

中图法分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)08-1459-07

论文索引信息: 葛莹, 陈科, 吴野, 陆凤. 增强现实系统中视频影像与 DEM 栅格图像匹配[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1459-1465

增强现实系统中视频影像与 DEM 栅格图像匹配

葛莹, 陈科, 吴野, 陆凤

(河海大学地球科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: 提出一种新的图像匹配技术解决增强现实(AR)系统中的户外3维注册问题。首先用数学形态学提取视频影像中的地形边缘曲线。根据GIS的通视分析原理,从DEM(数字高程模型)栅格图像上生成基于观测视点的地表视域轮廓。再分别检测两个轮廓线上的局部极值点,计算各自的极值点曲率向量。最终通过用相关矩阵度量两个极值点曲率向量之间的相似性获得匹配结果。研究结论表明,与地图相比,基于视频AR的地理信息可视化对地理数据建模的要求较低,且无须对空间数据进行抽象符号化。

关键词: 增强现实系统; 视频影像; DEM 栅格图像; 图像匹配

Video images and DEM raster images matching in augmented reality systems

Ge Ying, Chen Ke, Wu Ye, Lu Feng

(College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China)

Abstract: A new approach of image matching is introduced for 3D registration of augmented reality system. First, mathematical morphology is used to extract the edge of video images. And the land surface visible portions of DEM are derived at the viewpoint based on GIS visibility analysis. Second, the local extremes in the corresponding contours are detected and their curvature sets are calculated, respectively. Third, the similarity of the corresponding curvature sets is calculated by comparing the similarity matrix.

Keywords: augmented reality systems; video images; DEM raster images; image matching

0 引言

GIS通常采用地图、遥感图像、图表等形式作为地理信息可视化的手段。随着AR技术的兴起,地理学者已不再满足于抽象符号、地图注记等传统的GIS数据表达方式,开始尝试用真实的视频影像作为地理信息可视化的载体^[1]。利用AR技术可视化地理信息的优势是,无须进行数据抽象和建模,因而其数据表达更简单、效果也更逼真^[2]。更重要的

是,AR技术能反映地理数据自身的特性,做到与真实环境无缝融合,为用户呈献一个真实感强烈的视觉感受^[3],能帮助决策者做出合理的判断^[4]。所以,自20世纪90年代起,AR技术引起了国内外相关领域研究学者的广泛关注^[5-11]。

运用AR技术在真实场景上呈现地球表面的空间信息是近年来国内外学者的研究热点。例如,东京大学用混合跟踪方式确定3维空间模型和真实影像序列间位置和方向的相互关联,增强3维虚拟模型和视频影像的叠加效果^[12]。王靖滨等在景观规

收稿日期:2010-04-15;修回日期:2010-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41071347)。

第一作者简介:葛莹(1963—),女,副教授。2005年获南京大学地图学与地理信息系统专业博士学位,主要研究方向为GIS、空间分析和地理模拟演化。E-mail:gey1002@yahoo.com.cn。

划系统中,利用局部 3 维重建和交互式相机定标技术,解决虚拟景物和真实场景合成过程中几何和光照一致性的问题^[13]。Kamat 等人利用 GPS 获取观测视点的 6 维度信息,并结合其他的位置信息,在真实场景中实时叠加虚拟的 CAD 模型^[14]。Sun 等人利用 GPS 和惯导跟踪器的定位数据,从 3 维 GIS 中提取 2 维虚拟场景,并与真实视频场景融合^[15]。Ghadirian 和 Bishop 通过建立 GIS 数据库与真实全景视频影像序列间的关系,模拟澳大利亚维多利亚省 Cudgewa 山谷野草动态蔓延过程^[16]。尽管如此,AR 技术在地学领域中的研究才刚刚起步,目前仍处于研究和应用的初期^[17]。

