

基于立体视觉的越野环境感知技术

王荣本, 李琳辉, 郭烈, 金立生, 张明恒

(吉林大学 交通学院, 长春 130022)

摘要:针对越野环境光照多变、场景复杂等特点,对基于双目立体视觉的越野环境感知技术进行了研究,提出了一种适用于越野环境的视觉感知方案。采用高斯滤波和有限对比适应性直方均衡化(CLAHE)对图像进行预处理,对亚像素级 Harris 角点检测、基于 RANSAC 方法的基础矩阵估计、对极几何约束匹配及连续性约束等内容做了重点研究,最后通过三维可视化技术验证了本方案的有效性及其可行性。

关键词:交通运输系统工程;越野环境感知;立体视觉;CLAHE 预处理;特征匹配

中图分类号:U495 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)03-0520-05

Stereo vision based cross-country environmental perception technique

Wang Rong-ben, Li Lin-hui, Guo Lie, Jin Li-sheng, Zhang Ming-heng

(College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In consideration of cross country environment that is often variable in illumination and complicated in circumstance, a cross-country environmental perception technique on the basis of stereo vision system was presented. The original images were preprocessed by Gauss filter and CLAHE method and Harris corners were located with sub-pixel accuracy. Fundamental matrix was calculated using RANSAC theory. And epipolar restrain and continuity restrain were deeply studied. Finally, 3-D visualization techniques confirmed the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: engineering of communications and transportation system; cross-country environmental perception; stereo vision; CLAHE preprocess; feature-based match

近年来,智能车辆的工作空间正逐渐从室内环境向越野环境发展,如陆地自主车 ALV^[1]、行星巡视探测器^[2]等。一般情况下,越野环境的地形地貌是复杂且未知的,并且受光照和天气的影响比较大。应用于智能车辆环境感知的立体图像匹配算法大致可分为密集视差匹配和稀疏视差匹配两类。密集视差匹配应用于智能车辆领域^[3,4],能够反映详细的环境信息,便于三维建模;同时也存在计算量大、多义性问题严重及对

变形敏感等问题。稀疏视差匹配应用于智能车辆领域^[5-7],能够大幅度降低立体匹配的计算量,同时也减少了误匹配的可能性,从而提高环境感知的实时性,并具有较强的抗干扰和抗变形能力,可以将环境信息精确到亚像素精度。但三维场景恢复比较困难,容易出现漏检现象。

作者以应用于智能车辆越野环境感知领域的双目立体视觉系统为对象,从有效恢复出越野环境的概貌并满足环境感知实时性要求的角度出

收稿日期:2007-02-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(50675089).

作者简介:王荣本(1946-),男,教授,博士生导师.研究方向:智能车辆,汽车安全辅助驾驶,物流自动化.

E-mail: wrb@jlu.edu.cn

发,提出并设计了一种基于稀疏视差匹配的越野环境感知方案。在数据预处理部分,设计 Gauss 滤波器进行噪声滤除并平滑图像结构,然后采用有限对比适应性直方均衡化的方法增强局部区域的灰度对比,以保证图像特征的提取,避免漏检;特征提取部分,用限制角点间最小距离及亚像素坐标估计的办法对 Harris 角点提取进行补充,使被提取特征更为均匀地分布于整幅图像;在特征匹配部分,采用在线的 RANSAC 方法求取基础矩阵,引入对极线约束在提高匹配算法实时性的同时,与连续性约束共同作用剔除误匹配点;在文章的最后,通过三维数据插值技术重构三维环境来验证本文环境感知算法的可行性及有效性。

1 图像预处理

1.1 高斯滤波处理

用 3×3 的高斯模板遍历图像,在滤除孤立噪声点的同时起到了一定的平滑作用,将细微的结构组织一并滤除,有利于图像主要特征点的提取。

1.2 有限对比适应性直方均衡化

由于采用特征匹配,所以希望图像增强算法能够增强图像中所有区域的纹理特征,尤其是纹理特征不明显的区域,如泥土路面、光滑石块表面等。而大多数常见的灰度变换法,如直方图均衡化、规定化等,都是全局处理整幅图像,没有考虑局部信息,并且容易造成噪声和对比度过增强现象。为了增强图像每个小区域的灰度对比,本文采用有限对比适应性直方均衡化(CLAHE)^[8]方法来完成原始图像的第二步预处理。

