

基于视差梯度的快速区域匹配方法^{*})

郭龙源 夏永泉 杨静宇

(南京理工大学计算机科学与技术系 南京 210094)

摘要 通过引入视差梯度理论,本文提出了一种基于视差梯度的快速区域匹配方法,该方法首先根据匹配点的不同特性,确定匹配搜索范围,然后再进行匹配得出视差图。通过对比实验,表明采用这种可变匹配搜索范围的方法,比采用固定匹配搜索范围的方法,有更快的执行速度和更少的计算量。

关键词 立体匹配,视差梯度,可变搜索范围,区域匹配

Fast Region-matching Approach Based on Disparity Gradient

GUO Long-Yuan XIA Yong-Quan YANG Jing-Yu

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

Abstract According to disparity gradient theory, the paper presents a fast region-matching approach. Differing with some region matching algorithms, its matching search range is variable. The approach's strategy: First, according to different identity, matching pixels' search range will be educed. Second, region-matching will be processed and disparity map will be done. The experiment result indicates that the proposed algorithm is the higher matching speed and the less calculation than the ones based on invariable search range.

Keywords Stereo matching, Disparity gradient, Adaptive search range, Region matching

在双目立体视觉的区域相关匹配方法中^[1,2],寻找任意像素点的匹配点,都是以最大视差为搜索范围。但实际上,一幅图像中的很多像素点在匹配过程中存在一定的冗余搜索。那么是否有办法使得匹配时,可以根据实际情况自动地调整搜索范围以减少冗余搜索呢?即根据前面匹配的结果和其他一些已知条件,来确定当前的匹配搜索范围。视差梯度的理论为解决这个问题提供了依据。

对人类视觉系统的研究表明,某像素点与其相邻点之间的视差梯度不会超过一定的值^[3]。一些文献^[4~9]对视差梯度在视差匹配中的应用进行了研究。Pollard, Mayhew 和 Frisby 提出的 PMF 算法^[6,7],是最早将视差梯度理论应用到立体匹配的算法之一。文^[6]证明了多数自然场景的表面,包括锯齿状的表面,正确匹配的视差梯度通常小于 1。Pollard^[7]等指出了视差梯度和 3D 场景的深度的内在联系。P. Moallem 和 K. Faez^[8]将视差梯度约束应用到基于特征的匹配中。

但这些文献,对于视差梯度的应用研究,主要集中在基于特征的匹配方法,而且只是在非水平特征点匹配时利用视差梯度的性质。针对这种情况,本文根据视差梯度的定义,通过详细分析视差梯度和搜索范围的联系,提出了一种基于视差梯度的快速区域匹配方法。该方法将视差梯度应用到区域匹配的算法中,通过去除冗余搜索,减少了匹配时的计算量,提高了算法匹配的速度。文中算法匹配过程中以右图像为参考。

1 视差梯度定义

根据立体视觉中成像的几何原理,三维场景中的点 $P(x, y, z)$,在左右图像中的投影是 $P^l(x^l, y^l)$ 和 $P^r(x^r, y^r)$ 。对于已经校准的图像, $y^l = y^r$, 因此视差 d 可由公式(1)表示:

$$d = x^l - x^r = bf/Z \quad (1)$$

对于场景中的任意两个点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$,在左右图像上的投影点分别为 $P_1^l(x_1^l, y_1^l)$, $P_2^l(x_2^l, y_2^l)$, $P_1^r(x_1^r, y_1^r)$, $P_2^r(x_2^r, y_2^r)$,如图 1 所示。它们的视差梯度 δd 可以定义为:

$$\begin{aligned} \delta d &= \frac{2 \times ((x_2^l - x_2^r) - (x_1^l - x_1^r))}{\|(p_2^l - p_1^l) + (p_2^r - p_1^r)\|} \\ &= \frac{2 \times ((x_2^l - x_1^l) - (x_2^r - x_1^r))}{\|(p_2^l - p_1^l) + (p_2^r - p_1^r)\|} \end{aligned} \quad (2)$$

