

# 基于多特征与优化 Census 变换的立体匹配算法

曾甲元<sup>1</sup> 肖伸平<sup>1,2</sup> 赵倩颖<sup>1</sup>  
ZENG Jiayuan XIAO Shenping ZHAO Qianying

## 摘要

针对传统的 Census 变换过于依赖窗口中心像素,易受到噪声干扰,导致在纹理弱和视差不连续的区域匹配精度较低的现象,文章提出了一种基于多特征与优化 Census 变换的立体匹配算法。首先通过阈值优化 Census 变换的中心像素,降低传统 Census 对中心像素的依赖,引入四方向梯度信息以取代单一匹配代价。利用自适应阈值十字交叉法对成本进行聚合。最后使用 WTA 技术计算视差,采用左右一致性检测与视差优化得到最终视差图。实验结果表明,在 Middlebury 数据集的测试中,所提算法的平均误匹配率为 5.92%,相比传统 Census 算法降低了 6.7%,与其他改进 Census 算法相比,具有较高的精度。

## 关键词

立体匹配; 机器视觉; Census 变换; 梯度; 十字交叉法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.02.009

## 0 引言

立体匹配是计算机视觉研究的基础,广泛应用于自动驾驶、目标跟踪和三维重建等领域<sup>[1-2]</sup>。立体匹配技术是通过寻找左右视图中的对应点计算视差,进而获取场景深度信息的过程。

Scharstein 等人<sup>[3]</sup>将匹配过程分为 4 个阶段:代价计算、

代价聚合、视差计算和视差优化,并将立体匹配算法分为两种类型:全局立体匹配和局部立体匹配。全局立体匹配算法具有良好的匹配效果,但计算量大、耗时长,不适合实时操作,因此在实际应用中经常使用局部立体匹配<sup>[4]</sup>;局部立体匹配算法是以局部优化方法进行视差估计,主要包括 Census 变换<sup>[5]</sup>和绝对差<sup>[6]</sup>(AD)、绝对差<sup>[7]</sup>和(SAD)、归一化互相关(NCC)等。局部立体匹配计算复杂度低,可用于实时图像处理,效率高。Census 变换因其对光照的良好抗干扰性在立体匹配算法中得到广泛应用。但 Census 变换过度依赖中心像素,易受干扰,匹配精度不高。为此,蒋文萍等人<sup>[8]</sup>

1. 湖南工业大学轨道交通学院 湖南株洲 412007
  2. 湖南工业大学电气与信息工程学院 湖南株洲 412007
- [基金项目] 国家重点研发计划(2019YFE0122600)

## 参考文献:

- [1] 蒋长林,李清,王羽,等.天地一体化网络关键技术研究综述[J].软件学报,2024,35(1):266-287.
- [2] 崔新雨,伍杰,周一青,等.空天地一体化融合组网的挑战与关键技术[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2023,50(1):1-11.
- [3] 吴流丽,廖建华,宋健,等.手机直连卫星技术发展综述[J].通信技术,2024,57(5):429-435.
- [4] 何元智,杨岭才,肖永伟,等.天地一体化新路径:手机直连卫星发展热点、挑战与关键技术[J].天地一体化信息网络,2024,5(2):1-11.
- [5] 肖永伟,卢山,宋艳军."手机直连卫星"发展及关键技术[J].国际太空,2024(1):20-27.
- [6] 何元智,肖永伟,张世杰,等.全球泛在连接新模式:手机直连卫星关键技术及挑战[J].电子与信息学报,2024,

46(5): 1591-1603.

- [7] 苏昭阳,刘留,艾渤,等.面向低轨卫星的星地信道模型综述[J].电子与信息学报,2024,46(5):1684-1702.
- [8] 郎睿. IMS 网络与现网业务融合探讨[J].中国新通信,2023,25(10):58-60.
- [9] 张永强,张捍东,赵金宝. SIP 协议栈研究[J].计算机技术与发展,2007,17(11):49-51.
- [10] 张捷. 国际公众电信编号计划[J].电信网技术,2003(9):34-37.

