

一种山体图像边缘快速立体匹配方法

魏振忠 郝曼 张广军

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室 北京 100191)

摘要: 该文提出了一种新的针对山体图像边缘的立体匹配算法。为了保证匹配的准确性,首先引入极线方向上的视差梯度约束,然后在考察唯一性的基础上,通过搜索并考察边缘端点周围的角点信息来引导边缘的匹配,并且限定边缘端点的角点搜索范围,最终匹配结果保证了两幅图像中的匹配对是一一对应的唯一对应。实验结果表明,不同约束方法的融合在很大程度上提高了匹配速度和匹配精度。

关键词: 图像处理; 边缘立体匹配; 极线; 视差梯度; 角点

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1337-04

A Fast Stereo Edge-Matching Algorithm Based on Mountain Images

Wei Zhen-zhong Xi Man Zhang Guang-jun

(Beihang University, Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology,
Ministry of Education, Beijing 100191, China)

Abstract: A new fast stereo edge-matching algorithm based on mountain images is presented. In order to ensure the accuracy of the match. Firstly the disparity gradient restriction across the direction of epipolar lines is used, and then on the basis of exclusionism searched the corner information close to edge point to guide the matching with restricted corners-searched range. The final match results ensure that the matching pairs in two images are one-to-one correspondences. The algorithm results show that the amalgamation of different restrictions improved the matching speed and precision.

Key words: Image processing; Stereo edge-matching; Epipolar; Disparity gradient restriction; Corner points

1 引言

在立体视觉中,立体匹配是一个核心问题,匹配效果的好坏直接影响到后续 3 维重构地形图的准确性。目前的匹配方法主要是基于特征和区域。就区域匹配来讲,具有容易实现,恢复视差密度大的优点,但是在遮挡,纹理缺失以及深度变化剧烈处往往匹配效果不理想。而特征匹配对光照和几何畸变具有很好的鲁棒性^[1],匹配精度高,在视觉导航、目标识别、运动分析及图像拼接等方面具有十分重要的意义。

考虑到边缘比特征点更有利于 3 维结构重建以及 3 维目标识别,因此边缘立体匹配成为研究重点。但是也存在一些困难,比如在不同图像中边缘几何特征差异大,对边缘很难进行空间约束^[2];边缘提取的差异也在一定程度上影响匹配。这些困难导致了对边缘匹配的研究并没有得到很大程度上的突破。为了减少计算量,研究人员利用了各种约束来限制搜索范围。通常特征匹配采用的约束主要有惟一性、连续性及极线约束等^[3-7],其中连续性约束一般和视差梯度的应用联系在一起, Pollard^[8]曾经提出相邻匹配点对的视差梯度应

小于 2。但是视差梯度限制不能判断遮挡的情况,而极线约束是唯一不依赖于场景的约束,被广泛地应用到匹配的研究中^[9]。Zhang^[10]提出极线约束与灰度相关的经典匹配方法,但该方法只适用于微小旋转、平移、缩放范围的图像对。Schmid 和 Mohr^[11,12]计算特征点的 1 阶到 3 阶偏导数,从而构造出在图像平移和旋转变换下保持不变的向量,但计算量大,并且用到马氏距离匹配特征向量,给算法带来了难度和复杂度。Lowe^[13]在处理旋转不变的匹配时,构造 128 维特征向量,计算量大。

本文的贡献主要分为两部分,第一,将一般用于点匹配的极线约束和视差梯度约束用在边缘线条对象上,并将两种方法融合在一起。第二,考虑到极线约束和视差梯度约束都不能满足唯一性的条件,引入角点特征,通过端点周围的角点进行约束。

2 多约束融合快速匹配算法思路

为提高匹配的速度和匹配率,本文提出多种约束融合的匹配算法。该算法首先考虑立体视觉几何拓扑上存在的最本质极线约束,并在极线方向上运用视差梯度约束,以减少运算量,增强候选匹配的唯一性。在此基础上,进一步以边缘端点类特征鲜明的角点来限定匹配搜索范围,从而大大提高

