

基于反色均值化的非参数 Census 立体匹配算法<sup>①</sup>

窦 燕<sup>②\*</sup> 李 宁<sup>\*</sup> 康锦华<sup>\*</sup>

(<sup>\*</sup>燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

(<sup>\*\*</sup>河北省软件工程重点实验室 秦皇岛 066004)

**摘 要** 针对传统非参数 Census 变换过分依赖于变换窗口的中心像素灰度值的问题,提出了一种新颖的非参数 Census 变换的立体匹配算法。首先,该文研究了非参数 Census 变换并分析了其局限性;其次,考虑到像素空间位置,对于变换窗口进行反色处理后,求取邻域均值的反色来替代中心像素灰度值进行 Census 变换,提高了算法的抗干扰能力;最后,采用绝对误差和(SAD)方法和汉明距离作为相似性测度进行立体匹配,减少误匹配率,并通过左右一致性检测和亚像素插值来增大匹配的准确度。实验结果表明,此算法能够提高光照变换下匹配的鲁棒性,尤其对于深度不连续区域,适用于实时的立体匹配。

**关键词** 立体匹配, Census 变换, 反色处理, 邻域均值, 绝对误差和(SAD)算法

0 引 言

立体视觉技术是对一个场景同时获取视图和深度信息的可靠方法,其数据的精度主要取决于摄像系统和立体匹配算法<sup>[1,2]</sup>。立体匹配算法是近几十年来计算机视觉领域的研究热点和难点<sup>[3]</sup>。越来越多的研究专家和学者们以研究准确度高并且有较好鲁棒性的立体视觉系统为目标。然而,随着人工智能的发展,至今没有任何一种算法可以准确无误地解决图像对应点的问题。特别地,随着立体匹配应用领域的不断扩展,解决立体匹配算法中的相关问题迫在眉睫。立体匹配其实质是一个最优化求解问题,是一个通过建立合理的能量函数<sup>[4]</sup>,增加约束,采用最优化理论的方法进行方程求解的过程。

立体匹配算法的相似性度量大多是基于像素的灰度值计算的,即在理想光照条件下两幅图像中的同一特征点应该具有相同的灰度值<sup>[5,6]</sup>。在实际操作中,由于受到外部因素的影响,摄像机采集到的图

像受外部光照变换出现辐射度失真等问题,严重影响匹配算法的准确性。为了解决此问题,学者们对各种立体匹配算法进行光照测试发现,非参数 Census 变换对光照具有较强的鲁棒性<sup>[7]</sup>。由于传统 Census 变换过度依赖中心像素灰度值的大小,文献[8]利用临近像素灰度值的大小关系,对左右图像进行非参数 Census 局部变换,增强算法的抗干扰能力。王军政等人<sup>[9]</sup>提出了通过加权区域汉明距离的平均值和标准差作为相似性测量,可有效提高算法在深度不连续区域的匹配精度。文献[10]为了消除在深度不连续区域导致前景膨胀现象,提出在 RGB 空间进行稀疏 Census 变换,根据空间距离和颜色距离计算像素的权重,提高了光照变换的鲁棒性。张波等人<sup>[11]</sup>提出了一种自适应加权的汉明距离算法,通过引入邻域像素空间距离,将邻域像素分等级计算,丰富了匹配图像的信息,能够很好地反映图像纹理等信息,同时引入稀疏聚合窗口,不仅提高了光照变换下匹配的准确性和抗干扰性,减少了算法的复杂度,还提高了算法的实时性匹配。

① 国家自然科学基金(61379065)资助项目。  
② 女,1968 年生,博士,教授;研究方向:机器视觉与模式识别;联系人,E-mail: douyan@ysu.edu.cn  
(收稿日期:2018-08-30)

借鉴在光照不理想情况下对立体匹配算法的准确性与实时性的研究,本文首先分析了传统 Census 变换的局限性,利用变换窗口进行反色处理后求取均值的反色来替代中心像素灰度值作为参考值进行 Census 变换;通过汉明距离和绝对误差和算法 (sum of absolute differences, SAD) 作为立体匹配相似性测量,提高了匹配精度,减少了误匹配率;通过对生成的视差图进行检测和处理,生成最终视差图。

1 相关理论说明

1.1 Census 变换

Census 变换属于非参数图像变换的一种,变换过程简单,只有比较和加法运算,能够较好地检测出图像中的局部结构特征,如边缘、角点等。Census 变换的实质是将图像像素的灰度值编码成二进制码流,以此来获取邻域像素灰度值相对于中心像素灰度值的大小关系,具有很强的可实现性。

