

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209087

基于改进 Census 变换的自适应局部立体匹配^{*}

蒋文萍 汪凌阳 韩文超 孙亦勃

(上海应用技术大学电气与电子工程学院 上海 201418)

摘要: 针对现阶段局部立体匹配在弱纹理区域具有匹配精度低且过度依赖中心像素的缺点,提出一种基于改进 Census 变换的自适应局部立体匹配算法。首先根据中心像素领域的纹理复杂度采用自适应支持窗口改进 Census 变换,引入 Tanimoto 系数与 Hamming 距离算法结合,并融合颜色或亮度差的绝对值用作新的初始匹配代价计算。通过十字交叉域算法进行代价聚合并采用赢家通吃算法计算视差,在视差优化阶段采用左右一致法、迭代投票、插值填充和亚像素细化,针对边缘模糊化将改进的自适应中值滤波用作抑制噪声得到最后的视差图。实验结果表明,本文所提出的算法在 Middlebury 数据集上的平均误匹配率为 4.39%,相较于其他改进的 Census 变换算法有明显提升,并在抗噪能力上具有一定的鲁棒性和适应性。

关键词: 机器视觉;双目视觉;立体匹配;Census 变换

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

Adaptive local stereo matching based on improved census transform

Jiang Wenping Wang Lingyang Han Wenchao Sun Yijie

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: To address the shortcomings of the current local stereo matching in weak texture regions with low matching accuracy and over-dependence on the central pixel, an adaptive local stereo matching algorithm based on the improved Census transform is proposed. Firstly, the Census transform is improved by using adaptive support window according to the texture complexity of the central pixel domain, introducing Tanimoto coefficients combined with Hamming distance algorithm, and fusing the absolute value of color or luminance difference as the new initial matching cost calculation. The cost aggregation is performed by the cross-cross domain algorithm and the winner-take-all algorithm is used to calculate the parallax. The left-right consistency method, iterative voting, interpolation filling and sub-pixel refinement are used in the parallax optimization stage, and the improved adaptive median filtering is used as noise suppression for edge blurring to obtain the final parallax map. The experimental results show that the proposed algorithm has an average mismatch rate of 4.39% on the Middlebury dataset, which is a significant improvement over other improved Census transform algorithms, and is robust and adaptive in terms of noise immunity.

Keywords: machine vision; binocular vision; stereo matching; Census transform

0 引言

立体匹配作为三维重建技术的一项重要热门研究方向,在机器人、同时定位与地图构建(SLAM)、自动驾驶以及其他领域具有举足轻重的地位^[1-2]。立体匹配算法过程通常可以分为匹配代价计算、代价聚合、视差计算和视差优化4个步骤^[3]。在经过多年的计算机视觉领域发展,立体匹配算法主要分为全局算法、半全局算法以及局部算法。其中全局和半全局算法是建立以一个全局能量函数,进行

能量最小化处理得到最终的视差,常用的算法有动态规划法^[4]、置信传播算法^[5]、图割法^[6]等方法。此类方法对硬件要求较高,时间复杂度较高,不利于相关领域的实时性要求。局部算法是基于窗口利用某点邻域的灰度值、颜色信息^[7]以及梯度信息^[8]进行匹配代价的计算。其中当采用灰度值作为初始的匹配代价计算时,图像的匹配精度由于外界光照环境和噪声环境会降低。