在 AR 与 GIS 的结合应用中,富于挑战性的难题是在户外 AR 系统中,如何将视频影像实时叠加在 GIS 的相应位置上,即 3 维户外注册^[18]。本文尝试用一种新的图像配准技术来解决 3 维户外注册问题。该方法首先采用数学形态学的图像边缘检测技术,从视频影像中提取地形边缘曲线。并根据 GIS 通视分析原理,从 DEM 栅格图像中提取基于观测视点的 360°地表视域轮廓;再检测出两种曲线的极值点,通过计算极值点曲率,获取每个极值点的曲率向量;最后计算两个曲率向量的相似矩阵,检测地形边缘曲线和地表视域轮廓之间的匹配点,建立 DEM 栅格图像与视频影像之间的转换关系。

实验数据包括 GPS 观测视点、基于观测视点的视频影像以及含有观测视点的 DEM(数字高程模型)栅格图像。所有的实验数据均由 Ghadirian 和 Bishop^[16]提供。研究区域位于澳大利亚维多利亚东北山区。为了获取真实场景,笔者从视频影像中截取了 3 帧视频影像(按从左到右顺序,分别称为第 1

帧、第 2 帧和第 3 帧影像),采用特征点匹配技术,将 3 帧图像合成为一幅全景图(图 1)。

1 视频影像中地形边缘提取

常见的地理信息可视化工具包含文本、图形、静态图像、视频影像、声音、动画及可视化图标 7 种媒体形式及其组合^[19]。其中,视频影像是以可视化媒体的形式超链接入 GIS 中。事实上,视频影像包含大量地理信息,如果能提取出隐含在视频影像中的地理要素,并与 GIS 中的地理信息模型融合,则可以拓宽地理信息可视化的媒介。

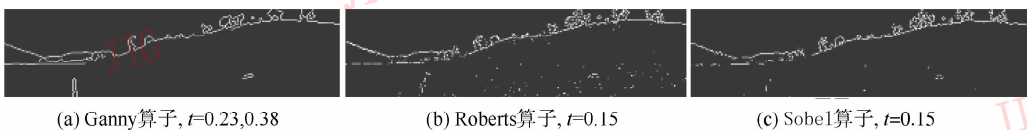
图像边缘提取是视频影像 3 维户外注册的关键之处。以第 3 帧为例,针对该视频影像的特点,我们采用了针对灰度图像的边缘检测方法。经典的边缘检测方法包括 Roberts、Sobel、Laplacian、Canny 算子等,其优点是计算简单、成熟、速度快,缺点是抗干扰性差,不能有效地克服噪声的影响^[20]。实验结果表明(图 2),采用上述方法提取视频图像的地形边缘,得到的边缘曲线不仅含有地形还含有树体,且两者交织在一起,出现了锯齿、缺口、洞、细长连线以及小的孤立物等噪声,所以它们不适合用于视频影像的地形边缘提取。

近年来,随着数学理论的发展,涌现出许多新的图像边缘检测方法。其中,数学形态学适用于灰度差异较大的图像边缘检测。它的基本思想是,在图像中移动一个结构元素,然后与下面的二值图像做交、并等集合运算。基本的形态运算是腐蚀和膨胀^[21]。若用 $B(x)$ 表示结构元素,对工作空间 E 中的每点 x ,腐蚀和膨胀公式分别为



图 1 全景图像合成

Fig. 1 Synthesis of panoramic image



(a) Ganny算子, $t=0.23, 0.38$

(b) Roberts算子, $t=0.15$

(c) Sobel算子, $t=0.15$

图 2 3 种检测方法提取的地形边缘曲线

Fig. 2 Land surface curves based on three edge detection methods

$$X = E - B = \{x : B(x) \subset E\} \quad (1)$$

$$X = E \oplus B = \{x : B(x) \cap E \neq \emptyset\} \quad (2)$$

先腐蚀后膨胀的过程称为开运算。其作用是消除细小物体,在纤细处分离物体和平滑较大物体的边界。而先膨胀后腐蚀的过程称为闭运算。其作用是填充物体内细小空洞,连接邻近物体和平滑边界。