## 【作者简介】

李硕(1988—),男,北京人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:电信业务和码号资源相关政策、技术研究。

(收稿日期:2024-10-27)

将 Tanimoto 系数与 Hamming 距离结合, 并融合图像颜色差绝对值作为初始代价; Zhou 等人<sup>[9]</sup>融合 Census 变换、颜色特征、梯度特征计算初始匹配代价, 并采用十字交叉法进行代价聚合; 孙延坤等人<sup>[10]</sup>提出一种融合 SAD 与 Census 变换的双目立体图像匹配算法; 朱建鸿等人<sup>[11]</sup>使用 3 种状态的 Census 变换方法取代传统的两种状态的变换方法, 提高像素的匹配精度; Hou 等人<sup>[12]</sup>采用加权 Census 变换圆形模板进行匹配代价, 扩大目标像素的感知范围; Li 等人<sup>[13]</sup>提出了融合边缘信息的 MSD-Census 算法, 在处理隧道配电箱孔图像时具有较好的匹配效果。

根据上述研究现状, 本文提出了一种多特征与优化 Census 的算法。首先对中心像素重新选取, 以减少噪声对中心像素的影响, 然后结合梯度代价采用自适应阈值十字交叉法进行代价聚合, 最后进一步优化视差, 得到最终的视差图。

## 1 算法原理

### 1.1 匹配代价计算

传统的 Census 变换在图像上遍历一个固定大小的窗口, 将该窗口中心像素的灰度值与窗口内其他像素的灰度值进行比较, 并使用二进制位串 0 和 1 表示结果。小于或等于参考值的标记为 0, 大于参考值的标记为 1, 然后依次按位连接, 得到一串二进制的 Census 变换码。变换过程表示为:

$$C_{\text{census}}(p) = \bigotimes_{q \in N_p} \xi[I_p, I_q] \quad (1)$$

$$\xi[I_p, I_q] = \begin{cases} 0 & I_p \leq I_q \\ 1 & I_p > I_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: 点  $p$  为中心像素点;  $N_p$  为其邻域窗口;  $I_p$ 、 $I_q$  为分别是  $p$ 、 $q$  点的灰度值;  $\bigotimes$  表示按位连接符。

经过以上计算得到左右图像各像素点的 Census 变换码后, 通过 Hamming 距离 (异或运算为 1 的数量) 得出代价值, 对于视差搜索范围内的任意视差, 其左图与右图对应点的 Hamming 距离计算公式为:

$$C_H(p, d) = \text{Hamming}[C_L(p), C_R(p-d)] \quad (3)$$

式中:  $C_H(p, d)$  表示  $p$  点在视差  $d$  下的 Census 代价;  $C_L(p)$  为左图  $p$  点的二进制变化码;  $C_R(p-d)$  为右图  $(p-d)$  点的二进制变化码, 具体运算过程如图 1 所示。

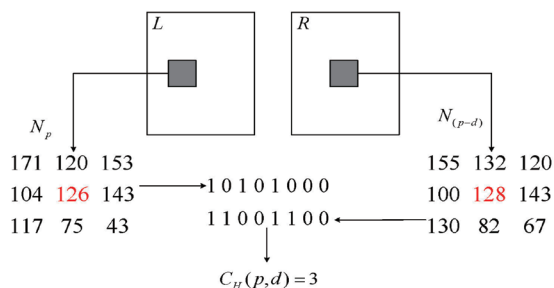


图 1 Census 变换

Census 变换是一种传统的非参数区域算法, 保留了窗口中像素之间的位置信息, 可以平衡光照信息对成本计算的影响。但是存在过于依赖中心点的问题, 从而导致 Census 变换的局限性。主要表现为像素的灰度值受噪声的影响而发生突变, 严重影响匹配精度。此外, 未充分利用像素间的相互关系信息, 导致在深度变化不一致和纹理重复区域存在不匹配问题。为解决 Census 算法受邻域窗口中心像素影响较大的问题, 本文通过阈值判别对 Census 算法进行改进。公式分别为:

$$I_p = \begin{cases} I_p, & |I_p - \bar{I}_p| \leq \delta \\ \bar{I}_p, & |I_p - \bar{I}_p| > \delta \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{I}_p = \frac{\sum I_p}{m \times n - 1} \quad (5)$$

式中:  $\sum I_p$  为窗口内所有邻域灰度值之和;  $\bar{I}_p$  为邻域灰度平均值;  $\delta$  为设置的阈值。

为防止图像边缘被过度平滑并进一步提升立体匹配算法的抗噪性能, 在改进 Census 变换的基础上, 引入图像的梯度信息。由于仅处理水平和竖直两个方向的图像边缘而对其他边缘不敏感, 导致匹配效果欠佳, 为解决上述问题, 考虑到图像边缘多为  $45^\circ$  和  $135^\circ$  两个方向, 本文使用 Sobel 算子求解图像像素点的梯度值。该算子由 4 组  $3 \times 3$  的矩阵组成, 如图 2 所示。

