

一种基于 Census 变换的可变权值立体匹配算法

王军政, 朱华健, 李静

(北京理工大学 复杂系统智能控制与决策教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 针对传统基于 Census 变换立体匹配算法精度不高的问题, 提出了一种基于改进 Census 变换的可变权值立体匹配算法。在分析传统 Census 变换缺陷的基础上, 提出利用最小均匀度子邻域均值代替中心像素灰度值进行 Census 变换, 可有效增强算法的抗干扰能力。通过加权区域海明距离均值和标准差作为相似性测度进行立体匹配, 减少误匹配, 提高匹配精度并通过左右一致性检测和遮挡填充, 生成最终视差图。实验结果表明, 该算法鲁棒性得到增强, 在深度不连续区域也可以得到准确的视差。

关键词: 立体匹配; Census 变换; 可变权值; 最小均匀度子邻域

中图分类号: TP 391. 41

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2013)07-0704-07

A Census Transform Based Stereo Matching Algorithm Using Variable Support-Weight

WANG Jun-zheng, ZHU Hua-jian, LI Jing

(Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision, Ministry of Education of China,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of low accuracy of matching algorithm by typical Census transform, a stereo matching algorithm using variable support-weight based on modified census transform is proposed. On the basis of analyzing the defects of traditional Census transform, a modified Census transform algorithm was developed using average value of minimum evenness sub-area as a reference instead of the center pixel intensity, which enhanced the robustness of the algorithm. The matching accuracy was improved by weighting the average value and the standard deviation of Hamming distances in a region. By means of left-right checking and occlusion filling, the final disparity map could be acquired at last. Experiment results indicate that the robustness of proposed algorithm is enhanced. Accurate disparity could be obtained even in the depth-discontinuities regions.

Key words: stereo matching; Census transform; variable support-weight; minimum evenness sub-area

从立体视觉引到立体匹配算法

立体视觉研究的一个重要目的是为了获取目标的深度信息, 其精度主要取决于所用的摄像机和立体匹配算法^[1-2]。立体匹配算法是双目立体视觉研究的一个热点。为了准确计算空间点在左右视图中的视差, 学者们提出了各种立体匹配算法。总的来说, 立体匹配算法可以分为局部算法和全局算法两

大类^[3]。局部算法主要有灰度差绝对值和、灰度差平方和^[3]、互相关归一化、互相关归一化和^[4]、自适应窗口、自适应权值^[5]及基于非参数变换的算法^[6-8]等。全局算法主要有动态规划法^[9]、图像分割法^[10]及基于置信传播的算法^[11]等。局部算法速度快, 在高纹理区域效果好, 但是在无纹理区域的精度较低。

匹配算法的分类, 各自的典型算法及优缺点

收稿日期: 2012-09-04

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(61103157)

作者简介: 王军政(1964—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wangjz@bit.edu.cn.

全局算法能获得高精度的视差,但是通常算法复杂,速度较慢.近年来出现的半全局算法^[12]是对局部算法和全局算法一种折中,拥有较快的匹配速度和较高的匹配精度.

介绍立体匹配测度,引到Census,指出Census缺点

大多数立体匹配算法^[13]是基于像素的灰度值,即两幅图像中的同一特征点在理想光照条件下应该具有相同的灰度值^[2].实际使用时,摄像机受到外部因素的影响,采集到的图像与理想情况相差较大,导致算法的效果不佳.为了克服上述问题,Zabih 等^[6]提出先对左右图像进行 Census 变换再进行立体匹配的方法,利用临近像素灰度值的大小关系而非像素灰度值作为相似性测度,抗干扰能力得到增强.但是,传统 Census 变换过度依赖中心像素灰度值的大小,也没有利用临近像素灰度值之间的连续性约束,对于变换后的左右图像,只是单一地利用区域海明距离和作为相似性测度,精度还有待提高.