将二值形态学用于第3帧影像地形边缘的提取过程是:先将视频影像转换为二值图像,根据灰度阈值分离天空和地形(图3(a));再用闭运算和开运算去除图像的噪声(图3(b)(c));最终根据处理后的图像提取符合要求的地形边缘曲线(图3(d))。在保持图像整体灰度值和地形区域基本不变的前提下,闭运算可消除天空中的树木,而开运算可填补图像弯口,消除图像锯齿,平滑地形轮廓。闭运算与开运算两者结合,既能保持地形边缘的细节特征,又能平滑边缘曲线。

除形态运算函数外,结构元素的大小和形状也会影响视频影像的形态运算结果^[22]。经过实验发现,选用边长为6的八边形结构元素,对二值图像进行闭运算操作,能较好地消除视频影像上方孤立的树木轮廓。

同时,选用6×10长方形对二值图像进行开运算操作,能明显地填补地形边缘的弯口,平滑地形轮廓。最终获得天空与地形边界清晰、边缘平滑的图像。

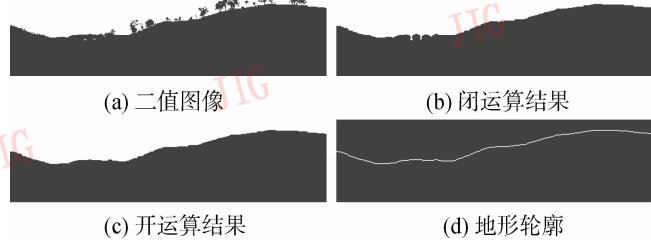


图3 视频影像的地形边缘曲线提取过程
Fig. 3 The detecting process of land surface curves of video images

值得一提的是,整幅图像应分割成若干互不交叉的区域进行处理,以保证图像灰度值的变化及噪声分布的均匀。原则上,图像分割区域越小,处理效果越佳,但运算时间也越长。因此,在选择分割尺寸时,需兼顾图像提取精度和运算时间。分别选取250×250、500×500、1 000×1 000、1 500×1 500、2 000×2 000 5种图像分割尺寸,做了一系列实验(如图4所示)。

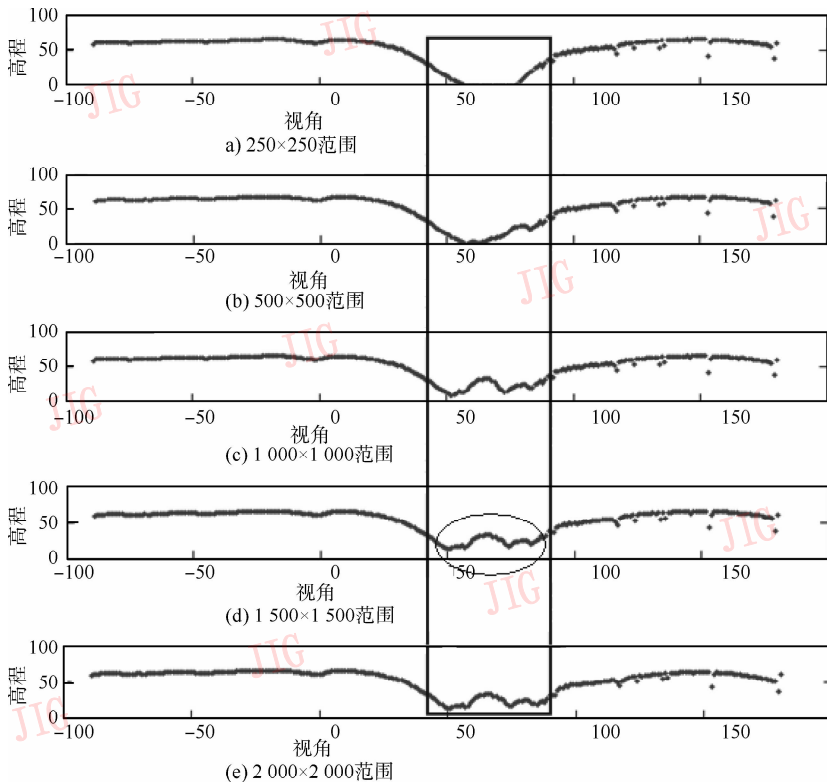


图4 不同图像分区提取的地形边缘曲线比较

Fig. 4 Comparison of land surface curves

通过与图 1 全景视频影像比较发现,若按 250×250 或 500×500 尺寸分割图像,远距离的地形边缘提取效果不佳,基本上没有提取出远距离的地形轮廓信息。只有当分割尺寸增加到 $1\ 000 \times 1\ 000$ 以上时,才能提取出远距离的地形边缘。综合考虑图像的提取精度和运算速度,我们认为选取 $1\ 500 \times 1\ 500$ 图像分割尺寸,实验效果比较理想。

