

视频空间化方法及其应用研究

吴 勇^{1,2}, 王美珍³

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

(2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007)

(3. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

[摘要] 视频数据具有获取便捷、表达直观、信息丰富的特性,使其成为地理信息系统(GIS)领域一种重要的数据源。同时,视频数据与GIS系统的集成应用已逐渐成为当前国际上的一个研究热点和新兴产业生长点。本文从数据采集、数据解析与数据组织检索的角度对视频空间化方法进行系统归纳与总结,详细介绍了视频数据与空间信息采用的字符叠加、音频调制、外部关联以及嵌入视频容器4种集成方式、原理以及特点;并阐述了单幅、双(多)幅视频三维建模、量测原理与方法,尤其对其核心问题相机标定进行了深入的剖析;同时总结提炼了视频/图像的基于位置检索的组织策略。最后,介绍了视频GIS在相关领域的典型应用,并对其发展做了展望。

[关键词] 视频GIS,空间化,视频集成,视频解析,视频检索

[中图分类号] TP37 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2014)02-0119-07

Video Spatialization Method and Its Application

Wu Yong^{1,2}, Wang Meizhen³

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

(2. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China)

(3. MOE Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the characteristics of convenient acquisition, intuitive representation and rich information, video has become an important GIS data source. At the same time, the applications of video integration with GIS systems have gradually become a research focus in the world and an emerging industrial growing point. In this paper, we concluded and summarized the methods of video spatialization from three aspects including data collection, data parsing and data organization and retrieval. Firstly the methods, principles and characteristics of four ways to integrate spatial information into video are addressed respectively. They are character overlay, audio modulation, external association and embedded video container. Secondly the methods and principles of three-dimensional modeling, geometric measurement principles and methods of single image or double(multiple) images are elaborated. And also the core issue of camera calibration is analyzed especially. Thirdly the video/photo organizational strategy based on location retrieval is summarized. Finally, the typical applications of video GIS were introduced and its future development was also discussed.

Key words: video GIS, spatialization, video integration, video parsing, video retrieval

作为一类常见的媒体类型,视频(图像/视频)由于时空属性兼备、信息分辨率高、表达直观和空间关系传递准确的特点,一直是世界性技术研究和产品开发的热点。视频作为一种普适化公众媒体资源,已不仅仅是一种视觉产品,而成为大众化的、社会化的地理信息来源和建模分析与表达手段。在GIS领域,由于视频信息本身的特点以及在许多领域中具有极其广阔的应用前景和重要的发展潜力,视频数据与GIS系统的集成应用已成为当前国际上的一个研究热点和新兴产业生长点。本文针对视频数据与GIS集成、视频数据解析以及视频数据组织与检索三类空间化方法进行总结与剖析,在此基础上介绍了视频GIS的典型应用领域。

收稿日期:2013-07-05.

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41201417)、福建省青年科技人才创新项目(2011J05104)。

通讯联系人:吴勇,博士,讲师,研究方向:视频GIS、嵌入式GIS. E-mail: wuyong3216@163.com

1 视频空间化方法

1.1 视频数据与 GIS 集成方法

早在 1978 年,麻省理工学院的 Andrew Lippman 教授首次将视频与空间数据集成,开发了动态、交互式超媒体地图系统.随后多媒体技术逐步被引入 GIS 领域,提出了多媒体或超媒体地图、GIS 多媒体功能扩展、地理超媒体概念与技术框架等技术与方法.然而在超媒体地图和地理超媒体概念中,视频数据仅作为空间实体的一种属性进行存储和调用.近年,诸多领域专家学者对视频与空间信息(GPS 定位信息与方位信息)集成进行了大量研究,数据源呈单一的信息资源向多种信息资源聚合转变,具体可分为单幅/全景图像、视频、全景视频与空间信息的集成.其集成方式主要分为以下 4 种:(1)字符叠加方式;(2)占用音频信道方式;(3)同步信息外部关联方式;(4)基于视频容器嵌入方式.具体集成方法及特点如表 1 所示.