针对基于 Census 变换的立体匹配算法精度不高的问题,作者首先分析了传统 Census 变换的局限性并提出改进,利用最小均匀度子邻域灰度平均值代替中心像素灰度值作为参考值进行 Census 变换;通过加权区域海明距离的平均值和标准差作为立体匹配相似性测度,减少误匹配,提高匹配精度;通过对生成的左右视差图进行检测,查找出异常值,并进行处理,生成最终视差图.

1 Census 变换

针对上段提出的Census缺点,提出本文的改进措施

1.1 传统 Census 变换

Census 变换是一种非参数变换,主要用来表征图像的局部结构特征,能够比较好地检测到图像中的边缘和角点特征^[6].Census 变换的基本原理是以一个矩形窗口遍历图像,通常选取中心像素的灰度值作为参考值,将矩形窗口中各像素的灰度值与参考值进行比较,灰度值小于参考值的记为 1,大于或等于参考值的记为 0,最后再按位连接.

$$T(u, v) = \bigotimes_{i=-n}^n \bigotimes_{j=-m}^m \xi(I(u, v), I(u+i, v+j)). \quad (1)$$

式中: $T(u, v)$ 为变换窗口生成的比特串; $I(u, v)$ 为 (u, v) 处的灰度; $m' = \lfloor m/2 \rfloor$, $n' = \lfloor n/2 \rfloor$,分别为不超过 $m/2$ 和 $n/2$ 的最大整数, m 和 n 分别为矩形窗口的宽和高; \bigotimes 表示按位连接.函数 $\xi(x, y)$ 定义为

$$\xi(x, y) = \begin{cases} 1 & x < y \\ 0 & x \geq y \end{cases}. \quad (2)$$

图 1 是对一个 3×3 窗口进行 Census 变换的示意图.选取中心像素的灰度值 127 作为参考值进行 Census 变换,得到比特串 110100110.

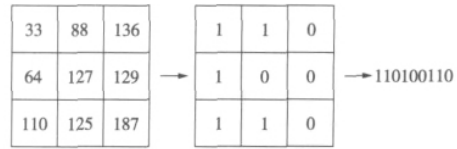


图 1 Census 变换示意图

Fig. 1 An example of Census transformation

1.2 改进 Census 变换

传统 Census 变换将中心像素的灰度值作为比较参考值,过分依赖中心像素灰度值的大小.当中心像素灰度值受干扰发生变化时,比特串的数值通常也会相应地发生变化.此外,传统 Census 变换没有充分利用灰度连续性约束,中心像素的灰度值未必就是变换窗口内的最佳参考值.针对传统 Census 变换的缺陷,作者提出了一种改进的 Census 变换方法,该方法可以更好地处理灰度值改变造成的问题,并且尽可能多地保持边缘和角点特征.

对于以 (u, v) 为中心的 Census 变换窗口,分别计算 (u, v) 的左上角子邻域、右上角子邻域、左下角子邻域和右下角子邻域的灰度分布均匀度 V ,取最小灰度分布均匀度对应区域的均值作为参考值进行变换,其表达式为

$$V = \sum [f(i, j) - \bar{f}(i, j)]^2. \quad (3)$$

式中: $f(i, j)$ 为子邻域像素灰度值; $\bar{f}(i, j)$ 为子邻域像素灰度值的平均值.

图 2 为子邻域灰度分布均匀度计算示意图,其分别计算 4 个子邻域的灰度分布均匀度,得到左上角、右上角、左下角和右下角子邻域灰度分布均匀度分别为 $V_1 = 4\ 722$, $V_2 = 1\ 410$, $V_3 = 2\ 581$, $V_4 = 2\ 708$.取右上角子邻域的灰度平均值 120 作为参考值进行 Census 变换,得到比特串 110100100.