|               |   |    |                |    |   |                |    |    |                 |    |   |
|---------------|---|----|----------------|----|---|----------------|----|----|-----------------|----|---|
| 1             | 0 | -1 | 0              | 1  | 2 | 1              | 2  | 1  | -2              | -1 | 0 |
| 2             | 0 | -2 | -1             | 0  | 1 | 0              | 0  | 0  | -1              | 0  | 1 |
| 1             | 0 | -1 | -2             | -1 | 0 | -1             | -2 | -1 | 0               | 1  | 2 |
| (a) $0^\circ$ |   |    | (b) $45^\circ$ |    |   | (c) $90^\circ$ |    |    | (d) $135^\circ$ |    |   |

图 2 Sobel 算子

将 Sobel 算子与左右图像进行卷积获取四方向的梯度信息, 然后将梯度绝对差的平均值作为梯度代价。基于图像梯度信息的匹配代价计算公式为:

$$C_G(p, d) = \frac{1}{4} \sum_{i \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}} (|\nabla_i I_p^L - \nabla_i I_p^R(p-d)|) \quad (6)$$

通过给中心像素与邻域像素的绝对差值设置阈值选取合适的中心灰度值, 然后引入四方向的梯度值构建匹配代价。由于两者初始代价存在差异, 为避免初始代价不一致导致视差图准确度不够的问题产生, 将上述代价进行归一化处理构建新的匹配代价计算函数, 表达式为:

$$\begin{cases} C(p, d) = \phi(C_H(p, d), \lambda_1) + \phi(C_G(p, d), \lambda_2) \\ \phi(C, \lambda) = 1 - \exp(-\frac{C}{\lambda}) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $C(p, d)$  为最后的代价函数;  $\phi(C, \lambda)$  对代价进行归一化;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为代价的归一化参数。

### 1.2 匹配代价聚合

#### 1.2.1 自适应阈值十字交叉窗口构建

由于上述代价计算仅由目标像素及邻域窗口确定, 无法

充分利用像素之间的关系,本文引入自适应阈值十字交叉法:首先构建一个以中心像素为原点的十字臂,十字臂生长窗口根据颜色相似度和空间距离寻找该点的臂长,然后对十字臂里的像素点进行同样的操作,其公式为:

$$\begin{cases} D_c(p, p_1) < \tau_1 \text{ and } D_c(p_1, p_1 + (1, 0)) < \tau_1 \\ D_s(p, p_1) < L_1 \\ D_c(p, p_1) < \tau_2, \text{ if } L_2 < D_s(p, p_1) < L_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $D_c(p, p_1) = \max_{r \in R, G, B} |I_r(p_1) - I_r(p)|$ , 即 3 个颜色通道的差值最大值, 表示  $p_1$  和  $p$  的颜色差异;  $\tau_1$  和  $\tau_2$  是设定的颜色阈值,  $\tau_2 < \tau_1$ ;  $D_s(p, p_1) = |p_1 - p|$ ,  $D_s(p, p_1)$  表示  $p_1$  到  $p$  的空间长度;  $L_1$  和  $L_2$  是设定的臂长阈值,  $L_2 < L_1$ 。式中对窗口的构建设置了 3 个条件: (1) 不仅像素  $p_1$  和  $p$  的颜色差异要小于阈值  $\tau_1$ , 且像素  $p_1 + (1, 0)$  和  $p_1$  的颜色差异也要小于阈值  $\tau_1$ , 保证十字臂不会跨越边缘。(2) 确保像素  $p_1$  和  $p$  的灰度差不能超过  $L_1$ , 以此来控制十字臂的长度。(3) 当臂长在  $L_2$  到  $L_1$  之间的时候, 设定一个更严格的阈值  $\tau_2$ , 只有当颜色相似时, 臂长才能扩张到  $L_1$ 。

### 1.3 视差计算与优化

实现代价聚合之后, 需优化视差生成视差图, 通过赢家通吃 (WTA) 算法获得最优视差结果, 该步骤对各个视差下的聚合代价进行比较, 最终将最小代价对应的视差值作为最终视差结果。计算公式为:

$$D_p = \arg \min_{d \in [0, d_{\max}]} [C(p, d)] \quad (9)$$

式中:  $d_{\max}$  为最大视差;  $D_p$  为计算出的视差值。经过该步骤得到的初始视差图必然存在着误匹配点和遮挡点, 为进一步提高视差图的准确性, 本文通过左右一致性检测找出异常点, 采用视差填充、中值滤波作为视差优化算法。

