

基于改进 Census 变换和自适应支持域的立体匹配

陈映光¹, 周佩^{1,2*}, 朱江平^{1,2}, 应三丛^{1,2}

¹四川大学视觉合成图形图像国防重点学科实验室, 四川 成都 610065;

²四川大学计算机学院, 四川 成都 610065

摘要 为了提升局部立体匹配的精度,提出了一种基于改进 Census 变换和自适应支持域的立体匹配算法。针对传统 Census 变换算法对中心点处的采样敏感、误匹配率高的问题,结合中心点左右插值点的信息,提出了一种对采样不敏感的改进 Census 变换算法。在计算匹配代价阶段,将改进 Census 变换与彩色信息及 x 、 y 方向的梯度信息相融合以构建匹配代价;在代价聚合阶段,提出了基于改进引导滤波的交叉交叉法以构建自适应支持域并聚合代价;最后采用赢家通吃(WTA)策略计算视差,并通过多步细化得到最终视差图。实验结果表明,所提算法在 Middlebury 测试平台 4 组标准图像上的平均误匹配率为 4.92%,具有较高的精度和较好的适应性。

关键词 视觉光学; 立体匹配; Census 变换; 自适应支持域; 引导滤波

中图分类号 TN911.73

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1433002

Stereo Matching Based on Improved Census Transformation and Adaptive Support Region

Chen Yingguang¹, Zhou Pei^{1,2*}, Zhu Jiangping^{1,2}, Ying Sancong^{1,2}

¹National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

²College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract In order to improve the accuracy of local stereo matching, a stereo matching algorithm is proposed, which is based on improved Census transformation and adaptive support region. To solve the problem that the traditional Census transformation algorithm is sensitive to the sampling at a center point and has a high mismatching rate, this paper proposes an improved Census transformation algorithm which is insensitive to sampling by combining the information of the interpolation points at the left and right of a center point. In the stage of matching cost calculation, the improved Census transformation is combined with the color information and gradient information in x and y directions to construct the matching cost. In the stage of cost aggregation, a cross-based approach based on improved guided filtering is proposed to construct adaptive support regions and aggregate costs. Finally, the WTA strategy is used to calculate disparity, and the final disparity map is obtained through a multi-step refinement. The experimental results show that the algorithm proposed here has an average mismatch rate of 4.92% in four sets of standard images on the Middlebury test platform, indicating that it has high accuracy and good adaptability.

Key words visual optics; stereo matching; Census transformation; adaptive support region; guided filtering

OCIS codes 330.1400; 150.1135; 100.6890

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-10-28; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61901287)、四川省重点研发专项(2020YFG0306, 2020YFG0112, 2021YFG0195)、四川省重大科技专项(2019ZDZX0039, 2018GZDZX0029)

通信作者: *michille78@163.com

1 引言

立体匹配作为双目立体视觉的关键技术之一,是寻找同一场景下两幅立体图像中像素点对应关系的过程,被广泛应用于三维重建^[1]、虚拟现实、无人驾驶^[2]等领域,成为近年来计算机视觉中的研究热点。立体匹配算法主要分为全局算法、半全局算法和局部算法。全局算法通常需要构建一个全局能量函数,通过能量函数最小化来求取视差,主要有动态规划法^[3]、图割法^[4]、马尔可夫随机场算法^[5]和置信度传播算法^[6]等。这类算法虽然匹配精度较高,但是通常运算量较大,很难满足实时性需求。Hirschmüller^[7]通过使用一维路径聚合的方式来近视全局算法的二维最优化,提出了半全局算法,与全局算法相比,其计算效率更高且匹配效果相当。局部算法通过判断局部窗口内像素的相似性来选取视差,算法相对简单,匹配精度通常较前两种算法低,但实时性更好。Scharstein 等^[8]将立体匹配算法归纳为匹配代价计算、代价聚合、视差计算和视差细化等 4 个步骤。

匹配代价计算是在视差范围内针对两幅输入图像的对应像素计算相似性度量,主要包括绝对差(AD)、平方差(SD)、梯度、BT 代价^[9]、Census 变换、零均值归一化互相关^[10](ZNCC)等。其中,绝对差和平方差在高纹理区域表现较好,但在低纹理区域容易造成误匹配;梯度信息能够突显图像颜色不连续处的特征,但在颜色相似区域表现一般;BT 代价消除了采样因素造成的误差,但同时也减少了颜色特征的差异;Census 变换对光照不敏感,且在纹理区域有较好的准确度,但其忽略了颜色信息,容易在重复纹理区域造成误匹配;零均值归一化互相关在整体上有着较好的表现,但其计算过程相对复杂,在追求实时性的算法中较少使用。由于每种匹配代价都存在不足,学者们通过融合多种代价来取得更好的效果。Mei 等^[11]将 AD 和 Census 变换结合,提出了 AD-Census 代价;在此基础上,王云峰等^[12]结合邻域纹理的丰富度,提出了自适应权重的 AD-Census 代价;孔令寅等^[13]通过融合 AD、Census 变换和梯度来构造匹配代价,在一定程度上提升了立体匹配的精度。

由于单个像素匹配代价的信息量较少,因此匹配精度不高,而各像素间的视差存在着一定的连续性,往往需要将所在支持域内的匹配代价进行代价聚合,以提升匹配精度。支持域的选择是个难题,支