当中心像素灰度值发生变化时,如图 1 所示的

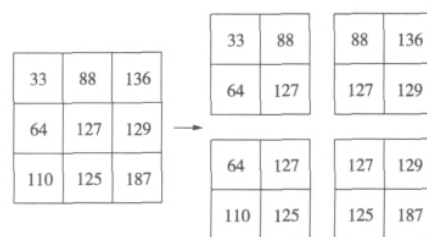


图 2 子邻域灰度分布均匀度计算示意图

Fig. 2 An example of calculating sub-area minimum evenness

窗口中心像素的灰度值变为 $I' \in (110, 125]$, 采用传统 Census 变换得到的比特串由 110100110 变为 110100100, 而采用本文中提出的改进 Census 变换得到比特串仍为 110100100, 没有发生变化, 算法的抗干扰能力得到增强.

2 可变权值立体匹配算法

对左右图像分别进行 Census 变换后, 需要进行立体匹配以获取视差图. 计算两点之间的海明距离以确定最佳匹配点, 其表达式为

$$C(u, v, d) = \text{Hamming}(T_l(u, v), T_r(u - d, v)). \quad (4)$$

式中: $T_l(u, v)$ 为左图像上以 (u, v) 为中心的矩形窗口 Census 变换得到的比特串; $T_r(u - d, v)$ 为右图像上以 $(u - d, v)$ 为中心的矩形窗口 Census 变换得到的比特串; d 为视差.

一种常见的立体匹配算法是计算左右匹配窗口内对应像素点的海明距离和^[2],

$$C_{\text{Sum}}(u, v, d) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m C(i, j, d). \quad (5)$$

式中: (u, v) 为匹配窗口的中心; $m' = \lfloor m/2 \rfloor$, $n' = \lfloor n/2 \rfloor$, m 和 n 分别是匹配窗口的宽和高. 在视差搜索范围内, 海明距离和最小的匹配窗口索引号即为该点的视差.

使用区域海明距离和作为立体匹配相似性测度的算法在深度连续区域的效果较好, 但在深度不连续区域易出现误匹配. 造成这种缺陷的主要原因在于算法对异常值的辨识度不够. 作者提出了一种改进的区域匹配算法, 通过加权区域海明距离的平均值和标准差信息作为相似性测度, 可有效地提高算法在深度不连续区域的匹配精度.

对于左图像上以 (u, v) 为中心的窗口区域, 它与右图像上匹配窗口之间加权值为

$$w(u, v, d) = f(E(C))g(\sigma(C)). \quad (6)$$

式中: $f(E(C))$ 为区域海明距离平均值的加权函数; $g(\sigma(C))$ 为区域海明距离标准差的加权函数. 其表达式为

$$f(E(C)) = \exp(E(C)/\gamma_1), \quad (7)$$

$$g(\sigma(C)) = \exp(\sigma(C)/\gamma_2). \quad (8)$$

式中: γ_1 为平均值的权值; γ_2 为标准差的权值. 在视差搜索范围内, 加权值最小的匹配窗口的索引号即为该匹配点的视差.

图 3 展示了利用区域海明距离和作为相似性测

度的算法和本文算法的匹配点权值区分度. 对比可以看出, 本文算法拥有更高的区分度.

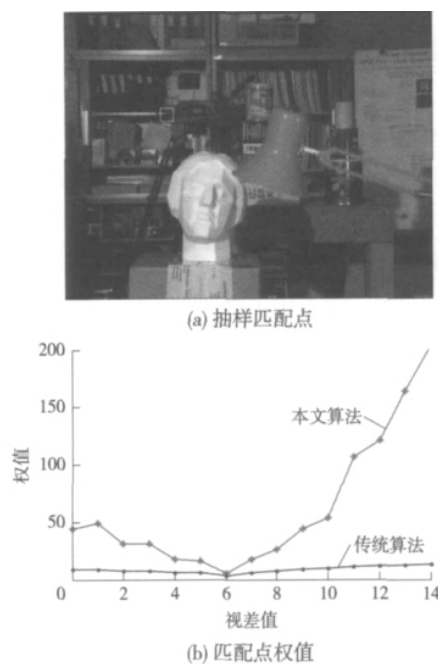


图 3 匹配点权值

Fig. 3 Weight comparison between traditional and proposed algorithm at every matching point

