

文章编号 1004-924X(2015)03-0887-08

## 基于种子点传播的快速立体匹配

胡汉平<sup>1,2,3</sup>, 朱 明<sup>1\*</sup>

(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;

3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:**针对计算机视觉中的对应点误匹配问题,提出了一种基于种子点传播的快速局部立体匹配算法来进一步提高匹配算法的运行效率。该算法首先利用 Canny 算子提取图像边缘,结合边缘信息构造动态匹配窗口,以克服固定窗口对匹配带来的不利影响;然后利用 AD-Census 联合匹配代价在动态窗口上进行代价聚集,用 WTA 搜索策略得出初始视差图,对视差值进行筛选以确定种子点;随后利用像素间颜色差异将种子点的视差值传递给周围非种子点;最后采用区域投票和局部校正方式对视差值求精,进而获取精确的稠密视差图。实验结果表明,该算法可对 Middlebury 测试图生成高质量的视差图。与目前较新的局部立体匹配算法相比,其运行速度提高了 1.8 倍,满足了实际应用对速度和精度的要求,具有较高的实用价值。

**关键词:**计算机视觉;立体匹配;边缘检测;种子点;视差传播;视差图

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0887

## Fast stereo matching based on seed pixel propagation

HU Han-ping<sup>1,2,3</sup>, ZHU Ming<sup>1\*</sup>

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: zhu-mingca@163.com*

**Abstract:** For the mismatching problem in computer vision, a fast local stereo matching algorithm based on seed pixel propagation was proposed to further improve the efficiency of matching algorithm. Firstly, the edge of an image was extracted using Canny operator in order to overcome the adverse influence of a fixed window on stereo matching by combining with the edge information to construct a dynamic matching window. Then, the AD-Census combined matching costs was used to realize the cost aggregation on the dynamic window, the initial disparity map was obtained by WTA search strategy and the disparity was filtrated to get seed pixels. Furthermore, the color difference between pixels was used to propagate the disparity of seed pixels to around unseeded pixels. Finally, the region voting and local rectification were adopted to refine the disparity and to get the accuracy dense

收稿日期:2014-09-25;修订日期:2014-12-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61077156)

disparity map. Experimental results show that the algorithm provides high-quality disparity map on Middlebury data set, the computing time is accelerated by 1.8 times as compared with that of newer local matching algorithms at present. It meets the demands of actual applications for accuracy and speeds.

**Key words:** computer vision; stereo matching; edge detection; seed pixel; disparity propagation; disparity map

## 1 引言

双目立体视觉作为计算机视觉中的重要研究方向,在视觉导航、场景重建和远距离遥感等领域得到了广泛应用。该系统中最关键的步骤为摄像机标定、立体匹配和三维重建,其中立体匹配技术即是重点和难点,如何对图像中的每个像素进行正确描述,定义合适的匹配特征,从而得到光滑稠密的视差图是匹配过程中的主要挑战,其结果直接影响三维重建效果。

立体匹配主要分为局部匹配和全局匹配<sup>[1]</sup>。局部匹配通常是以每个像素为中心建立一个邻域支撑窗口,根据左右待匹配图像相应像素邻域窗口内的数据,计算该像素点的匹配代价,最终选取具有最小匹配代价的窗口像素作为视差结果,代表性算法主要有自适应窗口和自适应权重。自适应窗口通过动态调整窗口位置和大小增强匹配代价区分性,一定程度上反应了对图像空间结构的理解和选择倾向。自适应权重算法融合了颜色、梯度等单像素间信息,相当于在局部区域中融入平滑假设,是目前性能较好的一种局部算法,但其计算复杂度高,无法实现并行运算。文献[2]提出一种自适应窗口的改进算法,在保留原算法优点的同时减小了计算量,并加强了相邻匹配基元间的视差连续性。文献[3]通过域变换将二维代价聚集转化为一系列的一维滤波,降低了自适应权重的计算复杂度,在算法精度和速度上都得到了较好的平衡。全局匹配算法综合考虑全局的图像信息,采用全局优化理论估计视差,建立包含数据项和平滑项的能量方程,将视差求解过程转化为能量最小化问题。代表算法有图割法、置信传播算法、动态规划算法等。此类算法在匹配图像的遮挡区域和低纹理区域有着较好的匹配效果,但计算复杂度过高,算法运行时间长,因此不适合实时运行。文献[4]提出一种局部共享标签和图割相结合的算法,实现了马尔科夫图割中标签的立