持域过小会使聚合代价的信息量小,从而导致误匹配率提升;支持域过大会导致图像边缘处的匹配精度降低。黄超等^[14]根据纹理的丰富度,自适应地设置了支持域的大小。Zhang 等^[15]结合邻域像素的颜色信息,提出了基于十字交叉的自适应支持域的构建方法。在此基础上,Mei 等^[11]改进了支持域的构建策略,提升了图像边界的处理能力。龚文彪等^[16]根据支持域内像素颜色和空间的相似性,设置了自适应权重,进一步提升了匹配的准确性。

视差计算是根据聚合后的代价来选择最优的视差值,目前最主要的方式是使用赢家通吃(WTA)策略,选择与最小的聚合代价对应的视差作为初始视差。而初始视差中的信息往往不够精确,需要通过视差细化的步骤来进行处理。视差细化主要是通过先验知识首先对初始视差中的异常信息进行判定和替换,然后对整体视差信息进行优化。

为了提升局部立体匹配算法的匹配精度,本文提出了一种基于改进 Census 变换和自适应支持域的局部立体匹配算法。在计算匹配代价阶段,提出了一种 Census 变换的改进方法,将其与 AD 和梯度进行融合以得到匹配代价;在代价聚合阶段,通过结合引导滤波和十字交叉法,提出了一种构建自适应支持域的方法,通过求和得到了聚合代价;最后,使用 WTA 策略和多步细化得到了最终视差图。

2 算法描述

2.1 匹配代价计算

针对传统 Census 变换的不足,本文提出了一种改进的 Census 变换方法,并将其与 AD 和梯度融合,充分利用图像的信息,得到了更为可靠的匹配代价。

2.1.1 改进的 Census 变换

Census 变换属于非参数算法的一种,以中心点的灰度为参考值,通过比较参考值与邻域窗口内其他点灰度的大小关系,得到一串由 0 和 1 编码而成的变换码,即

$$S_{CT}(p) = \bigotimes_{q \in N_p} \xi[I(p), I(q)], \quad (1)$$

式中: \bigotimes 为编码的连接符号; N_p 为以 p 点为中心的邻域窗口; q 为窗口 N_p 中的一点; $I(p)$ 和 $I(q)$ 分别为图像在 p 点和 q 点处的灰度值;编码函数 $\xi[I(p), I(q)]$ 定义为

$$\xi[I(p), I(q)] = \begin{cases} 1, & I(p) \geq I(q) \\ 0, & I(p) < I(q) \end{cases}. \quad (2)$$

Census 变换的匹配代价可由两个变换码的汉明距离计算得到,即

$$C_{\text{census}}(p, d) = \text{Hamming} [S_{\text{CT}}^L(p), S_{\text{CT}}^R(p - d)], \quad (3)$$

式中: $S_{\text{CT}}^L(p)$ 为左图中 p 点处的变换码; $S_{\text{CT}}^R(p - d)$ 为右图中视差为 d 时 p 点对应点的变换码。

由于 Census 变换只考虑中心点与邻域之间的大小关系,而不关心具体的灰度值,因此它对光照的变化不敏感,在低纹理区域也能有良好的表现。缺点是其过度依赖中心点的信息,鲁棒性较差。针对此问题,不少学者对其进行了改进。欧永东等^[17]通过对窗口内的像素进行加权求和,获得了参考值。Lee 等^[18]提出了一种带有噪声容限的三状态的 Census 变换。在此基础上,祝世平等^[19]用均值作为参考值。李大华等^[20]提出了一种多中心点融合监督的改进方式。

考虑到图像的强度会受到相机传感器采样的影响^[9],本文提出了一种改进的 Census 变换,其具有采样不敏感的特性。首先,需要计算中心点 x 方向的两个邻近插值点;然后,求出中心点和两个插值点中的最大值和最小值;最后,将邻域各个像素与这两个最大值和最小值相比较,用两个二进制位的编码表示它们之间的关系。改进后的编码函数 $\xi' [I(p), I(q)]$ 定义为

$$\xi' [I(p), I(q)] = \begin{cases} 10, & I(q) > I_{\max}(p) \\ 01, & I(q) < I_{\min}(p), \\ 00, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_{\max}(p)$ 和 $I_{\min}(p)$ 分别定义为

$$\begin{cases} I_{\max}(p) = \max [I(p), I_-(p), I_+(p)] \\ I_{\min}(p) = \min [I(p), I_-(p), I_+(p)] \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $I_-(p)$ 和 $I_+(p)$ 分别为中心点 p 的左右插值点的灰度值,定义为

$$\begin{cases} I_-(p) = \frac{I(p-1) + I(p)}{2} \\ I_+(p) = \frac{I(p) + I(p+1)}{2} \end{cases}. \quad (6)$$

图 1 对传统 Census 变换与改进 Census 变换进行了比较。传统 Census 变换根据邻域各点与中心点灰度值的大小,将邻域像素标记为两类,而改进 Census 变换在此基础上,能够自适应地判断与中心点相似的像素,并将其标记为第三类(标记为“00”)。

