

基于特征点能量的双目立体匹配稳健算法

姚海滨¹ 翁金平² 崔海华² 程筱胜^{2*}

¹扬州市职业大学机械工程学院, 江苏 扬州 225012

²南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 为提高双目立体视觉测量图像精确匹配的稳定性, 提出一种基于特征点能量的稳健匹配新算法。该算法基于极线约束获取左右图像中特征点的初始匹配, 根据特征点之间极线约束关系定义了一种不受仿射变换影响的能量来描述特征点, 通过比对特征点能量值来剔除误匹配。该算法有效降低了误匹配率和误剔除率, 从而满足多视角测量数据拼合过程中严格限制误匹配率的要求。实验结果表明, 该算法正确匹配率大于95%, 误剔除率小于2%, 具有较强的稳健性。

关键词 机器视觉; 能量; 双目; 标志点; 立体匹配

中图分类号 O438 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.021501

Binocular Stereo Matching Robust Algorithm Based on Energy of Marked Points

Yao Haibin¹ Weng Jinping² Cui Haihua² Cheng Xiaosheng²

¹School of Mechanical Engineering, Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou, Jiangsu 225012, China

²School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract In order to improve the stability of the binocular stereo vision measuring accuracy image matching. A new robust matching algorithm based on feature point energy is proposed, the algorithm based on epipolar constraint to get the initial matching feature points around image. The energy not affected by affine transformation is defined to describe feature points based on epipolar constraint relationship among feature points, and the error matching is removed by comparing the energy of feature points. The proposed method effectively reduces the false matching rate and the false rejected rate so that it can meet the need of strictly limited false matching rate in the process of multiple angle measurement data. Experimental results show that the correct matching rate of the proposed algorithm is over 95%, and the false rejected rate is less than 2%.The algorithm has better robustness.

Key words machine vision; energy; binocular; marked points; stereo matching

OCIS codes 150.1135; 150.4065; 100.5010

1 引言

物体的三维测量技术是逆向工程、产品质量检测、人工智能、虚拟现实等技术的技术前提^[1-3]。随着科学技术的发展, 三维测量技术正在日益凸显它的重要性。

三维测量的过程受很多因素的影响^[4-5], 往往一次测量并不能得到物体的整个形貌, 需要通过测量多个视角数据, 再进行拼接才能得到物体的整个形貌。目前拼接技术主要是通过粘贴特征点来进行多个视角三维数据的匹配, 即通过在被测物体表面粘贴标志圆点, 并保证两次测量数据有共同可见的三个或三个以上

收稿日期: 2015-06-17; 收到修改稿日期: 2015-08-11; 网络出版日期: 2015-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(51305201, 51205192)、国家863计划(SS2013AA040801-02)、江苏省自然科学基金(BK20130793)、江苏省博士后科学基金(1301104C)

作者简介: 姚海滨(1965—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事机器视觉和工业检测等方面的研究。

E-mail: zyhaobin@163.com

*通信联系人。E-mail: smcadme@nuaa.edu.cn

标志点,由这些标志点计算出两个视角之间的欧氏变换从而实现多视角数据的拼接,这种方法操作方便,准确可靠,具有很强的实用性。其中单个视角的数据主要靠双目相机获得,且需要准确地重建出单个视角的特征点,即实现单个视角下双目相机左右图像中特征点的准确匹配。

对于离散特征点的立体匹配方法主要有全局优化法^[6-7]、特征描述子直接匹配法^[8-9]、迭代松弛法^[10-12]等,其中使用最广泛的是迭代松弛法。这种方法利用极线约束获取一个初始的匹配集,但其中包含了一些错误匹配,依据匹配点的约束条件建立支持度函数,并根据一定的更新策略剔除^[13]错误匹配。Pollard等^[12]基于生理学研究的结果提出的PMF算法以形状连续性作为整体匹配准则,利用视差梯度的概念描述形状连续性,使用松弛法处理匹配中的错误,对后续的立体匹配研究产生了重要影响,但是,由视差约束所构成的支持度函数需要人为设置视差阈值,阈值过小会剔除正确匹配,阈值太大又不能完全剔除错误匹配,具有很大的不确定性,且阈值的选取并不能普遍适用。因此本文通过寻找一种不变量来定义一个支持度函数来剔除误匹配。实验证明,本文方法能够更准确地实现双目左右图像的立体匹配。