为了解决这一问题,Hirsh Muller 在进行研究立体匹配算法时,发现 Census 变换具有相对的鲁棒性^[9],其可以有

收稿日期:2022-02-25

^{*} 基金项目:上海应用技术大学协同创新基金跨学科、多领域合作研究专项项目(XTCX2021-10)资助

效解决上述提出的对光照敏感的问题。但 Census 变换这一传统立体匹配算法仍存在一定的缺陷,其算法过度依赖中心像素,对由于噪声环境产生的影响并未得到妥善的解决,且固定的变换窗口对窗口区域的纹理描述不够清晰。刘军等^[10]提出一种像素信息三维处理的方法,加入邻域像素差异进行匹配代价计算,王琼等^[11]采用窗口区域像素的灰度均值与局部纹理反差值的和代替中心像素灰度值。祝世平等^[12]提出了 Census-DP 算法,其在此基础上,提出了采用邻域像素均值代替中心像素值并引入噪声容限这一参数进行 Census 变换的改进,一定程度上解决了噪声环境下的立体匹配精度低的问题。同时,梯度和颜色信息的引入同样有效提高了传统立体匹配的精度,萧红等^[13]引入梯度信息进行初始匹配代价计算,通过引导滤波进行多尺度代价聚合。Mei 等^[14]提出的 AD-Census 算法采用亮度或灰度差的绝对值(AD)与 Census 变换结合并改进 SGM 算法提出的十字交叉域的代价聚合方式,大大提高了局部立体匹配传统算法的精度。

目前 Census 变换这一传统局部立体匹配算法在经过研究人员的各种改进之后,仍存在弱纹理以及遮挡区域匹配效果不够理想的情况,并且以上提出的部分算法未真正地考虑到时间复杂度这一重要评价指标。

本文提出一种基于改进 Census 变换的自适应局部立体匹配,在匹配阶段根据中心像素调整自适应窗口,受赵晨园等^[15]的改进算法影响,通过改进的 Hamming 距离进行 Census 变换的改进,归一化融合 AD 进行初始匹配代价计算,代价聚合阶段采用十字交叉域算法^[16]。视差计算上采用赢家通吃的算法,最后通过左右一致检测法、迭代投票、插值填充法以及亚像素细化进行视差优化,并采用改进的中值滤波抑制噪声,得到最后的视差图。在改进传统 Census 变换的同时提高了匹配精度。

1 基本原理

1.1 匹配代价计算及改进算法

传统的 Census 变换是采用一个固定大小的窗口对待匹配图像进行遍历,将变换窗口的中心像素灰度值与其邻域范围内的像素值进行比较,将比较后得到的布尔值存入相应的比特串,最终得到中心像素的 Census 值,其中 Census 的变换过程可以表示为:

$$C_s(a) = \bigotimes_{b \in N_a} \zeta(I(a), I(b)) \quad (1)$$

式中: C_s 为 Census 变换; \bigotimes 为比特串的逐位连接的运算; a 和 b 分别为中心像素和邻域像素; N_a 为中心像素 a 的邻域像素区间; ζ 为中心像素和邻域像素的比较运算,其可以具体表示为:

$$\zeta(k, l) = \begin{cases} 0, & k \leq l \\ 1, & k > l \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 和 b 分别为中心像素和邻域像素。得到待匹配的左右图像的对应像素的 Census 值后,可进行匹配代价计

算,这一计算过程是由 Hamming 距离这一位运算所实现的,其运算过程可以表示为:

$$C(a, b, d) = \text{Hamming}(C_{s1}(a, b), C_{s2}(a - d, b)) \quad (3)$$

式中: C_{s1} 和 C_{s2} 分别为左图像的 Census 值和右图像的 Census 值。Hamming 距离运算的具体过程为进行左右图像的 Census 值即比特串进行异或运算,得出此异或运算中结果为 1 的个数,充当其得到的代价计算值。

其运算过程如图 1 所示, Census 变换过程是针对中心像素和邻域像素的灰度比较产生的匹配代价计算,其对图像整体的亮度并不敏感的能力保证了算法的匹配效果好。Census 不仅在亮度上具有低敏感性,并且其由于采用的是窗口的运算,相对全局匹配计算,在计算资源的分配上可以保证其运算的并行效率。

