

基于图像分割的改进立体匹配算法

何欣荣, 张 刚, 董建园

(西安建筑科技大学 建筑设计研究院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 为解决边界模糊区域和低纹理区域易出现误匹配的问题, 研究了基于图像分割的改进立体匹配算法. 首先利用均值平移算法(Meanshift)分割参考图像, 然后利用自适应加权自适应相异算法(ASW-SelfAd)计算初始视差, 再利用奇异值分解算法(SVD)拟合视差平面, 最后利用改进的聚类算法合并相邻图像分割区域, 并利用协同算法优化能量函数以细化视差图. 实验结果表明, 该改进算法不仅能缩短匹配时间, 提高匹配精度, 而且在低纹理区域、视差不连续区域和遮挡区域也能准确匹配.

关键词: 图像分割; 立体匹配; 聚类

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)12-0061-06

Improved Stereo Matching Algorithm Based on Image Segmentation

HE Xin-rong, ZHANG Gang, DONG Jian-yuan

(Architectural Design and Research Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to solve the problem of fuzzy boundary and low texture regions prone to mismatching, this paper studied stereo matching algorithm based on image segmentation. The first step of the algorithm employs the mean-shift algorithm to segment the reference image. Then, it's followed by the use of Adaptive Support Weighted Self-Adaptation dissimilarity algorithm (ASW-SelfAd) for the estimation of initial disparity. The third step is the application of Singular Value Decomposition (SVD) in solving the robust disparity plane fitting. Lastly, we apply improved clustering algorithm to merge the neighboring segments, and refine the disparity map by the new energy function. Matching experiments show that this method can not only improve the matching speed and accuracy, but also be an exact match in textureless regions, disparity discontinuous boundaries and occluded portions.

Key words: image segmentation; stereo matching; clustering

1 引言

如何获取稠密视差图是计算机视觉中一个极其重要和具有挑战性的问题, 它对许多应用领域而言, 都是一个关键步骤, 如视觉监控, 机器人导航, 虚拟现实和三维环境重建等^[1].

立体视觉是指由多个不同视点拍摄到的图像中的二维信息恢复出现实场景中的三维信息的方法. 立体视觉是在视差的基础上, 利用两个或多个摄像机与目标物体间的三角约束关系来求解目标物体的

空间坐标. 因此, 立体视觉中最关键的问题是如何在图像对中找到匹配点对, 而立体匹配算法恰恰是用来进行对应点搜索.

立体匹配算法的种类繁多, 本文着重研究其中的图割算法. 图割算法理论于 2001 年由 Tao 等人提出的^[2], 其将匹配问题转化为能量最低化问题, 是目前公认的性能最优的全局匹配算法之一. Tao 给出的图割算法主要存在以下三个问题: (1) 低纹理区域内初始匹配点的计算不准确; (2) 针对所有分割区域计算求模板参数的思想欠妥当; (3) 评价函数的计

收稿日期: 2014-03-17; 修回日期: 2014-05-09

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2013JM8016)

算量大. 这些导致了图割算法在低纹理区域、视差不连续区域和遮挡区域匹配效果不佳, 而且计算量大, 实时性差. 针对图割算法存在的上述不足, 本文提出新的改进算法来解决此问题. 文中为了确保用于分割的像素集的可靠性, 提出了以下三条筛选原则来剔除异常值: 相互一致性检查, 可靠区域判断和视差距离计算.

2 相关研究

立体匹配算法大体上分两类, 一类是基于区域、特征、相位等局部约束的立体匹配算法, 另一类是基于图像分割 (GC)、置信传播 (BP)^[3]、动态规划 (DP)^[4] 等全局约束的立体匹配算法. 现将各算法特性进行对比, 结果如表 1 所示.