3 视差细化

基于改进 Census 变换的可变权值立体匹配算法相比于传统算法在匹配精度上有了很大的提高, 但生成的视差图中仍然包含许多异常值, 这些异常值极大地降低了匹配结果的可信度. 为了进一步增加匹配精度, 作者采用了一系列后续处理步骤对视差图进行细化.

对于左视差图 D_L 中的一点 p , 首先进行左右一致性检测, 其表达式为

$$|D_L(p) - D_R(p - (D_L(p), 0))| > \delta_0 = 1. \quad (9)$$

式中: $D_L(p)$ 为左视差图中一点 p 处的视差值; $D_R(p - (D_L(p), 0))$ 为 p 点在右视差图中对应点的视差值; δ_0 为阈值. 若两点视差值的差值大于预期阈值, 就认为该点为异常值; 否则, 认为该点是正常值.

异常值又可进一步分为遮挡点和误匹配点. 遮挡点是只在了一幅图像中出现的点, 遮挡点处的极线是不相交的; 误匹配点是匹配错误的点, 误匹配点处的极线是相交的^[7]. 对于遮挡点, 用其左右方向上最近的正常值的灰度值进行填充; 对于误匹配点, 用

其左右方向上灰度值最接近的点进行填充。最后，用 3×3 的滑动窗口对视差图进行中值滤波以生成最终视差图。

图 4 为视差细化前后的两幅视差图，图中灰色和黑色区域是异常值。可以看出，视差细化后，异常值显著减少。

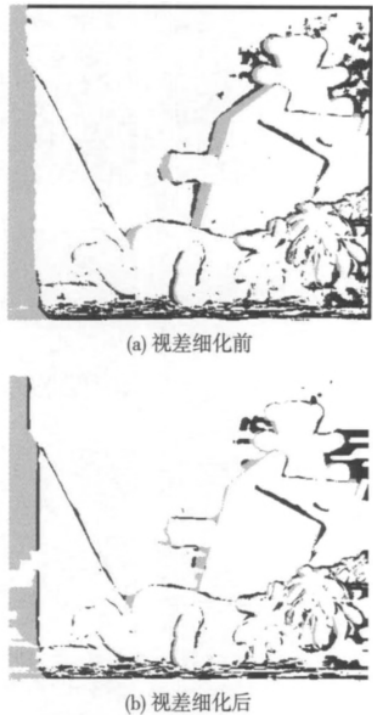


图 4 视差细化前后对比

Fig. 4 Comparison of outliers before and after refinement

4 实验结果与算法评价

图 5 为本文算法流程图。首先对左右图像进行

改进 Census 变换，然后利用可变权值区域匹配算法进行立体匹配，最后进行视差细化生成最终视差图。

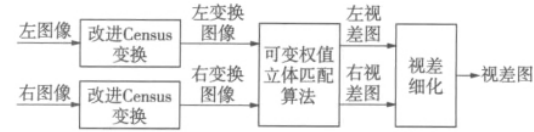


图 5 本文算法流程图

Fig. 5 Flow chart of the proposed algorithm

为了验证算法效果，将生成的视差图提交到 Middlebury 网站进行评估。评价算法效果的一项重要指标是视差图中的误匹配像素比，

$$B = \frac{1}{N} \sum |d_c(x, y) - d_s(x, y)| > \delta_d. \quad (10)$$

式中： N 为图像总像素数； $d_c(x, y)$ 为 (x, y) 处计算得到的视差值； $d_s(x, y)$ 为 (x, y) 处的标准视差值； δ_d 为阈值。误匹配像素比反映了误匹配像素在整个视差图中所占的比例。