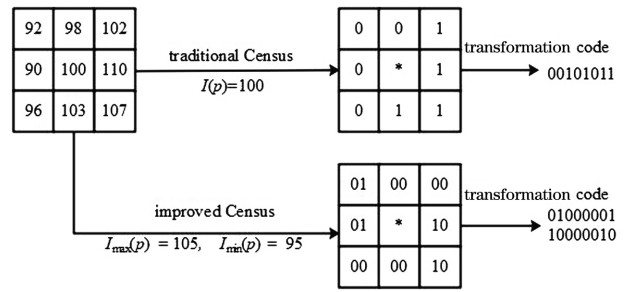


图 1 传统 Census 与改进 Census 的比较

Fig. 1 Comparison between traditional Census and improved Census

2.1.2 多代价融合

与灰度图像相比,彩色图像能展现更多的颜色信息。因此 AD 和梯度代价均使用红绿蓝(RGB)三通道的信息计算,表达式分别为

$$C_{\text{AD}}(p, d) = \frac{1}{3} \sum_{c=R,G,B} |I_c^L(p) - I_c^R(p - d)|, \quad (7)$$

$$C_{\text{grad}}(p, d) = \frac{1}{6} \sum_{c=R,G,B} |\nabla_x I_c^L(p) - \nabla_x I_c^R(p - d)| + \frac{1}{6} \sum_{c=R,G,B} |\nabla_y I_c^L(p) - \nabla_y I_c^R(p - d)|, \quad (8)$$

式中: $C_{\text{AD}}(p, d)$ 为 AD 代价; $C_{\text{grad}}(p, d)$ 为梯度代价; $I_c^L(p)$ 为左图 c 通道上 p 点的值; $I_c^R(p - d)$ 为右图 c 通道上视差为 d 时 p 点对应点的值; ∇_x 和 ∇_y 分别为 x 方向和 y 方向上的梯度运算。

将改进的 Census 变换、AD 和梯度代价融合,得到的匹配代价为

$$C(p, d) = \rho [C_{\text{census}}(p, d), \lambda_{\text{census}}] + \rho [C_{\text{AD}}(p, d), \lambda_{\text{AD}}] + \rho [C_{\text{grad}}(p, d), \lambda_{\text{grad}}], \quad (9)$$

式中: λ_{census} 、 λ_{AD} 和 λ_{grad} 分别为代价 $C_{\text{census}}(p, d)$ 、 $C_{\text{AD}}(p, d)$ 和 $C_{\text{grad}}(p, d)$ 的控制参数;融合函数 $\rho(C, \lambda)$ 的定义为

$$\rho(C, \lambda) = 1 - \exp\left(-\frac{C}{\lambda}\right), \quad (10)$$

式中: C 为融合的代价; λ 为控制参数。

2.2 代价聚合

十字交叉法^[11]构建的自适应支持域尽可能地包含邻域颜色近似的像素,这些像素往往具有相似的视差。而十字交叉法中臂长的展开易受噪声干扰,针对此问题,本文提出了一种改进的引导滤波算法以及基于改进引导滤波的十字交叉法以构建自适应支持域。将支持域内的匹配代价进行求和,得到聚合代价。

2.2.1 改进的引导滤波

引导滤波^[21]在引导图像和输入图像相同时,具

有保护边缘的图像平滑功能。设引导图像为 I , 输入图像为 P , 输出图像为 Q , 其计算过程为

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i P_i - \mu_k \bar{P}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad (11)$$

$$b_k = \bar{P}_k - a_k \mu_k, \quad (12)$$

$$Q_i = \left(\frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k \right) I_i + \left(\frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k \right), \quad (13)$$

式中: a_k 和 b_k 为线性系数; ω_k 和 ω_i 为中心点分别为 k 和 i 的窗口; I_i 、 P_i 和 Q_i 分别为图像 I 、图像 P 和图像 Q 在点 i 处的像素值; μ_k 为图像 I 在窗口 ω_k 内像素的平均值; \bar{P}_k 为图像 P 在窗口 ω_k 内像素的平均值; σ_k^2 为图像 I 在窗口 ω_k 内像素的方差; $|\omega|$ 为窗口 ω_k 的大小; ϵ 为防止求得的 a_k 过大所设的惩罚系数。

由于传统的引导滤波使用的惩罚系数 ϵ 是一个固定值, 而在亮度较高的窗口中, σ_k^2 的值偏大, 系数 ϵ 对 a_k 值的影响相对较小; 在亮度较低的窗口中, σ_k^2 的值偏小, 系数 ϵ 对 a_k 值的影响相对较大。因此, 在各个亮度不同的窗口中, 系数 ϵ 对 a_k 的惩罚强度不均衡, 导致引导滤波在亮度较低的区域边缘保持能力相对较弱。窗口的像素均值 \bar{P}_k 能反映局部图像的亮度, 本文将均值的平方 \bar{P}_k^2 作为惩罚系数 ϵ 的权重, 使惩罚项 $\bar{P}_k^2 \epsilon$ 对窗口亮度作出自适应的调整, 从而均衡各窗口的惩罚强度, 改进后的 a_k 计算公式为

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i P_i - \mu_k \bar{P}_k}{\sigma_k^2 + \bar{P}_k^2 \epsilon}. \quad (14)$$

2.2.2 基于改进引导滤波的十字交叉法

为了优化自适应支持域, 使十字交叉法的臂长展开不受噪声影响且又不破坏图像的边缘特征, 需要使用改进的引导滤波先对输入图像进行处理, 再结合滤波后的图像, 使用十字交叉法来构建自适应支持域。十字交叉法首先针对中心点 p , 从竖直方向扩展出两条支持臂 V_p^- 、 V_p^+ , 如图 2(a) 所示; 然后针对竖直支持臂上的各点 q 以及中心点 p , 从水平方向扩展出支持臂 H_q^- 、 H_q^+ 、 H_p^- 和 H_p^+ , 联合各个支持臂, 得到一个二维的自适应支持域 $R(p)$, 如图 2(b) 所示; 最后将支持域内各像素的匹配代价进行求和, 得到聚合后的代价 $C_A(p, d)$ 。