- Census 变换的基本思想是:
- (1)在图像区域定义一个矩形窗口,用矩形窗口遍历整幅图像;
  - (2)选取中心像素作为参考像素,将矩形窗口中每个像素的灰度值与参考像素的灰度值进行比较,灰度值小于或等于参考值的像素标记为 1,大于参考值的像素标记为 0;
  - (3)最后按位连接,得到由 0 和 1 组成的二进制码流。

变换过程可由式(1)和式(2)表示:

$$C(p) = \bigotimes_{q \in N_p} \xi(I(p), I(q)) \tag{1}$$
$$\xi(I(p), I(q)) = \begin{cases} 0 & I(q) \leq I(p) \\ 1 & I(q) > I(p) \end{cases} \tag{2}$$

式中, $C(p)$ 为变换窗口生成的比特串; $p$ 为中心像素, $q$ 为中心像素以外的其他像素, $N_p$ 为中心像素  $p$  对应的 Census 变换窗口, $I( *)$ 为像素  $*$  处的灰度值,为字符串连接符。

图 1 对一个  $3 \times 3$  窗口进行 Census 变换的示意图。如图所示选取中心像素的灰度值 128 进行 Census 变换得到比特串 110100101。

|     |     |                                      |   |   |                                      |
|-----|-----|--------------------------------------|---|---|--------------------------------------|
| 127 | 126 | 130                                  | 1 | 1 | 0                                    |
| 126 | 128 | 129 $\xrightarrow{\text{Census 变换}}$ | 0 | 0 | $\xrightarrow{\text{比特串}}$ 110100101 |
| 127 | 131 | 111                                  | 1 | 0 | 1                                    |

图 1 Census 变换示意图

1.2 反色原理

反色的原理很简单,即对图像的 R、G、B 值取反。在观察图像颜色的时候,反色会随着主色的出现而产生。当浏览图像的时候,视觉范围内的各种色光便刺激视网膜上的锥状感光细胞,从而产生所看到的各种颜色的色彩;由于视网膜上的锥状感光细胞一直受到同一色光刺激,便会有刺激疲劳现象产生,形成反色。环境色是影响物体色的因素之一,而环境色对物体颜色最主要的影响是环境色和物体色的对比现象,引起物体色的变化。

图 2 是对图 1 中窗口进行反色处理的示意图。

|     |     |                                 |     |     |     |
|-----|-----|---------------------------------|-----|-----|-----|
| 127 | 126 | 130                             | 128 | 129 | 125 |
| 126 | 128 | 129 $\xrightarrow{\text{反色处理}}$ | 129 | 127 | 126 |
| 127 | 131 | 111                             | 128 | 124 | 144 |

图 2 反色处理示意图

1.3 汉明距离

汉明距离是指两个字符串对应位置的不同字符的个数。在一个字符组集合中,任意两个字符之间汉明距离越小,抗干扰能力越强。汉明距离其实质是对两个字符串进行异或运算,并统计结果为 1 的个数,如式(3)所示:

$$d(x, y) = \sum (x[i] \oplus y[i]) \tag{3}$$

$(i = 0, 1, \dots, n - 2)$

其中  $d(x, y)$  表示两个字符之间的汉明距离, $\oplus$ 表示异或运算。

2 基于反色均值化的非参数 Census

2.1 立体匹配算法

本文算法首先对左、右视图利用变换窗口进行反色处理后求取邻域均值的反色来替代中心像素灰度值作为参考值进行 Census 变换,然后通过汉明距

离和 SAD 作为相似性测量,进行立体匹配,最后通过对生成的视差图进行视差细化,生成最终视差图。

图 3 为本文算法框图。

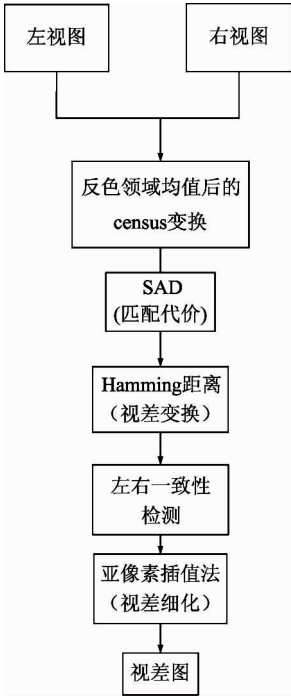


图 3 该文算法框图

2.2 Census 变换的改进

非参数 Census 变换下的立体匹配不仅能减少由相机的增益和偏置引起的变化的影响而且能够编码局部空间结构,区分旋转和反射,针对于接近深度不连续区域的外点,匹配的鲁棒性高。但是,传统的 Census 变换以中心像素作为比较参考值,过度依赖于中心像素的大小,对图像噪声比较敏感,尤其是当光照发生畸变时对变换结果影响很大。不仅如此,传统的 Census 变换没有充分利用周围像素的灰度信息,没有考虑利用像素间的互相关信息,容易引起与像素相关联的信息的丢失。而且随着窗口的大小增加,变量的大小的要求也有所增加。例如:对于一个  $3 \times 3$  大小的 Census 窗口,用于存储 Census 值的大小为 23,或者 8 位;对于一个  $5 \times 5$  大小的 Census 窗口,用于存储 Census 值的大小为 25,或者 32 位。