表 1 匹配算法分类

匹配算法	算法描述
区域匹配	在一定范围内搜索最大相似性
局部匹配算法	特征匹配 对可靠的特征 (如角点、边缘等) 进行匹配
	相位匹配 寻找具有相同或相似相位信息的像点进行匹配
图像分割匹配	把视差确定为图中最大流的最小割问题
全局匹配算法	置信传播匹配 将视差计算问题转换成最大后验概率估计问题
	动态规划匹配 为扫描线的视差确定一条最优路径

3 立体匹配算法

基于图像分割的改进立体匹配算法大体上由彩色图像分割、初始视差图、视差平面估计和合并图像分割区域以及视差图获取等几部分组成, 其算法流程图如图 1 所示.

3.1 彩色图像分割

该算法是基于区域分割原理的, 因此, 算法的第一步就是将参考图像划分为若干个具有单一颜色或灰度的独立区域. 颜色分割算法存在两个假设前提: 其一是区域范围内视差变化平滑, 其二是视差突变只发生在边界上^[5-6]. 本文中采用均值平移算法分割图像以满足这两个假设, 其可行性已由 Comaniciu 和 Meer 证明. 均值平移算法是一种利用概率分布的梯度寻找分布峰值的非参数估计方法, 它能以较快的速度将图像中每一个像素归类到相应的密度模式下, 从而实现聚类.

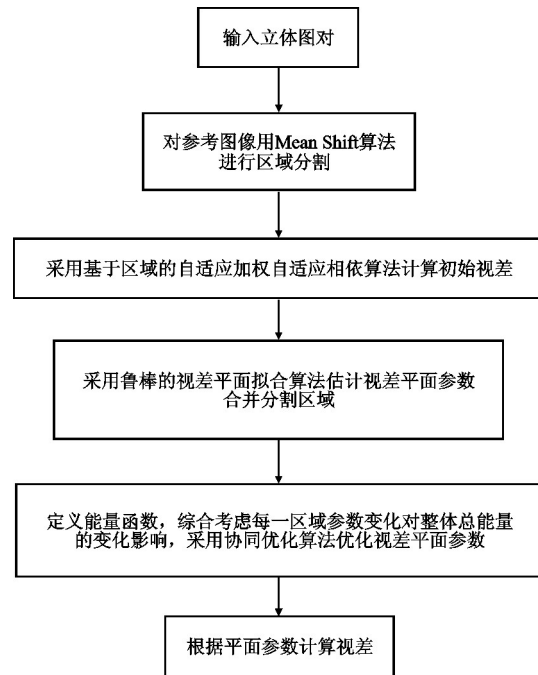


图 1 改进立体匹配算法流程图

3.2 初始视差图

初始视差图是为图像分割区域的合并做准备的, 其利用局部匹配算法得到结果. 局部匹配方法多种多样, 包括有: 区域匹配法、梯度匹配法、特征匹配法等. 文中选用的是自适应加权自适应相异算法 (ASW-SelfAd). 每个像素的权重 $w(x, y, d)$ 与其像素坐标 (x, y) 和相应视差 d 有关, 其值是该像素点与中央像素点欧氏距离和色差的二维高斯函数值. 高斯权重函数的搜索窗口是固定宽度的, 因此, 它可以被认为是一个固定值, 可以只计算一次, 并用于所有窗口.

$$w(x, y, d) = \exp\left(-\left(\frac{d_g}{r_g} + \frac{d_c}{r_c}\right)\right) \quad (1)$$

式中, d_g 是该像素点到中央像素点的欧氏距离, d_c 是该像素点与中央像素点的色差, r_g 、 r_c 是算法固定参数.

自适应加权自适应相异算法可定义为

$$\text{SelfAd}(x, y, d) = (1 - t) | I(x, y) - I(x + d, y) | + t (| \nabla_x I(x, y) - \nabla_x I(x + d, y) | + | \nabla_y I(x, y) - \nabla_y I(x + d, y) |) \quad (2)$$

式中, t 是权重值, I 和 I' 分别代表左、右两幅图像的强度.