2008-11-07 收到, 2009-03-27 改回

国家自然科学基金(50875014), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0043)和北京市自然科学基金(3092014)资助课题

了匹配的速度和匹配率。

该算法的具体实现可分为如下 6 个步骤: (1)采用 Harris 角点探测器^[14]探测两幅图像的角点; (2)在通过视差梯度约束确定初始候选匹配点的基础上, 利用鲁棒性估计方法求解基本矩阵, 建立起极线约束关系, 然后通过极线约束关系去除一部分虚假匹配点, 得到最终匹配点; (3)为构造出平行立体视觉系统, 基于匹配点对, 应用 Fusiello 的分布旋转方法^[15], 校准极线平行于图像的水平轴, 并且左右一一对应极线与图像 X 轴的距离是相同的。在矫正后的 F 矩阵下新的匹配点对的坐标的 1 阶几何误差(Sampon 距离)为 0.026 个像素; (4)利用基于多尺度梯度图的改进分水岭算法提取出像素级精度的边缘; (5)在极线方向上, 考察边缘的端点以及端点旁的边缘点之间的视差梯度, 去除部分的虚假边缘匹配, 得到候选匹配边缘对; (6)通过候选匹配边缘对端点附近的匹配角点信息约束, 确定最终边缘匹配对。

3 基于极线方向上的视差梯度约束

设双目立体视觉传感器左右两摄像机所成图像分别为图像 1 和图像 2。在使用视差梯度的方法之前, 首先对图像 2 进行分块处理, 使得图像 2 的每个分块区域对应图像 1 中提取的每条边缘所在区域的宽和高进行 1/3 图像宽度和 1/3 图像高度的扩充, 之后再在图像 2 的分块区域中判断哪条边缘是对应图像 1 的边缘, 通过减小搜索范围提高匹配算法的运行速度。

3.1 视差梯度约束方法原理

双目立体视觉传感器经过极线校正以后, 左右图像的纵坐标值相同, 并且左右极线都平行于横坐标轴(即图像坐标系的 X 轴), 也对应于相同的纵坐标值, 左右图像的差异只存在横坐标轴上。如图 1 所示, 图中 A_1 和 A_2 为空间边缘 A 在两幅经过矫正后的图像平面上的投影, 空间边缘 A 的起点和终点设为 S_1 和 E_2 , 本文考虑在左图中的边缘选取与端点在 X 方向上距离 1 个像素长度的点与端点配对进行匹配的判断和筛选。

以下将以 $***.x$ 的形式表示各点的空间坐标或图像坐标。根据视差梯度的定义, 空间点 S_1 和 S_2 ; E_1 和 E_2 的视差梯度值分别为 δd_1 和 δd_2 , 表达式如下:

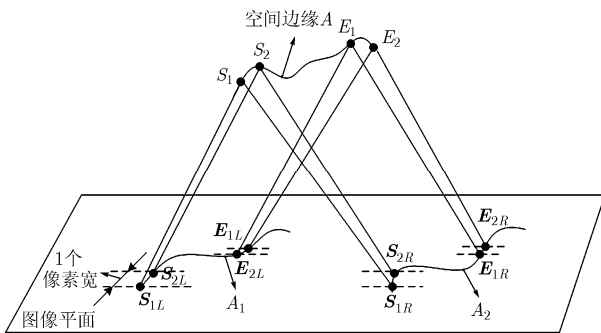


图 1 双目立体视觉系统成像平面说明图

$$\delta d_1 = 2 \frac{\|(\mathbf{S}_{2L} - \mathbf{S}_{1L}) - (\mathbf{S}_{2R} - \mathbf{S}_{1R})\|}{\|(\mathbf{S}_{2L} - \mathbf{S}_{1L}) + (\mathbf{S}_{2R} - \mathbf{S}_{1R})\|} \quad (1)$$

$$\delta d_2 = 2 \frac{\|(\mathbf{E}_{2L} - \mathbf{E}_{1L}) - (\mathbf{E}_{2R} - \mathbf{E}_{1R})\|}{\|(\mathbf{E}_{2L} - \mathbf{E}_{1L}) + (\mathbf{E}_{2R} - \mathbf{E}_{1R})\|} \quad (2)$$

