

## 基于改进 SGM 的立木视差图生成方法

尹萍<sup>1,2,3</sup>, 徐爱俊<sup>1,2,3</sup>, 尹建新<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>浙江农林大学数学与计算机科学学院, 浙江 杭州 311300;<sup>2</sup>浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311300;<sup>3</sup>浙江农林大学林业感知技术与智能装备国家林业与草局重点实验室, 浙江 杭州 311300

**摘要** 立木视差图是立木因子测量、三维重建的基础。结合立木图像特征,为解决自然环境下立木图像结构复杂、光照干扰大等因素导致获取高质量立木视差图困难的问题,提出一种基于改进的 semi-global matching (SGM) 算法的立木视差图生成方法。针对 SGM 算法在图像纹理较弱和光照不稳定时生成的视差图效果不佳的问题,提出改进 Census 变换,该变换将 Census 中心像素值用周围像素的中值替代,提高初始代价的可靠性;在代价聚合过程中使用均值漂移算法进行图像分割,使算法具有较强鲁棒性的同时还有效降低了对重复和弱纹理区域的误匹配率。最后,分别采用自适应窗口填充无效值、中值滤波剔除不可靠视差值,使视差不连续的区域也能获得准确的视差值。在 Middlebury 公共数据集上对所提方法进行验证,所提方法的平均误匹配率约为 5.23%,较传统的 semi-global block matching (SGBM) 算法、Boyer-Moore (BM) 算法、SGM 算法,分别提升 9.47 个百分点、9.345 个百分点、8.96 个百分点。自然环境下,所提改进的 SGM 算法可生成较高精确度的立木视差图。

**关键词** 立木视差图; SGM; 图像分割; 视差图优化; 自适应窗口

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1815017

## Generating Disparity Image of Standing Trees Based on Improved SGM

Yin Ping<sup>1,2,3</sup>, Xu Aijun<sup>1,2,3</sup>, Yin Jianxin<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>School of Mathematics and Computer Science, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;<sup>2</sup>Zhejiang Provincial Key Laboratory of Forestry Intelligent Monitoring and Information Technology, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Forestry Sensing Technology and Intelligent Engineering, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China

**Abstract** A standing tree disparity image is the basis of tree factor measurement and 3D reconstruction. However, one challenge is its difficulty in obtaining high-quality standing tree disparity image due to the complex structure of standing tree images and large illumination interference in the natural environment. Combined with the characteristics of standing tree images, in this paper, we propose a method for generating a standing tree disparity image using improved semi-global matching (SGM) algorithm. To solve the problem of poor disparity image generated using the SGM algorithm when the image texture and illuminations are weak and unstable, respectively, we employ an improved Census transform to replace the Census center pixel value with the median of the surrounding pixels to improve the reliability of the initial cost. Furthermore, the mean shift algorithm is used for image segmentation in the process of cost aggregation to enhance the robustness of the algorithm and effectively reduce the false matching rate for repeated and weak texture regions. Finally, we adopt the adaptive window to fill in invalid values and apply a median filter to eliminate unreliable parallax values, so that the area with discontinuous disparity can also obtain accurate disparity value. The proposed method was verified on the Middlebury public dataset. The results show that the average mismatch rate of the proposed method is approximately 5.23%, compared with the traditional semi-global block matching (SGBM), Boyer-Moore (BM), and SGM algorithms with improvements of 9.47 percentage points, 9.345 percentage points, and 8.96 percentage points, respectively. In the natural environment, the proposed SGM algorithm can be used to generate a standing tree disparity image with higher accuracy.

**Key words** tree disparity image; semi-global matching; image segmentation; disparity image optimization; adaptive window

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-09-10; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(31670641)、浙江省公益项目(LGN21C160004)

通信作者: \*19970008@zafu.edu.cn

# 1 引言

视差图是深度图获取和三维重建的基础<sup>[1-5]</sup>,广泛应用于多视觉图像的结构恢复、三维图像表面数据的采集、数字表面模型和数字高程模型的制作等,在航天航空、农林业、移动机器人等领域亦广泛应用<sup>[6-8]</sup>。受真实场景下光照不稳定、纹理结构相似等因素影响,视差图容易出现误匹配问题,严重制约视差图获取方式的应用范围。因此,提高真实场景下视差图的生成质量是立体匹配研究的一个热点,现有的视差图获取方式可分为传统方法和深度学习方法。

传统方法是通过改进经典的立体匹配算法提高视差图质量的。孙延坤等<sup>[9]</sup>为了提高视差图的匹配效率和精度,提出绝对误差与 Census 变化相结合的方法,克服了复杂场景下的错误匹配率高的问题。周昊昊等<sup>[10]</sup>提出一种改进匹配代价计算和路径优化策略的立体匹配算法,以提高匹配效率。文献<sup>[11-12]</sup>提出改进的 Census 与梯度融合的方法,该方法具有良好的稳健性与实用性。文献<sup>[13]</sup>提出基于改进的 Census 变换的图像分割立体匹配算法,该算法在弱纹理和重复纹理区域有较强的鲁棒性。刘越等<sup>[14]</sup>提出基于混合优化方法的立体匹配算法,采用模拟退火的鸽群优化算法求解优化问题,从而实现视差阈值的自适应调节,较好地克服了局部和全局寻优方法易受初值影响且收敛速度慢的缺点。王楠<sup>[15]</sup>采用 sum of absolute differences (SAD) 和 Census 相结合的方法,利用图像边缘检测算子加入自适应选择匹配模板,解决了匹配模板对匹配精度的影响。欧永东等<sup>[16]</sup>提出一种基于改进的 Census、融合颜色和梯度信息的方法来计算匹配代价,利用最小生成树聚合,最终获得高精度的视差图。孙丽等<sup>[17]</sup>为了提高 semi-global matching (SGM) 算法在视差边缘的精度,提出一种分段成本聚合的视差优化方法。Shi 等<sup>[18]</sup>提出基于自适应地面控制点 (AdaptGCP) 的高精度立体匹配方案,该方案有效地消除了不可靠像素的冗余和干扰信息,为高精度立体匹配提供了新的思路。文献<sup>[19]</sup>采用 DDL 算法作为叠加的基础模型,生成高质量的视差图。