CLAHE 方法的原理是分别处理图像中的小区域,增强每个小区域的灰度对比,将输出区域的直方图与指定直方图近似匹配。进行均衡化后,用双线性插值的方法来组合相邻的小区域,以剔除人为生成的边界。图 1 是一幅暗光照下背景信息比较均匀的越野环境图像预处理过程,可以看出,CLAHE 方法能够凸现背景和石块细节,便于特征的提取。

图 2(a)是一种强光并且亮度分布不均匀的情况,可以看到,近景的地面在强光下整体灰度值很高,而远处的灌木丛由于处在阴影中而显得结构模糊,图 2(b)是采用 CLAHE 方法预处理后的效果图,能够看出,该方法明显减弱了强光的影响,并且很大程度上增强了远景中灌木丛的特征,为整幅图像的特征提取奠定了良好的基础。



(a)原始图像 (b)预处理后图像

图 1 CLAHE 方法对弱光图像的预处理效果

Fig. 1 The preprocessing result of CLAHE to weak illumination image



(a)原始图像 (b)预处理后图像

图 2 CLAHE 方法对强光图像的预处理效果

Fig. 2 The preprocessing result of CLAHE to glare illumination image

2 角点提取

角点能够集中图像上某些重要特征信息的像素点,Harris 角点提取^[9]是一种基于信号点特征的角点提取方法,它具有简单、稳定,对噪声、光照条件等情况不敏感,能定量提取特征点,且所得特征点分布合理的特点。

Harris 算子的卷积表达式如下

$$M = G(\tilde{s}) \otimes \begin{bmatrix} g_x^2 & g_x g_y \\ g_x g_y & g_y^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$I = \text{Det}(M) - k \text{Trace}^2(M), k = 0.04 \quad (2)$$

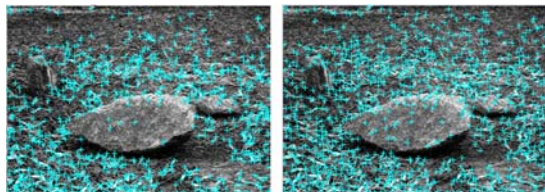
式中: g_x 为 x 方向的梯度; g_y 为 y 方向的梯度; $G(\tilde{s})$ 为高斯模板; \otimes 为卷积操作; I 为每点的兴趣值; Det 为矩阵的行列式; Trace 为矩阵的迹。

在本文中,由于在数据预处理阶段已经对原图像进行了高斯滤波,所以此处将高斯模板 $G(\tilde{s})$ 改为二值函数,描述如下

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{当}(x, y) \text{在窗口内} \\ 0 & \text{当}(x, y) \text{在窗口外} \end{cases} \quad (3)$$

为了使最终提取的角点尽量均匀分布于整幅图像,本文在计算出每点的 I 值后,首先进行非最大值抑制,即仅保留 3×3 邻域中的局部极大值,然后设定角点间最小距离 $\min D$,按顺序保留最强的角点,并同时检查新的角点与已有角点之间的距离 D ,使之满足 $D > \min D$ 。图 3 分别为不加

最小限制和最小限制 $\min D=4$ 时 1000 个 Harris 角点的提取情况,可以看出,加限制的角点提取更能反映出被探测场景的全貌。



(a) $\min D=0$ (b) $\min D=4$

图 3 Harris 角点提取

Fig. 3 Harris corner extraction

由于 Harris 算子只能检测到角点的像素级坐标,不能满足智能车辆环境感知精度的需求,所以需要求得各角点的亚像素坐标。一个比较直接的办法就是插值,用二次多项式(4)来逼近角点反映函数 $I(x, y)$,找出 I 的亚像素级精确位置。

$$ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f = I(x, y) \quad (4)$$

用已经检测出来的角点 (x, y) 周围的 9 个像素点建立含有 a 到 f 的 6 个未知量的超定方程组,运用最小二乘法求解这个超定方程组。亚像素级角点的 (x, y) 对应的是二次多项式的极大值点。可通过对二次多项式求偏导获得,如式(5)所示