表 1 视频与空间信息集成方法分类与特点

Table 1 Classification and characteristics of the images with spatial information integration methods

集成方式	集成方案	集成特点
字符叠加方式	将 GPS 信息转换为模拟信号,通过同步字符发生器将 GPS 模拟信号以点阵数据脉冲的方式叠加到视频中实现与图像的融合 ^[1] .	采用模拟图像/视频,生成文件数据巨大;GPS 嵌入图像/视频,后期难以分离利用.
占用音频信道方式	通过专用信号调制解调设备将解析获取的空间位置、方位等参数转换为模拟信号并调制到音频载频中完成与视频的合成 ^[2,3] .	采用专用设备采集,操作复杂;视频文件损失了音频信息;难以支持基于位置的快速检索.
同步信息外部关联方式	采用 MPEG-7 视频元数据格式对位置、时间等信息进行描述 ^[4] .	实现简单;需显式建立图像/视频信息与定位信息之间时域约束关系,且两者信息分离存储,不利于一些实时应用(如视频与定位信息同步传输).
	建立专门的元数据描述视频帧与地理位置的对照关系,并使用插值方式获得所有视频帧的空间位置 ^[5,6] .	
	基于高精度时间同步实现视频与空间信息的关联,如移动测量系统(MMS) ^[7,8] .	
基于视频容器嵌入方式	使用 ASF 流媒体文件作为编码容器,将接收到 GPS 经纬度、方位等信息存储到 ASF 脚本命令对象中,利用 ASF 内部时间轴实现音频、视频和空间信息之间时域同步并实时自动融合 ^[9] .	视频与定位信息实时融合且同步质量好;支持视频无线同步传输、播放.

1.2 视频数据解析方法

视频是视觉所及客观世界的自然再现,其所呈现的地理空间具有很强的真实感.由于其获取快速、物体表面细节丰富、多视角等优势,使得视频数据在 GIS 系统的角色由属性数据向空间数据转变,视频数据已逐渐成为 GIS 应用系统中一个极其重要的信息源.视频解析从表现形式看主要有场景的三维重建和几何量测两类,从解析方法原理上又分为近景摄影测量以及计算机视觉两种,前者主要以直线线性变换与共线方程为基础,后者主要以投影矩阵分解为基础.根据建模所用的图像数目不同,分为基于两(多)幅图像解析、基于单幅图像解析.

1.2.1 基于两(多)幅图像解析

基于两(多)幅图像解析主要用于虚拟场景建模、场景几何信息量测等,其通过同一场景的两幅或多幅具有重叠度的图像重建出场景的三维结构,从而测量出三维空间中任何两点之间的距离.其核心问题在于相机标定,即相机内外方位元素、图像畸变参数的求解,相机标定的精度直接关系到三维重建、几何量测的精度.目前,相机标定技术主要分为传统标定方法,主动标定方法以及自标定方法三类.传统标定方法需使用标定参照物,通过物点和像点之间的对应关系建立相机模型参数约束,并采用优化算法来取相机参数,该方法标定精度高,但是算法较复杂.主动标定方法则通过已知摄像机的运动信息,线性求解摄像机模型参数,算法的稳健性较好,但是对运动形式约束较多,标定方法难以实用.与前两者不同,自标定方法利用相机内参数自身存在的约束,构建二维图像与三维空间物体本身的内在射影几何关系确定相机参数.而这些约束仅与相机本身有关,与相机的运动和具体景物结构无关,因此该算法不需要标定物,方法比较灵活,但是对噪声比较敏感,鲁棒性差,主要应用在精度要求不高的应用中.总体上,基于两(多)幅图像相机标定理论与方法已较为成熟,三维重建的效果较好,量测精度也较高.近年来研究重点主要集中于已有算法改进、提高算法鲁棒性等方面.表 2 对目前典型的相机标定方法进行分类,并对其特点进行总结.