2 获取初始匹配

提出的算法适用于各种特征点的匹配,选用一种黑色背景白色前景的圆环状标志点,如图1所示。



图1 所用标记点

Fig.1 Marked point

提取标志点圆心,考虑用极线约束实现标志点的初始匹配。极线几何描述的是两个相机成像平面之间的几何关系。如图2所示, I_l 和 I_r 分别为采集到的左图像和右图像,点 P 是三维空间中的任意一点, p_l 和 p_r 分别为点 P 在左右两幅图像上的投影点坐标,显然, p_l 与 p_r 互为对应点,且存在的关系为

$$p_r^T F p_l = 0, \quad (1)$$

式中 F 为基础矩阵, $A_l^T E A_r^{-1}$, E 为本质矩阵。

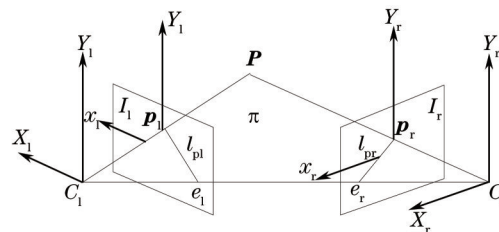


图2 双目立体视觉中的极线约束

Fig.2 Epipolar constraint in binocular stereo vision

但是实际计算过程中不可避免的会产生误差,因此可以认为标志点距离极线小于一个阈值 δ ,即

$$\frac{|p_r^T F p_l|}{|F p_l|} < \delta. \quad (2)$$

当(2)式成立时,则可以认为该标志点为候选匹配点。该阈值取决于相机标定精度,取其值为1 pixel。由此可以得到一个准匹配点集合 N 。但是由于标志点分布、标志点提取误差等因素的影响,利用极线约束获得的匹配存在许多误匹配,即左图中标志点可能对应右图中多个标志点,有时即使是一对一匹配也可能不是正确匹配。因此如何剔除误匹配才是标志点匹配过程中的关键。

3 基于标志点能量的匹配方法

初始匹配过程中并没有利用当前标志点与周围标记点之间的关系,因此在剔除误匹配的过程中可以加以利用。根据形状连续性约束,即正确匹配点周围必然存在最多的正确匹配点,而这些周围正确匹配点也必然符合极线约束,故可以利用这些信息进一步剔除错误匹配点。

3.1 定义标记点能量

假定双目系统已标定,基础矩阵为 F ,定义能量的思路为:若候选匹配点周围存在越多的正确标志点,

则该候选匹配点能量越大;若其周围存在较少的正确匹配点,则其对应的能量越小。如图3所示,假设 p_l 和 p_r 为左右图像中的一对候选匹配点, $M(p_l)$ 表示 p_l 半径 r 邻域范围内标志圆点的集合, $M(p_r)$ 表示 p_r 半径 r 邻域范围内标志圆点的集合, m_1 表示 $M(p_l)$ 元素的个数, m_2 表示 $M(p_r)$ 元素的个数。选取半径 $r=0.25L$, 其中 L 为图像对角线长度, (2)式中 δ 的选取由相机标定精度决定, 选择 $\delta=1$ pixel, 关于参数 r 和 δ 的选择在实验部分会作详细讨论。如果 p_l 和 p_r 为正确匹配点, $M(p_l)$ 和 $M(p_r)$ 中必然存在最多的正确匹配。

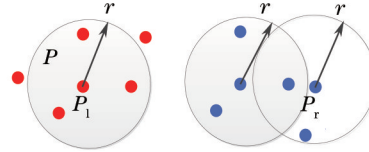


图3 左右图像标记点集合

Fig.3 Mark point set in left and right images

因此定义候选匹配点的能量为

$$E_{\text{Energy}}(p_l, p_r) = \sum_{\substack{p_k \in M(p_l) \\ q_k \in M(p_r)}} \Phi(p_l, p_r, p_k, q_k) \times \frac{1}{m_1 + m_2}, \quad (3)$$

$$\text{式中 } \Phi(p_l, p_r, p_k, q_k) = \begin{cases} 0, & D_{\text{dis}} > \delta \\ 1, & D_{\text{dis}} < \delta \end{cases}.$$

$$D_{\text{dis}} = \frac{|p_r^T F p_l|}{|F p_l|}, \quad (4)$$

(3)式中 $\frac{1}{m_1 + m_2}$ 是考虑 $M(p_l)$ 和 $M(p_r)$ 中元素有不对称情况。

根据松弛法思想,可以暂时认为集合 N 中所有点都为正确匹配点。计算出所有准匹配的能量,若候选匹配点周围存在越多的正确标志点,则该候选匹配点能量越大,若其周围存在较少的正确匹配点,则其对应的能量越小。采取一定的更新策略,根据唯一性约束,可以确定唯一的一个正确匹配点。

