

文章编号:1000-6893(2009)06-1070-07

一种地形轮廓特征的立体视觉三维重建方法

魏振忠, 李苏祺, 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

3D Reconstruction Method of Terrain Contour Features Based on Stereo Vision

Wei Zhenzhong, Li Suqi, Zhang Guangjun

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

摘要: 针对自然地形轮廓特征的三维数据测量问题,提出了一种基于区域分割的立体视觉三维重建方法。先通过分水岭变换进行图像分割,根据分割区域边界确定图像中场景的轮廓边缘。轮廓边缘按所属区域分组进行立体匹配,根据分割区域相互邻接的全局特征和各区域的位置、尺寸、灰度值局部特征建立区域约束,并根据区域边缘像素点梯度分布特点建立梯度方向约束,以减小立体匹配的搜索空间、优化匹配顺序、提高匹配精度。进而根据双目立体视觉的成像模型计算匹配边缘点的三维坐标,实现地形轮廓边缘的三维重建。实验结果表明,该方法能够快速有效地重建出体现地形三维结构特征的轮廓边缘,并具有较高的立体匹配正确率和重建精度。

关键词: 立体视觉; 三维重建; 边缘匹配; 区域约束; 梯度方向

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Abstract: To realize the 3D measurement of natural terrain contour features, a stereo vision 3D reconstruction method based on region segmentation was proposed. First, on the basis of image segmentation by using the watershed transformation method, the contour edges were detected according to the boundaries of the segmented regions. Then the contour edges were grouped according to their corresponding regions for stereo matching. On the basis of a region's global adjacency characteristics and its local position, area and gray characteristics, the region constraint was established. In addition, the gradient direction constraint of an edge point was established according to the gradient distribution. The new constraints effectively reduced the search area, optimized the matching order and increased the correct matching ratio. By using the stereo matching edge point pairs, their 3D coordinates were estimated according to the binocular stereo vision imaging model. Experimental results show that the proposed method can reconstruct the terrain contour edges denoting the terrain 3D structure characteristics quickly and effectively, and it can yield high stereo matching ratio and 3D reconstruction precision.

Key words: stereo vision; 3D reconstruction; edge matching; region constraint; gradient direction

基于计算机视觉的三维地形数据测量方法具有大视场、非接触、信息丰富、系统简单以及精度适中等优点,在飞行器导航与自主着陆、航空测绘等领域得到了广泛应用。根据应用背景以及相应立体匹配方法的不同,基于立体视觉的地形数据三维重建可分为两类:一类是对图像中密集点进行匹配,通过计算出稠密视差图得到密集点云三维数据^[1-3];另一类方法则是选择图像中的特征进行匹配,通过特征三维数据体现地形地貌特点^[4-7]。基于特征匹配的重建方法可以有选择地

采用能够表示景物自身特性的特征,通过更多地强调空间景物结构信息有效解决匹配歧义性问题,精简的结构化特征信息也更有利于建模与识别,近年来,基于特征的三维重建在视觉导航、目标识别、运动分析等领域得到了广泛关注。

目前,用于三维重建的特征主要有特征点、线特征和区域特征等。角点是最基本的特征基元^[7],具有较高的定位精度和较好的匹配鲁棒性,但角点特征所含图像信息较少,在图像中数目较多,因而在立体匹配时需采用灰度相关^[8]等较强的约束准则,以克服歧义匹配和提高运算效率。与点特征相比,表现为图像边缘特征的线特征更能体现图像景物信息,更利于三维结构重建及三

收稿日期:2008-04-03; 修订日期:2008-09-02

基金项目:国家自然科学基金(50727502)

通讯作者:张广军 E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn

维目标识别,利用边缘特征作为匹配基元也能有效提高匹配和重建速度。文献[4]根据边缘端点的相关性,利用极线约束进行边缘匹配实现三维重建,由于边缘匹配完全依靠其端点匹配的结果,该方法对噪声比较敏感,当边缘端点匹配出现偏差时,将导致边缘无法匹配。文献[5]中将边缘进行直线拟合后作为匹配基元,利用极线约束,先后进行基于直线长度特征和方向特征的初匹配与基于概率松弛法的直线结构特征匹配,实现直线重建,文献[6]针对月球陨石坑轮廓进行特征提取,并用参数化曲线进行拟合,利用特征圆的大小、位置和曲线参数实现立体匹配和重建,这两类方法由于待匹配边缘需满足特殊的直线或曲线几何特性,具有一定局限性。与线特征相比,区域特征更能体现图像中景物的全局信息,由于区域特征的立体匹配依赖于左右图像分割区域,在对人工场景(如建筑物、室内场景)这类分割区域明显、区域变形较小的图像进行处理时,对区域特征进行匹配重建能够获得较好效果^[9-10],而当左右图像分割区域存在差异时,只利用区域特性进行匹配重建的方法会受到一定影响。