ASW-SelfAd 局部匹配成本函数定义如下:

$$C_{\text{data}}(i, j, d) = \sum_{(i, j) \in N(i, j)} w(i, j, d) \text{SelfAd}(x, y, d) \quad (3)$$

式中, $N(i, j)$ 是像素坐标 (x, y) 周围 5×5 的中心窗口. 像素坐标为 (x, y) 的初始视差是运用赢家通吃方法(WTA)得到的使匹配成本最小化的视差.

3.3 视差平面估计和合并图像分割区域

彩色图像分割后, 研究主体由整幅图像变为图像分割区域, 使得初始视差的计算更加准确. 由于将原属于一个模板的区域分割成若干个独立的区域, 使得整个匹配算法的精度降低, 运算量增大, 因此需要把这类分割区域进行合并. 区域合并时遵循一条原则, 即可合并的区域必然具有相似的视差平面模型. 视差平面估计与分割区域合并的过程如下.

3.3.1 视差平面拟合

在分割区域内不存在视差突变的前提下, 分割区域内各像素点的视差值与其坐标值之间必然存在某种函数关系, 即各点深度信息可以建模表示. Tao^[7]给出了从初始视差到视差平面拟合的具体描述, 任意分割区域都可以建模表示为

$$d\{(x, y)\} = ax + by + c \quad (4)$$

式中, a, b, c 是平面参数, d 是像素坐标为 (x, y) 的点的相应视差. 分割区域内线性系统的关系式为 $\mathbf{A}(a, b, c)^T = \mathbf{B}$, 这里, 矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 i 行向量为 $[x_i, y_i, 1]$, 矩阵 $\mathbf{B}$ 的第 i 行元素为 $d(x_i, y_i)$. 因此, 线性系统的关系式可以修正为: $\mathbf{A}^T \mathbf{A} [a, b, c]^T = \mathbf{A}^T \mathbf{B}$, 具体表达式如下:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m y_i^2 & \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m y_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i d_i \\ \sum_{i=1}^m y_i d_i \\ \sum_{i=1}^m d_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

为了得到精确的视差平面参数值 (a, b, c) , 运用奇异值分解算法(SVD)求解最小二乘方程:

$$[a, b, c]^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^+ \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (6)$$

式中, $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^+$ 是 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的伪逆矩阵, $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^+$ 的奇异值分解结果如下:

$$\begin{aligned} \text{SVD}(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) &= \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T = \\ &[u_1, u_2, \dots, u_m] \begin{bmatrix} D_0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [v_1, v_2, \dots, v_n]^T \quad (7) \\ (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^+ &= \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T = \\ &[v_1, v_2, \dots, v_m] \begin{bmatrix} D_0^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [u_1, u_2, \dots, u_n]^T \end{aligned}$$

式中, 矩阵 u_i 特征方程 $\mathbf{A}^T \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^2$ 的特征向量, $d = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq 0$, σ_i^2 是矩阵 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^2$ 的非零特征值, 或者 σ_i 是矩阵 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^2$ 的非零奇异值, 矩阵 v_i 是特征方程 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^2$ 的特征向量.

然而, 众所周知的是, 最小二乘法对异常值是非常敏感的. 异常值将导致视差拟合结果的错误, 也可能干扰到平面估计. 因此, 为了尽量减少这种错误, 我们根据以下原则来过滤掉这些异常值. 假设集合 U 是分割区域内所有像素的集合, U_r 是可靠像素集.

相互一致性检查要求计算左、右视差图, 通过此检查可以得到可靠像素集, 并筛选出遮挡像素和往往导致视差估计不可靠的低纹理区域. D_L 是从左图像到右图像的视差集, 而 D_R 从右图像到左图像的视差集, 即:

$$|D_L(x_L) - D_R(x_L - D_L(x_L))| < 1 \quad (8)$$

如果像素视差满足式(8), 则这些像素可以被认为是可靠的像素. 反之, 将其作为遮挡像素.