## 2 实验结果与分析

为了验证改进算法的效果, 本文立体匹配算法实验数据集采用的是 Middlebury<sup>[14]</sup>。Middlebury 数据集是一组标准化的数据集, 专门用于评估立体视觉算法, 由 Middlebury 大学进行维护。该数据集以其卓越的标注质量和真实场景的代表性而著称。经过精心设计和精选, Middlebury 在 2003 年提出的数据集融合了结构光, 提供了丰富的具有挑战性的问题和复杂的图像场景, 旨在促进对计算机视觉算法的真实性能评估。本文选取该平台提供的 Tsukuba、Teddy、Cones、Venus 四组图像进行测试。通过 PyCharm 2021 软件使用 Python 语言编程, 操作系统为 Windows 11, 处理器为 i5-11260H, 内存为 16 GB。实验相关参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

| $\delta$ | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\tau_1$ | $\tau_2$ | $L_1$ | $L_2$ |
|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------|-------|
| 20       | 30          | 255         | 16       | 4        | 30    | 15    |

### 2.1 匹配代价计算的验证

为验证本文改进代价计算方法的有效性, 在不进行代价聚合的条件下, 将本文所提算法与传统 Census 算法、改进阈值 Census 算法进行对比。对 Cones 进行测试, 将得到的初始代价直接通过赢家通吃 (WTA) 算法计算视差图。结果如图 3 所示, 设置阈值后的 Census 变换得到的匹配代价图噪点更少; 融合多梯度的视差图中, 物体轮廓更加清晰。

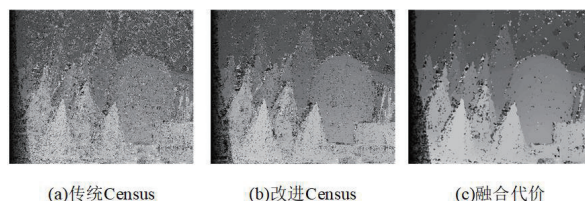


图 3 不同匹配代价下的视差图

分别计算各算法的平均误匹配率, 对比结果如表 2 所示。传统的 Census 变换平均误匹配率高达 29.94%, 对中心像素进行处理后使得平均误匹配率降低了 3.65%; 结合四方向梯度代价后, 误匹配率仅为 20.47%, 进一步证明所提算法的有效性。

表 2 不同代价误匹配率

| 方法        | Tsukuba | Teddy | Cones | Venus | 平均误匹配率 / % |
|-----------|---------|-------|-------|-------|------------|
| 传统 Census | 31.83   | 31.52 | 29.35 | 27.05 | 29.94      |
| 阈值 Census | 28.90   | 29.45 | 25.71 | 21.10 | 26.29      |
| 本文代价      | 24.93   | 21.07 | 16.97 | 18.86 | 20.47      |

### 2.2 整体算法对比

在计算得到整体代价的基础上, 基于自适应阈值十字交叉法的代价聚合通过上下文信息自适应地选择有效的聚合策略, 增强立体匹配的结果, 从而获得更平滑的视差图。将本文算法和传统 Census 算法得到的视差图进行对比, 如图 4 所示。传统 Census 在纹理复杂区域由于误匹配导致不平滑现象。而本文改进算法在 4 组图像上的匹配效果都表现较好, 获得的视差图质量更高。

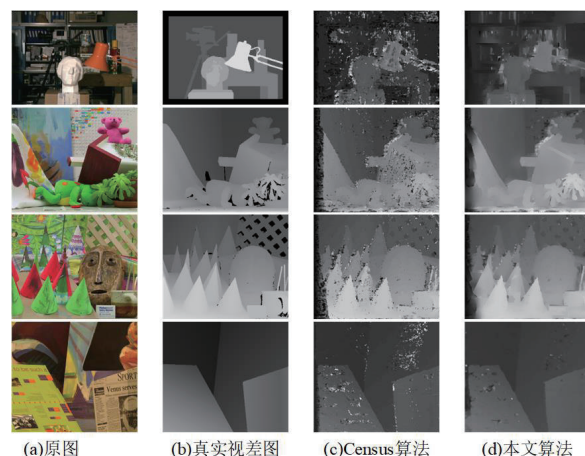


图 4 匹配结果



为客观评价本文算法在匹配精度的性能，分别与传统 Census 算法、AD-Census 算法以及 SAD 算法进行比较，以图像的非遮挡区域（non）和全部区域（all）的误匹配率作为指标，结果如表 3 所示。