考虑到以上各类特征立体视觉三维重建方法的特点,针对用于飞行器导航的自然场景图像,提出一种基于区域分割的地形轮廓边缘快速三维重建方法。该方法通过分水岭变换完成图像分割,根据区域边界确定图像中景物的轮廓边缘;图像边缘按所属区域进行分组,根据区域邻接关系和区域位置、尺寸和灰度局部特性建立区域约束,并根据区域边缘像素点梯度分布特点建立梯度方向约束,采用类似区域生长的匹配策略完成边缘立体匹配;利用轮廓边缘点立体匹配结果,根据双目立体视觉的成像模型结合摄像机的内外参数,实现地形轮廓特征的三维重建。

1 立体视觉三维重建工作原理

立体视觉三维重建是从两个(或多个)视点获取同一场景不同视角度的图像,通过计算空间点在不同图像中的位置偏差(即视差),根据三角测量原理来确定场景的三维信息。用于实现飞行器导航三维地形特征信息探测的三维重建系统构成如图1所示。

系统利用一个视觉传感器在不同位置获取被测场景图像形成图像序列,计算机根据机载惯性导航设备提供的摄像机运动信息,选取图像序列中的两幅不同图像组成立体视觉图像对,进行图

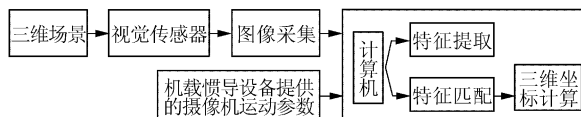


图1 立体视觉三维重建系统构成示意图

Fig. 1 Configuration of 3D reconstruction system based on stereo vision

像场景中地形轮廓特征的三维重建。

三维重建系统中的摄像机内部参数在工作前进行标定。而现阶段惯性导航领域中所用的中高精度陀螺仪误差能达到 $0.1(^{\circ})/h$ 以下,加速度计误差范围为 $10^{-5}g\sim 10^{-3}g$ ^[11-12],惯导系统在几秒的短时间内能够提供高精度的摄像机运动信息,确定系统摄像机透视投影矩阵中的系数。

在获得三维重建系统参数的基础上,立体视觉算法主要包括3部分:特征提取,立体匹配,三维重构。其中立体匹配是立体视觉三维重建的关键技术,也是整个三维重建过程中耗时最多、难度最大的步骤,直接决定了三维重建过程的精度和速度,下面即以立体匹配为重点逐一介绍地形轮廓特征的三维重建过程。

2 地形轮廓边缘特征提取

图像中景物的形状轮廓信息通常采用边缘进行描述,常用的一阶、二阶微分边缘检测算子(如Sobel算子、Canny算子等)对航空图像中建筑物、道路等人工场景进行边缘检测时,能够获得较好的阶跃边缘检测效果,但对复杂地形图像直接进行边缘检测时,由于其对噪声和细小纹理十分敏感,往往因受到局部细节的干扰而无法提取出体现景物结构特征的轮廓边缘信息,造成特征信息冗余和不稳定,影响后续的立体匹配和三维重建。图2(a)是一幅秦岭地形航拍图像,采用Canny算子直接进行边缘检测的结果如图2(b)所示,图中边缘琐碎凌乱,不但难以体现山体的轮廓信息,而且也很难按照一定的数据结构归类管理进行后续立体匹配。

为解决以上问题,本文从视觉感知的角度出发,采用由全局到局部的分层信息获取方式实现图像景物轮廓特征提取。先进行图像分割,将复杂的目标图像分割成为一系列体现景物基本结构特征的简单区域。采用具有区域边界封闭、全局区域边缘定位特点的分水岭变换算法^[13]先实现初步分割,进而对初步分割区域进行合并以解决分水岭变换通常存在过分割问