体传播,得到了较高精度的亚像素视差图。文献[5]提出一种基于图割的支撑点扩展全局算法,相对其它全局算法其运行时间大大缩短,但视差精度并未得到改善。

本文提出一种利用边缘分割和种子点传播的快速局部立体匹配算法。该算法充分利用图像的边缘信息来辅助构造动态的匹配窗口,以降低固定窗口造成的歧义匹配,同时通过联合不同的匹配代价函数来克服单一代价函数在某些特殊区域的不足。筛选种子点时,结合匹配代价比和种子点分布的区域性,得到高质量的种子点图。实验结果表明,该匹配算法视差范围稳定,能够获得较高质量的视差图,而且与其它匹配精度较高的局部算法比较,匹配速度有较大提高。

## 2 算法设计与实现

### 2.1 AD-Census 匹配代价初始化

在立体匹配中,要对左右视图进行对应点匹配,就必须建立对应点相似的度量,通常称其为匹配代价函数。常用的代价函数有绝对强度差(Absolute Intensity Difference, AD)、归一化相互关系(Normalized Cross Correlation, NCC)和以 Rank、Census 为代表的非参数变换等。

从文献[6]对各种代价函数性能对比中发现,无论是在局部匹配还是全局匹配中 Census 变换都表现极佳。该变换以像素灰度的相对值作为匹配的相似性测度,它只依赖于变换窗口内邻域像素的灰度值和中心像素灰度值的大小比较关系,即使像素的灰度值因为噪声而发生很大变化,Census 变换的相应值也只变化 1,因此它对由较强噪声和光照变化产生的离群点有较好的抑制作用。但其存在对重复区域和局部结构相似区域容易造成误匹配的缺点,为了有效改善上述区域的误匹配,文献[7]提出了将 AD 和 Census 组成联合匹配代价,在图像的局部相似区域,色彩信息能够有效降低误匹配,而同时在色彩分布相似区域,

基于窗口的 Census 变换测度较基于像素强度差的测度具有更好的区分性。采用如下联合匹配代价函数:

假设  $p$  为左图像上的一像素点,  $d$  为估计视差。首先计算  $C_{AD}(p, d)$  和  $C_{census}(p, d)$  的值, 在计算  $C_{AD}$  时直接求取 R, G, B 三通道的强度差均值:

$$C_{AD}(p, d) = \frac{1}{3} \sum_{i=R,G,B} |I_i^{left}(p) - I_i^{right}(pd)|. \quad (1)$$

计算  $C_{census}$  时, 定义窗口大小为  $7 \times 7$ , 将左视图窗口内像素依次与中心像素对比获取中心像素的 48 位二进制编码  $CEN_L(P)$ , 然后计算右视图中对应点  $P_d(x-d, y)$  的二进制编码  $CEN_R(P_d)$ , 则:

$$C_{census}(p, d) = Hamming(CEN_L(P), CEN_R(P_d)). \quad (2)$$

因此, AD-Census 联合匹配代价定义为:

$$C(p, d) = \rho(C_{census}(p, d), \lambda_{census}) + \rho(C_{AD}(p, d), \lambda_{AD}), \quad (3)$$

其中:  $\rho(c, \lambda)$  是关于  $C$  的函数:

$$\rho(c, \lambda) = 1 - \exp\left[-\frac{c}{\lambda}\right]. \quad (4)$$

$\lambda$  的 2 个值  $\lambda_{AD}$  和  $\lambda_{census}$  提前预设, 该函数的引入能将两类匹配代价值控制在  $[0, 1]$  内, 不会使联合匹配代价因为其中某一项而发生较大突变, 其次参数  $\lambda$  可有效控制离群点的不利影响。

