

非参量变换在彩色图像立体匹配中的应用研究^{*}

郭龙源 卢阿丽 杨静宇

(南京理工大学计算机科学与技术系 南京 210094)

摘要 随着彩色摄像机广泛使用,对彩色图像的视差匹配研究越来越普遍。研究显示,使用彩色图像匹配比灰度图像匹配精确度增加 20%~25%。根据非参量变换原理,提出了基于非参量变换的彩色图像立体匹配算法,将 Rank 变换应用到彩色图像的区域匹配方法中,并采用 census 变换后的汉明码距离作为新的约束条件。实验表明提高了原来方法的抗噪性和匹配准确性。

关键词 彩色图像,非参量变换,Rank 变换,立体匹配,鲁棒性

Research on Application of Non-parametric Transform in Color Image Stereo Matching

GUO Long-yuan LU A-li YANG Jing-yu

(Department of Computer Science & Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract Research of color image stereo matching becomes along with wide use of color camera. It is shown that the precision of matching results are always improved by 20% to 25% when using color information instead of gray value information. Presents color image matching approach based on non-parametric transform. With non-parametric theory, applies rank transform to color image local area matching. Hamming distance between pixels after the census transform is presented as a new constraint. The experiment result indicates that the proposed algorithm is the more precise matching and invariance to certain types of image noise than the ones based on intensity.

Keywords Color image, Non-parametric, Rank transform, Stereo matching, Robustness

1 引言

立体匹配是由二维图像获得三维物体结构信息的主要技术手段。现在提出了多种算法,但多关注于灰度图像的匹配应用,专门研究彩色图像匹配的文献还不多。随着彩色摄像机广泛使用,对彩色图像的处理越来越普遍,而且研究显示使用彩色图像匹配比灰度图像匹配精确度增加 20%~25%^[7]。在关于彩色图像匹配算法的研究文献中^[1,2],多数匹配算法都是对灰度图像算法的扩展,当然这是一个快速而有效的途径。比如文献[1]采用彩色段和动态规划的方法,彩色段就是对灰度段原理的扩展^[3]。还有一些文献除了对算法的扩展,还利用彩色图像特有的性质,提出新的匹配算法或约束条件。如文献[4]提出的色差梯度的概念,对提高彩色图像的匹配精度有一定的帮助。

本文提出了将 Rank 变换应用于彩色图像视差匹配的方法。Rank 变换属于非参量变换,因为它有抗噪性,所以在信号处理中有较多的应用,而且能应用到黑白图像的匹配中,并获得较好的匹配效果^[5]。本文根据彩色图像可以分解为红绿蓝三基色图像的特点,对其进行 Rank 变换,再进行匹配。实验表明,较直接以灰度为匹配基元的方法,本算法的抗噪性和鲁棒性都有所提高。

2 非参量变换

非参量变换是一种数理统计的方法,其基本思想是通过检测单元与邻近若干参考单元相比较,统计确定有无信号存

在^[6]。本文中的 Rank 变换和 Census 变换都属于非参量变换。为简化说明,下面以灰度图像为例,阐述原理,然后再推广到彩色图像。

2.1 Rank 变换原理及抗噪分析

对图像的 Rank 变换,是以一个像素点为中心开一个矩形窗口,称为 Rank 窗口,统计 Rank 窗口中所有灰度值小于中心像素灰度值的像素的个数,并以这个数代替原来中心像素点的灰度值。通过每个像素的 Rank 变换后,整个图像被转换为一个整数矩阵,这种图像称为 Rank 图像。

定义 1 设 $f(x, y)$ 表示离散图像当前像素 (x, y) 的灰度值, $N(x, y)$ 表示以 (x, y) 为中心的矩形窗口像素集合,则对图像的 Rank 变换定义为

$$r(x, y) = \sum \delta(f(x, y), f(x + \xi, y + \eta)) \quad (1)$$

$$\delta(x_1, x_2) = \begin{cases} 1, & x_2 < x_1 \\ 0, & x_2 \geq x_1 \end{cases} \quad (2)$$