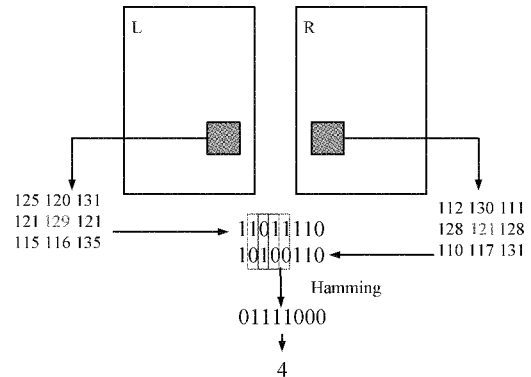


图 1 Census 变换示意图

但是传统的 Census 变换仍旧具有许多可以改进的地方,具体可以表现为:采取固定的支持窗口致使其在低纹理的处理上容易造成误匹配,在相对复杂的纹理区域采取较大的窗口会造成计算的复杂度增加并且整体的匹配效率会受到影响,对噪声区域的图像匹配也存在缺陷。其在 Census 值的求取过程中对中心像素的依赖程度过高,另外由于 Hamming 距离的运算对区域的纹理表征细节不够到位,致使在匹配过程中其对弱纹理区域和遮挡区域存在一定的匹配误差。

针对传统的 Census 变换存在的缺陷,本文提出的改进 Census 变换一定程度上改善了以上提出的缺陷。首先针对固定窗口的图像信息表达缺陷,采用了自适应抗噪支持窗口。其根据中心像素的灰度值计算纹理复杂度项,进而根据纹理复杂度的阈值进行窗口大小的划分。其变换过程表示为:

$$Q(a) = \begin{cases} 11 \times 11, & \left(\frac{l(a)}{m}\right) < n \\ 9 \times 9, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q(a)$ 为支持窗口大小; $l(a)$ 表示纹理复杂度项; m 为设定的参数;其中设定的阈值 n 为划分纹理复杂度的区间点,其基于中心像素的灰度值进行纹理区域的复杂性判

断,传统的 Census 变换的支持窗口选择 9×9 是最合适的。故当纹理复杂度小于于区间点 n 时,即在重复纹理区域采用的是 11×11 的支持窗口大小组合,当纹理复杂度小于于区间点 n 时,采用的是 9×9 的支持窗口大小组合降低复杂度,以此达到抗噪自适应窗口的实现。

针对 Census 变换过度依赖中心像素致使其在弱纹理区域的误匹配率问题,本文引入改进的 Tanimoto 系数来改进传统 Census 变换所使用的 Hamming 距离。Tanimoto 同样广泛地应用于模式识别的相似度计算,其表示为:

$$D_c(x, y) = \begin{cases} 1, & x = y = 0 \\ 1 - \frac{\sum x \cap y}{\sum x \cup y}, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: x 和 y 是像素点的比特串, D_c 表示 x 和 y 的 Tanimoto 距离值。本文引入 Tanimoto 系数与原有的 Hamming 距离进行结合,从而应用于待匹配图像的匹配代价计算。

由于 Tanimoto 系数在比特串异或变化很小的情况下,在距离这一表征上的区分度比 Hamming 距离好,故可在弱纹理区域具有较好的应用,可有效减少 Census 变换的误匹配率。但其在比特串异或变化很大的情况下其效果没有 Hamming 距离好,故可针对比特串异或变换程度设定阈值,在比特串异或变化小的区间采用 Tanimoto 系数来计算像素点的相似度距离,在比特串异或变化大的区间采用 Hamming 距离来计算距离。根据这一设定,改进的 Hamming 距离表示为:

$$D_c(x, y) = \begin{cases} 1, & x = y = 0 \\ 1 - w \times \left(\frac{\sum x \cap y}{\sum x \cup y} \right), & 0 < \sum x \cap y < q \\ \frac{1}{N} \sum (x \otimes y), & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: q 为比特串异或变化区间阈值点; \otimes 表示按位异或运算; w 为设定的 Tanimoto 系数的权重,用于提高相似度距离表征的区分度。这一改进 Hamming 距离算法可以有效解决 Census 变换在弱纹理距离误匹配率高以及过分依赖中心像素点的缺陷。

同时,为有效解决单采用 Census 变换带来的匹配率低问题,引入颜色差或亮度差的绝对值 AD 这一匹配代价计算方法,与上述改进的 Census 变换相融合来计算最终的初始匹配代价值。其中 AD 计算代价公式表示为:

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

式中: I_i^L 为待匹配左图像的颜色分差; I_i^R 为右图像的颜色分差; C_{AD} 为左右图像 RGB 像素点的三通道颜色分量的差的绝对值。若待匹配图像为灰色图像,其式表示即为灰度的亮度差。AD 匹配代价计算结果的亮度差范围为 $0 \sim 255$, Census 变换匹配代价计算的结果范围为 $0 \sim N$, 因此

通过归一化将二者统一融合。本文采用自然指数函数来进行归一化,最终匹配代价表示为:

$$C(p, d) = 1 - \exp\left(-\frac{C_{census}(p, d)}{\lambda_{census}}\right) + 1 - \exp\left(-\frac{C_{ad}(p, d)}{\lambda_{ad}}\right) \quad (8)$$

式中: λ_{census} 和 λ_{ad} 为自定义的参数,分别控制 Census 变换和 AD 匹配代价在匹配代价融合中的权重。

1.2 十字交叉域代价聚合

由于在匹配代价的计算过程中,其只考虑了窗口邻域的相关性,其由于本身对噪声敏感难以进行后续计算视差,故需要进行代价聚合这一步骤进行更为详细地描述像素点之间的相关性^[17]。本文引入 AD-Census 算法中的改进十字交叉域算法,其本身假设邻域范围内颜色或亮度值相近的像素点的视差值是相近的,在代价聚合过程中参与聚合的像素点的视差值接近会提升聚合的效果,故十字交叉域算法便以寻求像素点邻域范围内的颜色相近像素点进行代价聚合。

十字交叉域代价聚合算法首先构建一个以中心像素为原点的十字臂,十字臂上的像素点的颜色或亮度值与中心像素点的颜色或亮度值相近。十字臂的长度是动态的,其在一个最大延伸范围内进行十字臂的延展,并且臂长会在遇到动态范围内与中心像素的颜色或亮度值差异较大时停止。左臂的延伸为例,根据 AD-Census 算法建立规则,表示为:

$$\begin{cases} D_c(m_l, m) < \tau_1 \text{ and } D_c(m_l, m_l + (1, 0)) < \tau_1, \\ D_c(m_l, m) < L_{\max} \\ D_c(m_l, m) < \tau_2, L_1 < D_c(m_l, m) < L_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: D_c 表示 m_l 和 m 的颜色或亮度值比较; τ_1 为颜色差异阈值,并且限制 m_l 十字左臂前的一个像素值和 m_l 的颜色或亮度值比较不会超过阈值。其可有效保证臂长的颜色不会穿越边缘像素。 L_{\max} 为臂长的最大动态范围阈值,保证颜色或亮度值极为接近时允许其延展至臂长的最大延伸范围,此规则可有效保证弱纹理区域进行代价聚合时拥有更长的十字臂长并且限制全域像素的臂长。

在进行代价聚合时需进行 4 次运算,第 1 次和第 3 次为先水平后垂直的十字交叉域计算,第 2 次和第 4 次为先垂直后水平的十字交叉域计算。十字交叉域这一步骤可有效减少初始匹配代价计算的匹配噪声影响。

1.3 改进的视差计算与优化

在采用十字交叉域进行代价聚合之后,需进行视差计算生成视差图,此步骤采用的是赢家通吃 WTA 算法^[18],即像素点选择最小代价聚合值所对应的视差作为最终的视差结果。此算法表示为:

$$D_z = \operatorname{argmin}_{d \in \{0, d_{\max}\}} [C(z, d)] \quad (10)$$

式中: d_{\max} 为最大视差; D_z 为计算出的视差值, 在得到初始视差图后需进行更加细致的多步视差优化, 其包括左右一致性检查、视差传播、边缘校正、亚像素求精、改进的中值滤波。

左右一致性检查其约束每个像素点只有一个正确视差, 算法是根据互换的左右待匹配图像进行再一次的立体匹配得到新的视差图, 根据左视差图找到像素点在右图对应像素的对应视差值, 设定阈值进行筛选出有效点和无效点, 这一筛选过程的表示为:

$$D_z = \begin{cases} D_{l_z}, & |D_{l_z} - D_{r_z}| \leq 1 \\ D_{invalid}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: D_{l_z} 表示左图某点的视差值, D_{r_z} 为右图对应点的视差值。其表示两者差值若小于一个像素, 即表示满足约束成为有效值, 否则即为无效值。