### 2.2 边缘提取和代价聚集

局部匹配算法一般假设匹配窗口中的像素具有相同的视差值, 像素间的匹配主要是依靠匹配窗口内像素的支持来消除匹配过程中的歧义性<sup>[8]</sup>, 因此匹配窗口的选择直接影响匹配结果的准确性, 窗口尺寸过小不足以提供充分的匹配数据, 过大则容易导致无法满足视差一致性的条件。理想的匹配窗口应该能表示图像中不同物体的表面像素, 对于大尺寸弱纹理的表面区域, 应该选择尽可能大尺寸窗口, 而对于表面尺寸较小、细节较多的区域应选择小尺寸窗口。

首先采用 Canny 算子提取待匹配图像的边缘轮廓, 该算子是高斯函数的一阶导数, 是对信噪比与定位乘积的最优化逼近算子<sup>[9]</sup>, 即:

$$h(x, y) = [\nabla G(x, y, \sigma)] * f(x, y) = \nabla [G(x, y, \sigma) * f(x, y)]. \quad (5)$$

它包含了梯度非极大值抑制措施, 可得到局部最优边缘; 其次该算子得到的边缘是单像素宽度。

将提取到的边缘轮廓上的像素点的灰度值设为 255, 将其它像素点的灰度值设为 0。利用 Canny 算子对图 1 进行边缘提取, 其结果如图 2 所示。



图 1 左视图

Fig. 1 Left image



图 2 Canny 边缘提取

Figa. 2 Canny edge detection

接着利用提取的边缘轮廓来构造动态匹配窗口, 如图 3 所示, 以像素点  $p$  为例, 将  $p$  点周围的点分为内点和外点, 其中所有的内点构成  $p$  的匹配窗口<sup>[10]</sup>, 具体步骤如下:

(1) 以  $p$  点为起始点, 在垂直方向上的上下 2 个方向标记内点, 至遇到边缘像素点时停止;

(2) 以垂直方向上得到的内点为起始点, 在水平方向上的左右 2 个方向上标记内点, 至遇到边缘像素点时停止;

(3) 以上标记的所有内点组成  $p$  点的匹配窗口  $Win(p)$ , 同时为避免窗口过大或过小, 通过预设值来限制匹配窗口的尺寸, 其最小为  $W_{win}$ , 最大为  $W_{max}$ 。

采用该方法确定的匹配窗口能够借助边缘信息有效区分视差不连续区域, 同时对于弱纹理区域也能够自适应地放大匹配窗口, 以减少误匹配的可能性<sup>[11]</sup>。

最后利用动态窗口对匹配代价进行聚集, 以减少原始匹配代价带来的匹配歧义性。在  $p$  点

的动态匹配窗口上求取聚集代价  $C_1(p, d)$ :

$$C_1(p, d) = \sum_{q \in \text{Win}(p)} C(q, d). \quad (6)$$

对聚集代价  $C_1$  采用快速搜索策略 (Winner-Take-All, WTA) 来确定  $p$  点的最终视差值:

$$D_L(p) = \arg \min_d C_1(p, d). \quad (7)$$

采用同样方法求取右视图的视差  $D_R(p)$ 。图 4 为得到的初始视差图, 视差图中的遮挡区域、弱纹理区域和深度不连续区域存在明显的误匹配, 后续将采用种子点传播和视差求精来处理误匹配问题。