在传统 Census 变换的基础上,本章提出了基于反色均值化非参数 Census 匹配算法,首先对变换窗口进行反色处理,增强环境色和物体色的对比,在光照条件下突出物体本身,再求取邻域均值的反色来

替代。图 4 是对一个窗口进行改进 Census 变换的示意图。如图 4 所示,选取中心像素的灰度值 128 作为参考值进行 Census 换,得到比特串 110100101。

|     |     |     |           |   |               |
|-----|-----|-----|-----------|---|---------------|
| 127 | 126 | 130 | 1         | 1 | 0             |
| 126 | 128 | 129 | Census 变换 | 0 | 0             |
|     |     | 1   |           |   | 比特串 110100101 |
| 127 | 131 | 111 | 1         | 0 | 1             |

图 4 改进 Census 变换示意图

对窗口进行反色处理后,求取邻域均值的反色替代 Census 变换中的中心像素点,处理结果如图 5 所示。

|     |     |     |          |     |     |
|-----|-----|-----|----------|-----|-----|
| 127 | 126 | 130 | 127      | 126 | 130 |
| 126 | 128 | 129 | 反色均值化处理后 | 126 | 126 |
| 127 | 131 | 111 |          | 127 | 131 |

图 5 反色均值处理后的灰度值

如图 6 所示,选取反色均值处理后的中心像素的灰度值 126 作为参考值进行 Census 变换,得到比特串 000000001。

|     |     |     |           |   |               |
|-----|-----|-----|-----------|---|---------------|
| 127 | 126 | 130 | 0         | 0 | 0             |
| 126 | 126 | 129 | Census 变换 | 0 | 0             |
|     |     | 0   |           |   | 比特串 000000001 |
| 127 | 131 | 111 | 0         | 0 | 1             |

图 6 变换示意图

2.3 视差细化

改进后的 Census 变换的匹配算法,虽然提高了在光照变换下的抗干扰能力,但是生成的视差图中仍存在异常值,降低了算法的匹配率。为了增加算法的匹配精度,本小节对于匹配后的初始视差图通过左右一致性检测和亚像素插值进一步视差细化,尽可能地去掉异常点。

针对异常值中的遮挡点,采用左右一致性检测的作用是实现遮挡检测,根据左右两幅视差图,对于左图中的一个点  $p$ ,求得的视差值是  $d1$ ,那么  $p$  在右图中的对应点应该是  $(p - d1)$ ,其视差值记作

$d2$ 。若  $|d1 - d2|$  大于阈值,  $p$  标记为遮挡点。对于遮挡点,采用其左右方向上的正常灰度值进行填补。对于左图而言,遮挡点一般存在于背景区域和前景区域接触的地方。

针对异常值中的误匹配点,采用亚像素求精的方法进行填充。每个像素将被分为更小的单元从而对这些更小的单元实施插值算法。亚像素细分使计算的数值将比整数值更为精确。如果需要边缘检测的结果为整数值,可以把返回的小数值近似为最接近的整数。

3 实验结果与分析

为了验证算法的效果,本文算法在 VS2013 软件平台上用 C++ 实现,并选取 Middlebury 网站上的 4 组基准图像 Tsukuba、Venus、Teddy 和 Cones 实

验,给出相同参数设置下的匹配性能,并上传实验结果得到测评数据,以验证本文算法的有效性,实验结果如图 7 所示,能直观地反映本文匹配方法的整体处理性能。其中,第 1 行表示标准测试图原图,第 2 行表示对应的标准视差图,第 3 行表示采用本文算法得到的最终视差图。

为了验证算法的抗干扰能力,采用误匹配像素百分比作为重要指标进行算法评估,反映了计算得到的视差图与真实视差图的接近程度,百分比越低,表明实验中的视差图与真实视差图越接近,如式(4)所示。

$$B = \frac{1}{N} \sum |d_c(x, y) - d_T(x, y)| \triangleright \delta_d \quad (4)$$

