

仿射变换虚实配准的空间信息增强表达

武雪玲¹,任 福²,杜清运²

WU Xue-ling¹,REN Fu²,DU Qing-yun²

1.中国地质大学 地球物理与空间信息学院,武汉 430074

2.武汉大学 资源与环境科学学院 教育部地理信息系统重点实验室,武汉 430079

1.Institute of Geophysics & Geomatics,China University of Geosciences,Wuhan 430074,China

2.School of Resources and Environment Science,Wuhan University,Wuhan 430079,China

E-mail:snowforesting@163.com

WU Xue-ling,REN Fu,DU Qing-yun.Spatial information augmented representation using affine transformations registration.Computer Engineering and Applications,2010,46(3):16-19.

Abstract: With the emergence of mobile GIS and wearable computing,operating space of GIS is extended to outdoor.Outdoor augmented reality spatial information representation is committed to enhance and expand user's spatial cognition by overlaying virtual geographic objects on real scene.For the purpose of reducing registration error and avoiding complicated camera calibration,it borrows algorithm from computer vision to set up global affine coordinate system for computing projection coordinates of virtual objects into real scene images.Simultaneously,it brings forward an approach to get pixels relative depth.It provides location-related information sources for outdoor AR and becomes a new interface for spatial information visualization representation.

Key words: outdoor augmented reality;spatial information representation;virtual-real registration;spatial affine transformations

摘 要:伴随着移动 GIS 和可穿戴计算的出现,GIS 作业空间被拓展到户外,户外增强现实空间信息表达致力于将虚拟空间信息叠加到真实地理场景上,增强、拓展用户对地理场景的认知。为了有效地降低空间信息增强表达的虚实配准误差,汲取计算机视觉中的算法思想,提出通过建立全局仿射坐标系,解算虚拟物体到真实场景图像的投影坐标,找到获取像素相对深度参数的方法,进而避开相机定标这个复杂过程,最终为户外增强现实系统提供位置相关的信息源,也为空间信息可视化表达提供了新界面。

关键词: 户外增强现实;空间信息表达;虚实配准;空间仿射变换

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2010.03.005 **文章编号:**1002-8331(2010)03-0016-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**P208

从空间认知的视角来看,模拟地图和二维电子地图作为地理环境的抽象模型,在形象逼真地表达空间信息方面,存在一定的局限性。从人机界面的视角来看,目前流行的 3D GIS 呈现给用户一个可视化的三维虚拟世界,但绝大多数的人机交互限于平面显示器,很难让用户融入其中(孙敏,2004),户外增强现实(Augmented Reality,AR)为解决该问题提供了一种新的思路。户外 AR 空间信息表达致力于将虚拟空间信息叠加到真实地理场景上,增强、拓展用户对地理场景的认知。将 AR 应用到户外地理数据可视化的研究才刚刚开始,很多应用都集中在如何有效地为户外工作者提供辅助信息的研究上(Holweg,2006)。论文汲取计算机视觉中的空间仿射变换思想,解算虚拟物体到真实场景图像的投影坐标,避开复杂的相机定标过程。最后对基于空间仿射变换虚实配准的户外 AR 空间信息表达进行了验证性实践和分析。

1 空间仿射变换技术的引入

1.1 混合虚实配准方法分析

AR 的产生得益于计算机图形学的迅速发展,是在 VR 技术发展的基础上提出的一项崭新技术。将 AR 应用领域从室内拓展到户外,与空间信息可视化表达相结合,形成对空间信息的户外 AR 可视化表达,使用户从被动获取空间知识到直接可视化地观察相关空间信息并与之交互。Hedley 等人提出 AR 可以作为 GIS 的新界面(Hedley,2002)。户外 AR 系统的最终目标是将虚实信息合为一体,并通过软、硬件系统的协调作用,使用户可以更加自然地与虚拟信息进行交互,偏重于用户在真实世界环境中的沉浸感。AR 最显著的特点有三个:虚实融合、实时交互、虚实配准(注册)(Uenohara,1995;Azuma,2001)。其中,虚实配准是保证户外 AR 空间信息表达准确性的关键技术。户外 AR 要实时检测出回路中观察者或相机相对于真实地理场

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.40801154/D0107);测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费资助。