同理可以得红绿蓝单色图像的 Rank 变换:

$$r_{i=R,G,B}(x, y) = \sum \delta(f_{i1}(x, y), f_{i2}(x + \xi, y + \eta)) \quad (3)$$

以 3×3 Rank 窗口为例,因为中心像素 $f(x, y)$ 的灰度为 161。由式(2), $N(x, y)$ 转换为 $\delta(x, y)$, 求 $\delta(x, y)$ 所有元素的和,即为 $f(x, y)$ 以 $N(x, y)$ 为 Rank 变换窗口的 Rank 变换值 $r(x, y)$ 。也可以直接从 $N(x, y)$ 中看出,有 5 个像素灰度值小于中心像素,因此 $r(x, y) = 5$ 。图 1 显示了求解的过程。

$$\begin{array}{ccc} 160 & 162 & 160 \\ N(x, y) = 159 & 161 & 163 \\ 161 & 160 & 160 \end{array} \longrightarrow \delta(x, y)$$

^{*} 本课题得到国防基础研究项目(编号:J1500C002)基金资助。郭龙源 博士研究生,讲师,主要研究方向为计算机视觉、模式识别与人工智能;卢阿丽 博士研究生;杨静宇 教授,博士生导师,主要研究方向为计算机视觉、信息融合、模式识别、智能机器人。

$$\begin{matrix} 1 & 0 & 1 \\ =1 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 1 \end{matrix} \xrightarrow[\text{变换}]{\text{Rank}} r(x,y)=5$$

图1 Rank变换求解过程

经过 Rank 变换后,像素的灰度值(0 到 255)就转换为一个范围较小的整数(0 到 $R-1$, R 是 $N(x,y)$ 内的像素总数)。在 Rank 变换后,这个整数实质上就是中心像素灰度值在转换窗口内灰度值排序的序号。这样,再计算左右窗口的相关性时,并不是直接用灰度,而是用这些序号来进行比较。由于转换是窗口内像素灰度的相对值,使得匹配基元对椒盐噪声类的随机干扰有较好的抑制作用。这些噪声多是在浮尘、雨或雪等环境下拍摄图像所造成的。相对于采用简单的灰度值作为匹配基元来说,提高了算法的抗噪性。在图 2 中,Rank 窗口的某个像素 I_a 受到干扰,虽然 I_a 受干扰后的范围可能是 0 到 255,但 $r(x,y)$ 值的变化只是 1,特别对于高幅值的干扰(当 $I_a > 161$)可以完全地抑制。所以说 Rank 变换对椒盐噪声类的随机干扰有较好的抑制作用。

$$\begin{matrix} 160 & I_a & 160 \\ N(x,y)=159 & 161 & 163 \longrightarrow \delta(x,y) \\ 161 & 160 & 160 \\ 1 & \alpha & 1 \\ =1 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 1 \end{matrix} \xrightarrow[\text{变换}]{\text{Rank}} r(x,y) = \begin{cases} 5 \dots\dots I_a > 161 \\ 6 \dots\dots I_a \leq 161 \end{cases}$$

图2 Rank变换抗噪图例

2.2 Census 变换

定义 2 设 $f(x,y)$ 表示离散图像当前像素 (x,y) 的灰度值, $N(x,y)$ 表示以 (x,y) 为中心的矩形窗口像素集合,则像素 (x,y) 以 $N(x,y)$ 为变换区域的 Census 变换定义为

$$R(x,y) = \text{BitString}_{\xi, \eta \in N} \delta(f(x,y), f(x+\xi, y+\eta)) \quad (4)$$

BitString 表示前后连接。以 3×3 矩阵为例,图 3 显示了求解的过程。

$$\begin{matrix} 160 & 162 & 160 \\ N(x,y)=159 & 161 & 163 \longrightarrow \delta(x,y) \\ 161 & 160 & 160 \\ 1 & 0 & 1 \\ =1 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 1 \end{matrix} \xrightarrow[\text{变换}]{\text{Census}} R(x,y) = 101100011$$