表 2 相机标定方法的分类与特点

Table 2 Classification and characteristics of the camera calibration methods

分类	条件	方法及基本原理	特点
传统 标定 方法	精密加工 的标定块、平面 标定板	线性法 采用相机线性模型构建物点与像点之间线性方程组,并通过线性方法求取投影矩阵,进而分解出内外参数 ^[10,11] 。	未考虑相机畸变,精度较低。
		非线性法 在线性成像模型的基础上,考虑相机镜头的非线性畸变,通过非线性校正后得到相机的非线性成像模型,并通过非线性优化的方法求取摄像机的内外参数 ^[12,13] 。	考虑镜头畸变,精度高,但标定过程复杂。
		两步法 利用线性标定法求解相机内外参数,然后以该参数作为初始值,并考虑影响相机成像的非线性因素,进行内外参数非线性优化 ^[14,15] 。	考虑畸变因素,方法简单,算法精度高,但是对设备要求高。
		平面模板法 利用点阵、矩形、圆形等平面模板,通过图像匹配计算视频和模板间的单应矩阵,利用单应矩阵线性求解相机内参数 ^[16-18] 。	可求解镜头畸变因子,算法复杂。
主动 标定 方法	需精密仪器控制相机运动	控制摄像机作纯平移、纯旋转等特殊运动,根据拍摄视频间匹配信息,通过已知相机的运动信息,采用线性方法标定出摄像机的内参数和摄像机坐标系与平台坐标系之间的旋转矩阵和平移向量 ^[19-21] 。	算法简单,鲁棒性好,不适用于相机运动未知场合。
自标 定方法	无	Kruppa 方程 利用绝对二次曲线的像与相机的内参有关,而与相机刚体运动无关的性质,通过绝对二次曲线的对极关系建立相机内参的约束 kruppa 方程,联立多个方程求解内参 ^[22,23] 。	不需标定物,方法比较灵活,但计算过程复杂,鲁棒性差,多应用在精度要求不高的场合。
		分层重建法 首先对视频序列进行射影重构,然后确定出无穷远面和绝对二次曲线(或其对偶),从而确定矫正单应,把射影重构矫正到度量重构 ^[24-26] 。	
		二次曲面法 与 Kruppa 方程法本质一致,都是利用绝对二次曲线欧式变换的不变性,但其采用绝对二次曲线的对偶绝对二次曲面的投影方程建立约束方程求解内参数 ^[27,28] 。	

1.2.2 基于单幅图像解析

与基于两(多)幅图像解析相比,单幅图像解析使用的数据源更广,可以是历史照片、普通相机获取照片、视频截图等,且无需图像匹配、事先了解相机内参,从而使得图像解析过程更加方便、简单和普适,因此,单幅图像解析受到众多学者的关注,已成为摄影测量、计算机视觉等领域的重要研究趋势之一。