近年来,深度学习发展迅猛,深受国内外学者的青睐,利用卷积神经网络 (CNN) 进行立体匹配,取得了不错的效果。Pang 等<sup>[20]</sup>提出改进的卷积神经网络,装备额外的上卷积模块来推进 DisNet,从而使视差图像具有更多的细节信息。文献<sup>[21]</sup>利用扩张卷积建立一个背景金字塔特征提取模块,该模块聚集了更多的特征背景信息,使网络在弱纹理区域更健壮,网络在很大程度上保留局部结构细节深度不连续的区域。文献<sup>[22]</sup>提出 PWC-Net 方法,使用当前的光流估计来扭

曲第二幅图像的 CNN 特征,然后利用第一幅图像的扭曲特征和特征构造成本量,再由 CNN 进行处理来估计光流,效果优于一般的光流法。Bapat 等<sup>[23]</sup>为提高并行性和适应性,提出一种新颖的边缘感知优化框架,该框架比目前的技术速度快。曾军英等<sup>[24]</sup>为了达到视差图精确度和实时性的实际要求,提出自适应网络匹配算法。肖进胜等<sup>[25-26]</sup>提出一种改进的卷积神经网络与深度学习相结合的方法,该方法既减少了算法运行时间,又保证了视差图的精度。Rao 等<sup>[27]</sup>利用注意机制和语义信息进行立体匹配,采用几何细化模块对视差图进行细化,进一步提高了性能。Ruf 等<sup>[28]</sup>提出了一种嵌入式 CUDA GPU 的算法,通过使用大规模并行计算,利用 NEON 的内在特性,该算法实现了实时立体处理。文献<sup>[29]</sup>提出基于三维卷积神经网络 (3D CNN) 结构的深度学习立体匹配方法,该方法大幅度降低了立体匹配的计算成本。

真实场景下采集的图像受自然光照、噪声等影响较大,生成视差图较为复杂和困难。而立木生长环境更为复杂,受光照、遮挡、纹理等众多因素影响,获取立木视差图富有挑战性。立木视差图包含立木对象与相对深度信息,可为立木因子测量、三维重建等提供参考。传统方法误匹配率较高,制约着后续应用的范围。深度学习方法通过大量学习可获得较高质量的视差图,但由于在立木视差图方面缺少大量的训练样本,该方法不适用于复杂立木结构。为提高立木视差图的生成质量,本文对传统 SGM 算法<sup>[30]</sup>进行了改进:首先将 Census 中心像素值用周围像素的中值替代;然后根据颜色、纹理利用均值漂移算法对立木图像进行分割,选择效果最优的 8 路径代价聚合,采用赢家通吃法则 (WTA) 选出最优视差值;最后通过自适应窗口和中值滤波优化视差图中的空洞和失真点,生成高质量的立木视差图。

## 2 材料与方 法

### 2.1 立木图像采集

使用便携式 USB3.0 双目视觉相机在浙江农林大学自然环境下拍摄试验图像,共采集 5 种不同品种的立木,为便于研究,图像分辨率统一设置为 1280 pixel × 720 pixel。所拍摄的立木树种为丝兰、卫矛、木槿等,树高为 1~3 m。因品种不同,高矮存在差异,故拍摄距离为 1.5~3 m,以保证拍摄目标立木位于中心位置且完整。所采集的立木图像具有以下特征:包含背景立木、土壤、草丛、道路等噪声;存在立木被遮挡、纹理强弱不同和高度不一致等情况;均在晴天非均匀光照下(有较强的光照干扰)拍摄。图 1 为采集的 5 种不同品种的立木,均为立木左图像。



图 1 5 种品种的立木  
Fig. 1 Five species of tree

### 2.2 双目标定

双目标定是立体匹配中一个不可缺少的步骤,其准确性直接影响视差图的生成效果。标定过程是通过计算内在参数(相机焦距 $f_x$ 和 $f_y$ 、光心位置坐标、畸变系数)和外参(相机相对于 3D 世界原点的旋转  $R$  和平移  $T$ )纠正镜头畸变。本文采用张氏经典棋盘格标定法<sup>[31]</sup>,选取  $12 \times 9$  格、 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  的专业标定板以消除标定板反光现象及表面粗糙对标定精度的影响。把相机固定在标定板正前方,拍摄 20 张不同角度、相同距离的照片且拍摄过程使棋盘格处于图像的中心,无

遮挡。

### 2.3 立木视差图生成方法

立木视差图生成方法流程如图 2 所示,包括立木图像预处理、视差图获取、视差图优化和视差图输出 4 个步骤。首先,对立体矫正后的初始图像进行噪声消除和图像颜色均衡预处理;然后采用改进的 Census 视差计算,结合图像分割的代价聚合和赢家通吃法则进行视差计算,生成初始视差图;再采用抛物线拟合、自适应窗口、中值滤波进行视差图优化;最后,输出优化的视差图。