Middlebury 网站上提供了 4 组基准彩色图像 Tsukuba、Venus、Teddy 和 Cones，其大小分别为 (384×288) 、 (434×383) 、 (450×375) 和 (450×375) 像素。实验时，4 组图像的视差搜索范围依次分别为 $0 \sim 15$ 、 $0 \sim 19$ 、 $0 \sim 59$ 和 $0 \sim 59$ 像素，非参数变换窗口大小为 (5×5) 像素，子邻域窗口大小为 (3×3) 像素，立体匹配窗口大小为 (9×9) 像素， $\gamma_1 = 3$ ， $\gamma_2 = 10$ 。

表 1 为本文算法在阈值 $\delta_d = 1$ 时的误匹配像素比。Nocc、All、Disc 所在的列分别为非遮挡区域误匹配像素比、总误匹配像素比和深度不连续区域误匹配像素比。

表 1 匹配结果评估

Tab. 1 Evaluation of matching results

匹配算法	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			平均误匹配像素比
	Nocc	All	Disc	Nocc	All	Disc	Nocc	All	Disc	Nocc	All	Disc	
本文算法	8.39	9.49	19.30	2.92	4.22	20.60	8.6	15.7	23.9	4.8	13.7	14.1	12.1
传统算法	9.06	10.60	21.50	2.34	3.72	21.50	12.7	21.1	28.1	7.9	17.0	16.2	14.3
MI-NonPara	5.59	7.54	18.80	7.50	8.99	35.00	17.4	25.7	36.9	10.2	19.9	22.6	18.0
SSD+MF	5.23	7.07	24.10	3.74	5.16	11.90	16.5	24.8	32.9	10.6	19.8	26.3	15.7
LCDM+AdaptWgt	5.98	7.84	22.20	14.50	15.40	35.90	20.8	27.3	38.3	8.9	17.2	20.0	19.5
GC	1.94	4.12	9.39	1.79	3.44	8.75	16.5	25.0	24.9	7.7	18.2	15.3	11.4

从表 1 的数据中可以看出，本文中算法在深度不连续区域的匹配效果要好于传统算法。除 Venus 的匹配效果略差于传统算法外，Tsukuba、Teddy 和 Cones 的效果远优于传统算法，平均误匹配像素比也低于传统算法。与另一种基于 Census 变换的

MI-NonPara^[2] 算法相比，本文算法具备一定的优势。与局部算法灰度差平方和算法 SSD+MF^[3] 和自适应权值算法 LCDM+AdapWgt^[13] 相比，本文中算法的效果更好；与全局算法 GC^[3] 相比，本文算法对 Teddy 和 Cones 的匹配效果更好，对 Tsukuba 和

Venus 的匹配效果较差,平均误匹配像素比略高于 GC 算法。

图 6 直观地反应了本文算法结果的优劣。图 6 (a)为 Tsukuba 的算法结果,从左到右,第 1 幅图片为 Tsukuba 的左图像的灰度图像,第 2 幅图片为标准视差图,第 3 幅图片为本文算法生成的视差图,第

4 幅图片的白色大片区域是匹配正确的点,灰色区域和黑色区域分别代表遮挡区域和无遮挡区域的异常值点,第 5 幅图片中的灰色大片区域是匹配正确的点,白色和黑色区域代表匹配错误的点。图 6 (b)、6(c)和 6(d)分别为 Venus、Teddy 和 Cones 的算法结果图。