支持臂上的各点需要满足的规则为

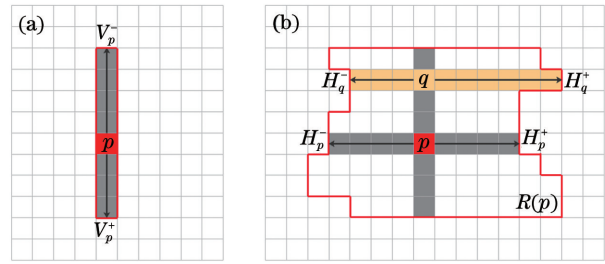


图 2 自适应支持域构建示意图。(a) 竖直支持臂; (b) 自适应支持域

Fig. 2 Schematic for construction of adaptive support region. (a) Vertical support arm; (b) adaptive support region

$$\begin{cases} D_C(p, p_i) < \tau_1 \text{ and } D_C(p, p_{i-1}) < \tau_1 \\ D_S(p, p_i) < L_1 \\ D_C(p, p_i) < \tau_2, \text{ if } D_S(p, p_i) > L_2 \end{cases}, \quad (15)$$

式中: p_i 为支持臂展开方向上的一点; p_{i-1} 为 p_i 的前一点; τ_1 、 τ_2 为颜色阈值; L_1 、 L_2 为距离阈值; $D_C(p, p_i) = \max_{c=R,G,B} |I_c(p) - I_c(p_i)|$; $D_S(p, p_i) = |p - p_i|$ 。

2.3 视差计算与细化

视差计算采用简单高效的 WTA 策略, 选择与最小聚合代价相对应的视差值作为初始视差, 表达式为

$$D(p) = \operatorname{argmin}_{d \in [0, d_{\max}]} [C_A(p, d)], \quad (16)$$

式中: d_{\max} 为最大视差。

对初始视差采用多步细化的方案, 其中包括左右一致性检测、迭代的支持域投票^[11]、异常点分类、亚像素求精以及中值滤波。

左右一致性检测对初始视差图中的各个点进行以下效验:

$$|D_L(p) - D_R[p - D_L(p)]| \leq \delta = 1, \quad (17)$$

式中: $D_L(p)$ 为左视差图中 p 点的值; $D_R[p - D_L(p)]$ 为右视差图中 p 点对应点的值; δ 为误差容限。将满足效验的点标记为有效点, 而其他点标记为异常点。

对于所有异常点, 使用迭代的支持域投票策略, 利用邻域信息进行插值。

$$\begin{cases} |R(p)| > \tau_n \\ \frac{|d_{R(p)}^*|}{|R(p)|} > \tau_r \end{cases}, \quad (18)$$

式中: $|R(p)|$ 为 p 点所在支持域 $R(p)$ 的点数; $|d_{R(p)}^*|$ 为支持域 $R(p)$ 中票数最高的视差 $d_{R(p)}^*$ 的投票数; τ_n 、 τ_r 为阈值。即异常点所在的支持域满足条件(18)式时, 使用 $d_{R(p)}^*$ 的值代替异常值, 并将其

标记为有效点。为了处理更多的异常点,需要将此过程迭代多次。

对于剩余异常点,使用异常点分类进行插值处理。首先根据对极几何原理^[7]将其分为遮挡点和误匹配点,然后分别从左右两个方向找到距离最近的有效点。对于遮挡点,选取左右有效点中视差最小的点对其进行插值;对于误匹配点,选取左右有效点中灰度最接近的点对其进行插值。

最后,对视差图进行亚像素求精和中值滤波,得到最终视差图。

3 实验结果及分析

本文实验所使用的数据集均来自学术界公认的 Middleberry 平台。实验所用的参数为: $\lambda_{\text{census}} = 21$, $\lambda_{\text{AD}} = 4$, $\lambda_{\text{grad}} = 7$, $\tau_1 = 16$, $\tau_2 = 12$, $L_1 = 36$, $L_2 = 5$, $\tau_n = 50$, $\tau_r = 0.5$, $\epsilon = 0.04$, Census 的窗口大小为

9×9 , 引导滤波的窗口大小为 5×5 。

3.1 改进 Census 算法的精度分析

为了验证本文所提的改进 Census 算法的精确性,将其与传统 Census 算法和另外两种改进的 Census 算法进行对比。其中一种改进的 Census 算法^[17](记为 Census 1)的参考值是通过加权求和得到的,另一种改进的 Census 算法^[18](记为 Census 2)带有噪声容限。4 种算法均不进行代价聚合和视差细化,直接利用 Census 算法的匹配代价,通过 WTA 策略计算得到视差图,如图 3 所示。其中,第一行为 Cones 图像的视差图;第二行为 Cones 视差图中一视差不连续处的细节放大图,尖峰左侧的黑色区域主要是遮挡关系造成的误匹配;第三行为 Teddy 图像的视差图;第四行为 Teddy 视差图中一低纹理区域的细节放大图。