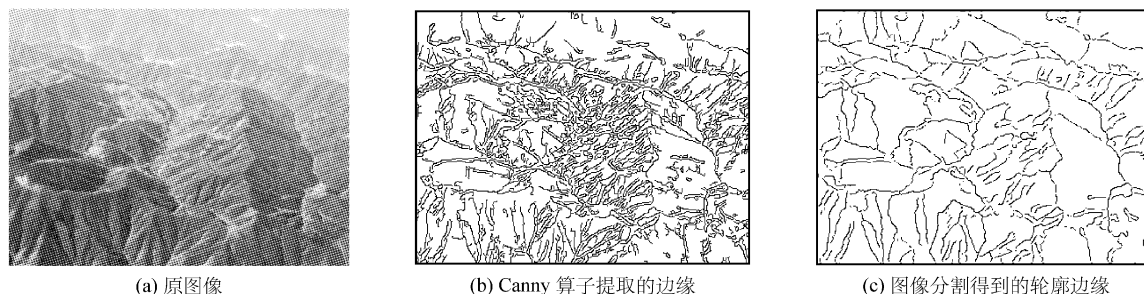


图2 秦岭地形图像及其边缘检测结果

Fig. 2 Terrain image of Qinling Mountains and its edge detection results

题。对于尺寸较大的图像,根据图像金字塔多分辨率结构降低图像分辨率,对低分辨率图像进行分割以获得全局特征信息,同时,图像尺寸减小也有利于降低分水岭变换过分割程度,提高图像分割速度。在低分辨率图像分割结果的基础上,利用 Canny 算子所采用的非极大点抑制和双阈值控制的方法,对原图像中具有一定像素宽度的区域边界进行细化,得到最终的单像素轮廓边缘。图 2(c)是采用上述方法所获得的秦岭地形图像轮廓边缘,与 Canny 算子边缘相比,其数量少,具有更好的连续性和完整性,能够较好地体现景物的轮廓信息。

3 轮廓边缘立体匹配

图像像素点在常规的极线约束、唯一性约束、顺序约束等条件下进行匹配,搜索空间过大往往使得匹配速度慢、精度低。本文以建立新的立体匹配约束、优化匹配策略为出发点,减少立体匹配搜索空间,以提高立体视觉三维重建精度和速度。

3.1 轮廓边缘的区域约束

常规的边缘匹配基元通常是以分段线段为单位^[4-5],按线段分组匹配各边缘点。不同视点的成像差异使得左右图像中各边缘线段通常并不严格对应,往往是左图像中一条边缘的一部分和右图像中一条边缘的其中一部分对应,出现交叉对应的复杂情况,而过多的分段边缘建立结构特征也比较复杂,进行匹配相对更为耗时。由于本文轮廓边缘是按分割区域边界进行提取,其所属的区域具有全局性更强的结构特性,因此,轮廓边缘以分割区域为单位,选择区域的闭合边界线(称为区域边缘)作为匹配基元进行立体匹配,并且利用区域特征建立立体匹配区域约束,提高匹配速度和准确性。

从全局角度来看,各区域之间的邻接关系所体现的全局结构特征可作为立体匹配过程的相关

约束和指导因素。图像分割区域邻接关系通常采用区域邻接图(Region Adjacency Graph, RAG)^[14]的数据结构形式进行描述,如图 3(a)图像分割区域的邻接关系可用图 3(b)所示的 RAG 表示。这里定义 RAG 为无向图,表示为 $G=(V, E)$,其中 $V=[v_1 \ v_2 \ \dots \ v_k]$ 表示 k 个顶点(Vertex),每个顶点代表一个区域;而 $E \in V \times V$ 表示 RAG 每条边(Edge),每条边连接相邻的两个区域,代表区域之间的边界,即共有边缘。根据 RAG 定义,区域边缘可表示为: $RE_i = \{(v_i, v_j)\}$, $(v_i, v_j) \in E$,其中 i, j 为区域标号, $i, j \in \{1, 2, \dots, k\}$ 。根据边界的共有性, $(v_i, v_j) = (v_j, v_i) = RE_i \cap RE_j$,在区域边缘 RE_i 完成边缘点匹配的同时,也确定了其邻接区域边缘 RE_j 的部分边缘点的匹配关系,由此即可将 RE_i 的匹配边缘所对应的邻接区域作为 RE_j 的待匹配区域边缘,从而建立匹配相关约束以确保匹配的有效性、减少匹配搜索空间。