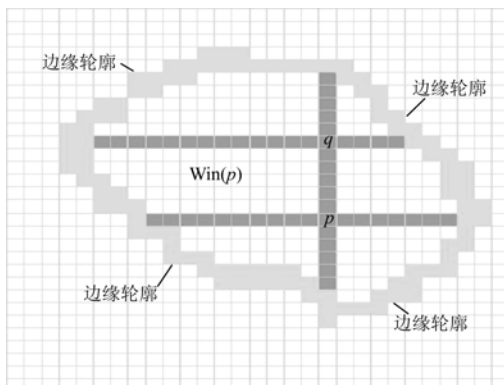


图 3 动态匹配窗口

Fig. 3 Dynamic matching window

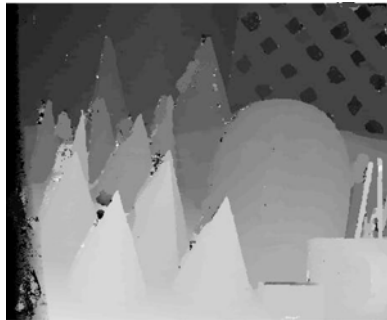


图 4 初始视差图

Fig. 4 Initial disparity map

### 2.3 种子点检测与传播

种子点是指具有高可靠性的左右图像匹配点对<sup>[12]</sup>, 设定候选的种子点  $p = \{x_p, y_p, d_p\}$ , 在视差为  $d_p$  时对应右图中点  $p'$ , 通过如下步骤确定种子点:

(1) 左右一致性检测: 满足式(8)则表示  $p$  点通过了左右一致性检测:

$$D_L(p) - D_R(p') = 0. \quad (8)$$

(2) 匹配代价比: 一般认为如果  $p$  的匹配代

价明显小于其余的竞争点, 则  $p$  的视差值更可靠<sup>[13]</sup>, 即最小匹配聚集代价与次小匹配代价的比值应满足:

$$\frac{C_1(p, d)}{C_1(p, D_L(p))} \geq \lambda_{\text{cost}}, \forall d \neq D_L(p). \quad (9)$$

如果  $p$  点同时满足式(8)和(9), 则将其标记为种子点, 否则将其标记为非种子点。

(3) 将所有点分为种子点和非种子点后, 考虑到突变点和孤立点大多是受图像噪声影响形成的错误点, 虽然也有部分为正确点, 但为了保证种子点的可靠性, 搜索已有种子点的 8 个相邻像素点, 如果没有其他种子点则将  $p$  点剔除<sup>[14]</sup>。

检测后的种子点分布如图 5 所示, 与真实视差图对比发现, 其误匹配点明显减少, 证明种子点的检测方法是有效可行的。

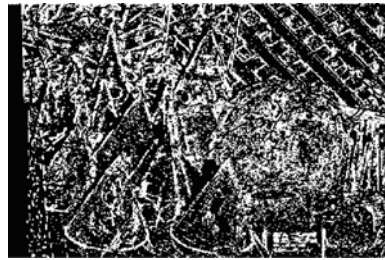


图 5 种子点图

Fig. 5 Seed pixels map

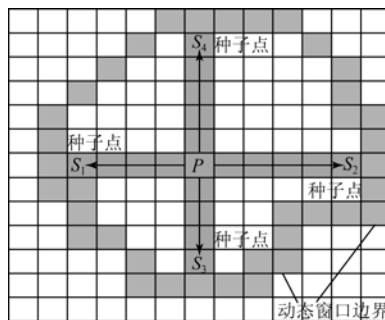


图 6 非种子点扫描

Fig. 6 Unseeded pixels detection

对于非种子点  $p$  采用如图 6 所示的扫描方式确定其最终视差值。首先在其动态匹配窗口内搜索其上下左右 4 个方向的种子点, 如果在区域内仅搜索到一个种子点, 则:

$$D_L(p) = D_L(S_i), i=1, 2, 3, 4. \quad (10)$$

如果搜索到多个种子点, 则通过式(11)分别计算  $p$  点和各个种子点之间的颜色差异值:

$$\text{Diff}(p, s) = \sum_{i=R, G, B} |I_p^i - I_s^i|. \quad (11)$$

若两个像素点之间的颜色差异最小,则它们趋向处于同一个深度平面内,也就具有相同或相似的视差值。将颜色差异最小的种子点的视差值赋给非种子点  $p$ ,一旦像素点  $p$  的视差值被更新,它将马上被标记为种子点参与到后续的传播计算中。如果  $p$  的动态窗口内未搜索到任何种子点,则直接沿  $p$  的水平方向搜索一个最近的种子点将其视差值赋予点  $p$ 。