图3 Census变换图例

3 基于 RANK 变换的彩色图像 SAD 匹配算法

本算法首先将彩色图像按红绿蓝三通道分别进行 Rank 转换,然后使用区域匹配方法求出视差。基于区域匹配方法是把一幅图像中某一像点的灰度邻域作为模板,在另一幅图像中搜索具有相同或相似灰度值分布的对应点邻域,从而实现两幅图像的匹配。在匹配过程中,通常是以邻域相似性作为测度。简单的 SAD(Sum of Absolute Differences)算法的费用函数为

$$SAD(x,y,k) = \sum_{\xi, \eta \in w} |f_1(x+\xi, y+\eta) - f_2(x+\xi+k, y+\eta)| \quad (5)$$

f_1, f_2 分别表示左右灰度图像, w 为匹配窗口, k 为搜索范围。当 $SAD(x,y,k)$ 最小时,左右两个像素就为最佳匹配对。

3.1 费用函数

根据色度学的三基色原理,任何色光都可以由红、绿、蓝三种单色光按不同比例相配而成。因此,彩色图像的模型可以由红 $f_R(x)$ 、绿 $f_G(x)$ 、蓝 $f_B(x)$ 单色图像来组合表示。设一对匹配彩色图像为 $(f_{R1}(x), f_{G1}(x), f_{B1}(x))$ 和 $(f_{R2}(x), f_{G2}(x), f_{B2}(x))$, 以红绿蓝三通道的 Rank 变换值作为匹配基元,则本文算法的费用函数为

$$SAD_{RGB}(x,y,k) = \sum_{S=R,G,B} \sum_{\xi, \eta \in w} |r_{S1}(x+\xi, y+\eta) - r_{S2}(x+\xi+k, y+\eta)| \quad (6)$$

r_{S1}, r_{S2} 分别为左右图像变换后的 Rank 图像,当 $SAD_{RGB}(x,y,k)$ 最小时,左右两个像素就为最佳匹配对。这时,视差为

$$d = \underset{k}{\operatorname{argmin}} SAD_{RGB}(x,y,k) \quad (7)$$

3.2 约束条件

在 Rank 图像进行匹配时,可能会出现多个最佳匹配,这就会造成许多误匹配。为了减少这种误匹配,除了采用三个约束条件(唯一性、相容性和连续性)外,本文采用了一种新的约束条件,在 Rank 窗口中对像素进行 Census 变换,再利用匹配窗口 Census 变换值间的汉明距离,来进一步比较,达到减少误匹配的目的。本算法涉及到两类窗口(即 Rank 窗口和匹配窗口),图 5 显示了它们的关系。

定义 3 两个像素的 Census 变换值 $R_l(x_1, y_1)$ 和 $R_r(x_2, y_2)$ 间的汉明码距离为

$$HAMMING(R_r(x_2, y_2), R_l(x_1, y_1)) = \sum_{(\xi, \eta)} \delta_r(f(x_2, y_2 + \xi, y_1 + \eta) \oplus \delta_l(f(x_1, y_1), f(x_1 + \xi, y_1 + \eta))) \quad (8)$$

由于 Rank 变换值由像素灰度比较而来,所以会出现不同像素分布,但在 $r(x,y)$ 值相等的情况下,利用 Census 变换可以进一步判断最优匹配对。在图 4 中, $N_1(x_1, y_1)$ 和 $N_2(x_2, y_2)$ 的 Rank 变换值都为 5,与图 3 中 $N(x,y)$ 的 Rank 变换值的差都为零,因此从 Rank 变换值无法判断哪一个与 $N(x,y)$ 更相似。但它们的 Census 变换不同,根据它们与 $N(x,y)$ 的 Census 变换的汉明码距离不同:

$$HAMMING(R_2(x_2, y_2), R(x,y)) = 4,$$

$$HAMMING(R_1(x_1, y_1), R(x,y)) = 0. \text{显然可以判断 } N_1(x_1, y_1) \text{ 与 } N(x,y) \text{ 更相似。}$$

$$\begin{matrix} 160 & 162 & 160 \\ N_1(x_1, y_1)=159 & 161 & 163 \longrightarrow R_1(x_1, y_1) = 101100011 \\ 161 & 160 & 160 \\ 161 & 162 & 160 \\ N_2(x_2, y_2)=163 & 161 & 160 \longrightarrow R_2(x_2, y_2) = 001001111 \\ 159 & 160 & 160 \end{matrix}$$

图4 Census变换最优判断示意图

根据这个原理,对两个待匹配窗口内所有相对位置相同的像素,求出它们的汉明码距离,再求和,就可得出本算法的约束函数:

$$g_{RGB}(x,y,k) = \sum_{S=R,G,B} \sum_{(m,n)} HAMMING(R_{S1}(x+m, y+n), R_{S2}(x+m+k, y+n)) \quad (9)$$

其中, k 为搜索范围。当出现多个最优值时,可以用式(9)作为约束条件加以取舍。取 $g(x,y,k)$ 最小时的像素对为最佳匹配,此时的 k 即为对应点的视差。

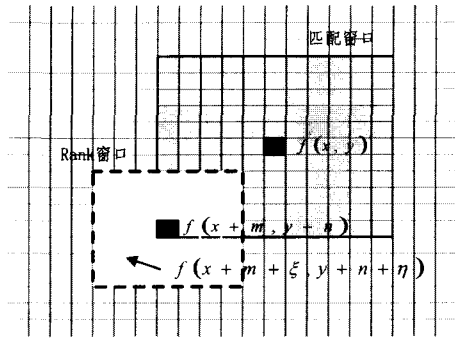


图5 Rank窗口和匹配窗口

4 实验结果及分析

以 SAD 算法为例做对比实验,即以像素为匹配基元的 SAD 算法和以本文算法进行比较。在 MATLAB 环境下,分别对 cones 和 teddy 进行了不加噪对比实验,及对 Corridor 图像加系数 0.05 的椒盐噪声的对比实验。Rank 转换窗口为 7×7 , 匹配窗口都为 9×9 。图 6 显示了实验的结果。

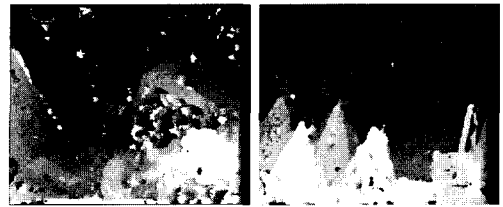
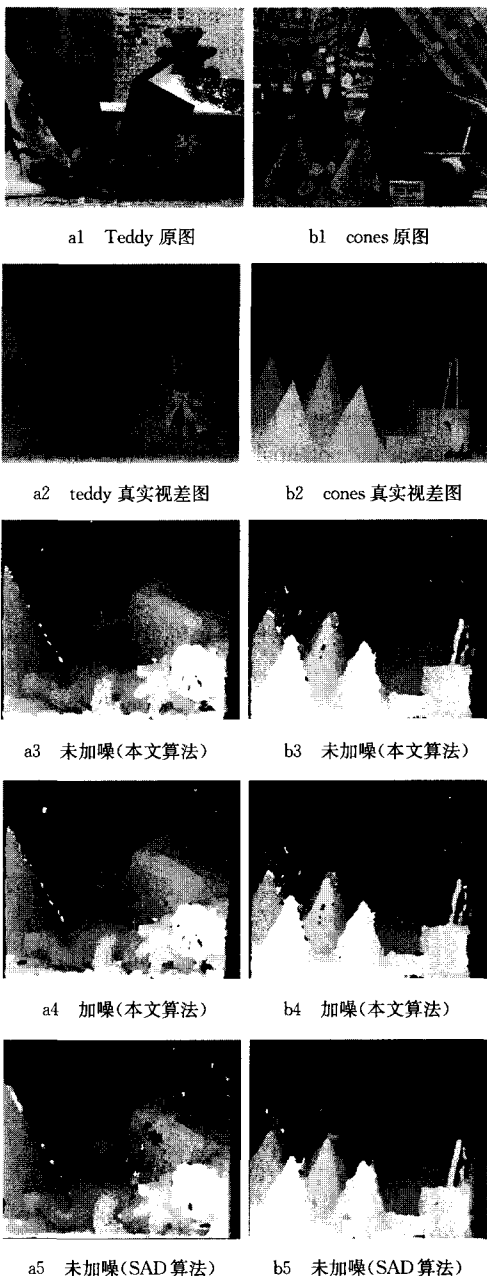