传统的单幅图像解析方法主要利用图像明暗、纹理、散焦等线索,由于此类方法对景物形状、反射属性以及曝光程度等有严格的限制,因此不利于应用推广。目前,单幅图像解析主要以图像本身所负载的几何信息为线索,以图像与现实空间之间的成像关系为纽带,实现空间对象的几何量测与三维重建。其关键同样是相机的标定问题,不同于传统的自标定方法,其没有像对之间的约束,而是利用物体在透视投影的作用下的不变性质来对内参数给出约束。Caprile 等假定相机畸变因子为零且具有单位纵横比,利用 3 个垂直方向的灭点,确定相机主点和焦距^[29];张祖勋等通过分析灭点弱标定影响因素,建立了视频直线段与方位元素的直接联系,根据最小二乘平差原理,给出了迭代计算视频内、外方位元素的方法^[30];魏锋等从圆柱体提取两组相互垂直的平行线,计算这两组平行线的灭点,然后根据透视投影理论中灭点的几何性质,计算出相机的内、外参数^[31];Tsai 提出在已知主点坐标的情况下,由一幅平面标定模板的图像求解摄像机焦距及其外部参数^[32];Chen 等利用包含多个圆形的平面通过最大似然估计实现三参数模型相机的标定^[33]。总体上看,单幅图像的相机标定研究主要集中于基于图像中直线、矩形、圆等几何特征,通过灭点、灭线或者基于平面模板的方式实现相机标定。在相机标定的基础上,结合目标的几何形状测量或计算目标高度来估计目标深度;并利用几何先验或透视投影、贝叶斯模型等实现单幅图像的三维重建。对于单幅图像量测,主要分为基于单应的直接量测方法和基于不变量的间接方法。基于单应的直接量测按其空间维度,有 2D 单应和 3D 单应之分,2D 单应如 Criminisi 等提出的基于点、线或两者混合的(归一化)直接线性变换方法^[34],3D 单应如王光辉等提出的 2D 单应+平行线计算模式^[35];基于不变量的间接量测主要是运用交比这一仿射变换不变量,如 Criminisi、张祖勋等运用交比计算共用端点的线段长度^[36,37],王美珍等提出的多次运用交比实现任意线段长度的量测等^[38]。单幅图像解析方法突破了“双眼视觉”的束缚,实现了单张影像的三维重建、几何量测,但是其研究主要集中于结构化场景,对于非结构化场景、算法精度、鲁棒性等都有待进一步研究。

1.3 视频数据组织与检索方法

目前,对于视频数据的检索研究主要以基于内容或语义为主,通常通过抽取视频的颜色、纹理、形状及

运动等特征与语义,构造视频检索模型,基于特征相似匹配实现视频的检索.对于上述空间化的视频,其视频具有空间信息,即图像、视频帧都与其采集设备的当前位置相对应,使得实现基于位置视频检索成为可能. Toyama 等采用规则网格方式对图像集进行组织,通过行列号建立图像的地理索引^[39]; Naaman 等综合考虑地理要素和时间要素,按照“国家—州—城市—乡村”层次方式以及事件方式对图像集进行聚类^[40]; Yekkala 等则利用“人物—事件—地点—语义特征”组织图像集^[41]; Epshtein 等不仅考虑位置参数,还通过摄像方向、可视视野等参数对图像中目标进行评价,并根据图像场景的重要性构建层次模型^[42],以上方式均可实现基于位置的图像检索,但其局限于静态图像.

针对视频, Pongnumkul 等通过构建视频关键帧与地图两者间关联模型,实现基于位置的视频检索播放,此方式只索引部分视频关键帧,因此无法在地图上准确反映拍摄视频真实路径^[43]. Paul Lewis 对 OGC GeoVideo 服务规范定义的二维视域模型 View Cone 进行了扩展,提出了三维视域理论模型 View Point,并以二维 View Point 模型详细设计与实现了空间视频的数据检索^[44]. Wu 等实现了视频、音频及空间信息的实时融合采集形成可定位视频,在此基础上通过路网、行政区等地理实体将视频分割为若干具有地理语义的视频片断,并采用规则格网方式构建固定/移动点视频点状、线状地理索引,实现视频与地图之间的双向检索,其组织检索方法只关注视频采集位置,而对视频帧可视范围缺乏考虑^[45]. Sakire、Kim 等则同时采集了位置信息与方位信息,基于每帧视频拍摄位置、方位以及焦距等参数构建平面、立体的视域模型,并通过该视域模型计算的可视范围,建立视频帧粒度上的地图索引,实现了更精确的视频检索^[46,47]. 韩志刚等采用 UML 表达视频片段、视频帧、视频轨迹、视频帧视域等实体及其相互关系,设计地理立体视频数据模型 (GeoSVDM),基于 MPEG-7 标准设计视频语义描述模式及数据检索方法,实现地理立体视频数据组织和检索^[48]. 目前,基于位置的照片采集设备、检索方法已非常成熟,出现了大量诸如微软 WWMX 项目等应用系统;但是对于空间化的视频,由于获取设备、数据应用的限制,其数据组织检索则更多集中于研究层面上,还未能广泛应用.