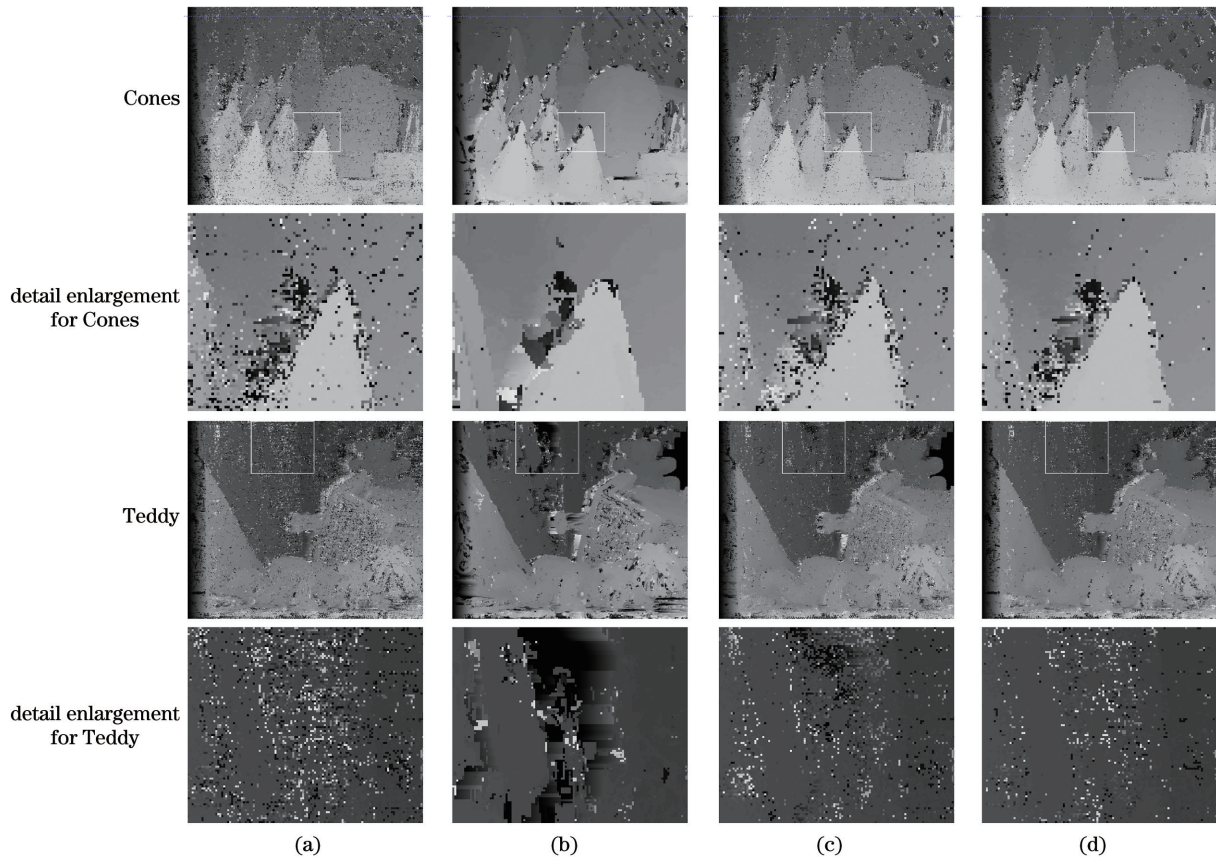


图 3 不同 Census 算法的比较。(a)传统 Census 算法;(b) Census 1;(c) Census 2;(d)所提 Census 算法

Fig. 3 Comparison among different Census algorithms. (a) Traditional Census algorithm; (b) Census 1; (c) Census 2; (d) proposed Census algorithm

从图 3 可以看出,传统的 Census 算法由于过于依赖中心点像素,存在大量误匹配点。Census 1 在视差连续且纹理较高的区域表现良好,但是在视差不连续区域,视差图边缘不清晰,且在低纹理区域的

误匹配较多。Census 1 的参考值是由窗口内所有像素加权求和得到的,在视差不连续区域通常存在有遮挡像素,会导致参考值不可信;Census 变换对参考值的选择十分敏感,而在低纹理区域,Census 1

的参考值不够稳定。Census 2 相对于传统的 Census 算法,精度有所提升,但是其噪声容限的阈值仅仅与中心点的灰度相关,未能结合窗口内像素的信息,当其阈值过大时,低纹理区域的特征被忽略。与前三种算法相比,所提的改进 Census 算法在低纹理区域和视差不连续区域表现最好,在视差连续的高纹理区域的表现仅次于 Census 1,因此其整体表现最为稳定。

为了更全面地比较几种 Census 算法的精度,按照上述方式计算 Tsukuba、Venus、Teddy 和 Cones 四组图像的视差,并统计其在全部区域内的误匹配率,误差阈值为 1,结果如图 4 所示。与传统的