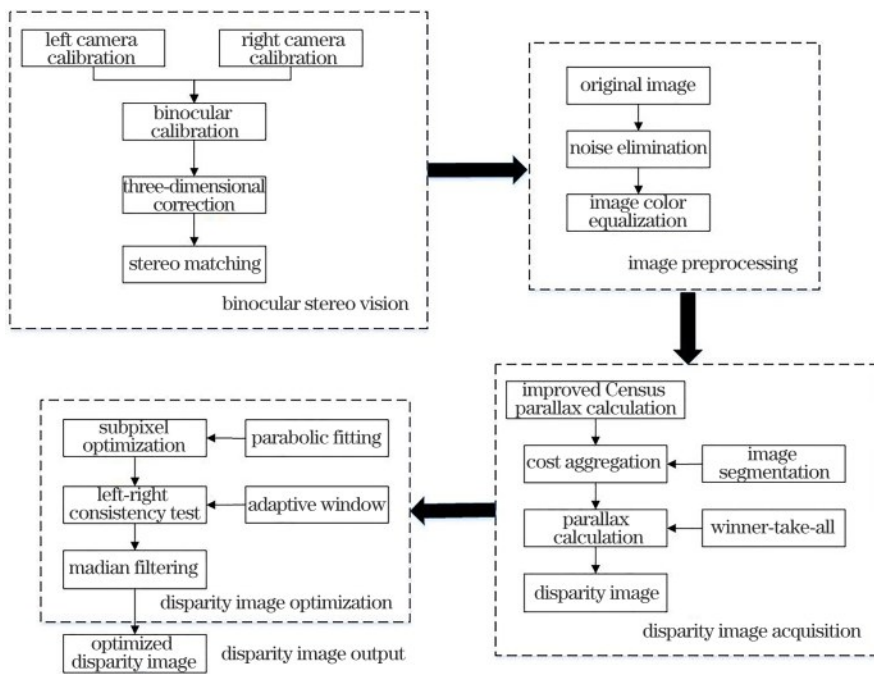


图 2 立木视差图生成方法流程

Fig. 2 Flowchart of tree disparity image generation method

## 3 改进的 SGM 算法

双目相机拍摄的立木图像存在一些问题,如辐射失真、低纹理区域等问题,这些问题在很大程度上影响视差图的质量。所提方法将 Census 窗口中心像

素值用周围像素的中值替代,从而减少噪声导致误匹配率较高的情况;将图像分割算法与代价聚合相结合,解决了传统 SGM 算法在视差变化的地方采用固定的惩罚值导致误匹配率较高的问题;利用赢家通吃法则进行视差计算,根据左右一致性检测消除

噪声和遮挡带来的错误视差,通过自适应窗口进行立木视差图的优化,进而采用中值滤波剔除无效视差值。

### 3.1 视差图获取

#### 3.1.1 改进 Census 的代价计算

传统的 Census 算法过于依赖中心像素,对光照不敏感,受噪声影响较大,紧紧靠邻接像素与中心像素的比较大小取值,误差较大,虽然鲁棒性较强,但是在纹理弱、光照充足时损失了一定的立木细节信息。将 Census 窗口中心像素点的灰度值用周围 8 个像素点灰度值的中值代替,中值计算过程如图 3 所示。

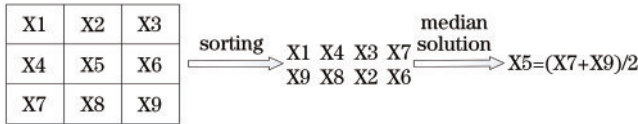


图 3 中值计算

Fig. 3 Median calculation

中值用 X5 表示,当 X5 为整数时,表示中心像素对应的值;否则对 X5 四舍五入后取整,作为中心像素的值。相比传统 Census 比较窗口像素值大小,求解中值法抗干扰能力强,计算结果准确。中值计算后,采用汉

明距离计算初始匹配代价值。

$$C(x, y, d) = \text{Hamming}[\text{str}_L(x, y), \text{str}_R(x - d, y)], \quad (1)$$

式中:  $C(x, y, d)$  代表左右图像两个字符位串中不同位的个数,该值越小,说明匹配效果越好;  $\text{str}_L$  为左图像像素点  $(x, y)$  的 Census 变换码;  $\text{str}_R(x - d, y)$  为左图像与右图像相差  $d$  距离的 Census 变换码。

#### 3.1.2 结合图像分割的代价聚合

##### 1) 均值偏移算法

均值偏移算法将复杂的背景粗略化进而提取整体信息,通过反复迭代实现立木图像分割,从而实现不同区域的划分,具有实现容易、计算量小、分割准确等显著优点。立木像素标签是否相同取决于立木的颜色和纹理区域是否相同,以此作为立木分割的依据,使分割后的立木图像保留更多的边缘细节信息。为便于研究,设置相同的分割阈值均为 30。

原有 SGM 算法对视差变化区域使用固定的惩罚系数。而均值偏移图像分割算法对立木图像的不同区域进行准确分割,并根据是否为同一区域给出不同的惩罚系数,可有效减小代价聚合过程在弱纹理、遮挡区域的误匹配率。均值偏移算法与能量函数相结合,得到的新能量函数公式为

$$E(D) = \sum_p \left\{ C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} \mu P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \right\}, \quad (2)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_1 & \text{same area} \\ \mu_2 & \text{different area} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $D$  代表视差图;  $E(D)$  代表视差图对应的能量函数;  $p, q$  均为像素点,  $q$  为  $p$  的周围像素点;  $C(p, D_p)$  代表匹配代价函数;  $D_p$  为  $p$  点对应的视差值,  $D_q$  为  $q$  点对应的视差值;  $P_1, P_2$  为周围像素点视差对应的惩罚因子,  $P_1$  小于  $P_2$ ;  $T[\cdot]$  为判定函数,根据公式是否成立,判断为 0 还是 1;  $\mu_1$  为处于相同区域的惩罚系数,  $\mu_2$  为处于不同区域的惩罚系数。