2 地表视域轮廓的生成

利用 GIS 通视分析原理生成地表视域轮廓。通视分析一般分为点通视分析、线通视分析和面通视分析三种。点通视分析是指观测视点与待判定点之间的可视性分析;线通视分析是指基于观测视点的可视范围分析;面通视分析是指基于观测视点的地表区域可视化分析。我们选择线通视分析,采用 Behringer 方法生成地表视域轮廓^[23]。具体算法是:1) 已知观测视点 P_0 ,将围绕 P_0 的 360° 方位视角按步长 $\Delta\alpha$ 等分;2) 设 P_{ij} 是 DEM 栅格图像上的任一像素,计算 P_0 和 P_{ij} 间的

方位视角 α_{ij} ,并判断 α_{ij} 所处的方位视角区间 α_c ; 3) 计算 P_0 和 P_{ij} 间的仰角 θ_{ij} ,并判断 θ_{ij} 是否等于 α_c 区间内 P_0 点的最大仰角 $\theta_{\alpha_c}^{\max}$ 。若相等,则 P_{ij} 是地形视域轮廓点;4) 遍历整个 DEM 栅格。重复上述步骤,直至循环结束。最终得到 2 维离散点集 $(\alpha_{ij}, \theta_{\alpha_c}^{\max})$,组成了基于观测视点 P_0 的地表视域轮廓。

从上述算法中得知,步长 $\Delta\alpha$ 影响地表视域轮廓的提取精度。选择 2 个步长 $\Delta\alpha$ 来分析地表视域轮廓的精度(图 5)。图中的横坐标表示观察点视角,纵坐标表示高程。当 $\Delta\alpha$ 为 0.5° 时,围绕观测视点的地形视域轮廓由 360 个 (α, θ) 点组成(图 5(a));而当 $\Delta\alpha$ 减小到 0.125° 时,围绕观测视点的地形轮廓由 1440 个 (α, θ) 点组成(图 5(b))。比较后发现,后者生成的地表视域轮廓精度明显比前者高,缺点是轮廓线上含有大量异常值,有明显的锯齿(图 5(c))。为剔除异常值,我们采用 1 维中值滤波法进行后续处理。处理后的地形视域轮廓既消除了锯齿,又完整保留了地表视域轮廓信息(图 5(d))。