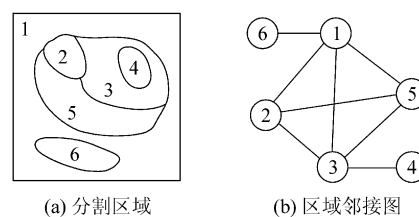


图3 分割区域及其对应的区域邻接图

Fig. 3 Partitioned regions and their corresponding RAG

从局部角度来看,区域边缘所属分割区域的几何和像素灰度特征可作为边缘可匹配度的衡量指标,定义左图像区域 v_{L_i} 与右图像区域 v_{R_j} 的区域位置、尺寸和像素灰度均值匹配评价函数分别为

$$\text{mat}^{\text{GC}}(v_{L_i}, v_{R_j}) = \begin{cases} 1 & \| \mathbf{gc}_{L_i} - \mathbf{gc}_{R_j} \| < T_{\text{GC}} \\ 0 & \| \mathbf{gc}_{L_i} - \mathbf{gc}_{R_j} \| \geq T_{\text{GC}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{mat}^S(v_{L_i}, v_{R_j}) = \begin{cases} 1 & \text{dif}^S(v_{L_i}, v_{R_j}) < T_s \\ 0 & \text{dif}^S(v_{L_i}, v_{R_j}) \geq T_s \end{cases}$$

$$\left(\text{dif}^S(v_{L_i}, v_{R_j}) = \frac{||v_{L_i}|| - ||v_{R_j}||}{\min(||v_{L_i}||, ||v_{R_j}||)} \right) \quad (2)$$

$$\text{mat}^{GM}(v_{L_i}, v_{R_j}) = \begin{cases} 1 & |gm(v_{L_i}) - gm(v_{R_j})| < T_{GM} \\ 0 & |gm(v_{L_i}) - gm(v_{R_j})| \geq T_{GM} \end{cases} \quad (3)$$

式中: gc 为区域重心坐标; $||v||$ 为区域尺寸即区域中像素数目; 函数 $gm(v)$ 为区域像素灰度平均值; T_{GC} 为区域位置阈值, 由于视差的存在, 可设为 $\min(w/4, h/4)$, w 和 h 分别为图像的宽度和高度; T_s 和 T_{GM} 分别为区域尺寸和灰度均值阈值。由此可通过式(4)所示的区域可匹配度综合评价函数建立区域约束, 评价函数 mat 值为 1 表示满足区域约束, 而 mat 值为 0 则表示不满足区域约束:

$$\text{mat}(v_{L_i}, v_{R_j}) = \text{mat}^{GC}(v_{L_i}, v_{R_j}) \cdot \text{mat}^S(v_{L_i}, v_{R_j}) \cdot \text{mat}^{GM}(v_{L_i}, v_{R_j}) = \begin{cases} 1 & \text{mat}^{GC}(v_{L_i}, v_{R_j}) = 1 \text{ and } \text{mat}^S(v_{L_i}, v_{R_j}) = 1 \\ & \text{and } \text{mat}^{GM}(v_{L_i}, v_{R_j}) = 1 \\ 0 & \text{mat}^{GC}(v_{L_i}, v_{R_j}) = 0 \text{ or } \text{mat}^S(v_{L_i}, v_{R_j}) = 0 \\ & \text{or } \text{mat}^{GM}(v_{L_i}, v_{R_j}) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

3.2 边缘点的梯度方向约束

由于区域边缘是一个封闭曲线, 利用极线约束进行匹配时, 极线穿过封闭区域边缘通常会有两个待匹配点满足极线约束, 如图 4 所示, 左图像区域边缘 RE_L 的像素点 p_L 在右图像中极线为 l , l 穿过区域边缘 RE_R 会有两个交点 p_{R1} 和 p_{R2} 。由于地形图像分割区域通常明暗交迭, p_{R1} 和 p_{R2} 的 x, y 梯度方向至少有一组会相反, 因此可以通过比较 p_L 与 p_{R1} 和 p_{R2} 的梯度方向建立立体匹配约束。

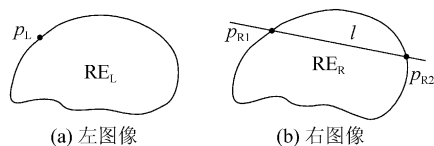


图 4 极线约束示意图

Fig. 4 Schematic diagram of epipolar constraint

像素点 x, y 梯度分量方向可用正负表示, 具体可设为 1 或 -1, 设左图像中 p_L 点 x, y 梯度方向为 DX_{p_L}, DY_{p_L} , 右图像中 p_{R1} 和 p_{R2} 的 x, y 梯度方向分别为 $DX_{p_{R1}}$ 和 $DY_{p_{R1}}$ 及 $DX_{p_{R2}}$ 和 $DY_{p_{R2}}$, 若 DX_{p_L} 与 $DX_{p_{R1}}$ 同号, 且 DY_{p_L} 与 $DY_{p_{R1}}$ 同号, 则

p_L 点与 p_{R1} 点匹配, 否则不匹配。

根据式(4)定义的局部区域约束, 结合常规的极线约束、连续性约束以及上述梯度方向约束, 利用图像分割区域 RAG 作为引导可按 3.3 节所述步骤完成区域边缘立体匹配。