##### 2) 代价聚合

改进的 Census 变换再通过多路径聚合,由高信噪比传播至信噪比低、匹配效果不好的区域,最后使图像代价值均能正确反映像素之间真正的相关性。路径数量不同,聚合的方向也不相同。常见的有 4 路径聚合、8 路径聚合和 16 路径聚合,不同路径下的效果有明显的差别,多条路径聚合明显优于单一路径聚合。针对立木背景复杂、轮廓边缘不清晰,本文采取 8 路径聚合,可获得相对最佳的立木轮廓,有效提高了算法匹配的正确率。图 4 为代价聚合的示意图。

路径聚合公式为

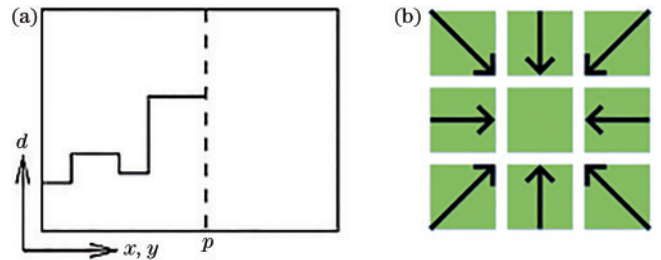


图 4 代价聚合。(a) 最小路径代价; (b) 8 条路径聚合

Fig. 4 Cost aggregation. (a) Minimum path cost; (b) 8-path aggregation

$$L_r(p, d) = C(p, d) + \min \left\{ \begin{array}{l} L_r(p - r, d) \\ L_r(p - r, d - 1) + p_1 \\ L_r(p - r, d + 1) + p_1 \\ \min_i L_r(p - r, i) + p_2 \end{array} \right\} - \min_i L_r(p - r, i), \quad (4)$$

式中:  $r$  代表路径;  $C$  是代价计算值;  $L$  是聚合代价值。左右路径的情况下  $p - r$  就是  $p$  左侧(从左到右聚合)或者右侧(从右到左聚合)的相邻像素;  $L_r(p - r, d)$  表示路径内一个像素视差为  $d$  时的聚合代价值;  $L_r(p - r, d -$

1) 表示路径内一个像素视差为  $d-1$  时的聚合代价值;  $L_r(p-r, d+1)$  表示路径内一个像素视差为  $d+1$  时的聚合代价值;  $\min_i L_r(p-r, i)$  表示路径内一个像素所有代价值的最小值。总路径代价值  $S$  的计算公式为

$$S(p, d) = \sum_r L_r(p, d). \quad (5)$$

### 3.1.3 视差计算

采用赢家通吃法则(WTA)进行视差计算,即在立木图像生成的所有视差值中,选取最小匹配代价对应的视差值作为最佳视差,也被称为胜者。图5为赢家通吃算法示意图。

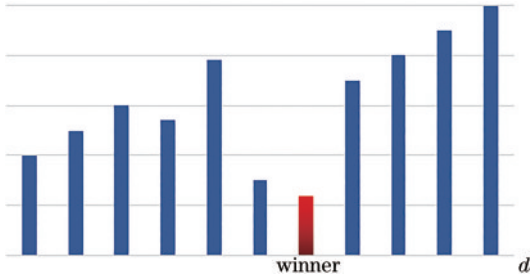


图5 赢家通吃算法示意图

Fig. 5 Schematic of winner-take-all algorithm

## 3.2 视差图优化

### 3.2.1 抛物线拟合

WTA算法局限于立木图像整体的像素精度计算,忽略了子像素精度,为保证立木视差图更加接近真实场景,故采用抛物线拟合的方法提高子像素的精度。抛物线拟合的方法原理是由最佳视差值( $d$ )和前后两个视差值( $d-1, d+1$ )拟合出一条一元二次抛物线,抛物线的最低点作为子像素视差值。

### 3.2.2 自适应窗口视差优化

为解决立木视差图因遮挡导致误匹配率高的问题,通过左右一致性检验(left-right consistency test)无效点,根据周围像素的视差值填充无效点,提出了一种自适应窗口方法对视差图无效点进行填充修复,并采用中值滤波(median filtering)方法剔除噪声点和平滑图像。无效点分为失真点和空洞点两种,无效点的类型不同,处理方法也不相同。

$$D_L(x, y) = D_R[x - D_L(x, y), y], \quad (6)$$

式中:  $D_L(x, y)$  表示左视图某点视差值;  $D_R(x, y)$  表示右视图某点视差值。若式(6)不成立并且视差不为0,则判定为失真点;反之,则判定为空洞点。若检测出点  $Y$  为失真点,则以  $Y$  点为中心,与周围8个像素点视差值进行比较,寻找出最大视差值与最小视差值,并对二者求平均。失真点填充表达式为

$$\begin{cases} M_{\min} = \min(Z) \\ M_{\max} = \max(Z) \\ M_{\text{avg}} = \frac{M_{\min} + M_{\max}}{2} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} D_L(Y) = M_{\min} & D_L(Y) < M_{\min} \\ D_L(Y) = M_{\text{avg}} & M_{\min} \leq D_L(Y) \leq M_{\max} \\ D_L(Y) = M_{\max} & D_L(Y) > M_{\max} \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $Z$  表示失真点相邻视差值的集合;  $M_{\min}$  为最小视差值,  $M_{\max}$  为最大视差值,  $M_{\text{avg}}$  为平均视差值。若  $D_L(Y) < M_{\min}$ , 则失真点视差以最小值填充; 若  $M_{\min} \leq D_L(Y) \leq M_{\max}$ , 失真点视差以平均值填充; 若  $D_L(Y) > M_{\max}$ , 则失真点视差以最大值填充。