作者简介:武雪玲(1978-),女,博士,讲师,主要从事 GIS 理论与方法的教学与科研工作;任福(1976-),男,博士,副教授,主要从事 GIS 设计与开发、在线动态地图表达、空间信息建模等方面的教学与科研工作;杜清运(1965-),男,博士,教授,博导,主要从事电子地图及地理信息科学理论与方法的教学与科研工作。

收稿日期:2009-08-17 **修回日期:**2009-11-12

景的位置、姿态和视域,以及相机的内部参数,然后依据这些信息计算所要添加的虚拟信息(图形或图像及属性)在真实地理场景坐标系中的映射位置,并显示到真实场景图像的正确位置。虚实信息配准的误差体现在需要融合的虚、实两个视觉通道视觉匹配上的不一致,人类视觉系统对差异的高敏感性及人眼的高分辨率使得即便是像素级别的不一致都会使用户感到虚实融合的不匹配。因此,如何提高户外AR虚实配准的准确性一直被当作研究重点和难点(Azuma,1999)。

目前,基于计算机视觉标志点和基于混合跟踪设备的配准方法已经引起广泛关注。大多数AR应用系统是从虚实配准问题的自然属性出发,用一种直接的方式解决AR中虚实信息的配准问题,关键是要明确几个空间坐标系及其转换关系。实现过程主要包括以下几个步骤,见图1:测量定位(虚拟物体到真实地理场景的转换关系A)、位置跟踪(真实场景到相机坐标转换关系B)、相机标定(三维真实场景到二维成像平面转换关系P和U)。

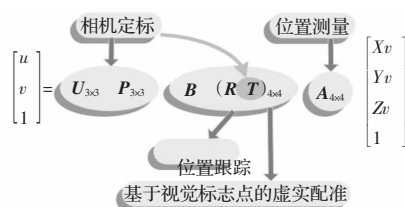


图1 基于空间坐标转换关系的虚实配准方法

目前,室内和户外AR应用大多都采用图1所示的基于空间坐标转换关系的虚实配准方法。常勇等人讨论了基于AR的空间信息三维可视化及空间分析(常勇,2007),杜清运等人探讨了户外AR技术与移动GIS相结合的模式,设计了户外ARGIS的总体框架(杜清运,2007)。该类方法误差累积,位置测量、位置跟踪和相机标定过程本身就极易产生误差,都将直接导致虚实配准错误的发生,系统运行时间越长,误差累积就越大,并有可能直接导致配准的失败。从自身实现原理出发,上述的虚实配准方法存在其必然的局限性。就精确度而言,目前常用的位置传感器(包括GPS和三维电子罗盘、机械式传感器、磁力传感器等)都不能完全满足户外AR应用的要求,都存在一定的不足(Piekarski,2004)。Durlach等人得出结论:就目前的技术水平而言,由于传感器等硬件系统本身固有的误差和延迟特性,基于位置跟踪和相机标定的方法不可能很好地解决户外AR应用中的虚实信息配准问题(Durlach,1995)。

基于视觉标志点和基于混合跟踪设备的配准方法从问题的本质出发,都是通过空间坐标转换关系的计算解决空间信息虚实配准问题,计算繁琐且极易发生错误。忽略了一些可能的解决途径,其中很重要的一个解决方法就是对计算机图形学和计算机视觉技术的利用。

1.2 引入空间仿射变换技术的理论基础

近年来,随着计算机图形学和计算机视觉技术的迅速发展,其中许多技术和方法可用于AR应用中虚实信息配准问题的解决(Vallino 1998)。保证虚拟地理目标信息和真实地理场景视频图像正确配准的关键是将虚拟目标上的点准确地投影到真实地理场景的视频图像上。即在齐次坐标表示下,3D空间中虚拟物体上的某一个点与其在真实场景像素坐标上的对应投影点之间的转换关系。该求解过程Koenderink、van Doorn(1991)和Ullman、Basri(1991)提出这样一个观点:如果已知三维空间点集中的4个或4个以上的非共面点,那么该三维空间

点集合中的任意一个点的投影变换都可以用这4个点的投影变换结果的一个线性组合来表示。受这个观点启发,设想是否可以通过将虚拟空间坐标系、相机坐标系和真实地理场景坐标系进行组合,建立一个非欧几里德坐标的全局仿射坐标系,通过将真实地理场景、相机和虚拟物体定义在同一个坐标系下,避开不同坐标系之间的转换矩阵求解问题,从而使得虚实信息配准问题的解决不再依赖于相机内、外部参数的标定和真实地理场景中用户视野范围内地理目标的跟踪定位。引入仿射变换技术实现虚实信息配准有两个特点:(1)与基于计算机视觉标志点的配准方法相比,仿射变换法无需借助场景中人为添加的特殊标志点即可正常工作,具有更高的实用性;(2)三维空间中的任意4个非共面点可以用来定义全局坐标系的坐标原点和坐标轴。

