm

表 2 改进前后的算法在所有区域(all)的误匹配像素百分比(%)(误差限为 1 像素)

Tab.2 Different stereo matching algorithms in all region false match rates (%) (error limit 1 pixels)

Algorithm	Art	Playtable	Recycle	Average error
Proposed	24.4	31.7	8.4	21.5
SSMP	29.7	34.2	10.2	24.7
SGM	23.5	59.3	34.2	39

5 实验结论

本文提出一种改进的 SSMP 立体匹配算法,首先使用图像的梯度信息和亮度信息构建初始匹配代价,再利用 RWR 算法进行代价聚合求取视差图,并使用爬山法基于颜色相似性进行填充,再通过左右一致性检测去除不一致的视差点,然后使用 SGM 算法中的代价聚合方式重新获取的左视差图并与 SSMP 算法获取的左视差图进行一致性比较,将一致的视差点填充到左右一致性检测后的视差图中。其目的在于尽可能的将更多的准确视差添

加到含有空洞点的视差图中,也就是说一致的视差点越多,最终的视差图就越精确。实验结果表明,改进后的 SSMP 算法在 Middlebury 测试平台上第 2 版本测试图像的平均匹配误差从 5.38% 减少到 5.23%,第 3 版本部分测试图像的平均匹配误差从 24.7% 减少到 21.5%。本文算法能利用正确的视差值来填充视差空洞,增加了视差图的正确信息,很好地解决由于右视差图中的不准确导致的左视差图中正确视差丢失的现象,有效地提高了匹配精确度。但在细节区域和图像的边缘处的精度方面还有待提高,在今后的研究中将针对细节区域和边缘做进一步优化。

参 考 文 献:

- [1] 王宇,朴燕.基于多视差函数拟合的集成成像深度提取方法[J].光学学报,2015,35(4):0411002.
WANG Y, PIAO Y. Depth extraction based on function fitting for multiple disparities in integral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0411002. (in Chinese)
- [2] 李蓉,邓春健,邹昆.一种基于 MRF 的单幅图像数据的三维重构方法研究[J].液晶与显示,2016,31(3):301-309.
LI R, DENG C J, ZOU K. 3D reconstruction method based on single image data by MRF [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 301-309. (in Chinese)
- [3] FENG L T, QIN K H. Superpixel-based graph cuts for accurate stereo matching [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 69(1): 012161.
- [4] VEKSLER O. Stereo correspondence by dynamic programming on a tree [C]//*Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2005, 2: 384-390.
- [5] 祝世平,闫利那,李政.基于改进 Census 变换和动态规划的立体匹配算法[J].光学学报,2016,36(4):0415001.
ZHU S P, YAN L N, LI Z. Stereo matching algorithm based on improved Census transform and dynamic programming [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0415001. (in Chinese)
- [6] 许金鑫,李庆武,刘艳,等.基于色彩权值和树形动态规划的立体匹配算法[J].光学学报,2017,37(12):1215007.
XU J X, LI Q W, LIU Y, et al. Stereo matching algorithm based on color weights and tree dynamic programming [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1215007. (in Chinese)
- [7] FELZENSZWALB P F, HUTTENLOCHER D P. Efficient belief propagation for early vision [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2006, 70(1): 41-54.
- [8] 周自维,樊继壮,赵杰,等.基于置信传播的立体匹配并行算法[J].光学精密工程,2011,19(11):2774-2781.
ZHOU Z W, FAN J Z, ZHAO J, et al. Parallel stereo matching algorithm base on belief propagation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2774-2781. (in Chinese)
- [9] 赵立荣,朱玮,曹永刚,等.改进的加速鲁棒特征算法在特征匹配中的应用[J].光学精密工程,2013,21(12):3263-3271.
ZHAO L R, ZHU W, CAO Y G, et al. Application of improved SURF algorithm to feature matching [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 3263-3271. (in Chinese)
- [10] 胡汉平,朱明.基于种子点传播的快速立体匹配[J].光学精密工程,2015,23(3):887-894.
HU H M, ZHU M. Fast stereo matching based on seed pixel propagation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 887-894. (in Chinese)
- [11] MEI X, SUN X, DONG W M, et al. Segment-tree based cost aggregation for stereo matching [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Portland, OR, USA: IEEE, 2013: 313-320.
- [12] MIN D B, SOHN K. Cost aggregation and occlusion handling with WLS in stereo matching [J]. *IEEE Transac-*

- tions on Image Processing, 2008, 17(8): 1431-1442.
- [13] HOSNI A, RHEMANN C, BLEYER M, *et al.* Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(2): 504-511.
 - [14] YANG Q X. A non-local cost aggregation method for stereo matching [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Providence, RI, USA: IEEE, 2012: 1402-1409.
 - [15] HAM B, MIN D B, OH C, *et al.* Probability-based rendering for view synthesis [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(2): 870-884.
 - [16] 麻祥才, 王晓红, 朱明, 等. 基于 LCD 显示器光谱特性的图像颜色一致性研究[J]. 发光学报, 2017, 38(5): 669-674.
MA X C, WANG X H, ZHU M, *et al.* Image color consistency based on spectral characteristics of LCD monitor [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(5): 669-674. (in Chinese)
 - [17] ZHAN Y L, GU Y Z, HUANG K, *et al.* Accurate image-guided stereo matching with efficient matching cost and disparity refinement [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2016, 26(9): 1632-1645.
 - [18] HIRSCHMULLER H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 328-341.
 - [19] 葛忠孝, 邢帅, 夏琴, 等. 基于树形结构的半全局立体匹配算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(8): 243-248, 254.
GE Z X, XING S, XIA Q, *et al.* Semi-global stereo matching algorithm based on tree structure [J]. *Computer Engineering*, 2016, 42(8): 243-248, 254. (in Chinese)
 - [20] GRUZMAN I S. Using gradient tensors of the second and third orders for segmentation of images containing textures with structural redundancy [J]. *Optoelectronics Instrumentation and Data Processing*, 2016, 52(1): 17-23.
 - [21] 陈璐宇, 周春艳. 基于分块颜色直方图和 GWLBP 的图像检索算法[J]. 液晶与显示, 2017, 32(9): 755-763.
CHEN L Y, ZHOU C Y. Image retrieval algorithm based on block color histogram and GWLBP [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(9): 755-763. (in Chinese)
 - [22] 谢娟英, 周颖, 王明钊, 等. 聚类有效性评价新指标[J]. 智能系统学报, 2017, 12(6): 873-882.
XIE J Y, ZHOU Y, WANG M Z, *et al.* New criteria for evaluating the validity of clustering [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2017, 12(6): 873-882. (in Chinese)

作者简介: 张建业(1993—), 男, 吉林榆树人, 硕士研究生, 主要从事机器视觉及图像处理方面的研究。E-mail: 863338313@qq.com

朴燕(1965—), 女, 吉林长春人, 博士, 教授, 博导, 2000 年于中科院长春光机所获得博士学位。主要从事三维成像及数字视频图像处理方面的研究工作。E-mail: piaoyan@cust.edu.cn