经过种子点传播后的视差如图7所示,相比初始视差图有较大改观,但仍存在一些错误的视差值,这些错误的视差值一方面来自于少量的错误种子点,另一方面来自于种子点在视差传递过程中的一些错误传递。

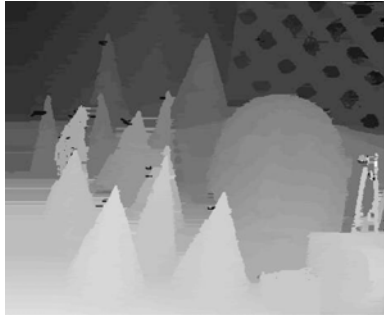


图7 种子点传播后的视差图

Fig. 7 Disparity map after seed pixel propagation

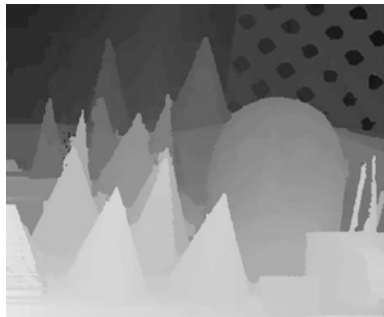


图8 求精后的视差图

Fig. 8 Disparity map after refinement process

## 2.4 视差求精

对于视差图中存在的错误视差值,尤其是在遮挡区域和深度不连续区域,采取如下措施来剔除错误视差值。

### 2.4.1 区域迭代投票

种子点传播过程中只考虑了相对较小区域内的视差分布,因此存在一定的误匹配。为了进一步剔除传播过程中造成的误匹配点,采用区域投票

方式将更大的视差分布区域纳入到投票区域<sup>[15]</sup>。对于传播之前标定的非种子点  $p$ ,建立箱体数为  $d_{\max} + 1$  的直方图  $H_p(d_{\max}$  表示最大视差范围),在像素点  $p$  的动态窗口内,如果像素点  $q$  与  $p$  的颜色差异  $D_c(p, q)$  小于阈值  $\tau$ ,即满足:

$$D_c(p, q) = \frac{1}{3} \sum_{i=R, G, B} |I_p^i - I_q^i| < \tau, \quad (12)$$

则视差值  $D_L(q)$  的投票值加1,  $D_L(p)$  最终值取决于投票结果:

$$D_L(p) = \arg \max_d H_p(d). \quad (13)$$

将此投票过程迭代2次,错误匹配的像素点基本被消除。

### 2.4.2 深度不连续区域校正

一般边界处由于视差不连续,容易产生错误视差点。针对此种情况,首先对视差图进行边界提取,对位于边界上的每个像素点  $p$ ,提取它的左右2个像素点  $p_1$  和  $p_2$ ,其对应的视差值分别为  $D_L(p_1)$  和  $D_R(p_2)$ ,如果:

$$C_1(p, D_L(p)) < \min(C_1(p_1, D_L(p_1)), C_1(p_2, D_R(p_2))), \quad (14)$$

则用相应较小的匹配代价点的视差值替换  $D_L(p)$ ,否则维持原视差值不变。

通过上述步骤能够有效地减少错误视差点,图8所示为得到的最终精确稠密视差图。

## 3 实验结果与分析

为检验算法的有效性,在 Intel core i5 2.3 GHz, 4 G 内存的 Windows 平台下用 VS2010 编程实现本文算法,用算法对 Middlebury<sup>[16]</sup>网站提供的4对彩色测试图像 Tsukuba、Teddy、Cones 和 Venus 进行匹配,其大小分别为  $384 \times 288$ ,  $434 \times 383$ ,  $450 \times 375$  和  $450 \times 375$ 。该网站提供的图像对已经完成了单幅图像校正和双幅图像的外极线校准过程,并且包含了图像对的真实视差图。根据测试要求,算法在对所有像对测试过程中都保持相同参数设置,具体参数值如表1所示。