$\|\cdot\|$ 表示向量范数。

$p_1^l = (p_1^l + p_1^r)/2$ $p_2^l = (p_2^l + p_2^r)/2$,则公式(2)可转化为:

$$\begin{aligned} \delta d &= \frac{(x_2^l - x_1^l) - (x_2^r - x_1^r)}{\|(p_2^l - p_1^l)\|} \\ \text{或 } \delta d &= \frac{d_2 - d_1}{\|(p_2^l - p_1^l)\|} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $d_1 = x_1^l - x_1^r$, $d_2 = x_2^l - x_2^r$

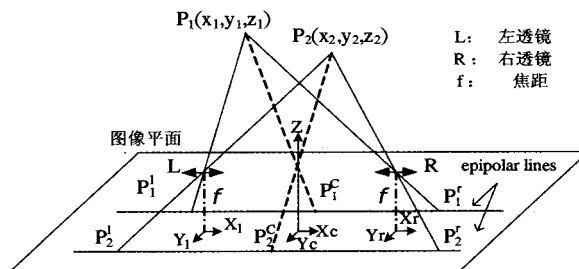


图 1 双目系统成像立体示意图

^{*})资助项目: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,主要研究方向为计算机视觉、模式识别与人工智能。杨静宇 教授,博士生导师,主要研究领域为计算机视觉、信息融合、模式识别、智能机器人。

2 视差梯度 δd 和搜索范围

视差梯度的定义公式,显示了视差梯度 δd 和搜索范围是有内在联系的,现具体讨论它们的联系。定义 $\Delta x_l = x_2^l - x_1^l$; $\Delta x_r = x_2^r - x_1^r$; $\Delta y_l = y_2^l - y_1^l$; $\Delta y_r = y_2^r - y_1^r$, 则公式(3)可转化为:

$$\delta d = \frac{2(\Delta x_l - \Delta x_r)}{\sqrt{(\Delta x_l + \Delta x_r)^2 + (\Delta y_l + \Delta y_r)^2}} \quad (4)$$

本文考虑沿极线方向从左到右逐点顺序匹配,则 $P_1(x_1^l, y_1^l)$ 和 $P_2(x_2^l, y_2^l)$ 就是右图像中同一极线上前后两相邻点,如图2所示。即 $\Delta x_r = 1$; $\Delta y_r = \Delta y_l = 0$, 公式(4)简化为

$$\delta d = \frac{2(\Delta x_l - 1)}{\sqrt{(\Delta x_l + 1)^2}} \quad (5)$$

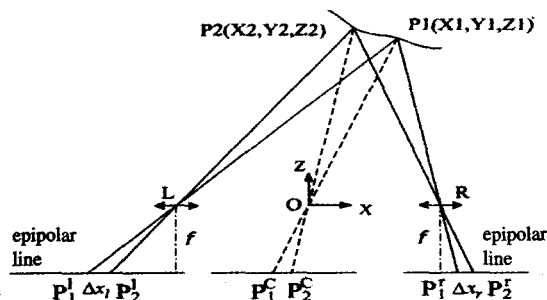


图2 双目系统成像平面示意图

根据公式(5)和 Δx_l 定义,可推出同一极线上前后两个相邻点的视差梯度和匹配搜索范围的关系公式:

$$x_2^l = \Delta x_l + x_1^l = \frac{2 + \delta d}{2 - \delta d} + d_1 + x_1^l \quad (6)$$

表1 δd 的范围与 Δx_l 的取值范围对应表

Δx_l 的取值范围	δd 的范围
$\{0, 1, 2, 3\}$	$(-1.0, 1.0)$
$\{0, 1, 2, 3, 4\}$	$(-1.2, 1.2)$
$\{4, 5, \dots, d_{\max}\}$	$(1.2, 2.0)$

公式(6)表明,当前像素点在左图像的匹配点可能存在的范围,可以由前一个点的视差值 d_1 , 视差梯度 δd 以及 x_1^l 来确定,现分情况具体讨论:

1) 当 $|\delta d| > 2$ 时,说明 $\Delta x_l < 0$, 也就是右图像前后两个像素在左图像的匹配点的前后顺序颠倒了,即发生了倒序的现象,这是由遮掩引起的。

2) 当 $\delta d = 2$ 时, $\frac{2 + \delta d}{2 - \delta d} = \infty \Rightarrow x_2^l = \infty$, 说明当前像素点在左图像中的匹配点可能有无穷个,也就是发生了右遮掩的情况。

3) 当 $\delta d = -2$ 时, $\frac{2 + \delta d}{2 - \delta d} = 0 \Rightarrow x_2^l = d_1 + x_1^l \Rightarrow x_2^l = x_1^l$, 说明当前像素点在左图像中的匹配点和前一个点的匹配点重合,也就是发生了左遮掩的情况。

4) 当 $1.2 < |\delta d| < 2$ 时, $4 + d_1 + x_1^l < x_2^l < \infty$, 此时像素点视差变化快,这是符合场景中的边缘点情况。因此,对于边缘点多可取这个范围。考虑实际情况,范围的上限取最大视差。

5) 当 $|\delta d| < 1.2$ 时, $1/4 + d_1 + x_1^l < x_2^l < 4 + d_1 + x_1^l$, 像素点处于较平滑区,视差是连续变化的,这是场景中的一般情况。因此,对于非边缘点多可取这个范围。

6) 当 $|\delta d| \ll 1$ 时, $\frac{2 + \delta d}{2 - \delta d} \rightarrow 1 \Rightarrow x_2^l = d_1 + x_1^l + 1$, 此时视差

的变化很小,可以近似认为没有变化。这时的搜索范围可以为零,也就是不用搜索而可直接得出视差值。表1列出了一些 δd 的范围与 Δx_l 的取值范围对应关系。

3 基于可变搜索范围的算法

上节在理论上说明了视差梯度的各种情况,以及与匹配时搜索范围的关系。但在算法实现时,并不用考虑所有的情况。因为对于多数图像像素,大致可分属于物体边缘线或平滑区域两类。而对于边缘处遮掩的情况,用视差梯度理论无法直接确定搜索范围,需要另外的方式来解决。因此,本文只考虑 $|\delta d| < 1.2$ 和 $1.2 < |\delta d| < 2$ 的情况是可行的。

在边缘特征点,一般视差变化较大,有较大的视差梯度值,因此采用较大的搜索范围;在非边缘的平滑区一般视差变化是连续的,因此采用较小的视差梯度约束,从而减小了搜索范围。整体上看,本算法是通过减少搜索冗余,来达到提高算法速度的目的。另外,由于搜索范围减少,对于纹理区域的匹配,可以减少重复出现的最优匹配点的个数,从而可以减少误匹配率。

本算法可分两个阶段。

1) 判断待匹配点是边缘点还是非边缘点,根据点的性质,利用公式(6)确定特征点和非特征点的搜索范围。

2) 用给定的费用函数进行匹配,生成视差图。

因为本文主要关注通过减少匹配搜索范围,提高算法速度的问题,所以费用函数介绍从略。

现以 Tsukuba 图的第120行为例,显示本算法速度是如何提高的。此行共有250个像素,边缘点有29个,非边缘点为221个,在匹配窗口和费用函数相同的情况下,使用固定搜索范围 $[0, 19]$, 总的搜索点数为2500个;使用本文的可变搜索范围方法,非边缘点搜索范围是 $[0, 3]$, 边缘点搜索范围是 $[4, 19]$, 则总的搜索点数为 $221 \times 4 + 29 \times 16 = 1348$ 个。可以看出,后者的计算量只是前者计算量的54%, 计算速度几乎加快了1倍。