对于无效点, 采用迭代的局部投票策略, 其按照制定的规则进行统计出票数最多的视差值, 这一规则的表达式是:

$$\begin{cases} S_z > \tau_s \\ \frac{H_z(d_z^*)}{S_z} > \tau_h \end{cases} \quad (12)$$

式中: H_z 为在最大视差范围内的直方图; d_z^* 为票数最多的视差值; τ_h 和 τ_s 为设定的阈值参数; S_z 为可靠像素, 规则表示可靠像素的票数和视差值票数最多大于预设的阈值 τ_h 时, 则此时的视差值为候选的视差值。迭代次数为 5 次。

对剩下的无效点进行邻域方向的最小视差值作为插值填充, 由于在无效点中分布着遮挡点和不稳定点, 遮挡点的处理采用搜索到的最近的点的视差值作为其有效视差, 不稳定点采用颜色或亮度值相近的像素点的视差值作为替代。而后进行边缘校正和亚像素求精。

在得到上述优化后的视差图, 最后一步即是采用中值滤波进行最后的细化去噪。本文改进了原有的中值滤波进行细化去噪。

由于中值滤波的处理是借助滤波窗口进行的, 窗口的大小会影响噪声的处理。由于边缘像素和噪声点同属于灰度值突出的像素点, 故统一进行去噪处理会使得边缘模糊。故改进的中值滤波将根据噪声点的位置进行噪声项的处理。

由于噪声点通常是窗口邻域范围内的最大值, 故窗口

的滑动可加入此类判断依据来进行中值滤波的处理。在窗口滑动至邻域最大值时进行滤波处理, 其他情况保留原有的视差值。此类改进算法可有效避免在滤波过程中由于边缘像素和噪声像素的数值接近造成边缘模糊化的效果, 一定程度上保证了最终匹配的精度。

2 分析与讨论

2.1 实验环境与参数设置

本文实验软件环境为 VS2019 与 OpenCV3.1; 硬件配置 CPU 为 i5-11400F, 主频为 2.60 GHz, 内存为 32 GB。本文采用 Middlebury 立体视觉评测平台, 数据集选用四组标准数据图像 Tsukba (375 450)、Venus (375 450)、Teddy (384 434)、Cones (288 384) 进行测试。4 组数据的最大视差为 15、19、59、59。数据集采用的 Middlebury 的最小分辨率。如表 1 所示, 其为本文算法实验参数的设置。

表 1 本文算法实验参数

参数	λ_{census}	λ_{ad}	L_1	L_{\max}	τ_1	τ_2	τ_3	τ_h
值	10	30	27	34	20	6	20	0.4

2.2 算法对比

为了更好地对本文算法进行客观评价, 选择了 NonCensus^[19]、RINCensus^[20]、RTCensus^[21] 和 Census-DP 四种近年来的 Census 改进算法与本文算法进行立体匹配的效果对比。4 种算法对 Census 变换的改进各有侧重点, 具有一定的代表性, 其中 NonCensus 算法增加了局部纹理复杂值测度, RINCensus 算法利用邻域相关信息进行改进, RTCensus 算法采用的是改进 Census 非参数变换, Census-DP 算法则加入噪声容限和动态规划。统计误匹配率的指标主要采用标准立体匹配的评价标准, 即采用非遮挡区域误匹配像素比 (Nonocc) 和全部区域误匹配像素比 (All) 的误匹配率对比。

如表 2 所示, 本文提出的改进 Census 变换自适应立体匹配算法相较于其他 4 种算法, 在精度上具有明显的提升, 在 4 个标准测试图像上的误匹配率明显远低于其他 4 种算法, 并且平均误匹配百分比低。证明本文的立体算法在精度上具有一定的优势, 具有一定的鲁棒性和可行性。