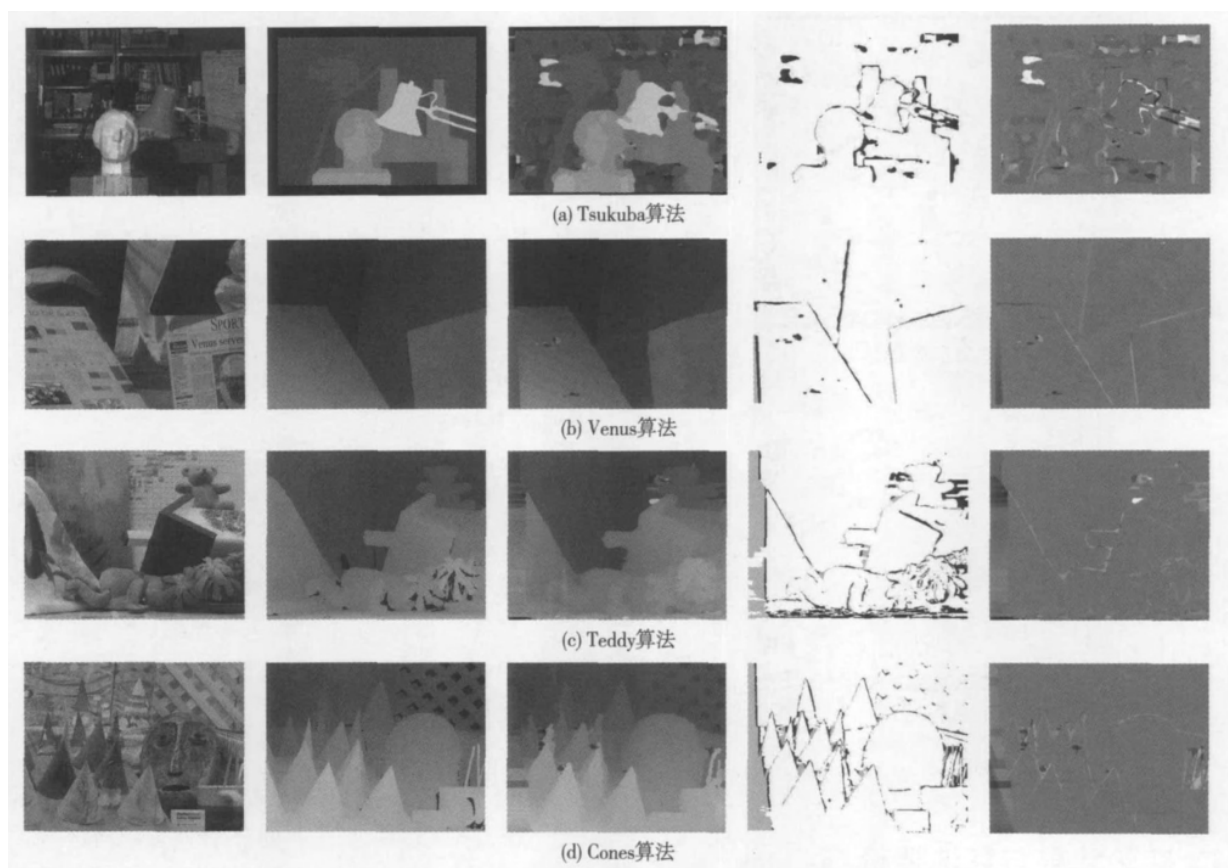


图 6 Middlebury 图像对立体匹配算法结果

Fig. 6 Results of stereo matching using proposed algorithm for Middlebury image pairs

本文中算法相比于其他局部算法的一大特点是较强的抗噪声能力。图 7 为本文算法和两种常见的局部算法在原始图像加入噪声时的匹配像素对比图。第 1 组实验分别对 Teddy 的左右图像加噪声密度为 0.04 的随机噪声,第 2 组实验分别对 Teddy 的左右图像加噪声密度为 0.05 的椒盐噪声。实验时,局部算法 SAD 和 NCC 的匹配窗口均为 (13×13) 像素,本文中算法非参数变换窗口为 (5×5) 像素,子邻域窗口为 (3×3) 像素,立体匹配窗口为 (9×9) 像素, $\gamma_1 = 3$, $\gamma_2 = 10$,视差搜索范围均为 60。从图 7 的数据中可以看出,本文算法在原始图像有噪声时,匹配精度要远高于另两种局部算法。在视差不连续区域、无遮挡区域和所有区域,本文算法的匹配像素都要高于另两种算法。