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial x} = 2ax + cy + d = 0 \\ \frac{\partial I}{\partial y} = 2by + cx + e = 0 \end{cases} \quad (5)$$

3 角点匹配

角点匹配是基础矩阵计算和三维重建的前提,作者先通过初始匹配获取一组匹配点,再基于这组匹配点一次在线求取基础矩阵,完成立体视觉系统的初始化。然后在车辆行走过程中采用对极几何约束匹配来提高匹配速度,误匹配点通过连续性约束来剔除。

3.1 初始匹配

初始匹配(见图 4)的大致过程如下:首先在左半幅图像中选取一个角点 a ,以角点的像素坐标为中心,割取一块尺寸为 $J \times K$ 的模板图像 $w(x, y)$,然后在右半图的相应位置割取一块以左图角点像素坐标为中心 $M \times N$ 尺寸的大图像 $f(x, y)$,假设 $f(x, y)$ 中包含有 n 个右图角点 a', b', c', \dots ,则分别计算 $w(x, y)$ 与 $f(x, y)$ 区域中以各角点为中心、 $J \times K$ 尺寸图像的相似程度。示

意图如图 4 所示。

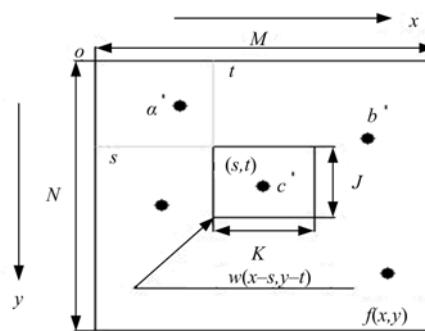


图 4 初始匹配

Fig. 4 Original match

由于在预处理过程中图像的亮度差异已经在很大程度上得到了补偿。本文为了减少运算量,提高匹配速度,采用比较简单的像素灰度差平方和(SSD)作为角点匹配的相似性度量指标。SSD 相关系数公式如下

$$\gamma(s, t) = \sum_{(x, y) \in W_{J, K}} (I_l(x, y) - I_r(x + dx, y + dy))^2 \quad (6)$$

在完成左半图到右半图的匹配后,用相同的办法进行反向匹配,即在左图中搜索右图角点 a' 的匹配点,然后比较两次匹配是否唯一确定了一对匹配,将唯一确定的匹配作为初始匹配的最终结果。

3.2 对极几何约束匹配

对极几何约束能将二维空间的匹配点搜索降低到一维空间,是一种有效的加速匹配方法。

对极几何约束关系描述为:一幅图像上的点在另一幅图像上的匹配点位于该点的对极线上。数学上这一几何关系表示为一个 3×3 的基础矩阵 F 。它将一幅图像上的点映射到该点在另一幅图像的对极线 l'_m 上,如图 5 所示。因而有

$$\begin{cases} l'_m = F \tilde{m} = \langle \tilde{e}', \tilde{m}' \rangle \\ l_m = F' \tilde{m}' = \langle \tilde{e}, \tilde{m} \rangle \end{cases} \quad (7)$$

本文采用 RANSAC (Random Sampling Consensus) 方法来估计基础矩阵, RANSAC 是一种鲁棒性较高的估计方法,其基本思想是通过迭代随机抽取最小点集来找出能够使正确的匹配所占比例最高的最小点集^[10]。