3.2 确定正确匹配点

确定正确匹配点的过程即提取出最大能量点的过程,获取左右相机图像,提取左图像标志点圆心,记作集合 C_l ;提取右图像标志点圆心,记作集合 C_r ;在 C_l 中随机取点 p_l ,利用极线约束找出 C_r 中准匹配点,记作集合 B 。具体步骤如下:

1) 在 B 中随机取点 q_i ,计算 q_i 关于 p_l 的能量,若能量小于阈值 T_h ,则剔除该点,若能量大于 T_h ,重复本步骤直至计算出 B 中所有点关于 p_l 的能量。 T_h 取值 0.5,即表示该点邻域内超过半数的点对为非正确匹配点,该阈值越高,匹配正确率越高,但是误剔除率也会增大。实验表明 T_h 取值 0.5 时效果最佳。

2) 若 B 中元素个数为 0,则 p_l 不存在匹配点,剔除 p_l ,执行下一步;若 B 中点个数为 1,则认为该点为 p_l 正确匹配点,执行下一步;若 B 中点个数大于 1,则比较所有点能量,采用选取能量最大的点作为点 p_l 的正确匹配点,执行下一步。

3) 重复 1)至 2),直至找到 C_l 中所有点的正确匹配点,算法结束。

4 结果分析与验证

传统松弛过程只是去除匹配点一对多的过程,当匹配集合达到一对一时算法结束。但是,一对一的匹配点对也可能存在误匹配,原因是某些特征点在左图像中未被检测出,在右图像中检测出来了,而其又恰巧在左图像某个特征点对应的极线上,因此传统松弛方法并不能剔除这种错误匹配^[14-15]。而采用能量的方式来描述标志点,当标志点为错误匹配时对应匹配点能量接近于 0,因此本文方法既能应用于一对多的正确匹配点获取,也能剔除一对一的错误匹配。

可以看出由于遮挡光照等干扰信息的影响,有时左图像能识别出的标志点,而在右图像中并不一定能被识别,为了衡量左右图像被识别出的特征点集中能够匹配的同名点对的多少,定义干扰率为

$$\beta = \frac{|B/M|}{|B|}, \quad (5)$$

式中 B 表示左右图像中所识别出标志点集合, M 表示所有存在正确标志点的标志点集合, $|\cdot|$ 表示集合中元素个数。同时, 定义误匹配率(FAR)和误剔除率(FRR)分别为

$$F_{\text{FAR}} = \frac{|\hat{M} \setminus M|}{|M|}, \quad (6)$$

$$F_{\text{FRR}} = \frac{|M \setminus \hat{M}|}{|M|}, \quad (7)$$

式中 \hat{M} 表示两幅图像上由匹配算法实际找到了匹配点的那些标志圆点的集合。

为了验证本文方法的匹配效果, 做了大量实验, 实验是在一个双目测量系统上进行的, 其主要硬件如下: 两个映美精 DMK23G445 相机, 分辨率为 1280 pixel×960 pixel, 光学镜头使用焦距为 12 mm 的光学镜头。拼接所用标志点是人工贴在物体表面的黑底白面的圆形标志点, 贴在物体曲率较小的位置。

4.1 干扰率影响实验

传统松弛过程是剔除匹配点一对多的过程, 并不能剔除一对一的错误匹配, 因此该方法受干扰率影响较大, 在此设计了实验来反应两种方法应对不同干扰率的表现, 实验中 $\delta = 1$ pixel, 图像对角线长度为 1600 pixel, 选择邻域半径 $r = 400$ pixel。实验结果如图 4 所示, 随着干扰率的增加, 传统的松弛匹配算法误匹配率和误剔除率都会相应增加, 而本文方法对干扰率的变化并不敏感, 原因在于传统松弛算法使用的视差约束受图像仿射变换影响较大, 本文算法的标志点能量并不受仿射变换影响, 具有较高的稳健性。

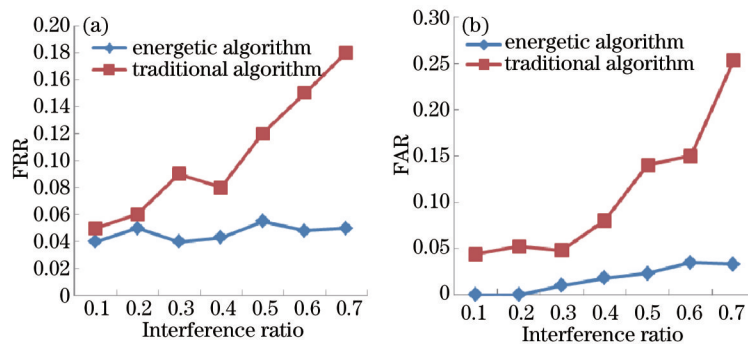


图 4 干扰率影响对比。(a) 干扰率对误剔除率的影响; (b) 干扰率对误匹配率的影响

Fig.4 Contrast of interference ratio. (a) Influence of interference ratio to the false rejected rate; (b) influence of interference ratio to the false matching rate