若检测出点  $Y$  为空洞点, 分别从  $x, y$  两方向进行遍历, 寻找视差值不为0的点  $Y_x$  和  $Y_y$ , 构造一个以空洞点  $Y(x, y)$  的坐标为起点,  $d_x$  为宽,  $d_y$  为高的矩阵  $N_{d_x \times d_y}$ , 形成一个自适应窗口矩阵  $N$ 。

$$N = \begin{pmatrix} Y & \cdots & Y_y \\ \vdots & & \vdots \\ Y_x & \cdots & (x', y') \end{pmatrix}. \quad (9)$$

空洞填充的表达式为

$$\begin{cases} S = \sum_{\substack{i, j \in M \\ i \geq d_x, j \geq d_y}} D_L[N(i, j)] \\ n = \sum_{\substack{i, j \in M \\ i \geq d_x, j \geq d_y}} \{D_L[N(i, j)] > 0\} = 1 \\ S_{\text{avg}} = \frac{S}{n} \\ D_L(x, y) = S_{\text{avg}} \end{cases}, \quad (10)$$

式中:  $S$  为矩阵  $N$  对应元素总和,  $S_{\text{avg}}$  为平均值;  $n$  为矩阵非0元素个数。直到检测完所有像素点, 并进行视差优化, 最终采用中值滤波平滑图像。

## 4 结果与分析

为了验证所提算法的匹配准确率和实时性, 开发与测试的软硬件平台均使用 Lenovo 310S 通用计算机 Intel (R) Core(TM) i5-7200U CPU @2.50 GHz 2.70 GHz、win10 系统和 Visual Studio2017+opencv3.1 以及 Matlab 2018a, C++ 语言实现。实验参数设置如表1所示, 其中  $\delta_d$  为视差阈值。

表1 参数设置

Table 1 Algorithm parameters in this paper

Parameter	Census size	$P_1$	$P_2$	$r$	Maximum parallax value	$\mu_1$	$\mu_2$	$\delta_d$
Value	3×3	10	150	8	64	0.8	1	1

### 4.1 双目标定结果

双目标定结果如表2所示。

根据相机标定结果, 对拍摄的立木图像对进行立体矫正。矫正后对应空间的搜索空间从2D缩小到1D, 对应点限制在矫正后图像。图6为立木图像矫正结果, 图中的横直线是由极线排列的, 这一步纠正了镜头失真, 补偿了图像边界周围的鱼眼效果, 以确保所有

表 2 双目相机标定结果  
Table 2 Calibration results of binocular camera

Camera parameter	Left camera	Right camera
Focal length ( $f_x, f_y$ )	(1139.78060, 1140.06362)	(1139.24564, 1139.93787)
Optical center position coordinate	(679.74223, 377.37711)	(683.14170, 380.91245)
Distortion coefficient	(0.08655, -0.22816, 0.00233, -0.00617, 0)	(0.08655, -0.22816, 0.00223, -0.00617, 0)
$R$	[-0.01300, -0.00469, -0.00061]	
$T$	[-60.73141, 0.16710, 0.42228]	

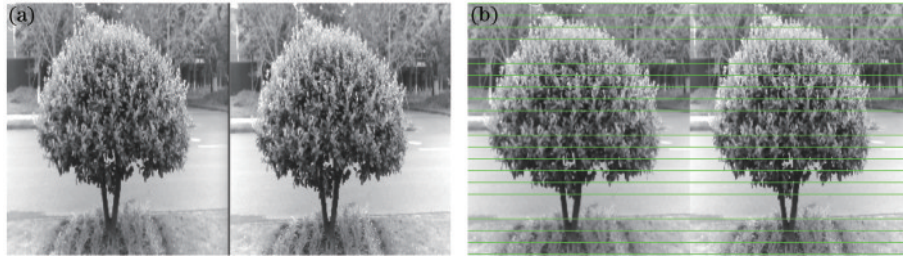


图 6 立木图像矫正结果。(a)矫正前;(b)矫正后  
Fig.6 Correction results of tree image. (a) Before correction; (b) after correction