在实验过程中,系统初始化阶段通过初始匹配在线求取出基础矩阵,之后的匹配点搜索便可以完全在对极线约束下进行,能够极大缩短匹配过程所消耗的时间。

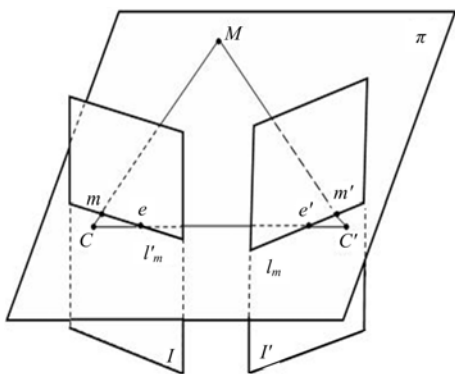


图 5 对极几何约束

Fig. 5 Epipolar restrain

3.3 连续性约束

对极线约束下的匹配不可避免要产生错误匹配,本文引入连续性约束来完成误匹配的剔除。

连续性约束也称为视差约束。如果同一物体表面上的两点相距很近,则它们在两幅图像上的投影及形成的矢量方向一般也比较接近。假设在双目图像的左图中的两个点 $p^{(l)}$ 和 $q^{(l)}$,它们在左图像上的坐标分别为 $(x_p^{(l)}, y_p^{(l)})$ 和 $(x_q^{(l)}, y_q^{(l)})$,令坐标向量 $m_p^{(l)} = (x_p^{(l)}, y_p^{(l)})^T, m_q^{(l)} = (x_q^{(l)}, y_q^{(l)})^T$,则这两个点的位置关系表示为

$$d_{pq}^{(l)} = m_p^{(l)} - m_q^{(l)} = (x_p^{(l)} - x_q^{(l)} \quad y_p^{(l)} - y_q^{(l)})^T \quad (8)$$

同样,得到右图像上两点 $p^{(r)}, q^{(r)}$ 的位置关系为

$$d_{pq}^{(r)} = m_p^{(r)} - m_q^{(r)} = (x_p^{(r)} - x_q^{(r)} \quad y_p^{(r)} - y_q^{(r)})^T \quad (9)$$

则 $d_{pq}^{(l)}$ 和 $d_{pq}^{(r)}$ 的相似性度量

$$\xi_{pq} = \frac{d_{pq}^{(l)T} d_{pq}^{(r)}}{[\max(\|d_{pq}^{(l)}\|, \|d_{pq}^{(r)}\|)]^2} \quad (10)$$

式(10)表示 $p^{(l)}$ 和 $p^{(r)}$ 周围的特征点 $q^{(l)}$ 和 $q^{(r)}$ 对其是否匹配的支持程度。 $\xi_{pq} > 0$ 表示 $q^{(l)}$ 和 $q^{(r)}$ 支持 $p^{(l)}$ 和 $p^{(r)}$ 为对应的特征点,称为支持点。反之,如果 $\xi_{pq} < 0$,则称为反对点。如果 $p^{(l)}$ 和 $p^{(r)}$ 匹配,周围应该有很多特征点支持。

4 实验结果

本文以吉林大学智能车辆课题组研发的 CJ-1 型智能车辆为实验平台,在 Visual C++ 开发环境下实现算法流程,双目系统在平台上的安装效果见图 6, CCD 采用的是德国 BASLER 公司的 A602fc 彩色摄像机。等高度安装在箱体前端的云台上,通过改变相机的基线距、光轴夹角及俯仰角,感知不同视场范围的环境,以寻求能够满足智



图 6 CJ-1 实验平台

Fig. 6 Environmental platform CJ-1

能车辆自主避障及路径规划的最佳安装姿态。

实验过程中采集多种环境下的景物信息,提取预处理后的特征点进行匹配,并计算投影矩阵以获取匹配点的三维信息。

图 7 为弱光照下泥土地面上存在石块障碍的情况,背景昏暗并且灰度比较均匀,如果不采用 CLAHE 方法进行图像增强,其最终匹配上的特征点如图 8 所示,其中线段用于连接两图对应的匹配点。图像的右上和左上部分都因为纹理特征不明显而被漏检了。



图 7 背景均匀的越野环境图像

Fig. 7 Cross-country environment with average background

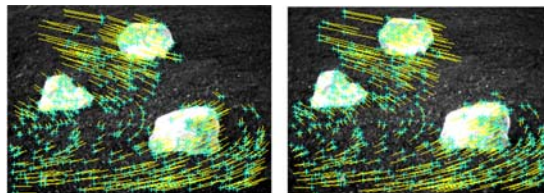


图 8 不进行局部图像增强的匹配结果

Fig. 8 Matching result without CLAHE preprocessing

而采用 CLAHE 进行预处理后的匹配结果如图 9 所示,能够看到最终匹配上的特征点均匀分布于整个图像场景中,没有漏检现象。

计算与图 9 各组匹配点对应的三维坐标,导出到 Matlab 平台下经线性插值的三维重构效果如图 10 所示。可见本文算法能够恢复出整个拍摄场景的概貌。同时给出本文中图 1、图 2 两幅