表 3 各算法误匹配率对比

| 算法        | Tsukuba |       | Teddy |      | Cones |       | Vensus |      | 平均<br>误匹<br>配率<br>/% |
|-----------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------|----------------------|
|           | non     | all   | non   | all  | non   | all   | non    | all  |                      |
| Census    | 7.61    | 18.35 | 5.31  | 9.57 | 10.53 | 15.91 | 4.58   | 6.64 | 12.62                |
| AD-Census | 5.63    | 11.26 | 4.66  | 8.70 | 5.75  | 11.69 | 3.17   | 3.72 | 8.84                 |
| SAD       | 5.04    | 10.21 | 5.39  | 9.04 | 8.38  | 13.51 | 3.47   | 3.81 | 9.14                 |
| 本文算法      | 3.85    | 6.39  | 2.05  | 7.02 | 2.20  | 9.26  | 0.82   | 1.02 | 5.92                 |

由表 3 可以看出，在处理具有复杂纹理和视差不连续区域的 Teddy 和 Cones 图像时，本文算法的匹配精度较高，且在四组测试图像上，本文算法的平均误匹配率最低，仅为 5.92%，较传统 Census 算法的匹配精度提升了 6.7%。表明在进行立体匹配时本文改进算法获得的视差图质量更高，具有更有效的匹配精度。

3 结论

本文提出一种融合梯度和优化 Census 变换的立体匹配算法。针对传统 Census 变换过于依赖中心像素导致弱纹理区域的高误匹配率，对中心像素灰度值的选取进行优化，然后引入四方向梯度信息将两者代价进行归一化处理作为初始代价。采用自适应阈值十字交叉法进行代价聚合，通过 WTA 获得最优视差，然后对视差进行左右一致性检测，将异常匹配点进行插值填充和中值滤波等实现后处理。实验结果表明，本文算法极大降低了立体匹配算法的误匹配率，具有更好的适用性和更高的匹配精度。

参考文献：

[1] CHEN M J, DUAN Z X, ZHONG X L, et al. Scene reconstruction algorithm for unstructured weak-texture regions based on stereo vision[J].Applied sciences,2023,13(11):6407.

[2] 陈炎,杨丽丽,王振鹏. 双目视觉的匹配算法综述 [J]. 图学报, 2020, 41(5):702-708.

[3] SCHARSTEIN D, SZELISKI R, ZABIH R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[C/OL]//Proceedings IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision (SMBV 2001). Piscataway: IEEE, 2001[2024-05-11].<https://ieeexplore.ieee.org/document/988771>.

[4] 郑思棋,田金鹏,宋春林. 基于特征融合的半全局立体匹配算法 [J]. 信息技术与信息化 ,2022(2):5-8.

[5] JI W S, KIM W S, LIM P D, et al. Quaternary census transform based on the human visual system for stereo matching[J]. IEEE access, 2020, 8: 116501-116514.

[6] WANG Y N, GU M J, ZHU Y F , et al. Improvement of AD-Census algorithm based on stereo vision[J].Sensors, 2022, 22(18): 6933.

[7] 吴福培,黄耿楠,刘宇豪,等. 基于多特征 SAD-Census 变换的立体匹配算法 [J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(2): 278-290.

[8] 蒋文萍,汪凌阳,韩文超,等. 基于改进 Census 变换的自适应局部立体匹配 [J]. 电子测量技术 , 2022,45(13):82-87.

[9] ZHOU Z Q, PANG M .Stereo matching algorithm of multi-feature fusion based on improved census transform[J]. Electronics,2023,12(22):45.

[10] 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.

[11] 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.

[12] HOU Y G, LIU C Y, AN B W, et al. Stereo matching algorithm based on improved Census transform and texture filtering[J]. Optik, 2022, 249: 168186.

[13] LI D J, CHENG K, WANG C, et al.Stereo matching method of distribution box hole image based on improved AD-Census algorithm[J].Journal of physics conference series, 2023, 2428(1): 012035.

[14]BAO W , WANG W , XU Y H, et al. InStereo2K: a large real dataset for stereo matching in indoor scenes[J].Science China information sciences, 2020,63(11):136-146.

【作者简介】

曾甲元（2000—），男，湖南衡阳人，硕士研究生，研究方向：计算机视觉与人工智能。

肖伸平（1965—），通信作者（email: xsph\_519@163.com），男，湖南永州人，博士，教授、博士生导师，研究方向：时滞系统鲁棒控制理论及应用、人工智能。

赵倩颖（2000—），女，湖南长沙人，硕士研究生，研究方向：深度学习与人工智能。

（收稿日期：2024-11-18）