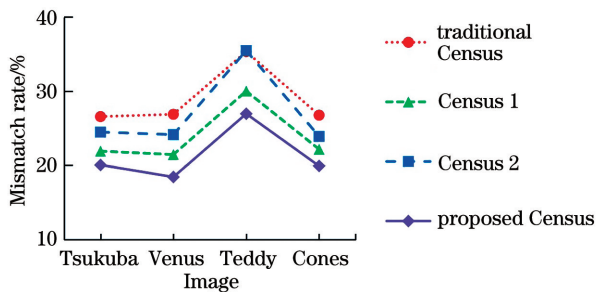


图 4 不同 Census 算法的误匹配率对比

Fig. 4 Mismatch rate comparison among different Census algorithms

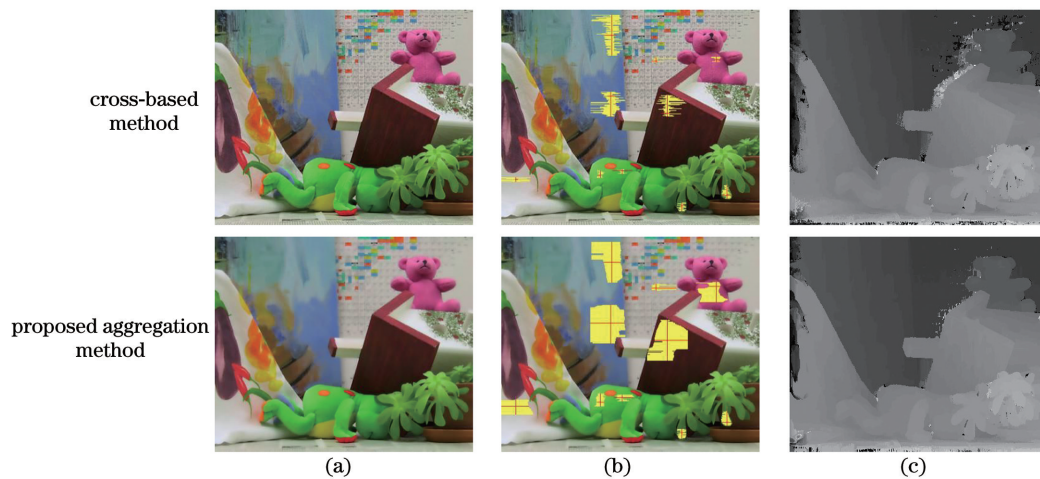


图 5 优化效果的验证。(a)输入图像;(b)自适应支持域;(c)视差图

Fig. 5 Verification of optimization effect. (a) Input images; (b) adaptive support regions; (c) disparity maps

3.3 算法对比分析

为了客观地评价所提算法的匹配精度,对 Middleberry 数据集中的 4 幅经典图像 Tsukuba、Venus、Teddy 和 Cones 使用所提算法进行实验,并将实验结果与 CC-SGM^[22]、VarCross^[15] 和 GlobalGCP^[23] 算法进行比较,如图 6 所示。从图 6 可以看出,所提算法的视差图效果明显优于局部算法 VarCross 和半全局算法 CC-SGM,与全局算法

Census 算法相比,本文改进的 Census 算法的误匹配率分别降低了 6.52、8.45、8.37 和 6.84 个百分点,精度的提升明显优于其他两种改进算法。

3.2 代价聚合效果验证

与十字交叉法^[11]相比,所提算法主要对输入图像进行了优化。为了验证聚合算法的优化效果,使用 Teddy 图像进行实验,如图 5 所示。其中,第一行为十字交叉法的结果,其输入图像为原始图像;第二行为所提聚合算法的结果,其输入图像经过改进引导滤波的处理。对于输入图像中的部分像素点,使用十字交叉法构建自适应支持域(支持域在图中用图像填充标记,各像素点的支持臂用横线和竖线标记),如图 5(b)所示。实验所用匹配代价为本文 2.1 节所提的融合匹配代价,使用相应的聚合方法进行代价聚合,并采用 WTA 策略计算视差,且均不进行视差细化,得到的视差图如图 5(c)所示。

由图 5 可见,由于所提算法处理了输入图像中的噪声,十字交叉法所创建的自适应窗口的可靠性得到提高,进而代价聚合效果得到提升,最终所得的视差图误差减小。

GlobalGCP 效果相当。

统计所提算法在非遮挡区域(N-Occ)、全部区域(All)和视差不连续区域(Disc)的误匹配率,并与 CS-FG^[24]、VarCross、CC-SGM、Census-DP^[19] 和 GlobalGCP 匹配算法进行比较,结果如表 1 所示,其中 AvgPBM 表示算法在 4 幅图像上的各个区域的平均误匹配率。由表 1 可见,所提算法在某些区域的误匹配率不如 Census-DP、CC-SGM 和 GlobalGCP 算