4.2 匹配实验

为了更直接地验证本文方法的匹配效果, 设计了以下实验。在一个石膏像上粘贴若干圆形标志点, 左右相机同时获取的两张图像, 左右图像中共识别出了 62 个标志点, 存在正确标志点的标志点有 54 个, 干扰率为 13%。图 5 表示只用极线约束作为匹配得到的结果, 图中存在较多一对多和一对一的错误匹配, 错误匹配点共 10 个, 错误匹配率 8.2%。图 6 为传统松弛法匹配结果, 正确匹配点 24 个, 错误剔除率高达 55.6%。图 7 为本文方法匹配结果, 正确匹配点共 52 个, 错误匹配点 0 个, 可以看出, 本文方法错误匹配率和错误剔除率均较低, 明显优于其他两种匹配方法。

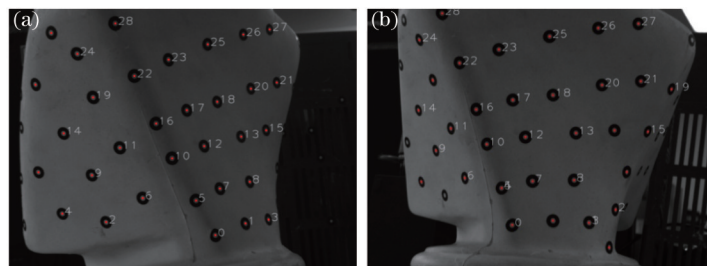


图 5 极线约束立体匹配。(a) 左图像; (b) 右图像

Fig.5 Stereo matching using epipolar constraint. (a) Left image; (b) right image

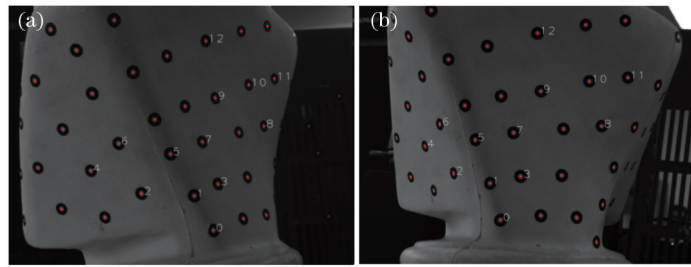


图6 传统松弛法立体匹配。(a)左图像;(b)右图像

Fig.6 Stereo matching using traditional relaxation method. (a) Left image; (b) right image

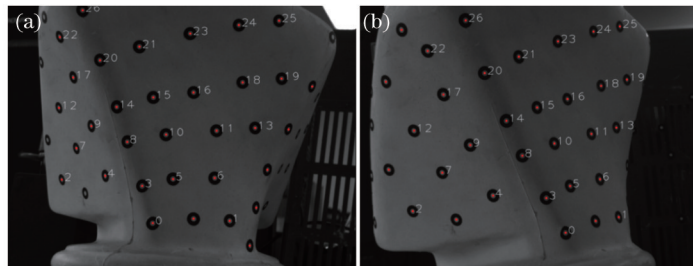


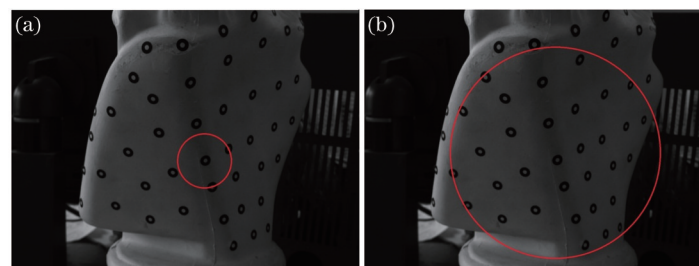
图7 本文方法立体匹配。(a)左图像;(b)右图像

Fig.7 Stereo matching using the proposed method. (a)Left image; (b) right image

4.3 关于参数的讨论

本文算法涉及以下两个参数:1) 极限约束阈值 δ ; 2) 候选匹配点半径 r 。其中极限约束阈值 δ 的选取由相机标定精度决定,相机标定精度能保证小于 1 pixel,故选取 $\delta = 1$ pixel,既能保证不剔除正确匹配,也能为后续错误匹配点的提出提供最优数据,由于取大于 1 pixel 的阈值,在初始匹配中会产生较多错误匹配,但是在后续能量法的剔除过程中也能将错误匹配一一剔除,结果与 $\delta = 1$ pixel 相差并不大,这说明了本文算法匹配准确率并不依赖极限约束阈值 δ 的选取。