图6 实验结果图

图 6 的第一行分别是原图,第二行是真实视差图,a3,b3,a4,b4 是采用本文算法在加噪或不加噪等不同情况下的视差图,a5,b5,a6,b6 是 SAD 算法在加噪或不加噪等不同情况下的视差图。从图 6 可以看出,在未加噪声时,本文算法视差图(a3,b3)与 SAD 结果图(a5,b5)比,没有明显的差别;在 teddy 图(a1)中间暗红色连续处,本文算法求出的视差(a3)是连续的,而 SAD 的视差图(a5)在这个区域出现了明显的误匹配。在加噪声后,本文算法求出的视差图(a4,b4)与没有加噪声时的视差图(a3,b3)之间没有太大的变化。而 SAD 算法得到的视差图(a6,b6)效果明显变差,特别是 teddy 图(a6)中误匹配明显区域变大。这说明,由于新的匹配基元的引进,本文算法比 SAD 算法对椒盐噪声有更好的抑制效果。

结束语 本文提出了基于非参量变换区域匹配算法,将 Rank 变换应用到彩色图像的区域匹配方法 SAD 中,并采用 Census 变换后的汉明码距离作为新的约束条件。实验表明,本文算法不仅有较好的批判效果,而且对椒盐噪声有较好的抑制作用。椒盐噪声多由在浮尘、雨或雪等环境下拍摄图像时造成。这说明本文算法在这些实际环境下有更好的应用前景。彩色图像的数据量比灰度图像的信息量更大,而 Rank 变换可以将像素的灰度值转换为一个范围较小的整数,在匹配彩色图像时可以节省很多存储空间。而且该算法实现时,只涉及到简单的比较、计数和异或等操作,比较适合在硬件上实现。当然,我们还发现本算法对高斯噪声的抑制效果不太理想。如何充分利用和提高本算法的抗干扰能力,并与其他算法结合,将是今后可能的研究方向。

参考文献

- [1] Cai Xuanping, Zhou Dongxiang, Li Ganhua, et al. A stereo matching algorithm based on color segments. Intelligent Robots and Systems[C]. (IROS 2005). Aug. 2005;3372 - 3377
- [2] 高富强,张帆. 一种快速彩色图像匹配算法[J]. 计算机应用, 2005(11)
- [3] 周东翔,蔡宜平,孙茂印. 基于灰度段的立体匹配算法. 软件学报, 2001,12(7):1101-1106
- [4] Okutomi M, Yoshizaki O, Tomita G. Color stereo matching and its application to 3-D measurement of optic nerve head pattern recognition[C]//Conference A; Computer Vision and Applications. 11th IAPR International Conference. 1992,1(1):509-513
- [5] Zabih R, Woodfill J. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence//3rd European Conference on Computer Vision. Stockholm, 1994
- [6] 段凤增. 信号检测理论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2002:226-228
- [7] Mühlmann K, et al. Calculating Dense Disparity Maps from Color Stereo Images: an Efficient Implementation[J]. International Journal of Computer Vision, 2002,47(1):79-88