3.3 立体匹配步骤

基于 RAG 的区域边缘立体匹配算法可由如图 5 所示流程图描述。

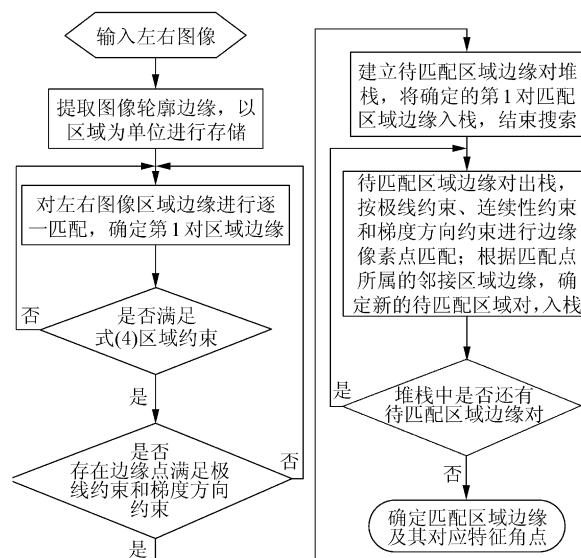


图 5 轮廓边缘立体匹配流程图

Fig. 5 Flowchart of contour edge matching method

匹配具体过程如下:

① 按照区域边缘序号顺序搜寻第 1 对匹配区域边缘。设当前进行匹配的左右图像区域边缘为 RE_{L_i} 和 RE_{R_j} , 若 RE_{L_i} 和 RE_{R_j} 所属区域 v_{L_i} 和 v_{R_j} 满足如式(4)定义的区域约束, 则转②; 否则转①, 继续匹配下一对区域边缘。

② 对 RE_{L_i} 和 RE_{R_j} 像素点进行立体匹配, 若存在严格满足极线约束和梯度方向约束的像素点, 则确定第 1 对匹配区域边缘, 转③; 否则转①。

③ 创建待匹配区域边缘对堆栈, 将第 1 对匹配区域边缘入栈。

④ 对待匹配区域边缘堆栈进行出栈入栈操作, 进行区域边缘及边缘像素点立体匹配。弹出位于栈顶的待匹配区域边缘对 RE_{L_i} 和 RE_{R_j} , 以已匹配的边缘像素点为基准, 按边缘点的连续性约束和极线约束对该对区域边缘的所有边缘点进行匹配, 记录匹配的各对边缘点; 按 RAG 根据边缘点同时所属的邻接区域边缘确定新的待匹配边缘对, 若其满足如式(4)定义的区域约束, 则将新的

待匹配区域边缘对入栈。

⑤ 若堆栈中还有待匹配区域,则转④;否则结束堆栈操作,最终确定区域边缘及其边缘点匹配结果。

在以上立体匹配过程中,轮廓边缘以区域为单位作为匹配基元会形成数据重叠,即同一段边缘将会出现在两个区域边缘数据中,因此需进行匹配记录以避免重复匹配。而区域边缘部分信息重叠的特点,能够在一定程度上保证区域边缘匹配的完整性,当所属某区域的边缘段由于分割区域差异而在该区域边缘匹配过程中无法对应匹配时,在其所属的邻接区域边缘匹配则可能完成对应匹配。由此可见,边缘按区域分组根据 RAG 进行匹配不但能够根据区域约束及其邻接关系提高匹配速度,同时也能提高匹配的鲁棒性。