在此之后, 需要制定一个规则来判断区域是否是可靠, 即:

$$\rho > \gamma \quad (9)$$

式中, ρ 是分割区域内不可靠像素点个数占总像素个数的比例, γ (通常为 0.5) 是一个恒定的阈值.

如果分割区域满足式(9), 则该区域可以被认为是不可靠的, 这表示该区域内缺乏足够的数据来支撑可靠的平面估计, 因此, 可以跳过这些小区域, 反之亦然.

通过上述步骤筛选完异常值后, 计算初始视差与拟合视差平面间的距离, 计算式表示如下:

$$|d_i - (ax_i + by_i + c)| \leq t_{\text{outlier}} \quad (10)$$

式中, t_{outlier} 是阈值 (通常为 10^{-4}). 只有计算距离小于阈值的像素点才可以被认为是可靠像素, 因此可靠像素集 U_r 的产生过程如图 2 所示.

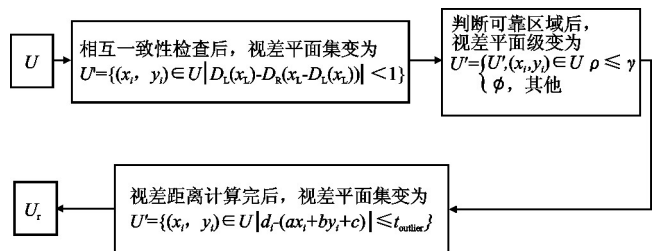


图2 可靠像素集 U_r 的产生过程图

经过以上三个步骤, 不断迭代计算视差平面参

数直到满足式(11):

$$e^{(|a-a'|+|b-b'|+|c-c'|)} > \epsilon \quad (11)$$

式中, a', b', c' 是新的视差平面参数, a, b, c 是在前面迭代过程中得到的视差平面参数, ϵ 是收敛阈值, 其通常被设置为 0.99.

图 3 是视差平面拟合算法的流程图, 视差平面参数的估计方法描述如下:

(1) 输入的分割图像.

(2) 根据式(8)检查每个像素视差的相互一致性, 并筛选出分割区域内的遮挡像素.

(3) 判断式(9)的可靠性, 如果可靠则转步骤(4), 否则转步骤(6).

(4) 利用奇异值分解算法(SVD)求取视差参数, 按式(10)计算视差距离, 并实时更新视差值.

(5) 循环执行步骤(4)直到迭代条件(式(11))得以满足.

(6) 如果所有分割区域的视差平面参数都已计算得到, 则终止, 否则, 返回到步骤(1).

经过以上步骤得到的新视差平面参数鲁棒性更强, 能够有效抑制噪声的同时, 有利于得到更高的匹配精度.

3.3.2 聚类

视差平面拟合完后, 下一步应考虑邻近平面间的相互关系如何, 聚类的相似性度量规则应该怎样定义, 以及如何利用聚类算法将这些分割区域合并. 相邻平面间的几何关系, 有平行关系和相交关系之分, 被用于确定是否合并这两个平面. 文献[8]给出了相邻平面间平行和相交关系的定义.

S_i 表示第 i 个分割区域, 其对应的视差平面为 $P_i = \{a_i, b_i, c_i\}$, 其中 a_i, b_i, c_i 为视差平面参数. 因此, 其临近的分割区域集合表示如下:

$$N_i = \{S_j \mid S_i \cap S_j \neq \emptyset, i, j = 1, \dots, n\} \quad (12)$$

式中, N_i 是第 i 个临近的分割区域集合, S_i 是一个分割平面.

定义 $\theta_{\angle A, B}$ 为两相交平面间的夹角, 而 d_{distance} 为两平行平面间的垂直距离. 两相交平面间夹角关系有两种: 一是 $\theta_{\angle A, B} \leq 90^\circ$, 二是 $\theta_{\angle A, B} > 90^\circ$, 如图 4.