表1 算法参数设置

Tab. 1 Parameter settings for the program

$\lambda_{AD}$	$\lambda_{Census}$	$W_{win}$	$W_{max}$	$\lambda_{cost}$	$\tau$
10	25	5	31	1.2	20

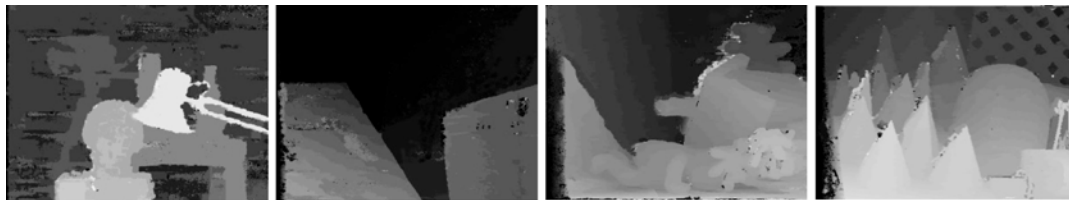
图 9 列出 4 对测试图集在算法中的中间视差图和最终视差图,其中图 9(a)为待匹配的左视图,图 9(b)为初始匹配生成的视差图,图 9(c)为相应的种子点图,图 9(d)为经过种子点传播后的视差图,图 9(e)为求精后的精密视差图。通过实验结果可以发现初始视差图中的各种误匹配在经

过一系列处理之后逐渐减少,视差图在趋于平滑的同时较好地保留了图像的边缘细节信息。同时由于该算法结合图像边缘信息来构造动态匹配窗口和利用颜色差异进行种子点传播,所以在低纹理和深度不连续区域都得到比较满意的匹配结果。