4 边缘点三维坐标计算

通常利用针孔成像原理可建立摄像机成像模型,当实际镜头存在非线性畸变时,一般采用一阶径向畸变已足以描述^[15]。边缘点世界坐标系坐标 $\mathbf{x}_w = [x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T$ 变换到摄像机像素图像坐标 $\mathbf{x}_p = [u \ v \ 1]^T$ 的成像过程可由式(5)~式(7)表示:

$$s\bar{\mathbf{x}}_c = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_w \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_c \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_c &= x_c(1 + k_1 r^2) \\ \bar{y}_c &= y_c(1 + k_2 r^2) \\ r^2 &= x_c^2 + y_c^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: f 为摄像机的有效焦距; \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 为由世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量; s 为比例因子; dx 和 dy 为摄像机图像平面 x 和 y 方向的像素物理尺寸; $[u_0 \ v_0]^T$ 为摄像机图像中心; $\bar{\mathbf{x}}_c = [\bar{x}_c \ \bar{y}_c \ 1]^T$ 为像点理想图像坐标; $\mathbf{x}_c = [x_c \ y_c \ 1]^T$ 为像点实际图像坐标; k_1 和 k_2 为 x 和 y 方向的一阶径向畸变系数。由边缘点的一组左右摄像机图像坐标,根据式(5)~式(7)建立线性方程组,利用最小二乘法即可解算出该点在世界坐标系下的三维坐标。

由于误匹配像点计算得到的错误三维坐标与正确值通常偏差很大,而地形景物高度变化通常是渐变过程,较少出现大幅度的跳跃,因此可将边缘点三维坐标中体现深度(高度)信息的坐标值(简称深度坐标)与其相邻点坐标值进行对比,去除坐标值大幅度跳跃点,以剔除轮廓边缘误匹配点。

5 实验结果

分别在实物仿真平台和数字仿真平台上进行实验以检验上述地形三维重建算法。实物仿真采用两个 CCD 建立双目立体视觉系统,在标定摄像机内外参数之后对山体模型进行拍摄,获取立体图像对如图 6(a)所示,其分辨率为 768 像素 \times 576 像素。轮廓边缘提取结果如图 6(b)所示,立体匹配结果如图 6(c)所示,图中匹配边缘点用黑色表示,数字为匹配的区域边缘序号,其中匹配区

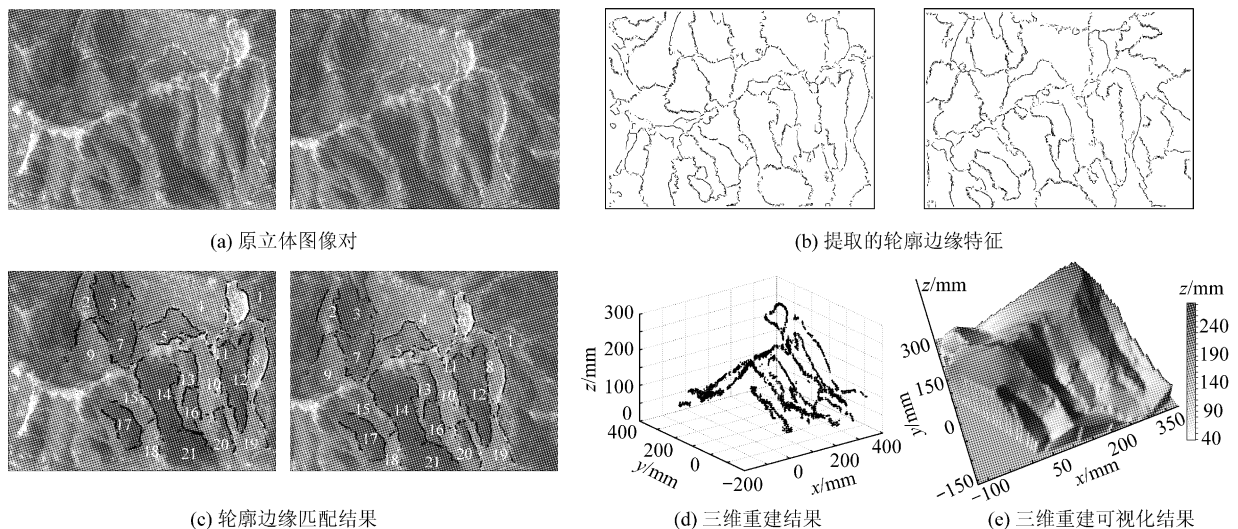


图6 山体模型图像立体匹配及三维重建结果

Fig. 6 Stereo matching and 3D reconstruction result of terrain model

域边缘数为 21 对,序号为 1 的匹配边缘是误匹配,匹配正确率为 95.2%。计算边缘点三维坐标得到结果如图 6(d)所示。为检验重建的地形轮廓特征是否能够体现三维场景整体结构特性,利用逆向工程软件 Golden Software Surfer 8.0 在三维轮廓边缘的基础上进行插值处理,得到的三维地形可视化结果如图 6(e)所示。由以上实验结果可以看出,重建的山体地形三维轮廓特征只用 3 317 个边缘点就能够较好描述山脊线、山谷线等地形特征信息,体现出山体起伏走势的概况,重建结果与实际山体模型在轮廓框架结构上具有一致性,体现出较好的三维场景整体结构特征概括能力。实验数据是在 P4 2.4GHz PC 机上 VC 6.0 的实验环境中获得的,特征提取耗时 0.562 s,立体匹配耗时 0.927 s,三维重建过程总