表 2 本文算法与其他算法的误匹配率比较

算法	Tsukba		Venus		Teddy		Cones		Avg
	Nonocc	All	Nonocc	All	Nonocc	All	Nonocc	All	
NonCensus	4.54	2.72	0.84	0.95	6.35	11.72	5.87	10.33	5.41
RINCensus	4.78	6.00	1.11	1.76	9.76	17.30	8.09	16.20	8.13
RTCensus	5.08	6.25	1.58	2.42	7.96	13.80	4.10	9.54	6.34
Census-DP	1.57	2.00	0.89	1.00	7.20	12.40	3.68	9.81	4.81
Proposed	3.04	4.17	0.70	0.96	6.53	7.21	4.25	8.22	4.39

为了更加直观地展现本文算法的匹配效果,在图 2 的匹配结果上以图像形式展示。图 2(d)为本文算法视差图与真实视差图叠加生成的误匹配图,其中对比真实视差图的差异像

素表示非遮挡区域的误匹配像素。如图 2 所示,本文算法在视差连续区域的表现较好,在场景复杂中的弱纹理区域表现突出,其中在视差不连续区域存在一定的误匹配率。

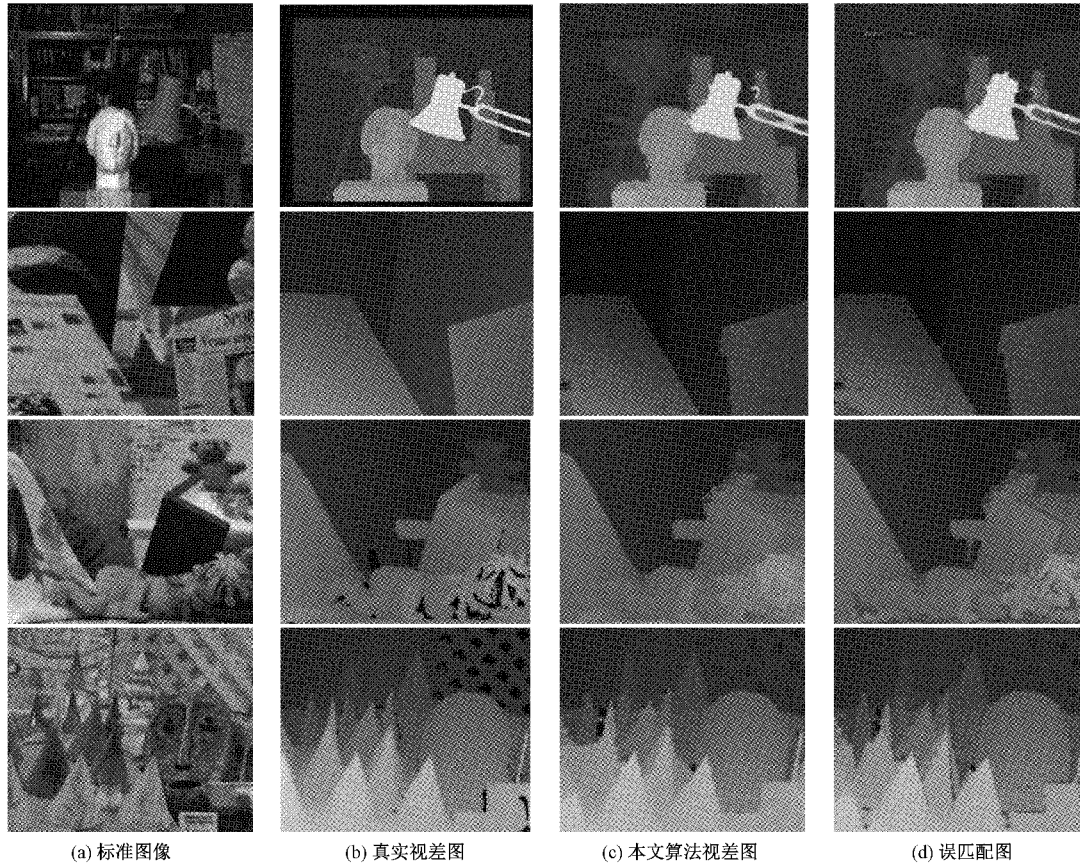


图 2 匹配结果图

3 结 论

本文提出了一种基于改进 Census 变换的自适应局部立体匹配算法。针对传统 Census 变换在弱纹理区域误匹配率高和过度依赖中心像素的缺陷,采用基于中心像素灰度值的自适应支持窗口,并引入 Tanimoto 系数与 Hamming 距离相结合作为新的匹配代价计算方式,并与基于颜色或亮度的匹配代价进行归一化操作计算出初始匹配代价。引入交叉域算法进行代价聚合,采用赢家通吃 WTA 算法进行视差计算,并对视差进行左右一致性检测、迭代投票、插值填充和亚像素细化算法,最后通过改进现有的中值滤波算法进行去噪。实验结果表明,本文提出的算法相较于其他改进算法具有明显的精度提升,但在视差不连续区域仍存在一定的提高空间,后续研究应针对此处进行改进。

参考文献

- [1] 黄刚. 双目视觉系统实现羽毛球实时跟踪[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 117-123.
- [2] 李艳艳, 潘晋孝, 刘宾. 基于相似度匹配的场景深度估

计方法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(3): 37-40.

- [3] 朱建鸿, 王曹松, 高美凤. 一种改进的 Census 变换和自适应窗口的匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 427-434.
- [4] 顾梦娇, 朱宇锋, 郭迎庆, 等. 基于半全局立体匹配算法的改进研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19): 89-93.
- [5] 张惊雷, 王艳姣. 基于图像区域分割和置信传播的立体匹配算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(7): 257-260, 278.
- [6] 罗久飞, 邱广, 张毅, 等. 基于自适应双阈值的 SURF 双目视觉匹配算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 240-247.