2 基于空间仿射变换的虚实配准

2.1 仿射相机逼近

在全局仿射坐标系中,图1所示的计算过程可以用式(1)表示, $(u, v, h)^T$ 表示虚拟地理目标上的点在二维图像上的像素坐标, $(X_f, Y_f, Z_f, W_f)^T$ 代替1的 $(X_v, Y_v, Z_v, h)^T$, $(X_f, Y_f, Z_f, W_f)^T$ 表示全局仿射坐标系下虚拟物体上点的坐标。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ h \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{3 \times 4} \begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ W_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

为了充分利用Koenderink、van Doorn(1991)和Ullman、Basri(1991)提出的简化方法和观点,采用弱透视投影模型建立相机坐标到图像平面的转换关系P。基于弱透视逼近,三维空间中任意点到像平面的投影关系由第一次沿平行光线正交于像平面投影的点决定。这种逼近方法在计算机视觉领域是十分常见的,与用户到三维空间目标之间的观察距离相比,用户视觉方向观察到的三维空间目标之间的前后深度关系是比较小的;同时,与相机镜头的焦距相比,三维空间目标到相机的距离是比较大的。

2.2 仿射真实场景中的地理目标

三维空间中所有的点都可以用基于仿射变换的全局仿射坐标表示,该全局仿射坐标系由像平面中基准特征点的位置决定。当对所有的特征点都进行平移、旋转、非均匀缩放等仿射变换时,这种仿射表达关系是恒定的。弱透视相机观察真实地理场景时,运动过程中引起的变换保证了仿射恒定表达关系,这种仿射投影或变换被用于计算虚拟地理目标到真实地理场景视频图像的投影变换。

全局仿射坐标系由坐标原点和3个坐标轴确定,增强场景中虚拟物体上的每一个点都由各自固定的仿射坐标表示。定义全局坐标系原点和坐标轴的4个点可以是三维空间中任意4个非共面的点,在实际应用中,通常人工添加特征点以便于计算机图像特征点的提取。如图2所示, $p_i (i=0, 1, 2, 3)$ 为经过全局仿射坐标系下某一变换 $\mathbf{P}_{3 \times 4}$ 后,4个基准特征点在二维投影图像上对应的坐标, p_x 为全局仿射坐标系中任意一点经过 $\mathbf{P}_{3 \times 4}$ 变换后在二维投影图像上的投影点, $(X_f, Y_f, Z_f, 1)^T$ 是 p_x 的全局仿射坐标。对于全局仿射坐标系中的某一变换 $\mathbf{P}_{3 \times 4}$,由图像分析已经确定4个基准特征点在二维投影平面上的坐标 $(u_i, v_i)^T (i=0, 1, 2, 3)$ 后,则三维空间中任意一点 $p_x (X_f, Y_f, Z_f, 1)^T$

到二维投影图像上的投影坐标 $(u_p, v_p)^T$ 可以解算得到。

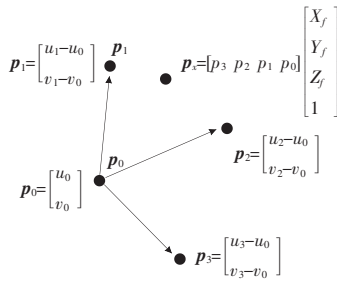


图2 全局仿射坐标系中点坐标表示

2.3 仿射投影变换及投影矩阵

仿射投影性质: 三维空间中任意一点 p 在二维投影图像中的投影坐标为 $(u_p, v_p)^T$, p 点的全局仿射坐标为 $(X_f, Y_f, Z_f)^T$, 则有如下方程表达式(2), 其中 $(u_i, v_i)^T (i=0, 1, 2, 3)$ 表示定义全局仿射坐标系的坐标原点 P_0 和其他三个基准特征点 P_1, P_2, P_3 在二维投影图像上的投影坐标。

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1-u_0 & u_2-u_0 & u_3-u_0 \\ v_1-v_0 & v_2-v_0 & v_3-v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)的等价齐次坐标表达方程为式(3), 明确给出了投影矩阵 $\mathbf{II}_{3 \times 4}$ 的定义。