的极线都是直线。

#### 4.2 立木图像预处理结果

对立体矫正后的立木图像进行预处理,剔除模糊图像,最大程度减小相机镜头引起的图像噪声或图像

变形。利用高斯滤波去除噪声,采用直方图均衡化进一步增强立木图像颜色,提升暴露过多或不足的立木细节信息。图 7 为立木图像预处理前后的效果对比。

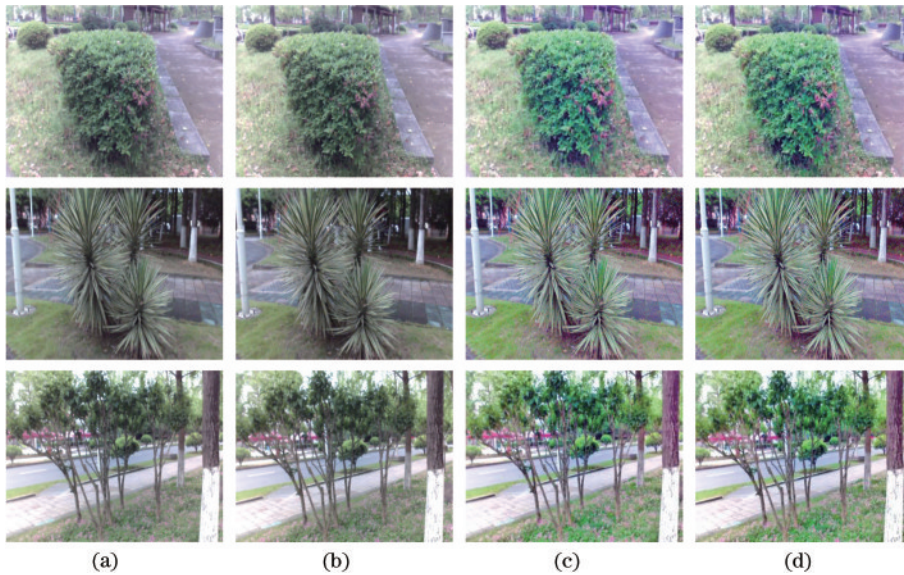


图 7 直方图均衡化预处理前后的结果。(a)立木左图像;(b)立木右图像;(c)预处理后的立木左图像;(d)预处理后的立木右图像  
Fig. 7 Histogram equalization results before and after preprocessing. (a) Tree left image; (b) tree right image; (c) tree left image after preprocessing; (d) tree right image after preprocessing

#### 4.3 立木视差图结果与分析

为了验证改进 SGM 算法的可行性和普适性,分别对在自然条件下拍摄的立木图像和 Middlebury 标准数据集<sup>[32]</sup>上提供的图像进行实验比较。将改进 SGM 算法与经典算法 BM<sup>[33]</sup>、SGBM<sup>[34]</sup>、SGM 进行比较,并从主观和客观两方面进行评价。图 8 为 4 种算法生成的立木视差图的主观效果。

从图 8 可以看出:传统的 SGM 算法生成的立木视

差图没有明显的分层,边缘轮廓不清晰,噪声点较多,此方法高度依赖中心像素的灰度值,在复杂的立木背景下,获得的有效信息较少,导致生成的视差图有些稀疏,因而立木视差图的结构特征不清晰;所提算法通过改进 Census 进行代价计算,结合图像分割进行代价聚合可获得更多有效信息,在复杂背景下仍可获得精细的立木视差图。视觉效果上,所提算法明显优于三种经典算法,层次分明,立木轮廓清晰,且保留了更多的细节

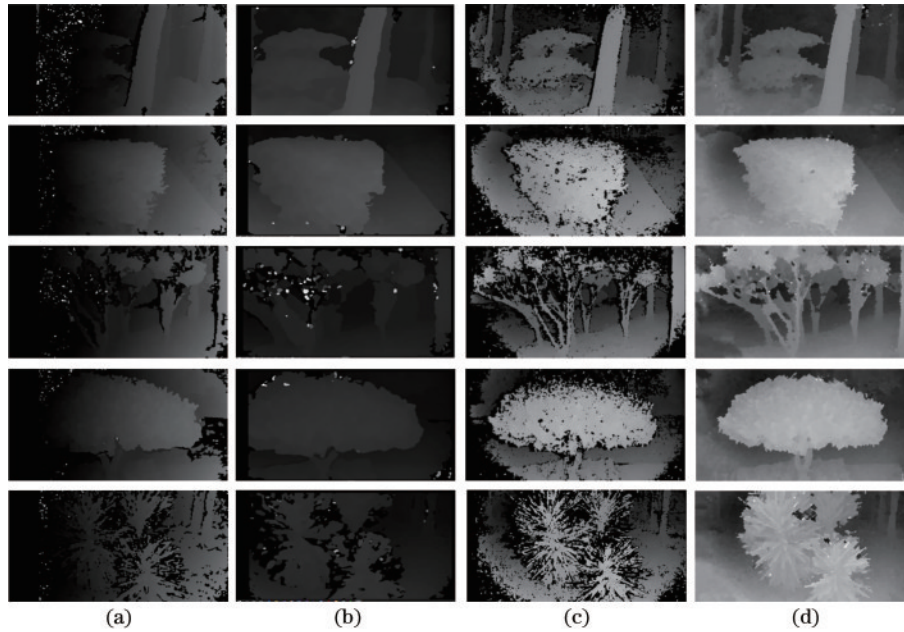


图 8 不同算法生成的视差图。(a) SGBM算法;(b) BM算法;(c) SGM算法;(d)所提算法

Fig. 8 Disparity images generated by different algorithms. (a) SGBM algorithm; (b) BM algorithm; (c) SGM algorithm; (d) proposed algorithm

信息,剔除了较多的噪声点和失真点,细节效果更佳。

为从客观角度进一步评价所提算法的准确性,采用 Middlebury 标准数据集平台提供的图像对经典 SGBM、BM、SGM 算法进行视差图评价与测试,并与所提算法生成的结果进行误匹配率对比。误匹配率是衡量视差图质量好坏的标准,值越低,则生成的视差图越接近真实视差图,误匹配率的公式为

$$B = \frac{1}{N} \sum_{(x,y)} |d_c(x,y) - d_i(x,y)| > \delta_d, \quad (11)$$

式中: $N$ 为图像像素总数; $d_c(x,y)$ 为计算像素 $(x,y)$ 的视差值, $d_i(x,y)$ 为实际视差值; $\delta_d$ 为错误匹配设置的阈值,一般为 1,若匹配视差值与实际视差值之间的差值小于设置的阈值 1,则为正确匹配,否则为错误匹配。

图 9 为所提算法生成的视差图与真实视差图的比较。表 3 为传统 Census 与改进后的 Census 测试结果,表 4 为不同算法在 Middlebury 标准数据集上的测评结果。