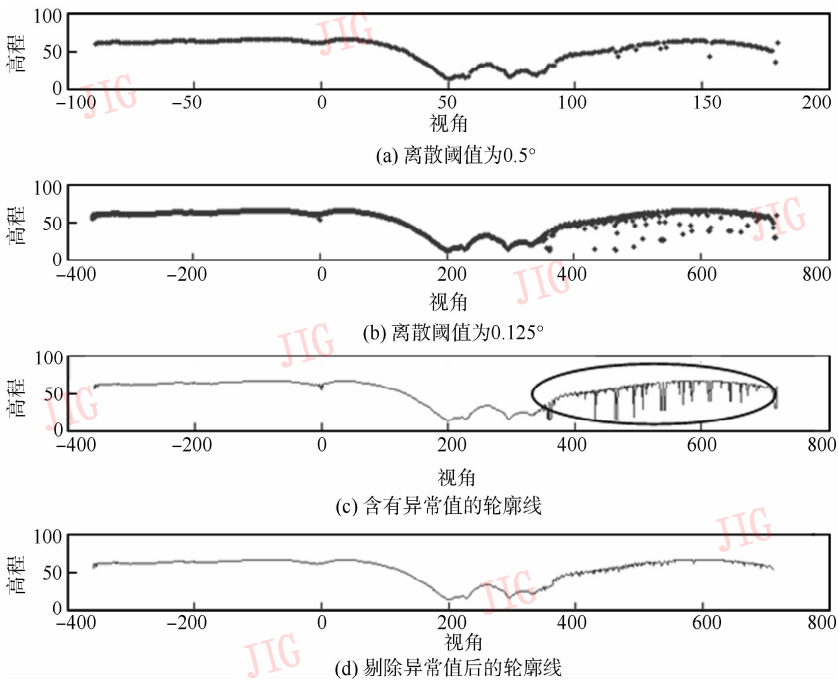


图 5 方位角离散化和异常值剔除

Fig. 5 Discretization of silhouette and exclusion of outliers

3 视频边缘曲线和地表视域轮廓的匹配

视频边缘曲线和地表视域轮廓可采用传统的曲率极值配准方法进行匹配。即从待匹配的图像中寻找曲率极值点作为曲线的特征点,再用相似性度量匹配曲线之间的特征点。匹配精度取决于特征点提取质量,且提取过程容易受噪声的影响。为了提高曲线的匹配精度,提出一种基于极值点曲率相关的算法。即先提取两种曲线的局部极值点,再用钱文光等人提出的方法^[24]计算极值点曲率,得到极值点曲率集合,并通过相似矩阵度量二个曲率集合的相似性。最终实现视频边缘曲线和地表视域轮廓之间的匹配。

3.1 极值点提取

曲线的极值点提取分为两部分。一是视频边缘曲线的极值点提取。视频边缘曲线是以行列为索引的像素点集。由于该曲线的极值点较少,采用局部搜索法实现曲线极值点的检测和提取。选取该曲线上任意一点 $P(x, y, \theta_k)$, 且 $\theta_k \in [0, a]$, α 为阈值,判断 $P(x, y, \theta_k)$ 是否为局部最大值和最小值。若是,则该点是极值点, (x, y) 是极值点所在像素的位置。二是地表视域轮廓的极值点检测。设步长 $\Delta \alpha$ 为 0.125° , 地表视域轮廓由 1 440 个 (α, θ) 离散点组成。在方位视角 $(-90^\circ, 270^\circ)$ 范围内,搜索 (α, θ) 的极值点。若 θ 是极大值或极小值,则 (α, θ) 是轮廓的特征点。图 6 表示提取的视频边缘曲线和地表视域轮廓的极值点。红点表示极大值,绿点表示

极小值。从视频边缘曲线上,获得了 3 个极大值点和 3 个极小值点,而从地表视域轮廓上,得到了 7 个极大值点和 20 个极小值点。

3.2 特征点匹配

首先利用文献[24]的方法分别计算视频边缘曲线和地表视域轮廓的极值点曲率。曲率的求解公式如下:设 p_i 点为中心,前后相距 λ 的两点是 $p_{i-\lambda}$ 和 $p_{i+\lambda}$, 这 3 点拟合成圆弧。设圆弧所在圆半径为 r , 则中心点 p_i 处的曲率是 $k(i) = 1/r$ 。定义 $D(p_i) = \{p_{i-\lambda}, \dots, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, \dots, p_{i+\lambda}\}$ 为 p_i 点的支撑区域,则在支撑区域内 p_i 处的曲率是

$$k(i) = \frac{1}{r} = \frac{4 \sqrt{(|p_{i-\lambda}p_i| + |p_i p_{i+\lambda}|)^2 - |p_{i-\lambda}p_{i+\lambda}|^2}}{(|p_i p_{i+\lambda}| + |p_{i-\lambda}p_{i+\lambda}|)^2} \quad (3)$$

式中,向量 $p_{i-\lambda}p_i$ 和 $p_{i-\lambda}p_{i+\lambda}$ 是矢量积。当 $p_{i-\lambda}p_i \times p_{i-\lambda}p_{i+\lambda} \geq 0$ 时,曲线在 p_i 点处是凸的,规定曲率为正值;反之是凹的,曲率则为负值。