4 实验验证

本文以 SAD 算法为例做实验,即以固定搜索范围的 SAD 算法和基于可变搜索范围的 SAD 算法(以下称本文算法)进行比较。在 MATLAB 环境下,分别对 Tsukuba, Sawtooth 和 Venus 图像进行了实验。匹配窗口为 7×7 , 最大视差值是19。表2和图3显示了实验的结果。表2的第4,5列分别是本文方法和 SAD 算法匹配图像所用时间的统计,从执行的时间上看,本文算法所用时间是 SAD 算法时间的 $1/3$ 到 $1/4$, 说明速度明显提高。速度提高的大小和特征点的数目有关,第3列统计了各图像特征点数量,它们之间的关系这里不详述了。在速度提高的同时,从图3中可以对比地看到匹配的效果差别不大。

表2 算法时间比较表

图像	图像大小	特征点数	本文算法时间(s)	SAD算法时间(s)
Sawtooth	190×217	4476	3.3	10.5
Tsukuba	192×256	5356	3.5	12.5
Venus	383×434	14577	11.2	46.8

(下转第257页)

图是安全的。且由构造过程知 $\exists \sigma \in T^*$, 且对 $\forall i \in 1, 2, \dots, |T|$, $\#(t_i/\sigma) = 1$ 。由引理 3.4 知 $M_0[\sigma] > M_0(\forall i \in 1, 2, \dots, |T|, \#(t_i/\sigma) = 1)$ 。易知得到的完全 T-图也是活的。再根据定理 1 知, 逐步确定初始标识法确定的初始标识代表了一个活和安全的标识类。证毕。

结论 3.1 设 $N=(T, E)$ 为一个活和安全的 n 阶完全图, 其活和安全的标识类的个数为 $(n-1)!$ 。

证明: 由引理 2.5 知, 用逐步确定初始标识法得到初始标识的是一个活和安全的标识类的一个代表元素, 从确定初始标识的过程知, 可以构造出的初始标识, 即活和安全的标识类的个数为: $C_{n-1}^1 \cdot \dots \cdot C_{n-2}^1 \cdot \dots \cdot C_{n-3}^1 LC_2^1 = (n-1)!$ 。证毕。

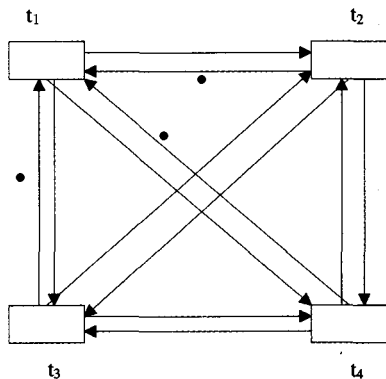


图 6

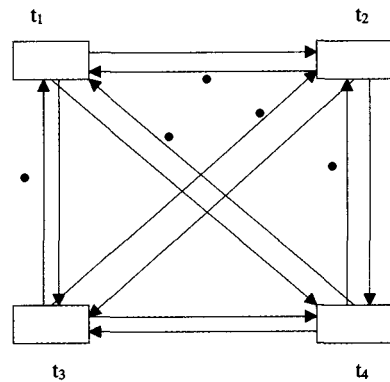


图 7

参考文献

- 1 Commoner F, et al. Final report for the project—development of the theoretical foundations for description and analysis of discrete information systems. vol. II-Mathematics, CADD-7405-2011, Mass. Comp. Assoc., Inc., Wakefield, MA 01880, May 1974
- 2 Murata T. Modeling and analysis of concurrent systems, ch. 3 in Handbook of Software Engineering, C. R. Vick and C. V. Ramamoorthy Eds. New York: Van Nostrand, Reinhold, 1984. 39~63
- 3 Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications[A]. In: Proceedings of IEEE, 1989. 560~562
- 4 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
- 5 徐俊明. 图论及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004
- 6 卢开澄, 卢华明. 组合数学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002

(上接第 240 页)