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1-u_0 & u_2-u_0 & u_3-u_0 & u_0 \\ v_1-v_0 & v_2-v_0 & v_3-v_0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

真实地理场景中的任意一个点到二维投影图像的投影坐标都可以用真实地理场景图像中其他仿射基准特征点投影坐标的一个线性组合来表示, 那么, 虚拟地理目标上任意一个点到二维投影图像上的投影坐标求解问题可以转化为二维投影图像中仿射基准特征点的定位求解和虚拟地理目标上点的齐次仿射坐标的求解问题。由于基准特征点通常易于被计算机识别的特征点标识, 大大降低了计算的难度。通过视觉跟踪真实场景中的特征点确定仿射基准点, 并根据这些仿射基准点确定每个新视频图像的投影关系。

要得到三维空间中任意一点 P 的二维投影图像坐标, 前提是已知其全局仿射坐标。为了求解三维空间中任意一点的全局仿射坐标, 可以采用类似于双目立体视觉的方法, 不需要受光轴平行等限制, 也不需要已知相机的焦距和立体视觉基线的长度, 只需要从任意不同的角度获取真实场景的两个二维投影图像, 再分别确定出4个基准点以及点 P 在两个投影平面图像上的对应坐标, 下面通过仿射重建性质解算任意三维特征点的全局仿射坐标。

仿射重建性质: 假设已知三维空间中的任意一个点和4个仿射基准特征点在2个或2个以上投影像平面图像中的投影坐标, 则该点的仿射坐标 $(X_f, Y_f, Z_f)^T$ 可以通过方程(4)求得。如果真实地理场景的两个投影平面视图 I_1 和 I_2 、仿射基准特征点 $p_i (i=0, 1, \dots, 3)$ 和 P 在视图 I_1 和视图 I_2 中的二维投影图像像素坐标已知, 则 P 点的仿射坐标 $(X_f, Y_f, Z_f)^T$ 可以通过式(4)求得, 其中 $(u_i^j, v_i^j)^T (i=0, 1, 2, 3, j=1, 2)$ 表示仿射基准特征点

在投影平面 $I_i (i=1, 2)$ 中的坐标, $(u_p^j, v_p^j)^T (j=1, 2)$ 表示三维空间中任意点 P 在投影平面 $I_i (i=1, 2)$ 中的像素坐标。

$$\begin{bmatrix} 1 \\ u_p \\ v_p \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ u_1^1-u_0^1 & u_2^1-u_0^1 & u_3^1-u_0^1 & u_0^1 \\ v_1^1-v_0^1 & v_2^1-v_0^1 & v_3^1-v_0^1 & v_0^1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ u_1^2-u_0^2 & u_2^2-u_0^2 & u_3^2-u_0^2 & u_0^2 \\ v_1^2-v_0^2 & v_2^2-v_0^2 & v_3^2-v_0^2 & v_0^2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

户外AR空间信息表达中必须保持增强地理场景中虚实物体之间正确的遮挡关系, 消除虚拟物体模型的隐藏面是保证虚实信息一致性效果的最基本的操作, 不仅需要确定三维空间中任一点在投影平面上的二维坐标, 还需得到每一个投影点的深度信息, 即三维空间点相对于视点的距离, 以便通过计算机图形系统硬件的支持来实现场景中物体隐藏面的自动消隐。隐藏面的消除根据面的前后关系决定是否显示, 前后关系通过视点到每个待渲染点的距离决定。下面的两个性质对“像平面”和“观察方向”两个常见的概念进行延伸, 以解决全局仿射坐标系中投影点深度值的计算问题。仿射像平面和仿射观察方向定义了一个描述相机方位的三维坐标系。

仿射像平面性质: 令 ξ 和 ψ 分别对应矩阵 $\mathbf{II}_{2 \times 3}$ 的第一行和第二行的齐次向量: (1) 向量 ξ 和 ψ 分别表示仿射基准点组成的仿射坐标系下相机的行和列方向; (2) 相机的仿射像平面由向量 ξ 和 ψ 构成。在弱透视投影模型中, 三维空间中任意点到图像上对应投影像素的方向定义了相机的观察方向。在仿射投影中, 该方向数学表达为矩阵 $\mathbf{II}_{2 \times 3}$ 的零空间。