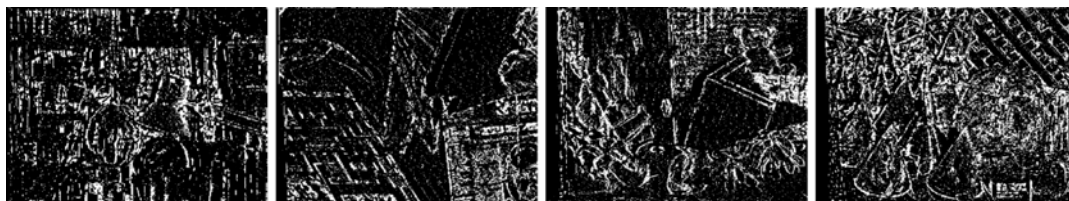
(a) 左视图

(a) Left image



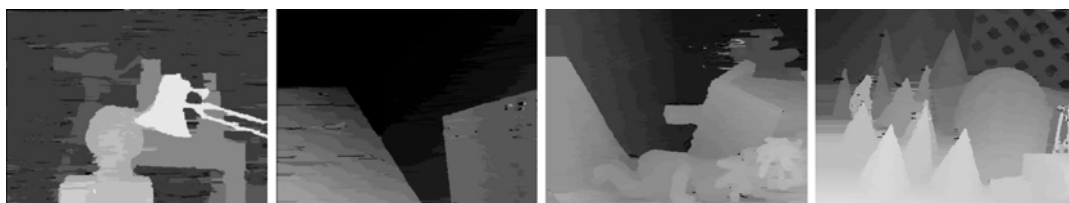
(b) 初始视差图

(b) Initial disparity map



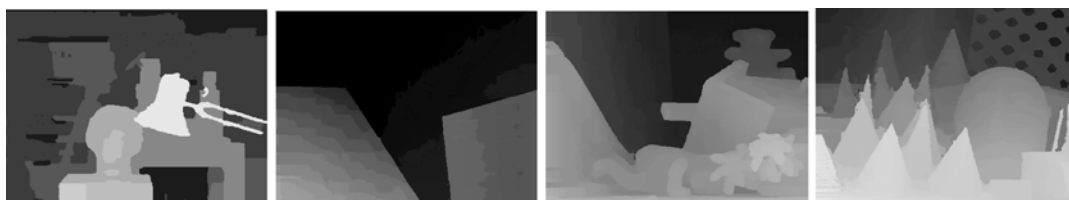
(c) 种子点图

(c) Seed pixel map



(d) 种子点传播后的视差图

(d) Disparity map after seed pixel propagation



(e) 求精后的视差图

(e) Disparity map after refinement process

图 9 Middlebury 测试图集运行结果

Fig. 9 Results on the Middlebury data set

表2给出了在4幅标准测试图对上匹配的具体量化结果,nonocc表示非遮挡区域的误匹配率,all表示所有区域的误匹配率,disc表示视差不连续区域的误匹配率。将本文算法与联合直方图立体匹配(HistoAggr)<sup>[17]</sup>、基于局部视差估计和支撑权重匹配算法(LM3C)<sup>[18]</sup>、基于梯度相关的立体匹配(RelativeGrad)<sup>[19]</sup>进行对比发现,在

误差阈值为1个像素时,由于本文算法在视差不连续区域采用了校正方法,使得边界信息较复杂的Teddy和Cones测试图在disc区域的误匹配率较HistoAggr算法下降了12%。同时算法借助边界区域构建的动态匹配窗口较好地处理了非遮挡区域,使其在nonocc区域的误匹配率较对比算法平均下降了8.3%。

表2 本文方法与其它方法量化对比(误差阈值为1个像素)

Tab. 2 Quantitative comparison of different methods(error threshold is 1 pixel)

算法	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			平均误差
	nonocc	all	disc	nonocc	all	disc	nonocc	all	disc	nonocc	all	disc	
HistoAggr	1.93	2.30	6.39	0.16	0.46	2.22	5.88	11.3	14.7	2.41	7.78	6.89	5.20
LM3C	2.10	2.44	8.01	0.12	0.39	1.23	5.46	10.9	14.9	2.12	7.59	6.14	5.12
RelativeGrad	1.18	1.27	5.91	0.23	0.24	1.28	6.89	12.3	16.0	3.31	7.94	8.24	5.40
本文方法	1.06	1.24	5.73	0.11	0.27	1.19	5.71	10.4	12.9	2.08	7.63	5.98	4.53

图10所示为本文算法和对比算法分别在4幅测试图对上的运行时间,其中测试图的视差范围分别为Tsukuba(0,15)、Teddy(0,19)、Cones(0,59)、Venus(0,59),由于本文算法未采用复杂的加权计算方式,使得算法的计算效率得到较大改善,4种算法在测试图对上的平均运行时间分别为4.2,4.8,3.6和1.5s,本文算法较对比算法运行速度平均提高了1.8倍。

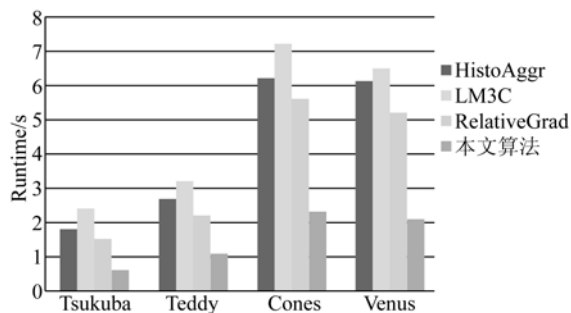


图10 4种方法运行时间对比

Fig. 10 Comparison of runtime for four methods

#### 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):7-42.

## 4 结 论

本文提出了一种利用边缘分割和种子点传播的快速局部立体匹配算法。该算法通过动态窗口和联合匹配代价构造出高质量的初始视差图,在左右一致性检测和匹配代价比的约束下结合区域分析进行种子点的选取;然后利用颜色差异控制种子点传播,采用区域投票和边界视差校正的方式进一步剔除误匹配点得到稠密的视差图。实验结果表明,该算法在匹配精度上和当前优秀的局部匹配算法相当,匹配速度上较相应的局部匹配算法提高了1.8倍,较好地解决了双目立体视觉中的立体匹配问题,能够满足对匹配速度和精度的要求,具有较好的实际应用前景。