式中,  $N$  为总的像素值,  $(x, y)$  为像素点的坐标,  $d_c(x, y)$ 、 $d_T(x, y)$  分别为计算视差和真实视差,  $\delta_d$  为可接受的误匹配阈值,一般  $\delta_d = 1$ 。

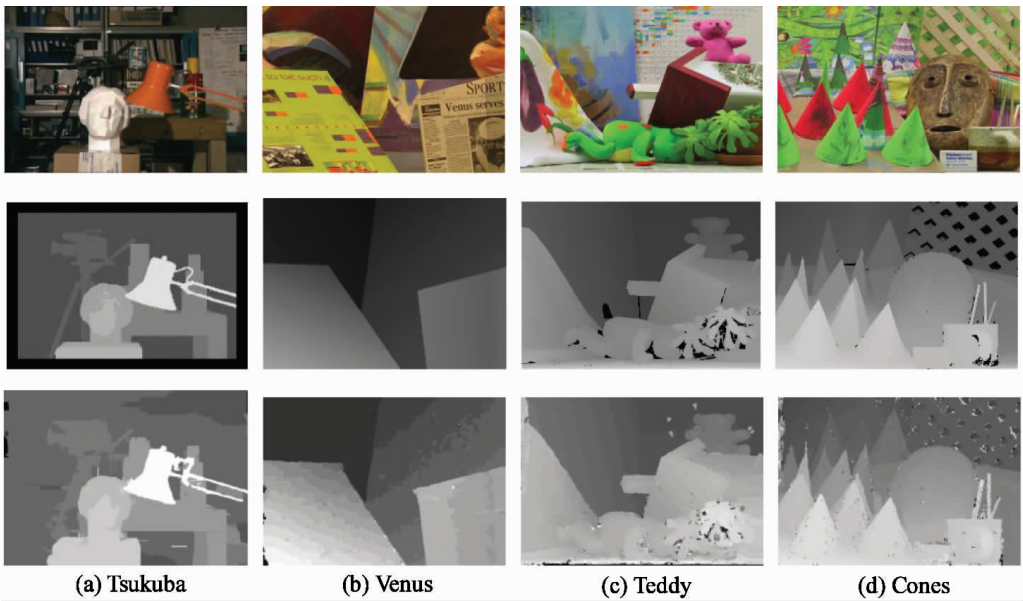


图 7 实验结果

表 1 为本文算法在误匹配评估阈值为 1 时的立体匹配定量评估。其中 Nocc、All、Disc 所在的列分别为非遮挡区域误匹配像素比、总误匹配像素比和深度不连续区域误匹配像素比。

各种方法实验结果的定量对比如表 1 所示,从表中可以看出,本文的算法相比于传统算法在深度不连续区域的匹配效果更好,平均误匹配像素比也

相对较低。对于 4 组基准图像 Tsukuba、Venus、Teddy 和 Cones 图,本文算法在深度不连续区域误匹配像素比仅仅低于局部算法 ADCensus<sup>[12]</sup>,明显优于 GC<sup>[13]</sup>、SSD + MF<sup>[6]</sup>、AdaptDispCalib<sup>[14]</sup>、Adapt weight<sup>[15]</sup>等算法;在非遮挡区域的误匹配像素比也明显高于 SSD + MF、AdaptDispCalib、GC 等算法。

表 1 基于误匹配率的立体匹配定量评估

| 算法             | Tsukuba |        |        | Venus |       |       | Teddy  |        |        | Cones  |        |        |
|----------------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | Nocc    | All    | Disc   | Nocc  | All   | Disc  | Nocc   | All    | Disc   | Nocc   | All    | Disc   |
| 本文算法           | 1.280   | 1.360  | 6.020  | 0.650 | 0.320 | 2.230 | 4.170  | 13.70  | 15.400 | 2.510  | 8.160  | 7.250  |
| 传统算法           | 9.060   | 10.060 | 21.50  | 2.340 | 3.720 | 21.50 | 12.70  | 21.10  | 28.10  | 7.900  | 17.000 | 16.200 |
| ADCensus       | 1.070   | 1.480  | 5.730  | 0.090 | 0.250 | 1.150 | 4.100  | 6.220  | 10.900 | 2.420  | 7.250  | 6.950  |
| AdaptDispCalib | 1.190   | 1.420  | 6.150  | 0.230 | 0.340 | 2.500 | 7.800  | 13.600 | 17.300 | 3.620  | 9.330  | 9.720  |
| Adapt weight   | 1.380   | 1.850  | 6.900  | 0.710 | 1.190 | 6.130 | 7.880  | 13.300 | 18.600 | 3.970  | 9.790  | 8.260  |
| GC             | 1.940   | 4.120  | 9.390  | 1.790 | 3.440 | 8.750 | 16.500 | 25.000 | 24.900 | 7.700  | 18.200 | 15.300 |
| SSD + MF       | 5.230   | 7.070  | 24.100 | 3.740 | 5.160 | 11.90 | 16.500 | 24.800 | 32.900 | 10.600 | 19.800 | 26.300 |