耗时 1.857 s。

在利用虚拟现实技术建立的数字仿真平台上,对本文算法也进行相应实验。在虚拟环境中设置摄像机参数后,将其视点设置在海拔 3 000 m 左右,在不同位置得到两幅俯视地形图如图 7(a)所示。对提取的轮廓特征进行立体匹配结果如图 7(b)所示,其中匹配区域边缘数为 72 对,误匹配 3 对,匹配正确率为 95.8%。地形三维重建结果如图 7(c)所示,三维地形可视化结果如图 7(d)所示。为衡量三维重建精度,在不同边缘上随机选取 50 个参考点,比较参考点的重建三维坐标值和标准值,坐标误差如图 7(e)所示,各坐标分量的 RMS 误差为: $RMS_x = 6.6079 \text{ m}$, $RMS_y = 7.1948 \text{ m}$, $RMS_z = 9.9785 \text{ m}$ 。三维重建过程总耗时 2.055s。

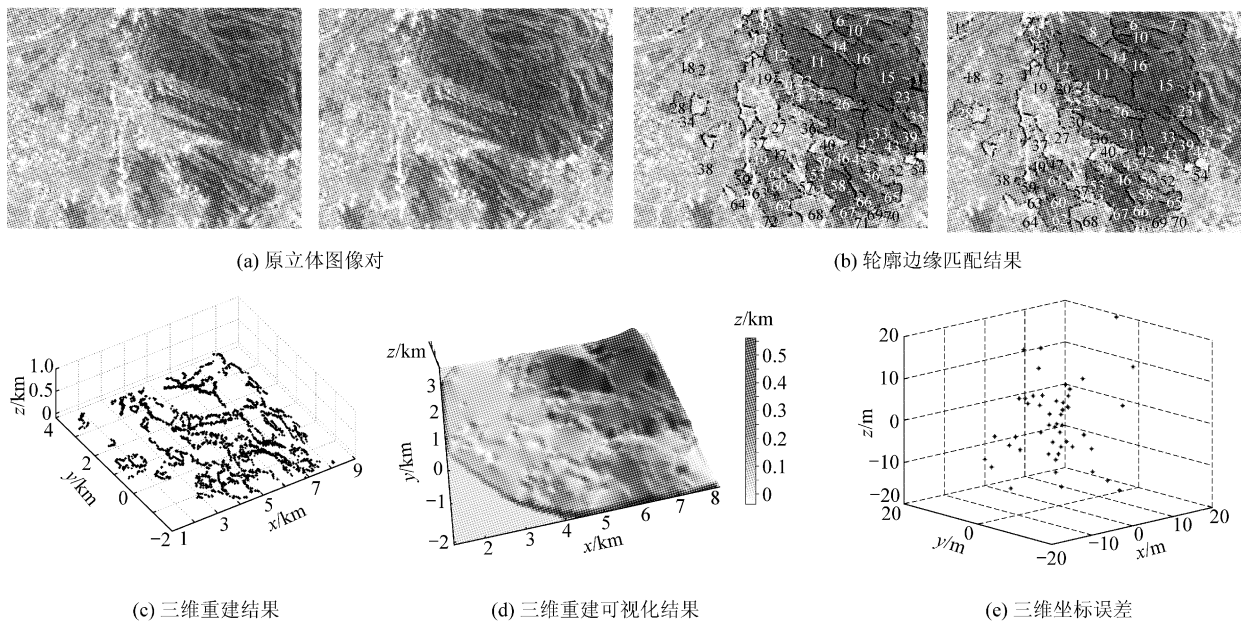


图 7 数字仿真地形图像立体匹配及三维重建结果

Fig. 7 Stereo matching and 3D reconstruction result of digital simulation terrain

6 结论

针对自然地形特征的三维重建,提出了基于区域分割的轮廓特征立体视觉重建算法。通过分水岭变换确定的地形轮廓边缘特征比普通边缘更能体现图像中场景的结构信息。在分割区域的基础上,利用区域之间邻接关系的全局特征和各区域所具有的位置、尺寸、灰度值局部特征,为轮廓边缘立体匹配建立新的区域约束,可大大减少匹配的搜索空间,优化边缘特征的匹配顺序。同时根据区域边缘像素点梯度分布的特点建立梯度方向约束,结合常规的极线约束