采用式(3)对视频边缘曲线的极值点逐像素计算曲率,而对地形视域轮廓的极值点按 (α, θ) 坐标逐个计算曲率。 λ 的取值范围是 $[3, 15]$ 。计算结果是,每个极值点均可以得到一个内含 13 个元素的曲率向量。由此可得,以极大值点为例,视频边缘曲线的 3 个极大值点可以得到 3×13 个曲率向量,而地表视域轮廓的 7 个极大值点可以得到 7×13 个曲率向量。以每个曲率向量为观测值,计算视域边缘曲线和地表视域轮廓极值点曲率向量的相关系数矩阵(见表 1 和表 2)。

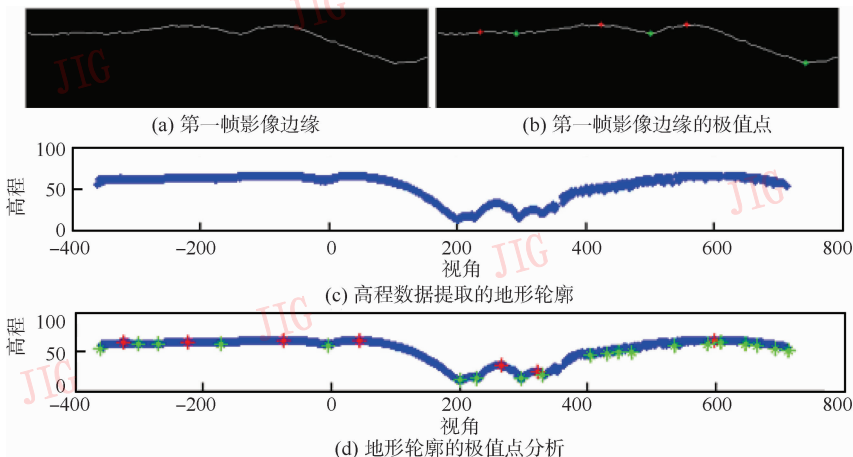


图 6 提取的视频边缘曲线和地表视域轮廓极值点

Fig. 6 Detecting the extreme points on land surface curves of video images and visible portions

表 1 两个地形曲线极大值向量间的相关系数矩阵

Tab. 1 Correlation coefficient matrix of the recognition vector of maximum points on land surface curves

视频曲线边缘极大值点	DEM 极大值点						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0.740 602	0.940 897	0.788 162	0.779 325	0.814 871	0.902 734	0.718 738
2	0.442 320	0.861 51	0.996 769	0.701 576	0.754 859	0.825 031	0.584 274
3	0.816 389	0.688 22	0.638 921	0.999 369	0.990 981	0.929 368	0.990 487

表 2 两个地形曲线极小值向量间的相关系数矩阵

Tab. 2 Correlation coefficient matrix of the recognition vector of minimum points on land surface curves

视频曲线边缘极小值点	DEM 极大值点		
	4	5	6
1	0.887 922	0.674 474	0.736 527
2	0.827 186	0.998 254	0.952 677
3	0.844 616	0.975 241	0.998 932

从表 1 可以看出, 视频边缘曲线和地表视域轮廓之间表现出正相关性, 且相关程度较高。仔细

分析相关系数矩阵, 发现在相关系数矩阵中, 视频边缘曲线上的第 1、2、3 个极大值点与地表视域轮廓上的第 2、3、4 个极大值点之间的相关系数最大, 分别是 0.940 897、0.996 769 和 0.999 369, 所以视频边缘曲线上的第 1、2 和 3 点分别可以与地表视域轮廓上的第 2、3 和 4 点匹配。同理, 从表 2 中可知, 地表视域轮廓上的第 3、4 和 5 点分别可以与视频边缘曲线上的第 1、2 和 3 点匹配。最终, 3 帧视频影像上的 17 个特征点在 DEM 中都能找到相应的位置(图 7)。