其中 \mathbf{S}_{1L} 、 \mathbf{S}_{2L} 、 \mathbf{S}_{1R} 、 \mathbf{S}_{2R} 、 \mathbf{E}_{1L} 、 \mathbf{E}_{2L} 、 \mathbf{E}_{1R} 、 \mathbf{E}_{2R} 分别表示图像点的坐标向量。因为经过极线矫正后的图像匹配点之间的视差只发生在 X 坐标上, Y 坐标上不存在视差(误差小于 0.03 个像素, 因此忽略不计)。定义

$$\Delta x_l = \mathbf{S}_{2L}.x - \mathbf{S}_{1L}.x = 1 \quad (3)$$

$$\Delta x_r = \mathbf{S}_{2R}.x - \mathbf{S}_{1R}.x \quad (4)$$

因此 δd_1 可以表示为

$$\delta d_1 = 2 \frac{\Delta x_r - 1}{\Delta x_r + 1} \quad (5)$$

式(5)也可以表示为

$$\Delta x_r = \frac{2 + \delta d_1}{2 - \delta d_1} \quad (6)$$

由式(6)可以推导出 δd_1 的范围与 Δx_r 的范围的对应关系, 如表 1 所示。

表 1 δd_1 的范围与 Δx_r 的范围的对应关系表

Δx_r 的取值范围	δd_1 的取值范围
{0, 1, 2, 3}	(-1, 0, 1)
{0, 1, 2, 3, 4}	(-1.2, 1.2)
{4, 5, ..., max}	(1.2, 2.0)

3.2 视差梯度与极线约束算法

δd_2 与空间边缘终点的 Δx_r 对应关系依上述过程类推。根据表 1, 对图 1 所示的 A_1 和 A_2 进行它们是否是匹配对的判断, 判断过程如下:

(1)在对应 A_1 的图像 2 的分块区域中进行搜索, 假定首先搜索到如图 1 所示的 A_2 , 判断 A_2 和 A_1 的两个端点的在图像平面上的 Y 坐标值是否对应相等, 即是否端点在对应极线上。如果不相等, 则进行从 A_1 的端点相邻点和 A_2 的端点的判断, 如仍不满足条件, 再进行从 A_2 的端点相邻点与 A_1 的端点之间的判断, 搜索范围设定为 10 个点, 如果最终两条边缘上能搜索到边缘点, 即如图 1 所示的 \mathbf{S}_{1L} 和 \mathbf{S}_{1R} , 以及 \mathbf{E}_{2L} 和 \mathbf{E}_{2R} , 并将它们作为两条边缘上新的起始点, 进行下一步处理, 否则进入算法循环。

(2)对于 A_1 边缘上的 \mathbf{S}_{1L} , 搜索到边缘上与其在 X 方向相差一个像素的点 \mathbf{S}_{2L} , \mathbf{S}_{1L} 对应 A_2 边缘上的 \mathbf{S}_{1R} , 在与 \mathbf{S}_{1L} 和 \mathbf{S}_{2L} 的相对位置相同已知的方向上搜索 \mathbf{S}_{2R} , 搜索最大范围限定为 10 个像素, 按照表 1 的数据, 根据 Δx_r 的取值范围首先计算 δd_1 , 若 δd_1 的值也在对应的取值范围内, 则认为 \mathbf{S}_{1L} 和 \mathbf{S}_{2L} 满足视差梯度的判断, 同样的过程对应于 \mathbf{E}_{2L} 和 \mathbf{E}_{2R} 。若判断结果也满足视差梯度约束, 则认为 A_1 和 A_2 为候选的边缘匹配对, 否则进入算法循环。