4 结 论

本文算法克服了传统 Census 变换的局限性,提出利用图像反色处理后邻域均值的反色代替中心像素灰度值进行 Census 变换的方法,提高了算法在光照变换下的鲁棒性。在立体匹配时,通过 SAD 和汉明距离进行相似性度量,提高匹配精度。通过一系列后续视差细化,减少误匹配对,生成最终视差图。实验结果表明,本文算法的效果要优于传统算法,尤其在光照变化下。但是,立体匹配过程通常是建立在深度连续性约束的基础上的,在深度不连续区域的算法还需要增加额外的约束条件,并进行更深层次的研究。

参考文献

[ 1 ] 贾松敏,王爽,王丽佳,等. 基于双层协作定位机制的移动机器人目标跟踪[J]. 高技术通讯,2013,23(11):1154-1160.

[ 2 ] Meger D, Lai K, Helmer S, et al. Curious George: An attentive semantic robot[J]. *Robotics & Autonomous systems*, 2008, 56(6):503-511

[ 3 ] Zitnick C L, Kang S B. Stereo for image-based rendering using image over-segmentation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 75(1):49-65

[ 4 ] 张赞赞,王辉,吴琼,等. 基于立体匹配技术的数字全息三维形貌重构[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11):113-121

[ 5 ] 杨宇翔,高明煜,尹克,等. 结合同场景立体图对的高质量深度图像重建[J]. 中国图象图形学报, 2015,

20(01):1-10

[ 6 ] 赖小波,朱世强,马璇. 一种对光照条件不敏感而快速的局部立体匹配[J]. 机器人, 2011, 33(3):292-298

[ 7 ] Hirschmuller H, Scharstein D. Evaluation of cost functions for stereo matching[C]. In: *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, USA, 2007. 1-8

[ 8 ] Zabih R, Woodfill J. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994. 151-158

[ 9 ] 王军政,朱华健,李静. 一种基于 Census 变换的可变权重立体匹配算法[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(7):704-710

[10] 于方杰,栾新,宋大雷,等. 一种光照变化条件下的自适应权重局部立体匹配算法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(04):108-111

[11] 张波,谢明,刘杰. 基于 Census 变换的自适应权重 Hamming 距离立体匹配算法[J]. 电子技术应用, 2016, 42(12):119-121

[12] Mei X, Sun X, Zhou M, et al. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware[C]. In: *IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, Barcelona, Spain, 2011. 467-474

[13] Boykov Y, Veksler O, Zabih R. Fast approximate energy minimization via graph cuts[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2002, 23(11):1222-1239

[14] Gu Z, Su X, Liu Y, et al. Local stereo matching with adaptive support-weight, rank transform and disparity calibration[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(9):1230-1235

- [15] Yoon K J, Kweon I S. Locally adaptive support-weight approach for visual correspondence search[C]. In: 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision

and Pattern Recognition, San Diego, USA, 2005. 924-931

## Non parametric Census stereo matching algorithm based on color reversing equalization

Dou Yan<sup>\*\*</sup>, Li Ning<sup>\*</sup>, Kang Jinhua<sup>\*</sup>

(<sup>\*</sup> College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qihuangdao 066004)

(<sup>\*\*</sup> Key Laboratory of Hebei Software Engineering, Qihuangdao 066004)

### Abstract

Aiming at the problem that the traditional nonparametric Census transform is too dependent on the gray value of the center pixel of the transform window, a novel stereo matching algorithm for nonparametric Census transform is proposed. Firstly, the nonparametric Census transform is studied and its limitation is analysed; Secondly, considering the pixel space position, the inverse colour of the transform window is obtained to replace the gray value of the center pixel for Census transform, which improves the anti-interference ability of the algorithm; Finally, the sum of absolute of differences (SAD) method and Hamming distance are used as similarity measures to reduce the mismatch rate, and the accuracy of the matching is enhanced by the left and right consistency detection and sub-pixel interpolation. The experimental results show that this algorithm can improve the robustness of the matching under illumination transform, especially in the depth discontinuous region, and is suitable for real-time stereo matching.

**Key words:** stereo matching, Census transform, color reversing, neighbourhood mean, sum of absolute of differences (SAD) algorithm