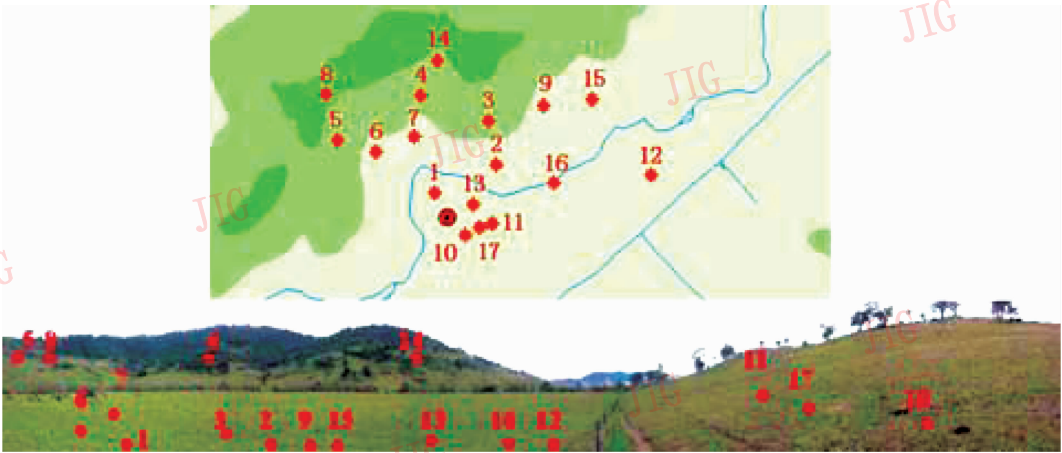


图 7 坐标配准的结果

Fig. 7 The results of coordinate registration

4 结 论

增强现实技术由于其数据表达和可视化方面的优势, 已受到相关领域学者的广泛关注。本研究以视频影像合成的全景图像作为地形数据表达的载体, 通过应用图像配准技术实现 AR 系统的 3 维户外注册。首先采用数学形态学从视频影像中提取地形边缘曲线; 再根据 GIS 的通视分析原理, 基于相机视点从高程格网中产生地表的 360° 视域边缘轮廓。

最后通过提取两幅图像的极值点作为特征点, 进行曲率计算和相关性的相似区域匹配找到匹配的特征点对, 并得到图像空间坐标变换参数进行图像配准。与以地图形式的表达方式相比, 本文的方法是对真实场景的增强表达, 可视化表达更简单、直观, 富有真实感。