对视差梯度约束过程需要说明的 3 点是：

(a)在过程中判断是否满足极线约束条件，只需要判断左，右图像点的纵坐标是否相同即可，考虑到误差小于一个像素，而本程序中提取的边缘为像素级，故误差因素略去不计。

(b)在如上叙述的算法过程第二步中，在与 S_{1L} 和 S_{2L} 的相对位置相同已知的方向上搜索 S_{2R} ， S_{1L} 和 S_{2L} 并不一定在同一条极线上，所以不需要考虑在对应点在极线上的序的情况，并且考虑到在拍摄时左右图像的旋转角度未超过 30° ，因此在与 S_{1L} 和 S_{2L} 的相对方向相同的同一方向上搜索 S_{2R} 。

(c)视差梯度约束只是一种用于判断匹配相容性的一种判据，是根据人眼的生理特征试验得到的一种规律^[16]，因此能剔除部分的错误匹配而不能完全的解决匹配问题，将其和极线约束融合在一起，也减小了搜索范围，从而提高算法的运行速度。

3.3 视差梯度约束算法结果

在边缘提取步骤结束后中，左图提取边缘总数为 271，右图提取边缘总数为 212，基于区域筛选建立的候选匹配数为 932 对，基于极线方向上的视差梯度约束过程结束后建立的候选匹配数为 632 对。因此视差梯度约束算法能够剔除约 32% 的错误的匹配对。过程中存贮每对边缘上在端点附近满足极线约束和视差约束的边缘点作为新的起始点。

4 角点特征的约束

首先采用 Harris 角点探测方法^[14]完成匹配角点的提取过程。利用 Harris 角点提取方法在左图提取角点数量 928，右图提取角点数量为 961，最终匹配角点数量为 473 对。然后在视差约束完成后建立的候选匹配的基础上进行考察。

如图 2 所示，表示视差梯度约束过程结束以后的候选匹配情况，图 2(c)中的边缘 L_1 在图 2(d)中的候选匹配边缘满足与 L_1 有满足极线约束和视差约束的新的起始点的条件。在图 2 所示中， L_1 只与 L_2 ， L_3 ， L_5 成为候选匹配对，因此针对这种一对多的情况，需要进一步进行处理，即接下来的角点约束。

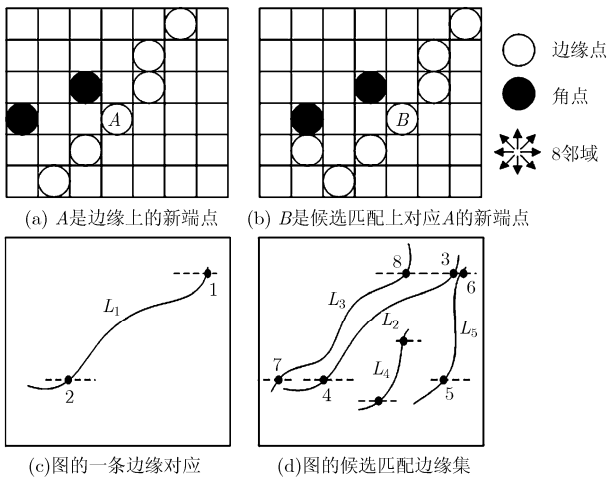


图 2 角点约束匹配示意图

角点约束算法步骤：

步骤 1 如图 2(c)，首先搜索边缘 L_1 的两个端点周围 8 邻域的角点信息，若 8 邻域未搜索到，则扩充到端点的 2×2 矩形区域进行搜索，2 为矩形区域的半径。若有，便记录下来角点所在端点邻域的方向信息，以及距端点的长度(1 或 2 个像素)，否则进入循环。

步骤 2 搜索 L_1 对应的所有候选匹配边缘端点附近的角点信息，判断：若在候选匹配边缘端点的 3×3 邻域搜索到对应 L_1 端点邻域角点的匹配角点信息，则将该候选匹配选进新的候选匹配集进行下一步判断。