在算法的复杂度方面,假设图像像素点总数为 n ,视差搜索范围为 d ,Census 变换窗口内的像素数为 c ,立体匹配窗口内的像素数为 w 。本文算法的计算复杂度 $\propto O(ndcw^{0.5})$,局部算法 MI-NonPara 的计算复杂度 $\propto O(ndc^{0.5}w^{0.5})$,局部算法 LCDM + AdaptWg 的计算复杂度 $\propto O(ndw)$,全局算法 GC 的计算复杂度 $\propto O(n^2d^2\lg(nd))$ 。通常, $n \gg w > c$,上述算法的计算复杂度关系为本文算法大于 MI-NonPara,小于 LCDM + AdaptWg,远小于 GC。综合表 1 中的算法效果,本文算法还是具有一定的优势的。

表 2 中的数据为本文算法一次实际执行时间。实验时,硬件平台 CPU 配置为 i3-380,主频 2.5 GHz。非参数变换窗口为 (5×5) 像素,子邻域

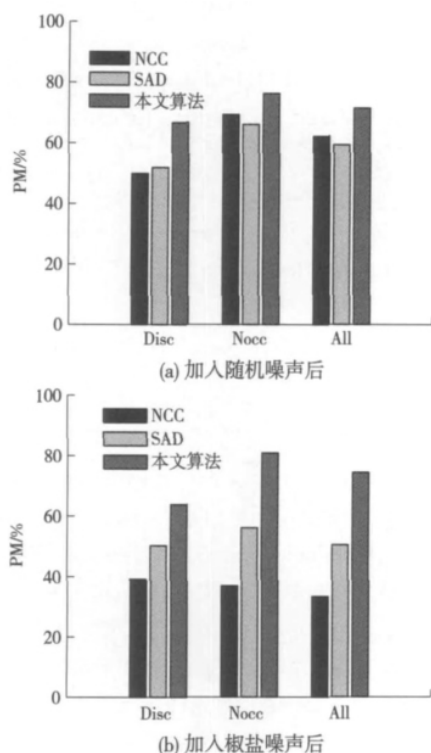


图 7 加入噪声后匹配像素比

Fig. 7 Results of pixel matching for Teddy with noise

窗口为 (3×3) 像素,立体匹配窗口为 (9×9) 像素.

表 2 实际执行时间

Tab. 2 Actual execution time ms

立体匹配算法	Tsukuba	Venus	Teddy	Cones
本文算法	2 122	3 567	8 642	8 588
传统算法	1 458	2 633	5 527	5 501

从表 2 的数据中可以看出,本文算法的执行时间相比于传统算法要长,这与理论结果是吻合的,因为作者在改进 Census 变换和区域匹配时采用了更复杂的计算,直接导致了算法用时的增加. 考虑到本文算法在编程时没有进行代码优化,可以进一步提高效率,而算法的计算量大多集中在加、减、异或等步骤,适合硬件加速,所以,本文算法的执行速度还有很大的提升空间.

5 结 论

为了克服传统 Census 变换过分依赖中心像素灰度值的缺陷,提出利用最小灰度分布均匀度子邻域均值代替中心像素灰度值进行 Census 变换的方法,提高了非参数变换的稳健性. 在立体匹配时,通过加权区域海明距离均值和标准差信息,提高匹配精度. 通过一系列后续处理,减少异常值,生成最终

视差图. 实验结果表明,本文算法的效果要优于传统算法,尤其在深度不连续区域,像素匹配百分比得到很大提升. 如何提高算法效率,增强算法在深度不连续区域的可靠性,将是今后研究的主要方向.