从上述的定义和分析可知, 利用高斯函数定义的相似性度量规则如下:

$$\pi = \begin{cases} e^{-\theta}, & \text{if } \theta_{\angle A, B} \leq 90^\circ \\ e^{-(180^\circ - \theta)}, & \text{if } \theta_{\angle A, B} > 90^\circ \\ e^{-d_{\text{distance}}}, & \text{if } A \parallel B \end{cases} \quad (13)$$

给定一个阈值 λ (通常为 0.99). 如果 $\pi > \lambda$, 则

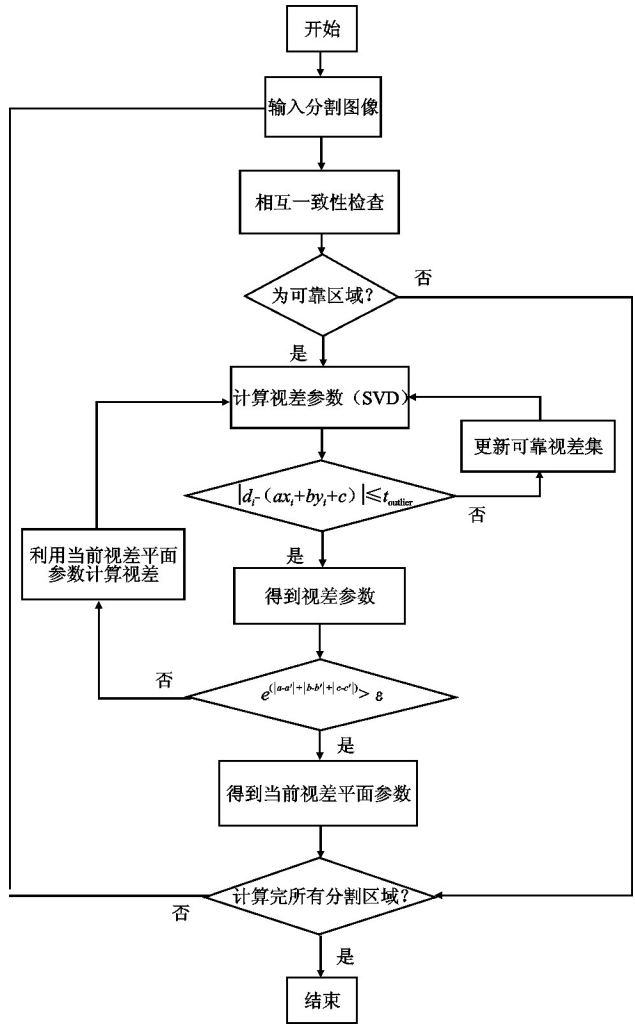


图 3 视差平面拟合算法的流程图

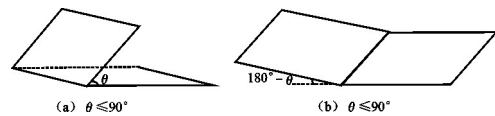


图 4 两平面间夹角示意图

认为这两个分割区域相同, 可以合并.

为了能在视差平面拟合完后精确估计视差值, 构造了新的能量函数, 将视差优化的问题转化为求解匹配能量最小化的问题. 对任意分割区域 $S \in R$, 其相应的视差平面 $f(s) \in D$, 其中, R 是参考图像, D 是视差平面的集合, 那么, 构造全局视差函数, 其定义式为:

$$E(f) = E_d(f) + E_{\text{occ}}(f) + E_{\text{sm}}(f) \quad (14)$$

式中, $E(f)$ 是整体能量函数, $E_d(f)$ 是数据成本函数, $E_{\text{occ}}(f)$ 是遮挡像素惩罚函数, $E_{\text{sm}}(f)$ 是平滑惩罚函数.