2 视频 GIS 应用领域

随着视频空间化理论方法的成熟、完善,许多研究机构和公司推出了视频 GIS 系统并应用于社会各个行业中,其典型应用如下:

2.1 旅游观光

2007 年 Google 公司推出了街景服务,其通过车载采集设备在全球范围内进行室内外全景视频采集,让人们在网络上以平面、立体方式浏览全景图像,直观、全面和便捷了解各个城市.此外,Google 还提供美国大峡谷、澳大利亚大堡礁等旅游胜地实景,让用户足不出户体验虚拟旅游,同时还提供预定房间、旅游线路规划等服务.

2.2 公路、铁路管理

公路、铁路管理是视频 GIS 另一个重要应用领域,其主要应用于道路数据采集、检测管理以及设施管理等方面.例如,武汉立德公司研发的移动道路测量系统,其不仅能快速采集道路基础要素,同时采集了具有地理参考的可量测立体视频序列 (DMI),通过 DMI 可实现任意地物的绝对测量和相对测量,其绝对测量的精度可达 0.5 m,其相对精度可达厘米级^[49](如图 1). 美国 Waylink、澳大利亚 ARRB 以及南京理工大学研发的路面智能检测车,通过采集的高精度图像实现公路平整度、路面裂缝、破损等自动检测.孔云峰等通过将地理位置、里程、视频时间或帧数据进行集成,实现了公路沿线断面、信号、路基、接触网等信息的管理^[50].

2.3 数字城市

近年来,图像获取手段的丰富、分辨率的提升,通过航空视频和近景图像快速重建成为城市建筑物三维信息获取的重要手段. Arm Gruen 等利用低空飞行器搭载三线阵相机等设备获取地面图像序列,通过后期视频三维重建实现三维场景快速获取^[51](如图 2). 在近景图像重建方面,许多公司和研究机构也相继推出了各自的图像三维重建系统. 如 Berkeley 大学的 Debevoise 等完成的著名的建筑物重建系统 Façade^[52],美国肯塔基州立大学的 David Nister 开发的基于未标定视频序列的自动稠密重构系统^[53]以及 Noah Snavely 基于 Internet 网络中无序图片序列实现目标三维重建 Photo Tourism^[54]系统(如图 3)等.



图 1 道路移动测量系统与可量测立体视频序列

Fig.1 Mobile mapping system and digital measurable image



图 2 三线阵扫描系统及三维城市模型

Fig.2 TLS system and 3D city model



图 3 Photo Tourism 三维重建系统

Fig.3 Photo tourism 3D reconstruction system

3 总结

视频与空间信息的结合,使得传统多媒体地理信息系统在数据采集、表达方法与应用方面发生了深刻的变革.在数据采集方面呈多样化、集成化、智能化趋势,从传统的图片、视频为主转变为地理视频、立体视频、可定位照片、全景图片以及可量测实景视频等;在表达方法方面,视频从单纯的供用户观看,逐步转向支持可检索、可交互、可量测、可分析以及增强现实等方面,提升了多媒体数据在 GIS 中的应用价值,丰富了地理表达方法;在应用领域方面,从专业应用领域转变为大众化应用,其应用更加贴近大众生活,丰富 GIS 的应用领域的同时,进一步推动地理信息科学的社会化进程.随着视频数据空间化方法与理论日益丰富、完善,以影像为基础的地理信息系统将成为地理信息系统今后的发展方向,同时其在各个行业领域将发挥更为重要的作用.