仿射观察方向性质: 在基于仿射基准点的坐标系中, 相机观察方向 ω 为 ξ 和 ψ 的叉乘: $\omega = \xi \times \psi$, 见式(6)。该性质保证了定义任意点 P 按照方程(2)投影到同一像素的视线方向的点集。沿仿射观察方向, 对应于同一像素点的虚拟物体上待渲染点之间的前后关系能够正确保持, 用于消除隐藏面的每个点的深度值等于点乘:

$$[\omega^T \ 0] \cdot P^T \quad (5)$$

$$\omega = \begin{bmatrix} u_1-u_0 \\ u_2-u_0 \\ u_3-u_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_1-v_0 \\ v_2-v_0 \\ v_3-v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_2-u_0)(v_3-v_0) - (u_3-u_0)(v_2-v_0) \\ (u_3-u_0)(v_1-v_0) - (u_1-u_0)(v_3-v_0) \\ (u_1-u_0)(v_2-v_0) - (u_2-u_0)(v_1-v_0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

仿射像平面性质和仿射观察方向性质描述的仿射像平面和观察方向向量定义了一个三维坐标系, 该坐标系不是欧几里德三维空间中的正交参考坐标系。尽管如此, 近似得到的相对距离值 d 可以正确反映增强场景中虚拟物体上点的深度。

2.4 空间仿射变换技术实现虚实配准的过程

仿射变换空间信息虚实配准的过程包括: (1) 从二维投影图像中任意提取4个非共面的仿射基准特征点建立全局仿射坐标系; (2) 对真实地理场景从两个角度 $I_i (i=1, 2)$ 采集视频图像, 得到两组4个仿射基准特征点和虚拟地理目标上的任意一点 P 的二维投影图像坐标, 根据方程式(4), 解算得到 P 点的全局仿射坐标 $(X_f, Y_f, Z_f, 1)^T$; (3) 已知点 P 的全局仿射坐标, 根据方程式(3), 解算得到该点在真实地理场景任意一个二维投影图像的像平面坐标上的像素坐标; (4) 虚拟地理目标到二维投影图像的投影完成后, 根据方程式(5)处理隐藏面的消除问题。只有定义了坐标原点和3个坐标轴后, 全局仿射坐标才可以被唯一确定, 所以, 真实地理场景中用来定义坐标原点和坐标轴的4个仿射基准特征点的提取成为关键, 并且需要实时对

场景中的基准点进行定位,然后才能用这些基准点的定位信息实现虚实信息配准。

3 户外增强现实空间信息表达

3.1 实例设计与实现

对真实场景地理目标武汉大学信息学部水电科办公楼,从任意不同的2个角度采集2D投影图像,提取19个同名特征点:4个基准特征点A、B、C、D用于建立全局仿射坐标系,用6个虚拟物体标定点P、E、F、F1、F2、F3配准虚拟图形及属性信息,其他特征点F2...F12用来估算误差与距离关系。场景图像如图3(a)和(b)所示,每个角度拍摄的真实场景2D投影图像都包含四个构成全局仿射坐标的基准特征点A、B、C、D,图像分辨率为3 648x2 736,图像宽度为30.89 cm,高度为23.16 cm。



图3 (a)角度1获取的2D投影图像



图3 (b)角度2获取的2D投影图像

将场景的2D投影图像(a)和(b)中的4个基准特征点A、B、C、D的像素坐标带入式(4),得P点在全局仿射坐标系中的坐标: $[X_f \ Y_f \ Z_f]^T = [-0.17 \ 0.08 \ 0.11]^T$,将解算得到的 $[X_f \ Y_f \ Z_f]^T$ 代入式(3),得: $[u_p \ v_p]^T = [1 \ 936 \ 461]^T$ 。同理得: $[u_E \ v_E]^T = [2 \ 088 \ 1 \ 419]^T$, $[u_F \ v_F]^T = [2 \ 354 \ 1 \ 729]^T$ 。误差分别为: $[\Delta u_p \ \Delta v_p]^T = [-5.8 \ 2.8]^T$, $[\Delta u_E \ \Delta v_E]^T = [0.75 \ 1]^T$, $[\Delta u_F \ \Delta v_F]^T = [15.8 \ 4.2]^T$ 中误差 $m_u = \pm \sqrt{\frac{\Delta u_p^2 + \Delta u_E^2 + \Delta u_F^2}{3}} = \pm 9.7$, $m_v = \pm \sqrt{\frac{\Delta v_p^2 + \Delta v_E^2 + \Delta v_F^2}{3}} = \pm 2.98$ 。