数据能量函数是所有分割区域局部匹配成本的

和,而任意分割区域 S 的局部匹配成本又是该区域内所有可靠像素匹配成本的和,其定义式如下:

$$C(s, f(s)) = \sum_{(x, y) \in U_r} c_{\text{data}}(x, y, d) \quad (15)$$

式中, $c_{\text{data}}(x, y, d)$ 的定义在前文中已给出, U_r 是可靠像素的集合.

$$E_d(f) = \sum_{S \in R} C(s, f(s)) \quad (16)$$

遮挡能量函数根据遮挡像素数目分配惩罚量,遮挡能量函数的定义式如下:

$$E_{\text{occ}}(f) = \sum_{S \in R} \omega_{\text{occ}} \cdot N_{\text{occ}} \quad (17)$$

ω_{occ} 是遮挡惩罚系数, N_{occ} 是分割区域内检测到的不可靠像素个数.

平滑能量函数用来判断相邻分割区域间的相互关系,其定义式如下:

$$E_{\text{sm}}(f) = \sum_{((s_i, s_j) \in S_N | f(s_i) \neq f(s_j))} \xi_{\text{disc}}(s_i, s_j) \quad (18)$$

式中, S_N 所有相邻分割区域的集合, s_i, s_j 是相邻分割区域, $\xi_{\text{disc}}(s_i, s_j)$ 是不连续惩罚系数,其值大小与共同边界长度和平均颜色相似度有关.

通常情况下,采用模拟退火法、动态规划法、松弛法、遗传算法等来求解全局匹配能量最小化的问题,进行视差图优化.但这几种优化算法往往难以控制收敛,因此本文中选择文献[9]中给出的协同优化算法进行优化,这样可以有效地抑制区域间的能量冲突,避免不完善初始视差估计的影响,得到更加稠密可靠的匹配视差图^[10-12].

4 实验结果

为验证本文算法的有效性,用 VC++6.0 编程实现算法功能,对从 Middlebury 网址上下载来的筑波图、维纳斯图、圆锥图和泰迪图进行立体匹配,效果图如图 5 所示,其中,第一列是原图,第二列是真实背景,第三列是匹配视差图,第四列是坏点图.实验中,算法的涉及参数设置如下:

$$\omega_{\text{occ}} = 5, \xi_{\text{disc}} = 5, \gamma_{\text{segment}} = 0.9, \gamma_g = 64, \gamma_c = 36.$$

由表 2 可以看出,改进算法相比原分割算法不仅缩短了匹配时间,而且降低了匹配错误率,即提高了匹配精度.由表 3 可以看出,将该算法与自适应 BP 算法、亚像素双 BP 算法和原分割算法相比,尤其在低纹理区域、视差不连续区域和遮挡区域匹配优势明显,表中的数据对应该算法下该区域的匹配错误百分比.

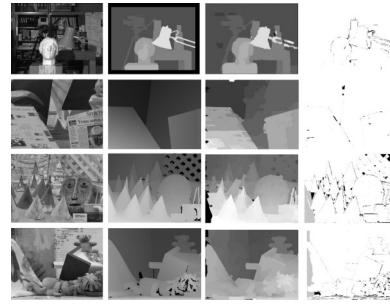


图 5 立体匹配效果图

表 2 原分割算法和改进算法计算时间、匹配错误率比较

图名	大小	计算时间/ms		匹配错误率/%	
		原分割	改进算法	原分割	改进算法
筑波图	704×576	3325.7	154.6	6.543	5.8
维纳斯图	640×480	2 568.9	91.7	4.8	4.4
圆锥图	384×288	1 939.2	69.5	5.108	4.8
泰迪图	506×380	3 085.1	142.1	7.6	7.3

表 3 不同算法的立体评价效果

算法	筑波图			维纳斯图		
	遮挡	所有	视差不连续	遮挡	所有	视差不连续
自适应 BP	1.11	1.37	5.84	0.20	0.27	1.72
亚像素双 BP	1.24	1.76	5.98	0.12	0.46	1.74
原分割	1.47	1.82	7.86	0.19	0.31	2.44
改进算法	0.89	1.21	5.79	0.10	0.21	1.44