志谢 本文的所有实验数据均由澳大利亚墨尔本大学 Department of Geomatics 的 Ghadirian 博士和 Bishop 教授提供。在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Azuma R, Bailiot Y, Behringer R, et al. Recent advances in augmented reality [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(6):34-47.
- [2] Rana S, Sharma J. Frontiers of Geographic Information Technology [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [3] Veas E, Schmalstieg D. Creating meaningful environment models for augmented reality [C]// Proceedings of IEEE Virtual Reality. New York, USA: IEEE Press, 2008, 1:295-296.
- [4] Zhang Fen, Lu Zhenzhu. Application of augmented reality in urban planning [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2007, 30(4):113-116. [张奋, 卢珍珠. 增强现实技术在城市规划中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2007,30(4):113-116.]
- [5] Raskar R, Welch G, Fuchs H. Spatially augmented reality [C]// Proceedings of the First IEEE International Workshop on Augmented Reality. New York, USA: IEEE Press, 1998, 1:11-20.
- [6] Zlatanova S, Heuvel F. 3D GIS for outdoor AR applications [C]// Proceedings of the Third International Symposium on Mobile Multimedia Systems & Applications. Boca Raton, USA: CRC Press, 2002:117-124.
- [7] Yuan M L, Ong S K, Nee A Y C. Registration using natural features for augmented reality systems [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(4): 569-580.
- [8] Chen Jing, Wang Yongtian, Lin Liang. Implementation of the augmented reality on PDA [J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 52-55. [陈靖, 王涌天, 林惊. 增强现实技术在PDA上的应用[J]. 光学技术, 2007,33(1):52-55.]
- [9] Du Qingyun, Liu Tao. Design and implementation of a prototype outdoor augmented reality GIS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(11): 1046-1049. [杜清运, 刘涛. 户外增强现实地理信息系统原型设计与实现[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2007, 32(11): 1046-1049.]
- [10] Shen Kai, Dai Qing, Fei Xiaofei, et al. Key techniques of outdoor augmented reality system [J]. Microcomputer Information, 2006, 22(27): 6-9. [申凯, 戴青, 费晓飞, 等. 户外增强现实系统的关键技术研究[J]. 微计算机信息, 2006,22(27):6-9.]
- [11] Chang Yong, Shi Chuang. 3D visualization and analysis of spatial information based on augmented reality [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(9): 1991-1996. [常勇, 施闯. 基于增强现实的空间信息三维可视化及空间分析[J]. 系统仿真学报, 2007,19(9):1991-1996.]
- [12] Chen T, Shibasaki R. A versatile AR type 3D mobile GIS based on image navigation technology [C]//Proceedings IEEE International Conference on Systems. New York, USA: IEEE Press, 1999, C: 1070-1075.
- [13] Wang Jingbin, Li Ming, Geng Weidong, et al. Scene-planning system based on augmented reality technique [J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(4): 405-410. [王靖滨, 李明, 狄卫东, 等. 基于增强现实技术的景观规划系统[J]. 中国图象图形学报, 2002,7(4):405-410.]
- [14] Kamat V R, Behzadan A H. GPS and 3DOF tracking for georeferenced registration of construction graphics in outdoor augmented reality [J]. Intelligent Computing in Engineering and Architecture, 2006: 368-375.
- [15] Sun M, Li M, Zhang F Z, et al. Hybrid tracking for augmented reality GIS registration [C]// Proceedings of Japan-China Joint Workshop on Frontier of Computer Science and Technology. New York, USA: IEEE Press, 2007: 139-145.
- [16] Ghadirian P, Bishop I D. Integration of augmented reality and GIS: a new approach to realistic landscape visualization [J]. Landscape and Urban Planning, 2008, 86: 226-232.
- [17] Zhu Qing, Lin Hui. Cybercity Geographic Information System [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004. [朱庆, 林晖. 数码城市地理信息系统[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2004.]
- [18] Sun Min, Chen Xiuwan, Zhang Feizhou, et al. Augment reality geographical information system [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40(6): 906-913. [孙敏, 陈秀万, 张飞舟, 等. 增强现实地理信息系统[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2004,40(6):906-913.]
- [19] Wang Jianhua, Zhu Guorui, Wu Hehai. Description and expression of visual media in GIS [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1999, (2): 12-15. [王建华, 祝国瑞, 毋海海. GIS中可视化媒体的描述与表达[J]. 测绘通报, 1999, (2):12-15.]
- [20] Liu Xun, You Zhisheng. An image edge detection method based on multi-scale morphology [J]. Opto-electronic Engineering, 2003, 30(3): 56-58. [刘循, 游志胜. 多尺度形态学图像边缘检测方法[J]. 光电工程, 2003,30(3):56-58.]
- [21] Dai Qingyun, Yu Yinglin. The advances of mathematical morphology in image processing [J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(4): 478-482. [戴青云, 余英林. 数学形态学在图像处理中的应用进展[J]. 控制理论与应用, 2001,18(4):478-482.]
- [22] Wang Shuwen, Yan Chengxin, Zhang Tianxu, et al. Application of mathematical morphology in image processing [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 32: 89-92. [王树文, 闫成新, 张天序, 等. 数学形态学在图像处理中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004,32:89-92.]
- [23] Behringer R. Registration for outdoor augmented reality applications using computer vision techniques and hybrid sensors [C]//Proceedings of the IEEE Virtual Reality. New York, USA: IEEE Press, 1999: 244-251.
- [24] Qian Wenguang, Lin Xiaozhu, Zhao Guoqing. Research on the algorithm for matching 2D contours [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2007, 15(3): 8-15. [钱文光, 林小竹, 赵国庆. 二维轮廓曲线匹配算法研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2007,15(3):8-15.]