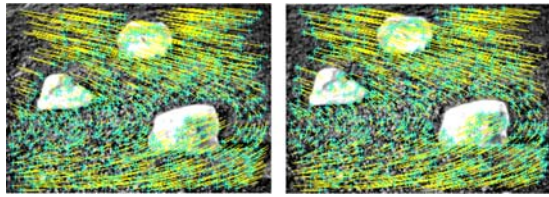


图 9 经过局部图像增强的匹配结果

Fig. 9 Matching result with CLAHE preprocessing

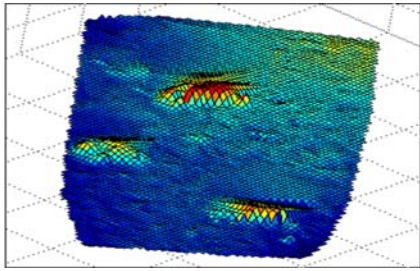


图 10 三维重构效果图

Fig. 10 3-D reconstruction

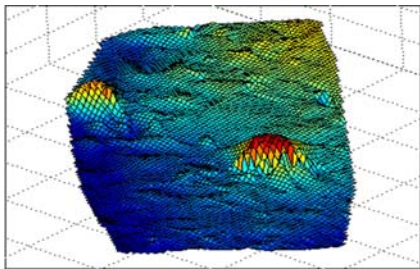


图 11 图 1 场景的三维重构

Fig. 11 3-D reconstruction of Fig. 1

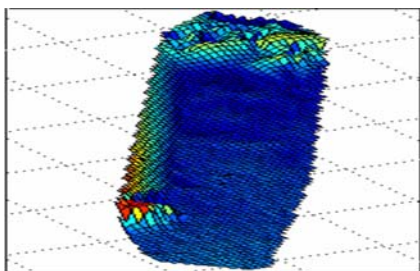


图 12 图 2 场景的三维重构

Fig. 12 3-D reconstruction of Fig. 2

场景图片的三维重构效果分别如图 11、图 12 所示,能够看出,本文算法能适应不同光照的变化,并可以适用于不同类型越野环境的三维重构。

5 结束语

本文研究了越野环境下基于特征点匹配的双目立体视觉感知技术,采用局部增强小区域对比度的方法避免漏检现象,并通过对极线约束加速

匹配,引入连续性约束剔除误匹配点,最后通过三维重构验证了环境感知的有效性和可行性。下一步将在基于立体视觉的越野环境地形分类和障碍物探测上加大研究力度,以实现越野智能车辆的自主导航。

参考文献:

[1] Bellutta P, Manduchi R, Matthies L, et al. Terrain perception for DEMO III[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, 2000:326-331.

[2] Ayanna Howard, Homayoun Seraji. An intelligent terrain-based navigation system for planetary rovers [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2001, 8(4): 9-17.

[3] Matthies Larry, Litwin Todd, Owens Ken, et al. Performance evaluation of UGV obstacle detection with CCD/FLIR stereo vision and LADAR[C]// IEEE International Symposium on Intelligent Control Proceedings, 1998: 658-670.

[4] Steven B Goldberg, Mark W Maimone. Stereo vision and rover navigation software for planetary exploration [C] // 2002 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002, Big Sky, Montana, USA.

[5] Novak Gregor, Bais Abdul, Mahlkecht Stefan. Simple stereo vision system for real-time object recognition for an autonomous mobile robot[C]// Second IEEE International Conference on Computational Cybernetics, 2004: 213-216.

[6] Stephen Se, David Lowe, Jim Little. Vision-based mobile robot localization and mapping using scale-invariant features[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001, 2 : 2051-2058.

[7] 王荣本,张明恒,毛晓燕. 双目视觉技术在环境探测中的应用[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第二届学术会议,中国,北京,2005:234-242.

[8] Reza Ali M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement[J]. Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image, and Video Technology, 2004,38(1): 35-44.

[9] Harris C G, Stephens M J. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings Fourth Alvey Vision Conference, Manchester, 1988: 147-151.

[10] Lloyd S A. A dynamic programming algorithm for binocular stereo vision [J]. GEC Journal of Research, 1985, 3(1): 18-24.