算法	圆锥图			泰迪图		
	遮挡	所有	视差不连续	遮挡	所有	视差不连续
自适应 BP	2.48	7.92	7.32	4.22	7.06	11.8
亚像素双 BP	2.93	8.73	7.91	3.45	8.38	10.0
原分割	4.99	6.89	8.66	4.25	6.51	10.9
改进算法	2.73	5.78	7.04	4.02	5.55	9.2

5 结束语

本文提出了一种基于图像分割的改进立体匹配算法^[13-15],该算法相比其他匹配算法缩短了匹配时间,提高了匹配精度,尤其在低纹理区域、视差不连续区域和遮挡区域匹配优势明显.

参考文献:

- [1] Lazaros Nalpantidis, Georgios Ch. Sirakoulis, Antonios Gasteratos. A dense stereo correspondence algorithm for hardware implementation with enhanced disparity selection[C]//SETN 2008. Greece, 2008:365-370.
- [2] Hong L., Chen G. Segment-based stereo matching using graph cuts[C]//CVPR. Washington, 2004:74-81.

- [3] Jian sun, Zheng Nanning, Shum Heungyeung. Stereo matching using belief propagation[J]. PAMI, 2003, 25(7):787-800.
- [4] Bobick A, Intille S. Large occlusion stereo[J]. Int. J. Comput. Vis, 1999, 33(3):181-200.
- [5] Zhang Y, Kambhamettu C. Stereo matching with segmentation-based cooperation[C] // European Conference on Computer Vision, Copenhagen, 2002:556-571.
- [6] Ke Q, Kanade T. A subspace approach to layer extraction[C] // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, USA, Hawaii, 2001:255-262.
- [7] Tao H, Sawhney H S, Kumar R. A global matching framework for stereo computation[J]. ICCV, 2001(1): 532-539.
- [8] Daolei Wang, Kah Bin Lim. A new segment-based stereo matching using graphcuts[C] // 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT), China: Chengdu, 2010(5): 410-416.
- [9] 郑志刚, 汪增福. 基于区域间协同优化的立体匹配算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(5):469-477.
- [10] 徐青, 王敏东, 李鹏, 等. 基于图像分割的快速立体匹配算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(5):209-211.
- [11] 尹传历, 刘冬梅, 宋建中. 改进的基于图像分割的立体匹配算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(6):808-812.
- [12] 蒋菱. 基于迭代均值漂移滤波图像分割新算法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(9):147-150.
- [13] 颜轲, 万国伟, 李思坤. 基于图像分割的立体匹配算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(1):175-178.
- [14] 刘亚竹, 李逵, 狄红卫. 一种改进的基于图割的立体匹配算法[J]. 微型机与应用, 2012, 31(7):43-45.
- [15] 徐海祥, 朱光喜, 张翔, 等. 基于支持向量机方法的多目标图像分割[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(4): 5-10.

作者简介:

何欣荣 女, (1987-), 硕士, 助理工程师. 研究方向为图像处理、计算机视觉、建筑电气. E-mail: summer19871111@126.com.

张刚 男, (1987-), 硕士, 助理工程师. 研究方向钻探机.

董建园 男, (1971-), 副教授, 硕士生导师. 研究方向为计算机检测与控制、数字图像处理与可视化技术、嵌入式系统及应用.

(上接第 60 页)

- [6] 胡永东, 吴国新, 钱宁, 等. WiMAX 网络中自相似呼叫接纳控制算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(9): 8-14.
- [7] Li Xiangyang. Multicast capacity of wireless Ad Hoc networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(3): 950-962.
- [8] Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1995, 13

(6): 953-962.

作者简介:

罗晓娟 女, (1975-), 硕士, 副教授. 研究方向为计算机网络与算法. E-mail: luoxj1978@163.com.

李希勇 男, (1978-), 硕士, 副教授. 研究方向为计算机网络技术、云计算等.

张义良 男, (1978-), 硕士, 讲师. 研究方向为计算机网络.