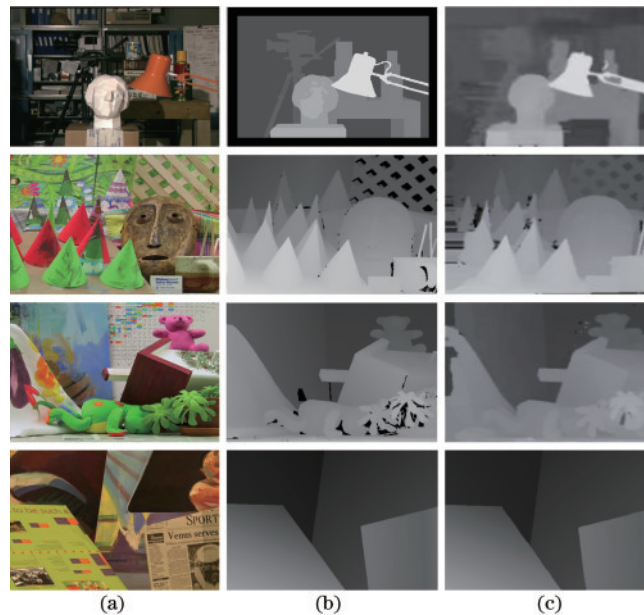


图 9 所提算法生成视差图与真实视差图的对比。(a)原始左图像;(b)真实视差图;(c)所提算法生成的视差图

Fig. 9 Comparison between the disparity image generated by the proposed algorithm and the real disparity image. (a) Original left image; (b) real disparity image; (c) disparity image generated by the proposed algorithm

表 3 匹配代价测试结果  
Table 3 Matching cost test result

Algorithm	False match rate / %	Time / s
Traditional Census	14.19	4.7
Improve Census	11.23	4.9

表 4 不同算法在 Middlebury 标准数据集的误匹配率  
Table 4 False match rate of different algorithms on Middlebury standard dataset unit: %

Algorithm	Tuskuba	Teddy	Cones	Venus	Average
SGBM	12.16	22.43	14.00	10.22	14.70
BM	14.23	21.45	10.93	11.69	14.575
SGM	12.78	19.46	15.61	8.92	14.19
Method in Ref. [11]	6.61	6.24	4.21	5.45	5.6275
Method in Ref. [16]	1.79	11.51	8.51	0.43	5.56
Method in Ref. [35]	3.25	15.7	9.76	2.83	7.89
Proposed algorithm	8.13	6.01	4.06	2.71	5.23

由表 3 可知,改进后的 Census 变换比传统 Census 变换的平均误匹配率低 2.96 个百分点,提高了匹配精度,但是因为算法中加入了中值计算,导致时间比传统 Census 变换多 0.2 s。由表 4 可知,SGBM 误匹配率最高,所提算法的误匹配率最低。所提算法相对于 SGBM 算法,误匹配率降低了 9.47 个百分点;相对于 BM 算法,降低了 9.345 个百分点;相对于 SGM 算法,降低了 8.96 个百分点。在弱纹理和遮挡区域较严重的图像对 (Teddy 和 Cones) 中,所提算法视差效果较好,与其他三种文献方法相比,平均误匹配率最低,具有良好的整体性能。误匹配率降低的主要原因之一是所提算法利用改进的 Census 进行代价计算,形成高可靠初始视差值;二是采用均值偏移算法先进行立木分割再进行代价聚合,分割边界明确,减小了在弱纹理和视差不连续区域的误匹配率;三是采用自适应窗口填充黑洞点和剔除无效点,使立体匹配结果更加精确。因此,所提算法不仅具有高精确性,而且在弱纹理、遮挡以及边缘区域具有普适性,可生成高质量的立木视差图。

## 5 结 论

针对立体匹配获得视差图的精度和实时性无法满足实际应用以及立木生长环境复杂、遮挡较严重等问题,提出一种改进的 SGM 立体匹配算法。在软硬件配置和拍摄条件均相同的情况下,改进的 SGM 算法比 BM、SGM 和 SGBM 三种算法的平均误匹配率至少提高了 8.96 个百分点,在弱纹理、视差不连续区域的立体匹配效果较好。所提改进算法可提高立木场景视差图获取的灵活性和便捷性,解决了目前立木视差图获取较困难的问题,可为立木深度图获取、三维重建等提供参考。改进的 SGM 算法能够适用于不同复杂程度的场景,运行效率较高,可生成层次分明、边缘清晰的立木视差图。

## 参 考 文 献

- [1] 劳彩莲, 杨瀚, 李鹏, 等. 基于消费级深度相机的玉米植株三维重建[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 222-228.  
Lao C L, Yang H, Li P, et al. 3D reconstruction of maize plants based on consumer depth camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 222-228.
- [2] 梁秀英, 周风燃, 陈欢, 等. 基于运动恢复结构的玉米植株三维重建与性状提取[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 209-219.  
Liang X Y, Zhou F R, Chen H, et al. Three-dimensional maize plants reconstruction and traits extraction based on structure from motion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 209-219.
- [3] 吴军, 李鑫, 刘少禹, 等. 基于后方定位的飞机蒙皮损伤视觉检测全局三维重建方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115002.  
Wu J, Li X, Liu S Y, et al. Global three-dimensional reconstruction method for visual detection of aircraft skin damage based on rear positioning[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115002.
- [4] 郭清达, 全燕鸣. 采用空间投影的深度图像点云分割[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1815001.  
Guo Q D, Quan Y M. Depth image point cloud segmentation using spatial projection[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1815001.
- [5] 张子健, 程效军, 曹宇杰, 等. 结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1110001.  
Zhang Z J, Cheng X J, Cao Y J, et al. Application of 3D reconstruction of relic sites combined with laser and vision point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1110001.
- [6] 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.
- [7] 董天阳, 陈东方, 杨丽锦, 等. 树木结构层次细化的立体树木图像构建[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(9): 1382-1392.  
Dong T Y, Chen D F, Yang L J, et al. Construction of 3D tree image with hierarchical tree structures[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 23(9): 1382-1392.
- [8] 刘金成, 冯仲科, 杨立岩, 等. 实时动态多功能双目立体摄影测树仪设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 61-68.  
Liu J C, Feng Z K, Yang L Y, et al. Design of real-time kinematic multi-functional binocular stereo-photogrammetric dendrometer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 61-68.
- [9] 孙延坤, 李彩林, 王佳文, 等. 融合绝对误差和与 Census 变换的双目立体图像匹配算法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12035-12041.  
Sun Y K, Li C L, Wang J W, et al. Binocular stereo