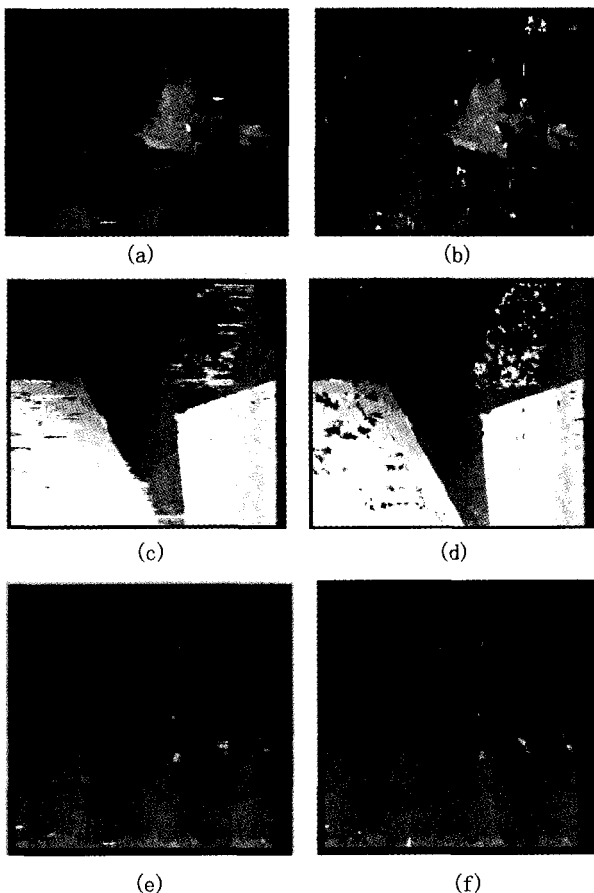


图 3 a,c,e 为本文算法的视差图; b,d,f 为 SAD 算法的视差图

结论 本文根据视差梯度的定义, 通过公式推导, 得到在同一极线上前后两个相邻点的视差梯度和匹配搜索范围的关系公式。根据该公式, 详细讨论了视差梯度和匹配搜索范围的关系, 并得到了一种基于视差梯度的快速区域匹配方法。在边缘特征点, 该方法采用较大的搜索范围; 在非边缘的平滑区采用通过视差梯度来减小搜索范围。通过去除冗余搜索, 减少了匹配时间。实验证明, 在保持视差正确匹配率的同时, 本方法比采用固定搜索范围的方法有更快的执行速度。如何充分利用视差梯度原理与其它匹配算法相结合, 将是今后研究的可能方向。

参考文献

- 1 Bhat D N, Nayar S K. Ordinal Measures for Image Correspondence[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20: 415~423
- 2 Faugeras O, Hotz B, Matthieu H, Vieville T, Zhang Z, Fua P, Theron E, Moll L, Berry G, Vuillemin J, Bertin P, Proy C. Real Time Correlation-Based Stereo: Algorithm, Implementations and Applications[R]. INRIA Technical Report 2013. 1993
- 3 Burt P, Julesz B. Modifications of the classical notion of Panum's fusional area[J]. Percept, 1980, 9: 671~682
- 4 李德广, 李科杰. 一种快速立体视觉边缘匹配算法[J]. 计算机应用, 2005, 25(4)
- 5 Li Z, Hu G. Analysis of Disparity Gradient Based Cooperative Stereo[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1996, 5(11): 1493~1506
- 6 Pollard S B, Mayhew J V W, Frisby J P. PMF: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit[J]. Percept, 1985, 14: 449~470
- 7 Pollard S B, Porrill J, Mayhew J E W, Frisby J P. Disparity gradient, Lipschitz continuity, and computing binocular correspondence[J]. In: O. D. Faugeras and G. Giralt, eds. Proc. 3rd Int. Symp. Robot. Res, 1986, 19~26
- 8 Moallem P, Faez K. Search space Reduction in the Edge Based Stereo Correspondence[C]. In: Proceedings of the International Workshop on Vision, Modeling, and Visualization 2001 (VMV2001), Germany, 2001. 423~429
- 9 朱松立, 戴礼荣, 宋彦, 王仁华. 基于角点特征值和视差梯度约束的角点匹配[J]. 计算机工程与应用, 2005, 34