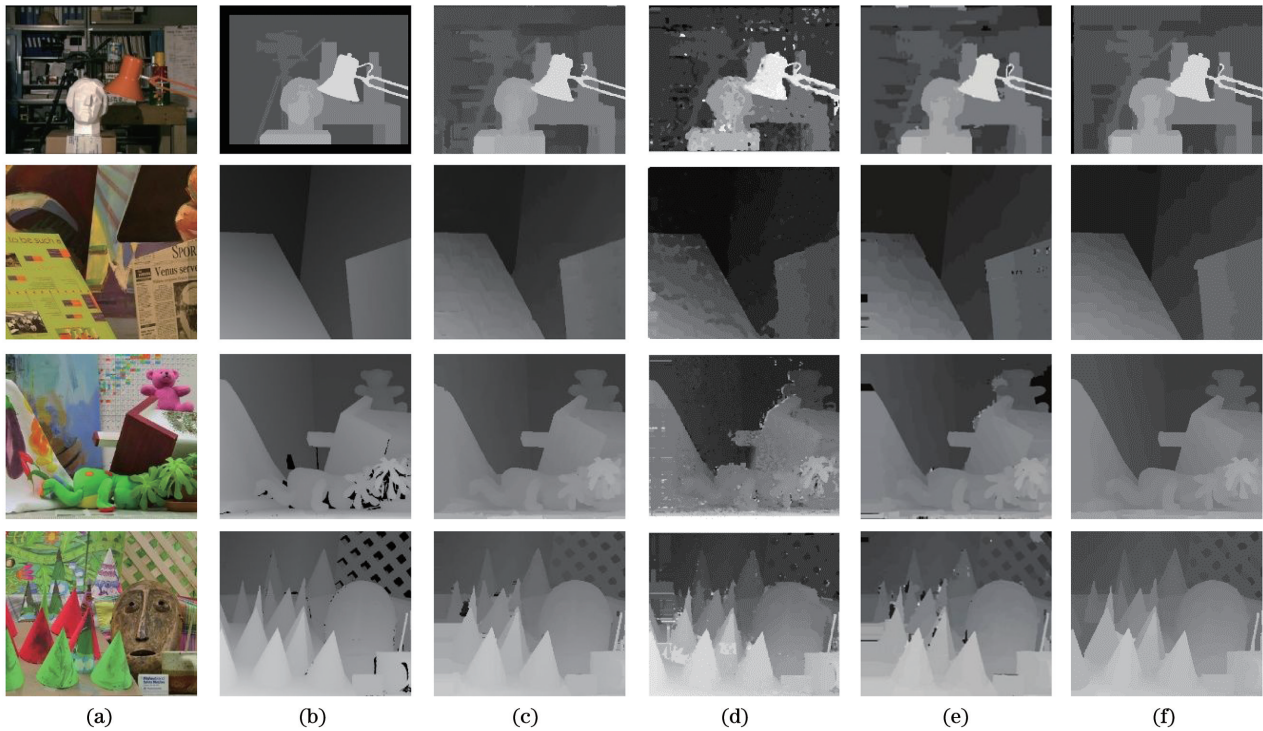


图 6 结果对比。(a)参考图像;(b)真实视差图;(c)所提算法;(d) CC-SGM;(e) VarCross;(f) GlobalGCP

Fig. 6 Comparison of results. (a) Reference images; (b) real disparity maps; (c) proposed algorithm; (d) CC-SGM; (e) VarCross; (f) GlobalGCP

表 1 本文算法与其他算法的误匹配率对比

Table 1 Mismatch rate comparison among proposed and other algorithms

unit: %

Algorithm	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			AvgPBM
	N-Occ	All	Disc	N-Occ	All	Disc	N-Occ	All	Disc	N-Occ	All	Disc	
Proposed	1.29	1.75	6.12	0.22	0.71	2.32	4.47	9.69	12.28	3.00	9.07	8.07	4.92
CS-GF	2.38	2.85	8.40	1.13	1.98	9.26	7.05	14.90	16.80	3.32	11.00	7.99	7.09
Census-DP	1.41	1.74	6.86	0.27	0.38	3.04	5.94	11.40	14.90	2.64	7.86	7.37	5.31
GlobalGCP	0.87	2.54	4.69	0.46	0.53	2.22	6.44	11.50	16.20	3.59	9.49	8.90	5.60
VarCross	1.99	2.65	6.77	0.62	0.96	3.20	9.75	15.10	18.20	6.28	12.70	12.90	7.60
CC-SGM	2.80	3.10	8.70	1.70	2.10	3.70	7.40	11.80	14.00	5.10	6.40	7.00	8.20

法。这主要是由于这三种算法都根据视差平滑性设置了能量函数,匹配精度有所上升,同时运算复杂度增加。而所提算法的平均误匹配率均优于其他算法,说明本文算法在精度上具有一定的优势。

为了验证本文算法的适应性,选取 Middleberry 平台上的其他 4 个场景的图像(Baby 3、Cloth 3、Lampshade 1 和 Rocks 2)进行实验,实验结果如图 7 所示。在图 7(d)的误匹配图像中,黑色表示非遮挡区域的误匹配像素,灰色表示遮挡区域的误匹配像素,白色表示正确匹配的像素。从图 7 可以看出,本文算法在视差连续区域的匹配效果较好,误匹

配像素主要存在于视差不连续的区域。

4 结 论

提出了一种基于改进 Census 变换和自适应支持域的局部立体匹配算法。针对传统 Census 变换,提出了一种对采样不敏感的改进方法,与其他几种方法相比,所提方法的鲁棒性更佳。将改进的 Census 变换与多种代价进行融合,得到了更为有效的匹配代价。针对引导滤波在低亮度区域的边缘保持能力较差的问题,提出了一种改进的引导滤波计算方法,并将其应用于自适应支持域的