步骤 3 对新候选匹配集的每条边缘进行如下判断：若某条候选匹配边缘的角点和端点的距离信息和相对位置信息是在边缘集中和边缘 L_1 的相关对应信息最为接近的，则认

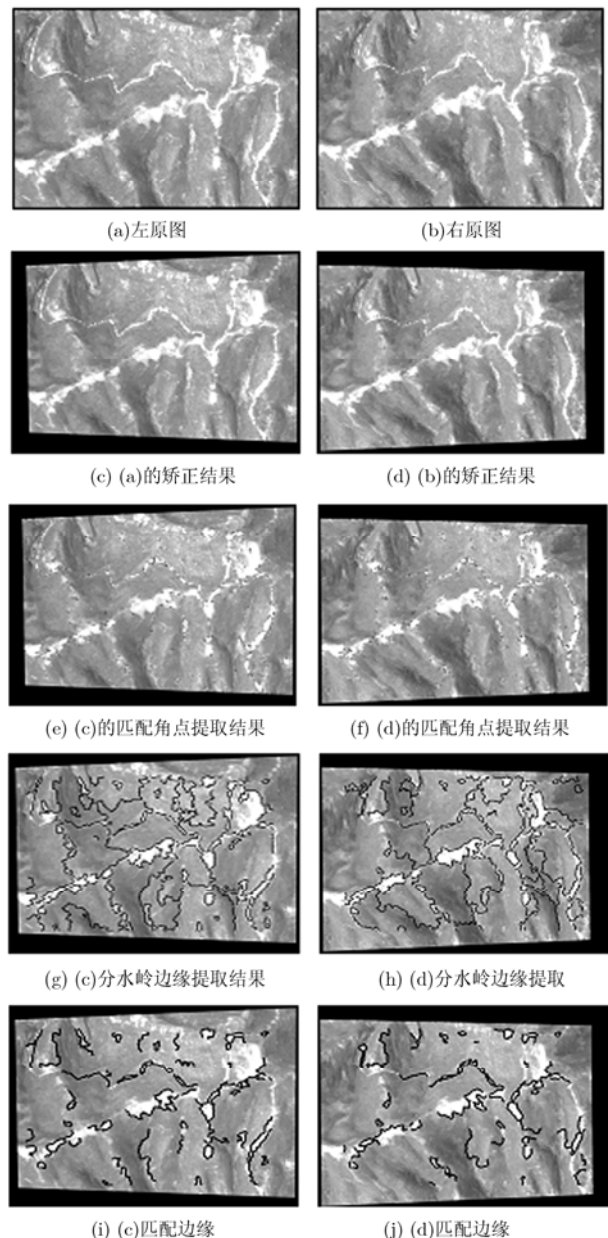


图 3 各阶段实验结果

为该条边缘和 L_1 是最终边缘特征匹配对。

该角点特征约束算法限定搜索范围,对可能的匹配对进行相互比较,得到相互位置分布信息最为接近的匹配边缘对为最终匹配对,实现了快速且较可靠的匹配,期间存贮匹配对上满足极线约束和视差梯度约束的对应的新端点。

5 实验结果

利用山区图像对本文提出的算法进行了大量实验,图像分辨率为 843×653 ,各阶段实验结果如图3所示。实验结果表明该算法快速可靠。实验环境为 CPU P4 2.4,内存 1G,操作系统 Windows XP SP2,编译工具 Visual C++ 6.0。

图3中的3(g),3(h),是基于分水岭方法提取后的结果图,并对提取的边缘作了如下处理:在边缘图上搜索边缘点,若点周围的8邻域里包含3个或3个以上的边缘点,则清除以上边缘点。上述处理的意义在于将边缘分解为单条边缘的集合,便于进行下一步的处理。

最终匹配结果如图3中3(i),3(j)所示,总共获得160对匹配边缘对,其中有三对错误匹配,正确匹配对数量为157对,匹配数据如表2所示。

表2 各阶段所消耗时间(s)和匹配率

角点 提取	角点 匹配	边缘 提取	角点 匹配	边缘 匹配	总 时间	匹配 边缘 数	正确 匹配 率
0.478	0.568	0.547	0.350	0.460	2.403	160	98%