和连续性约束能够迅速可靠地确定立体匹配点对。实验结果表明,本文的地形轮廓特征的立体视觉三维重建方法具有较高的精度和速度,重建的轮廓特征能够很好地体现自然场景的三维结构特征。由于本文方法建立在区域分割的基础上,当不同视点成像图像具有一定差异而使得分割区域难以对应时,该方法则会受到限制,需探讨新的方法。

参 考 文 献

- [1] Lotti J L, Giraudon G. Adaptive window algorithm for aerial image stereo[C]// Proceedings of the 12th IAPR Inter-

- national Conference on Pattern Recognition. 1994, 1: 701-703.
- [2] Schultz H. Terrain reconstruction from widely separated images[C] // Proceedings of SPIE—Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II. SPIE, 1995, 2486: 113-123.
- [3] 介鸣, 尹航, 黄显林. 月球探测器自主软着陆中的三维重构技术研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 966-971.
Jie Ming, Yin Hang, Huang Xianlin. On 3D reconstruction technology of lunar lander autonomous soft landing [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 966-971. (in Chinese)
- [4] Contassot-Vivier S, Rasson J P. Vectorization, matching, and simplification of image contours in uncalibrated aerial stereo vision[C] // Proceedings of SPIE—Image and Signal Processing for Remote Sensing VI. SPIE, 2001, 4170: 41-48.
- [5] Zhang C S, Baltsavias E. Knowledge-based image analysis for 3D edge extraction and road reconstruction[C] // Proceedings of 19th ISPRS Congress. 2000, 33: 1008-1015.
- [6] 史海龙, 李焱, 贺汉根. 一个基于结构化特征匹配的月面三维重建方法[J]. 计算机工程与科学, 2006, 28(9): 56-59.
Shi Hailong, Li Yan, He Hangen. A lunar surface 3-D reconstruction method based on structured feature-matching [J]. Computer Engineering & Science, 2006, 28(9): 56-59. (in Chinese)
- [7] 陶声祥, 张江辉. 空中侦察图像立体重建方法研究[J]. 探测与控制学报, 2007, 29(4): 49-51.
Tao Shengxiang, Zhang Jianghui. Study on the 3D reconstruction of the air-reconnaissance image[J]. Journal of Detection & Control, 2007, 29(4): 49-51. (in Chinese)
- [8] Zhang Z, Deriche R, 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: 87-119.
- [9] Ma J, Ahuja N. Region correspondence by global configuration matching and progressive Delaunay triangulation[C] // IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2000, 2: 637-642.
- [10] Wei Y C, Quan L. Region-based progressive stereo matching [C] // IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2004, 1: 106-113.
- [11] 姜璐, 于远治, 吉春生. 陀螺仪在导航中的应用及其比较[J]. 船舶工程, 2004, 26(2): 10-13.
Jiang Lu, Yu Yuanzhi, Ji Chunsheng. Application and comparison of gyroscopes in navigation[J]. Ship Engineering, 2004, 26(2): 10-13. (in Chinese)
- [12] 顾英. 惯导加速度计技术综述[J]. 飞航导弹, 2001(6): 78-85.
Gu Ying. The technology of accelerometer measurement for inertial navigation[J]. Winged Missiles Journal, 2001(6): 78-85. (in Chinese)
- [13] Bieniek A, Moga A. An efficient watershed algorithm based on connected components[J]. Pattern Recognition, 2000, 33(6): 907-916.
- [14] Haris K, Efstratiadis S N, Maglaveras N, et al. Hybrid image segmentation using watersheds and fast region merging [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(12): 1684-1699.
- [15] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 95-96.
Zhang Guangjun. Machine vision [M]. Beijing: Science Press, 2005: 95-96. (in Chinese)

作者简介:

李苏祺(1980—) 男, 博士。主要研究方向: 计算机视觉与模式识别、视觉导引与导航。

Tel: 010-82316930

E-mail: lisuqi@buaa.edu.cn

张广军(1965—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 计算机视觉与模式识别、光电测量与动态跟踪、光机电一体化技术。

Tel: 010-82338768

E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn

魏振忠(1972—) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 计算机视觉、图像处理与模式识别、光电精密测量。

Tel: 010-82316930

E-mail: zhenzhongwei@buaa.edu.cn

(责任编辑: 张利平, 孔琪颖)