[2] 卢阿丽,唐振民. 利用自适应窗口实现不连续保护立体匹配 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2328-2334.  
LU A L, TANG ZH M, Discontinuity preserving stereo matching using variable window [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(9):2328-2334. (in Chinese)

[3] PHAM C, JEON J. Domain transformation-based

- efficient cost aggregation for local stereo matching [J]. *IEEE*, 2012, 23(7): 1119-1130.
- [4] TATSUNORI T. Graph cut based continuous stereo matching using locally shared labels [C]. In *CVPR*, 2014.
- [5] 周自维, 樊继壮, 李戈, 等. 支撑点扩展快速立体匹配方法的设计与应用 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(1): 207-215.  
ZHOU Z W, FAN J ZH, LI G, *et al.*. Design and application of fast matching method based on support point expansion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 207-215. (in Chinese)
- [6] HIRSCHMULLER H, SCHARSTEIN D. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometric differences [J]. *IEEE*, 2009, 31(9): 1582-1599.
- [7] SUN X, MEI X, JIAO S, *et al.*. Stereo matching with reliable disparity propagation [C]. In *Proc: 3DIMPVT*, 2011: 132-139.
- [8] HOSNI A, BLEYER M, GELAUTZ M. Secrets of adaptive support weight techniques for local stereo matching [C]. In *CVIU*, 2013, 117(6): 620-632.
- [9] 吴威, 许廷发, 王亚伟, 等. 高精度全景补偿电子稳像 [J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 378-385.  
WU W, XU T F, WANG Y W, *et al.*. High precision digital image stabilization with full frame compensation [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 378-385. (in Chinese)
- [10] PAL C J, WEINMAN J J, TRAN L C, *et al.*. On learning conditional random fields for stereo: Exploring model structures and approximate inference [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2012, 99(3): 319-337.
- [11] 吉淑娇, 朱明, 胡汉平. 基于特征点匹配的电子稳像技术 [J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 841-849
- JI SH J, ZHU M, HU H P. Aero-borne electronic image stabilization based on feature point matching [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 841-849. (in Chinese)
- [12] HU X Y, MORDOHAI P. A quantitative evaluation of confidence measures for stereo vision [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(11): 2121-2133.
- [13] PFEIFFER D, GEHRIG S, SCHNEIDER N. Exploiting the power of stereo confidences [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013: 297-304.
- [14] 闫辉, 许廷发, 吴青青, 等. 多特征融合匹配的多目标跟踪 [J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 163-170.  
YAN H, XU T F, WU Q Q, *et al.*. Multi-object tracking based on multi-feature joint matching [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 163-170.
- [15] KOWALCZUK J, PSOTA E, PEREZ L. Real-time stereo matching on CUDA using an iterative refinement method for adaptive support-weight correspondences [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2013, 23(1): 94-104.
- [16] SCHARSTEIN D, SZELISKI R. Middlebury stereo evaluation [EB/OL]. 2012, <http://vision.middlebury.edu/stereo/eval/>.
- [17] MIN D B, LU J B, DO M N. Joint Histogram-Based Cost Aggregation for Stereo Matching [J]. *IEEE*, 2013, 35(10): 2539-2545.
- [18] LEE Z, JUANG J, NGUYEN T. Local disparity estimation with three-moded cross census and advanced support weight [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(8): 1855-1864.
- [19] ZHOU X Z, PIERRE BOULANGER. Radiometric invariant stereo matching based on relative gradients [C]. *IEEE*, 2012: 2989-2992.

#### 作者简介:



胡汉平(1980—),男,湖北襄阳人,博士研究生,工程师,2003年、2009年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事数字图像处理、计算机视觉等方面的研究。E-mail: custhhp@163.com



朱明(1964—),男,江西南昌人,研究员,博士生导师,1985年于南京航空航天大学获学士学位,1991年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事视频图像处理和光电成像测量技术以及目标识别与电视跟踪技术方面的研究。E-mail: zhu-mingca@163.com