依图像的分辨率和实际尺寸,像素的宽度和高度均为:0.008 47 cm,则±15.8的像素误差的实际尺寸误差为:±0.134 cm,基本能够满足户外配准精度的需要。

A B C D四个基准特征点在2D投影图像上的坐标确定了一个3D平面flat,具体解算见式(6)。

$$\text{联立:} \begin{bmatrix} u \\ v \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - u_0 & u_2 - u_0 & u_3 - u_0 & u_0 \\ v_1 - v_0 & v_2 - v_0 & v_3 - v_0 & v_0 \\ & & \omega^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ 1 \end{bmatrix}$$

得到特征点E、F、P的深度参数,单位是像素,则E、F、P的相对深度距离为:

$$\text{像素深度} \begin{cases} dP=502 \ 059 \\ dE=207 \ 929 \\ dF=2 \ 118 \ 683 \end{cases} \quad \text{近似深度(cm)} \begin{cases} DP=42.5 \\ DE=17.6 \\ DF=179.4 \end{cases}$$

与测量数据相比较,P、E、F三点到平面flat的近似深度距离值可以正确反映户外AR空间信息表达场景中虚拟物体间的深度关系。由图3(a)和(b)两个角度获取真实地理场景的两个2D投影图像,通过A、B、C、D四个基准特征点建立全局仿射坐标系,得到3D空间任意一点,如特征点P、E、F、F1、F2、F3的全局仿射坐标后,将其转换到图4观察角度获取的真实地理

场景图像平面的像素坐标,最后得到如图4所示的特征点P、F处的虚拟属性信息增强和E、F1、F2、F3处的图形信息增强合成显示图像。同理,也可以根据虚拟模型关键点的像素坐标将虚拟模型叠加到真实场景图像上。



图4 虚实信息合成显示

3.2 误差分析

为了准确反映相机相对于虚拟物体的距离与虚实配准精度的关系,加载更多已提取的特征点验证算法,得到3D空间中点F1...F12在图4观察场景2D投影图像中的像素坐标,见表1。

表1 3D空间中点的2D投影坐标

3D空间点号	F1	F2	F3	F4	F5	F6	
像素坐标	U	2 121	2 201	2 173	2 370	2 077	2 145
	V	1 694	1 696	1 433	1 404	1 142	1 177
3D空间点号	F7	F8	F9	F10	F11	F12	
像素坐标	U	2 052	2 046	2 039	2 036	2 030	2 021
	V	1 907	1 798	1 690	1 583	1 476	1 370

特征点F1...F12的近似相对距离为(单位:m):

$$\begin{aligned} DF1=33.9 \quad DF2=21.5 \quad DF3=38.7 \quad DF4=167.1 \quad DF5=12.0 \\ DF6=57.0 \quad DF7=97.9 \quad DF8=88.1 \quad DF9=78.5 \quad DF10=68.5 \\ DF11=58.9 \quad DF12=48.6 \end{aligned}$$

特征点E、F、P、F1...F12在u和v方向的像素误差见表2。

表2 特征点像素误差

特征点号	像素误差		特征点号	像素误差	
	ΔU	ΔV		ΔU	ΔV
E	0.75	1.0	F6	9.0	-8.8
F	15.8	4.2	F7	-0.4	-0.3
P	-5.8	2.8	F8	-1.2	-0.9
F1	10.3	1.5	F9	-2.8	-1.7
F2	4.3	4.8	F10	-1.1	-1.8
F3	8.6	-2.5	F11	-1.8	-2.6
F4	0.0	-6.0	F12	-5.5	-2.8
F5	5.2	-6.0			

特征点的近似深度参数与u、v方向像素误差的关系曲线见图5。图像分辨率为3 648x2 736,宽度为30.89 cm,高度为23.16 cm,相机相对于虚拟地理目标的距离为200米以内,虚实信息配准的误差保持在10个像素范围内,像素的宽度和高度均为:0.008 47 cm,即实际尺寸误差为:±0.085 cm,基本能满足户外AR应用的需要。随着2D投影图像分辨率的提高,呈现的像素误差会增大,但图像特征点提取精度提高,实际尺寸误差降低。随着距离的增大,因获取目标图像特征点精度的下降,配准误差也会增大。