6 总结

本文提出了一种基于极线约束,视差梯度约束,角点信息约束3种约束相结合的立体视觉边缘快速匹配算法,有效地提高了匹配速度和匹配可靠性,通过实验结果也充分验证了该立体视觉边缘匹配方法的快速性和可靠性。考虑到利用了角点和边缘点的相对位置信息,因此在两幅图像存在程度较大的旋转、缩放时,本方法的适用性还需进一步提高。

参 考 文 献

- [1] 徐奕,周军,周源华. 基于稀疏-密集匹配算法的视差度量[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 630-634.
Xu Yi, Zhou Jun, and Zhou Yuan-hua. Measurement of disparity based on sparse-to-dense matching approach[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 630-634.
- [2] 张广军. 机器视觉[M]. 第一版,北京:科学出版社,2005,第2章.
Zhang Guang-jun. *Machine Vision*. Edition 1, Beijing: Science Press, 2005, Chapter 2.
- [3] 苏胤杰. 基于蚁群优化算法的立体匹配[J]. 微计算机信息, 2008, 24(8-3): 227-228, 249.
Su Yin-jie. Stereo matching based on ant colony optimization algorithm[J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24(8-3): 227-228, 249.
- [4] 沈峰亭. 边缘检测在视觉图像中的应用分析[J]. 微计算机信息, 2008, 24(3-3): 304-305.
Shen Feng-ting. Analysis of the application of several edge detection operators in an image[J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24(3-3): 304-305.
- [5] 郭龙源,夏永泉,杨静宇. 基于视差梯度的快速区域匹配方法[J]. 计算机科学, 2007, 34(4): 239-240, 257.
Guo Long-yuan, Xia Yong-quan, and Yang Jing-yu. Fast region-matching approach based on disparity gradient[J]. *Computer Science*, 2007, 34(4): 239-240, 257.
- [6] 姜露露,彭健. 基于极线几何约束的非标定图像的立体匹配[J]. 计算机应用, 2007, 27(11): 2800-2803.
Jiang Lu-lu and Peng Jian. Stereo matching on uncalibrated images based on epipolar geometry[J]. *Journal of Computer Applications*, 2007, 27(11): 2800-2803.
- [7] 吴熙,钱盛友. 基于LoG算子的图像边缘增强算法的改进[J]. 电气电子教学学报, 2007, 29(4): 25-27.
Wu Xi and Qian Sheng-you. Improved edge enhancement algorithm based on Gauss-Laplacian operator[J]. *Journal of Electrical & Electronic Education*, 2007, 29(4): 25-27.
- [8] Poward S B, Mayhew J E, and Frisby J P. PMF: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit[J]. *Perception*, 1985, 14(4): 449-470.
- [9] Joon H H and Jong S P. Contour matching using epipolar geometry[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(4): 358-370.
- [10] Zhang Z, Deriche R, and Faugeras O, et al. A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry[J]. *Artificial Intelligence*, 1995, 78(1): 87-119.
- [11] Schmid C and Mohr R. Matching by local invariants[R]. Reserach Report, INRIA, France, 1995.
- [12] Schmid C and Mohr R. Local grayvalue invariants for image retrieval[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Matching Intelligence*, 1997, 19(5): 530-535.
- [13] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [14] Harris C and Stephens M. A combined corner and edge detector[C]. The Fourth Alvey Conference, Manchester, America, 1988: 147-151.
- [15] Fusiello A, Tmcci E, and Vem A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs[J]. *Machine Vision and Applications*, 2000, 12(1): 16-22.
- [16] 马颂德,张正友. 计算机视觉[M]. 第一版,北京:科学出版社,1998,第2章.
Ma Song-de and Zhang Zheng-you. *Computer Vision*[M]. Beijing: Science Press, 1998, Chapter 2.

魏振忠: 男,1972年生,副教授,从事机器视觉、光电精密测量、图像处理与模式识别等方面的研究工作。

郝曼: 女,1985年生,硕士生,从事立体匹配及图像处理方面的研究工作。

张广军: 男,1965年生,教授,博士生导师,主要从事机器视觉、光电精密测量、图像处理与模式识别等方面的研究工作。