- [7] 刘建明, 何晴, 陈辉. 基于改进 Census 变换与颜色梯度融合的立体匹配[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(9): 38-44.
- [8] 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): 267-277.
- [9] 彭新俊, 韩军, 汤踊, 等. 基于改进 Census 变换和异常值剔除的抗噪立体匹配算法[J]. 光学学报, 2017,

- 37(11):223-231.
- [10] 刘军,苗志勇,张煜祺,等.一种异形自适应窗口局部立体匹配算法[J].上海大学学报(自然科学版),2021,27(3):466-480.
- [11] 王琼,江晓亮,袁建英,等.基于改进 Census 变换的区域立体匹配算法[J].计算机应用研究,2015,32(10):3164-3167.
- [12] 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):216-224.
- [13] 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):327-333.
- [14] MEI X, SUN X, ZHOU M, et al. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware[C]. IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), IEEE, 2011: 467-474.
- [15] 赵晨园,李文新,张庆熙.一种改进的实时半全局立体匹配算法及硬件实现[J].计算机工程,2021,47(9):162-170.
- [16] 路乾坤,李彦.基于自适应窗口与权重的立体匹配算法[J].电子测量技术,2019,42(14):117-122.
- [17] 彭建建,白瑞林.基于水平树结构的可变权重代价聚合立体匹配算法[J].光学学报,2018,38(1):214-221.
- [18] 曹毅,包祥威,吴翔.基于重排序 Census 变换的半全局立体匹配算法[J].电子测量技术,2021,44(24):40-46.
- [19] 梁海波,邹佳玲.改进的非参数 Census 变换立体匹配算法[J].吉林大学学报(理学版),2019,57(5):1163-1168.
- [20] 马利,李晶皎,马技.邻域相关信息的改进 Census 变换立体匹配算法[J].计算机工程与应用,2014,50(24):16-20,46.
- [21] LEE Y, KIM H. A high-throughput depth estimation processor for accurate semiglobal stereo matching using pipelined inter-pixel aggregation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021,32(1):411-422.

作者简介

蒋文萍,博士,副教授,主要研究方向为机器人控制、智能控制器设计、电机控制等。

E-mail:jiangwenping@sit.edu.cn

汪凌阳,硕士研究生,主要研究方向为移动机器人、三维视觉等。

E-mail:azureleo7@163.com

韩文超,硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机控制。

E-mail:1576040058@qq.com

孙亦劫,硕士研究生,主要研究方向为机器人控制、智能控制器设计。

E-mail:415172653@qq.com