参考文献:

- [1] Matthies L, Maimone M, Johnson A, et al. Computer vision on Mars[J]. International Journal of Computer Vision, 2007,75(1):67-92.
- [2] 赖小波,朱世强,马璇. 一种对光照条件不敏感而快速的局部立体匹配[J]. 机器人,2011,33(3):292-298.
Lai Xiaobo, Zhu Shiqiang, Ma Xuan. A fast local stereo matching insensitive to illumination conditions[J]. Robot, 2011,33(3):292-298. (in Chinese)
- [3] Scharstein D, Szeliski R, Zabin R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[C]//Proceedings of IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision. Kauai, HI: IEEE, 2001:131-140.
- [4] Einecke N, Eggert J. A two-stage correlation method for stereoscopic depth estimation[C]//Proceedings of International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications. Sydney, NSW: IEEE, 2010:227-234.
- [5] Nalpantidis L, Gasteratos A. Biologically and psychophysically inspired adaptive support weights algorithm for stereo correspondence[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010,58(5):457-464.
- [6] Zabih R, Woodfill J. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence[C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision. Stockholm, Sweden: [s. n.], 1994:151-158.
- [7] Mei X, Sun X, Zhou M C, et al. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. Barcelona: IEEE, 2011:467-474.
- [8] Humenberger M, Engelke T, Kubinger W. A census-based stereo vision algorithm using modified semi-global matching and plane-fitting to improve matching quality [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. San Francisco, USA: IEEE, 2010:77-84.
- [9] Chang X F, Zhou Z, Wang L, et al. Real-time accurate stereo matching using modified two-pass aggregation and winner-take-all guided dynamic programming[C]//Proceedings of International Conference on 3D Imaging,

Modeling, Process, Visualization and Transmission, Hangzhou: IEEE, 2011;73-79.

- [10] Papadakis N, Caselles V. Multi-label depth estimation for graph cuts stereo problems[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2010,38(1):70-82.
- [11] Yang Q X, Wang L, Ahuja N. A constant-space belief propagation algorithm for stereo matching[C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, USA: IEEE, 2010;1458-1465.

- [12] Hirschmuller H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information [J]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005,2:807-814.
- [13] Nalpantidis L, Gasteratos A. Stereo vision for robotic applications in the presence of non-ideal lighting conditions[J]. Image and Vision Computing, 2010,28(6):940-951.

(责任编辑:赵业玲)

(上接第 684 页)

- [7] Hayya J C, Harrison T P, He X J. The impact of stochastic lead time reduction on inventory cost under order crossover[J]. European Journal of Operational Research, 2011,211(1):274-281.
- [8] Gumus A T, Guneri A F. A multi-echelon inventory management framework for stochastic and fuzzy supply chains[J]. Expert Systems with Applications, 2009,36(3):5565-5575.
- [9] 阮旻智,李庆民,彭英武,等. 任意结构系统的备件满足率模型及优化方法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(8):1799-1803.
- Ruan Minzhi, Li Qingmin, Peng Yingwu, et al. Model of spare parts fill rate for system of various structures and optimization method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011,33(8):1799-1803. (in Chinese)
- [10] 霍佳震,李虎. 零备件库存多点转运的批量订货模型与

算法[J]. 系统工程理论与实践,2007,27(12):62-67.

- Huo Jiazhen, Li Hu. Batch ordering policy of multi-location spare parts inventory system with emergency lateral transshipments[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2007,27(12):62-67. (in Chinese)
- [11] 阮旻智,李庆民,彭英武,等. 基于体系保障度的装备备件三级库存方案优化[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(7):1623-1630.
- Ruan Minzhi, Li Qingmin, Peng Yingwu, et al. Optimization of three-echelon inventory project for equipment spare parts based on system support degree[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2012,32(7):1623-1630. (in Chinese)
- [12] Svoronos A, Zipkin P. Estimating the performance of multi-level inventory systems [J]. Operations Research, 1988,36(1):57-72.

(责任编辑:孙竹凤)