[参考文献]

- [1] 尹君,李萌. GPS 数据在图像传输中的应用[J]. 航天制造技术,2008(2):49-50.
- [2] 唐冰,周美玉. 基于视频图像的既有线路地理信息系统[J]. 铁路计算机应用,2001,10(11):31-33.
- [3] Berry J K. Capture "Where" and "When" on video-based GIS[J]. Geoworld,2000(9):26-27.
- [4] Hwang T H,Choi K H,Joo I H,et al. MPEG-7 metadata for video-based GIS applications[C]//Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse:IEEE Press,2003:3 641-3 643.
- [5] Joo I H,Hwang T H,Choi K H. Generation of video metadata supporting video-GIS integration[C]//Proceedings of the International Conference on Image Processing. Washington D C:IEEE Press,2004:1 695-1 698.
- [6] 孔云峰. 地理视频数据模型及其应用开发研究[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(5):12-16.
- [7] Lee S Y,Choi K H,Joo I H,et al. Design and implementation of 4S-Van:A mobile mapping system[J]. ETRI Journal,2006,28(3):265-273.
- [8] 李德仁,郭晟,胡庆武. 基于 3S 集成技术的 LD2000 系列移动道路测量系统及其应用[J]. 测绘学报,2008,37(3):272

-276.

- [9] 丰江帆. 视频 GIS 关键技术研究[D]. 南京:南京师范大学地理科学学院,2007.
- [10] Abdel-Aziz Y I, Karara H M. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry[C]//Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 1971: 1-18.
- [11] 冯文灏, 李建松, 闫利. 基于二维直接线性变换的数字相机畸变模型的建立[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2004, 29(3): 254-258.
- [12] Faig W. Calibration of close-range photogrammetry systems: mathematical formulation[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1975, 41(12): 1 479-1 486.
- [13] 王社阳, 强文义, 陈兴林, 等. 基于遗传算法的非线性摄像机标定[J]. 宇航计测技术, 2004, 24(4): 33-38.
- [14] Tasi R Y. An Efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]//Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition. Miami Beach: IEEE Press, 1986: 364-374.
- [15] Weng J, Cohen P, Hemiou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [16] Zhang Z. A Flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1 330-1 334.
- [17] Heikila J. Geometric camera calibration using circular control points[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(10): 1 066-1 077.
- [18] 吴福朝, 王光辉, 胡占义. 由矩形确定摄像机内参数与位置的线性方法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 703-712.
- [19] Ma S D. A Self-calibration technique for active vision system[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 114-120.
- [20] 杨长江, 孙凤梅, 胡占义. 基于二次曲线的纯旋转摄像机自标定[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 310-317.
- [21] 吴福朝, 胡占义. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2002, 25(11): 1 149-1 156.
- [22] Faugeras O, Luong Q, Maybank S. Camera self-calibration: theory and experiments[C]//Proceedings of the Second European Conference on Computer Vision. Santa Margherita Ligure: Springer Press, 1992: 321-334.
- [23] 雷成, 吴福朝, 胡占义. 一种新的基于 Kruppa 方程的摄像机自标定方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(5): 587-597.
- [24] Hartley R. Euclidean reconstruction from uncalibrated views[J]. Applications of Invariance in Computer Vision, 1994, 825: 235-256.
- [25] Pollefeys M, Van Gool L. Self-calibration from the absolute conic on the plane at infinity[C]//Proceedings of Computer Analysis of Images and Patterns. Kiel: Springer Press, 1997: 175-182.
- [26] Triggs B. Auto-calibration and the absolute quadric[C]//Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan: IEEE Press, 1997: 609-614.
- [27] Heyden A, Astrom K. Euclidean reconstruction from image sequences with varying and unknown focal length and principal point[C]//Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan: IEEE Press, 1997: 438-443.
- [28] Pollefeys M, Van Gool L, Oosterlinck A. The modulus constraint: A new constraint for self-calibration[C]//Proceedings of International Conference of Pattern Recognition. Vienna: IEEE Press, 1996: 349-353.
- [29] Caprile B, Torre V. Using vanishing points for camera calibration[J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 4(2): 127-140.
- [30] 张祖勋, 吴军, 张剑清. 建筑场景三维重建中视频方位元素的获取方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2003, 28(3): 265-271.
- [31] 魏峰, 王小林. 采用单幅圆柱体图像的摄像机标定[J]. 工程图学学报, 2009(1): 109-113.
- [32] Tsai Y M, Chang Y L, Chen L G. Block-based vanishing line and vanishing point detection for 3D scene reconstruction[C]//Proceedings of the International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Tottori: IEEE Press, 2006: 586-589.
- [33] Chen Y S, Horace IP, Huang Zhangjin, et al. Full camera calibration from a single view of planar scene[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Visual Computing. Las Vegas: Springer Press, 2008: 815-824.
- [34] Criminisi A, Reid I, Zisserman A. Single view metrology[C]//Proceeding of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra: IEEE Press, 1999: 434-441.
- [35] 王光辉. 基于图像的量测及三维重建研究[D]. 北京:中国科学院自动化研究所, 2004.