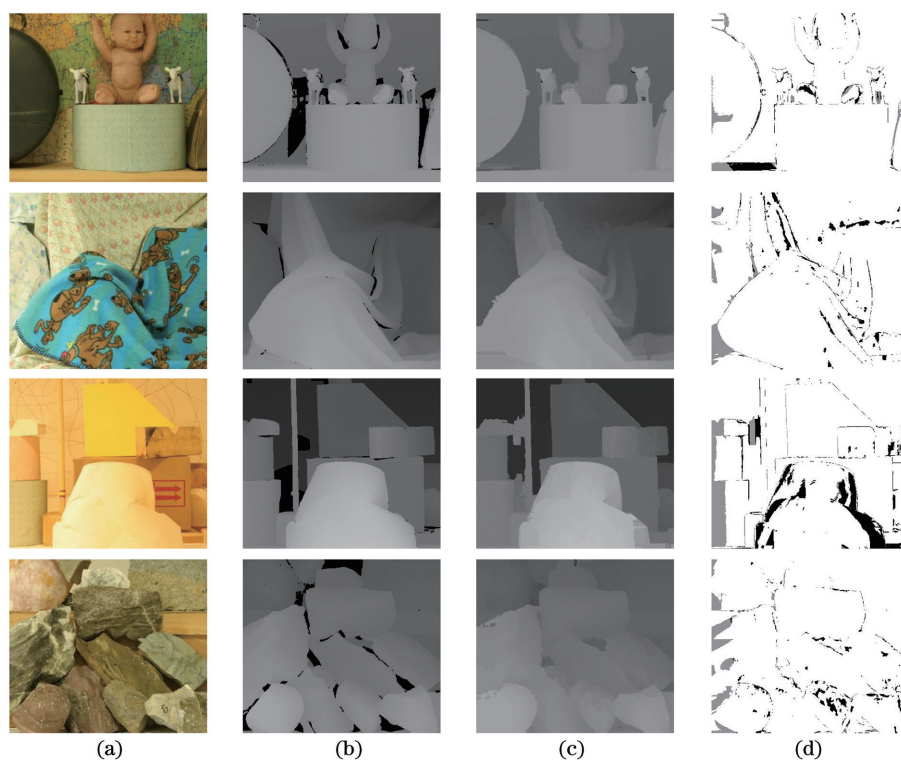


图 7 匹配结果。(a)参考图像;(b)真实视差图;(c)所提算法得到的视差图;(d)误匹配图像

Fig. 7 Matching results. (a) Reference images; (b) real disparity maps; (c) disparity maps obtained by proposed algorithm; (d) mismatched images

构建中,提升了支持域的可靠性。实验结果表明,所提算法具有较高的精度和较好的适应性,但是在视差不连续区域的误差较大,后续工作将进一步研究该问题。

参 考 文 献

- [1] Shen S H. Accurate multiple view 3D reconstruction using patch-based stereo for large-scale scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(5): 1901-1914.
- [2] Howard A. Real-time stereo visual odometry for autonomous ground vehicles [C] // 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 22-26, 2008, Nice, France. New York: IEEE Press, 2008: 3946-3952.
- [3] Kim J C, Lee K M, Choi B T, et al. A dense stereo matching using two-pass dynamic programming with generalized ground control points [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: 1075-1082.
- [4] Bleyer M, Gelautz M. Graph-cut-based stereo matching using image segmentation with symmetrical treatment of occlusions[J]. Signal Processing: Image Communication, 2007, 22(2): 127-143.
- [5] Li J, Qian W X, Chen Q, et al. An efficient stereo matching method based on Bayesian theory[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 101001. 李娇, 钱惟贤, 陈钱, 等. 一种基于贝叶斯理论的高效立体匹配方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 101001.
- [6] Felzenszwalb P F, Huttenlocher D R. Efficient belief propagation for early vision [C] // Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2004, June 27-July 2, 2004, Washington, D.C., USA. New York: IEEE Press, 2004.
- [7] Hirschmüller H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 328-341.
- [8] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1/2/3): 7-42.
- [9] Birchfield S, Tomasi C. Depth discontinuities by pixel-to-pixel stereo [C] // Sixth International Conference on Computer Vision, January 7, 1998, Bombay, India. New York: IEEE Press, 1998: 1073-1080.

- [10] Ma R H, Zhu F, Wu Q X, et al. Dense stereo matching algorithm based on image segmentation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0315001.
马瑞浩, 朱枫, 吴清潇, 等. 基于图像分割的稠密立体匹配算法[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0315001.
- [11] Mei X, Sun X, Zhou M C, et al. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware[C]//2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2011: 467-474.
- [12] Wang Y F, Wu W, Yu X L, et al. A stereo matching system with the adaptive weight AD-Census [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(4): 153-160.
王云峰, 吴炜, 余小亮, 等. 基于自适应权重 AD-Census 变换的双目立体匹配[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(4): 153-160.
- [13] 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.
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.
- [14] Huang C, Zhao H Z. Semi-global stereo matching with adaptive window based on grayscale value[J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(8): 1381-1390.
黄超, 赵华治. 根据灰度值信息自适应窗口的半全局匹配[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(8): 1381-1390.
- [15] Zhang K, Lu J B, Lafruit G. Cross-based local stereo matching using orthogonal integral images[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(7): 1073-1079.
- [16] Gong W B, Gu G H, Qian W X, et al. Stereo matching algorithm based on the inter color correlation and adaptive support weight[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0812001.
龚文彪, 顾国华, 钱惟贤, 等. 基于颜色内相关和自适应支撑权重的立体匹配算法[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0812001.
- [17] 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.
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.
- [18] Lee Z, Juang J, Nguyen T Q. Local disparity estimation with three-moded cross Census and advanced support weight[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(8): 1855-1864.
- [19] 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.
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.
- [20] Li D H, Shen H Y, Yu X, et al. Binocular ranging method using stereo matching based on improved Census transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 111503.
李大华, 沈洪宇, 于晓, 等. 一种改进 Census 变换的双目匹配测距方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 111503.
- [21] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [22] Zhang J, Wang J X. A semi-global stereo matching algorithm combining color information and Census transformation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(12): 147-152.
张晶, 王竞雪. 结合颜色信息的 Census 变换半全局立体匹配算法[J]. 测绘科学, 2019, 44(12): 147-152.
- [23] Wang L, Yang R G. Global stereo matching leveraged by sparse ground control points [C] // Computer Vision & Pattern Recognition (CVPR) 2011, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 3033-3040.
- [24] Liu J, Zhang J X, Dai Y, et al. Dense stereo matching based on cross-scale guided image filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0115004.
刘杰, 张建勋, 代煜, 等. 基于跨尺度引导图像滤波的稠密立体匹配[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0115004.