- image matching algorithm combining sum of absolute differences and Census transformation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(29): 12035-12041.
- [10] 周昊昊, 王晓旭, 王景隆, 等. 基于改进代价计算和路径优化策略的匹配算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 1615006.  
Zhou H H, Wang X X, Wang J L, et al. Matching algorithm based on improved cost calculation and path optimization strategy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(16): 1615006.
- [11] 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.
- [12] 范海瑞, 杨帆, 潘旭冉, 等. 一种改进 Census 变换与梯度融合的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0215006.  
Fan H R, Yang F, Pan X R, et al. Stereo matching algorithm for improved Census transform and gradient fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0215006.
- [13] Lu B L, Sun L, Yu L N, et al. An improved graph cut algorithm in stereo matching[J]. *Displays*, 2021, 69: 102052.
- [14] 刘越, 仲小清, 付金宇, 等. 基于混合优化方法的立体匹配算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(12): 2692-2699.  
Liu Y, Zhong X Q, Fu J Y, et al. Stereo matching algorithm based on hybrid optimization method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(12): 2692-2699.
- [15] 王楠. SAD 与 Census 融合的双目匹配算法研究及 FPGA 实现[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.  
Wang N. Research and FPGA implementation of binocular matching algorithm based on SAD and Census fusion[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [16] 欧永东, 谢小鹏. 基于改进 Census 变换的多特性立体匹配算法[J]. *计算机工程与科学*, 2020, 42(6): 1030-1036.  
Ou Y D, Xie X P. A multi-feature stereo matching algorithm based on improved Census transform[J]. *Computer Engineering & Science*, 2020, 42(6): 1030-1036.
- [17] 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.
- [18] Shi C B, Wang G J, Yin X W, et al. High-accuracy stereo matching based on adaptive ground control points [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(4): 1412-1423.
- [19] Yao P, Feng J Q. Stacking learning with coalesced cost filtering for accurate stereo matching[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2021, 78: 103169.
- [20] Pang J H, Sun W X, Ren J S, et al. Cascade residual learning: a two-stage convolutional neural network for stereo matching[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2017: 887-895.
- [21] Kang J H, Chen L, Deng F, et al. Context pyramidal network for stereo matching regularized by disparity gradients[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 157: 201-215.
- [22] Sun D Q, Yang X D, Liu M Y, et al. PWC-Net: CNNs for optical flow using pyramid, warping, and cost volume [C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 18-23, 2018, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE Press, 2018: 8934-8943.
- [23] Bapat A, Frahm J M. The domain transform solver[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 6007-6016.
- [24] 曾军英, 冯武林, 秦传波, 等. 实时自适应的立体匹配网络算法[J]. *信号处理*, 2019, 35(5): 843-849.  
Zeng J Y, Feng W L, Qin C B, et al. Real-time adaptation for stereo matching[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(5): 843-849.
- [25] 肖进胜, 田红, 邹文涛, 等. 基于深度卷积神经网络的双目立体视觉匹配算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815017.  
Xiao J S, Tian H, Zou W T, et al. Stereo matching based on convolutional neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815017.
- [26] 黄东振, 赵沁, 刘华巍, 等. 基于改进卷积神经网络的稠密视差图提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 121004.  
Huang D Z, Zhao Q, Liu H W, et al. Dense disparity map extraction method based on improved convolutional neural network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 121004.
- [27] Rao Z B, He M Y, Dai Y C, et al. NLCA-Net: a non-local context attention network for stereo matching[J]. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 2020, 9(1): e18.
- [28] Ruf B, Mohrs J, Weinmann M, et al. ReS2tAC: UAV-borne real-time SGM stereo optimized for embedded ARM and CUDA devices[J]. *Sensors*, 2021, 21(11): 3938.
- [29] 杜弘志, 张腾, 孙岩标, 等. 基于门控循环单元的立体匹配方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 1415001.  
Du H Z, Zhang T, Sun Y B, et al. Stereo matching method based on gated recurrent unit networks[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 1415001.
- [30] 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 (CVPR'05), June 20-25, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 807-814.
- [31] 刘艳, 李腾飞. 对张正友相机标定法的改进研究[J]. 光学技术, 2014, 40(6): 565-570.  
Liu Y, Li T F. Research of the improvement of Zhang's camera calibration method[J]. Optical Technique, 2014, 40(6): 565-570.
- [32] vision.middlebury.edu[EB/OL]. [2021-04-05]. <https://vision.middlebury.edu/stereo/>.
- [33] Rahim R, Ahmar A S, Ardyanti A P, et al. Visual approach of searching process using Boyer-Moore algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 930: 012001.
- [34] Spangenberg R, Langner T, Adfeldt S, et al. Large scale semi-global matching on the CPU[C]//2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, June 8-11, 2014, Dearborn, MI, USA. New York: IEEE Press, 2014: 195-201.
- [35] 郭鑫, 王延杰, 付东辉, 等. 三种测度融合的加权引导滤波匹配算法[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(6): 1044-1049.  
Guo X, Wang Y J, Fu D H, et al. A weight guided filtering matching algorithm combining three measures[J]. Computer Engineering & Science, 2019, 41(6): 1044-1049.