- [36] Criminisi A. Accurate Visual Metrology from Single and Multiple Uncalibrated Images[M]. Berlin:Springer Press,2001:77-84.
- [37] 张祖勋. 数字摄影量测与计算机视觉[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2004,29(12):1 035-1 039.
- [38] 王美珍,刘学军,甄艳,卢玥. 基于交比的单幅图像平面几何信息提取算法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(2):190-194.
- [39] Toyama K, Logan R, Roseway A. Geographic location tags on digital images [C]//Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Multimedia. Berkeley:ACM Press,2003:156-166.
- [40] Naaman M, Song Y J, Paepcke A, et al. Automatic organization for digital photographs with geographic coordinates [C]//Proceedings of the 2004 Joint ACM/IEEE Conference on Digital Libraries. Tucson Arizona:IEEE Press,2004:53-62.
- [41] Yekkala A K, Volleberg G T G, Saha S. Automatic organization of digital photographs [C]//Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics. Las Vegas:IEEE Press,2007:1-2.
- [42] Epshtein B, Ofek E, Wexler Y, et al. Hierarchical photo organization using geo-relevance [C]//Proceedings of the 15th Annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems. Seattle:ACM Press,2007:1-7.
- [43] Pongnumkul S, Wang J, Cohen M. Creating map-based storyboards for browsing tour videos [C]//Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. Monterey:ACM Press,2008:13-22.
- [44] Paul Lewis. Linking Spatial Video and GIS [D]. Maynooth: Department of Computer Science & National Centre for Geocomputation, National University of Ireland Maynooth,2009.
- [45] Wu Yong, Liu Xuejun, LIN Guangfa. The locatable video: acquisition, segmentation, retrieval [C]//Proceedings of the 19th International Conference on Geoinformatics. Shanghai:IEEE Press,2011:1-5.
- [46] Sakire Arslan Ay, Roger Zimmermann, Seon Ho Kim. Relevance ranking in georeferenced video search [J]. Multimedia Systems Journal,2010,16(2):105-125.
- [47] Seon Ho Kim, Sakire Arslan Ay, Roger Zimmermann. Design and implementation of geo-tagged video search framework [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation,2010,21(8):773-786.
- [48] 韩志刚. 地理超媒体数据模型及 Web 服务模型研究 [D]. 开封:河南大学环境与规划学院,2011.
- [49] 李德仁,沈欣. 论基于实景视频的城市空间信息服务——以影像城市·武汉为例 [J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(2):127-130.
- [50] 孔云峰. 一个公路视频 GIS 的设计与实现 [J]. 公路,2007,1(1):118-121.
- [51] Armin Gruen, Zhang Li, Xinhua Wang. 3D city modeling with TLS (Three Line Scanner) data [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2003, XXXIV-5/W10:24-27.
- [52] Debevec P E, Taylor C J, Malik J. Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry- and image-based approach [C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New Orleans:ACM Press,1996:11-20.
- [53] Nister D. Automatic dense reconstruction from uncalibrated video sequences [D]. Stockholm:Royal Institute of Technology KTH,2001.
- [54] Noah Snavely, Steven M Seitz, Richard Szeliski. Modeling the world from internet photo collections [J]. International Journal of Computer Vision,2008,80(2):189-210.

[责任编辑:丁 蓉]