候选匹配点邻域半径 r 的选取范围为 $[0, L]$, 其中 L 为图像对角线长度。本文算法中,候选匹配点周围存在越多的正确标志点,则该候选匹配点能量越大,理想情况下,当候选匹配点周围点均为正确匹配时,能量达到最大值 1。邻域点的数量决定了能量的区分度,比如,当邻域点数量为 2 时,能量值可能情况有 $\{0, 0.5, 1\}$, 当邻域点数量为 4 时,能量值可能情况有 $\{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ 。能量的区分度越大,即邻域点数量越多,其匹配的稳定性越高。但是如图 8 所示, r 取值过小则没有足够周边信息, r 取值过大,所有准匹配点邻域点大概相同,亦无法利用本文算法剔除误匹配。综合以上考虑做过若干实验,结果表明,当 r 选取为 $0.25L$ 且保证邻域点数量至少为 4 时,本文算法即能稳定匹配。

图8 邻域半径 r 取值错误情况。(a) r 过小;(b) r 过大Fig.8 Condition that neighborhood radius r is error value. (a) r is undersize; (b) r is oversize

5 结 论

在双目相机获得图像中寻找匹配特征点,常用的方法是利用极线匹配加视差约束,这两者都有各自的缺陷,这种方法匹配的正确率并不高,而在一些要求严格的场合更是效率低。本文方法在极线匹配的基础上利用能量来描述标志点,并以此剔除错误匹配,而能量本身区别于视差约束,是一个不受仿射变换影响的量纲,匹配方法的错误匹配率大大低于上面提出的常用方法,可满足工程应用中对错误匹配率有严格限制的要求。

参 考 文 献

- 1 Yan Jingjie, Yang Qinghua, Song Yupeng, *et al.*. The study of reconstruction auricle long-term changes by 3D laser scan technology[J]. Chinese Journal of Otolaryngology, 2013, 11(4): 524-528.
燕静杰, 杨庆华, 宋宇鹏, 等. 三维激光扫描技术应用于再造耳廓远期变化的研究[J]. 中华耳科科学杂志, 2013, 11(4): 524-528.
- 2 Tang Minghui, Cheng Xiaosheng, Cui Haihua, *et al.*. A high stability mapping stitching method for structured light three dimensional measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1112006.
汤明辉, 程筱胜, 崔海华, 等. 面向结构光三维测量的高稳定映射拼接方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112006.
- 3 Shao Jie, Zhang Aiwu, Wang Shumin, *et al.*. Research on fusion of 3D laser point clouds and CCD image[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0514001.
邵 杰, 张爱武, 王书民, 等. 三维激光点云与 CCD 影像融合的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0514001.
- 4 Che Jianqiang, Dai Ning, Cui Haihua, *et al.*. A novel encoding method for binocular three dimensional measurement of color objects[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1115001.
车建强, 戴 宁, 崔海华, 等. 面向彩色物体的双目三维测量编码新方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1115001.
- 5 Cui Yanjun, Zhang Wenfeng, Li Jianxin, *et al.*. A method of Gamma correction in fringe projection measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112002.
崔艳军, 张文峰, 李建欣, 等. 条纹投影三维测量的 Gamma 畸变校正方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112002.
- 6 Verri A, Trucco E. Introductory Techniques for 3D Computer Vision[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.
- 7 Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two frame stereo correspondence algorithms[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(13): 7-42.
- 8 Maciel J, Costeira J P. A global solution to sparse correspondence problems[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(2): 187-199.
- 9 Kolmogorov V, Zabih R. Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts[J]. ICCV, 2001, 2: 508-515.
- 10 Lowe D G. Distinctive image features from scales-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- 11 Ke Y, Sukthankar R. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors[J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2004, 2: 506-513.
- 12 Pollard S B, Mayhew J, Frisby J. PMF: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit[J]. Perception, 1985, 14: 449-470.
- 13 Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1-3): 7-42.
- 14 Kanade T, Okutomi M. A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiment[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(9): 920-932.
- 15 Zhang Hui, Zhang Liyan, Chen Jianfu, *et al.*. A robust stereo matching algorithm based on adaptive relaxation[J]. Chinese Journal of Image and Graphics, 2009, 14(7): 1378-1385.
张 辉, 张丽艳, 陈鉴富, 等. 基于自适应迭代松弛的立体点对匹配鲁棒算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(7): 1378-1385.

栏目编辑: 苏 岑