

基于机载视频量测的3维城市建模

吴军^{1,2)} 张祖勋³⁾ 张剑清³⁾

¹⁾(湖南科技大学地球空间信息科学研究所,湘潭 411201)

²⁾(Department of Engineering and Technology, Old Dominion University, Norfolk, Virginia, USA 23529)

³⁾(武汉大学遥感信息工程学院,武汉 430079)

摘要 3维城市模型的快速获取及更新是近十年来计算机视觉及数字摄影测量领域研究的热点。从实用、经济角度出发,提出了集成城市数字地图、LIDAR data以及机载视频序列影像多数据源,基于数字摄影测量理论的半自动获取3维城市模型的解决办法,并在3维导航的数据生产实践中进行了验证,取得较好的生产效率及效果。

关键词 3维城市模型 数字摄影测量 视频量测 序列影像

中图分类号: P231.5 TP751 P237.9 TP753 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)08-1161-10

3D City Modeling Based on Videogrammetry from Helicopter

WU Jun^{1,2)}, ZHANG Zu-xun³⁾, ZHANG Jian-qing³⁾

¹⁾(Geo-spatial Information Institute, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

²⁾(Department of Engineering and Technology, Old Dominion University, Norfolk, Virginia, USA 23529)

³⁾(College of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract Interest in 3D city Modeling and quickly updating have significantly raised in the past years. In this paper, an economically viable solution for city modeling based on strict digital photogrammetric theory is proposed. Two oblique image sequences for buildings' walls and one vertical image sequence for building's roof, acquired by digital video camera on helicopter, coarse 2D vector data of buildings and LIDAR data are used as sources of information. Camera parameters of each image are acquired by automatic aerial triangulation technique for high overlapping image sequence. By matching every space edge of the building to its image line, the building is accurately reconstructed. The visualization of 3D city model is realized based on the reconstructed buildings with fine textures superimposed on DSM and ortho-image. Experimental results in three-dimensional car navigation application show us an attractive future both in efficiency and expression.

Keywords 3D city modeling, digital photogrammetry, video grammetry, image sequence

1 引言

交互式的立体环境为观察、分析与空间位置相关的信息提供了方便、直观地途径,在许多应用领域,如城市旅游、城市规划、建筑景观设计、汽车导航、城市温度、噪声传播等环境研究,人们正密切关注着城市3维表达的技术,环境以及商业应用上的可能性^[1,2]。近十年来,带纹理的3维城市模型(textured 3D city model, T3DCM)的快速获取以及更

新是计算机视觉及数字摄影测量领域的研究热点^[3,4]。

T3DCM通常包括城区地形、街道、植被以及人工建筑物等各种要素和对象。在上述几何对象中,成千上万、各式各样的房屋建筑物无疑是最为重要的模型类型之一,同时也是进一步空间分析和交互操作的重要研究对象。目前,关于房屋建筑物3维模型的快速获取研究工作主要分两大类,即全自动系统^[5,6]和半自动系统^[1,7]。基于航空影像的房屋全自动提取研究尽管取得了很大的进展,但其系统

收稿日期:2004-07-16;改回日期:2005-06-17

第一作者简介:吴军(1973~),男,现于美国 Old Dominion University 从事博士后研究工作。研究领域包括计算机视觉、数字摄影测量与3维城市建模,已在核心期刊上发表论文多篇。E-mail: wujun93161@hotmail.com

仍缺乏足够的实用性^[4],房屋建筑 3 维模型的实际采集过程还是主要依赖于手工方式获取,且量测的模型也比较粗略。与使用 LIDAR (light detection and ranging) 数据相比,基于数字表面模型 (DSM) 的房屋全自动提取系统所需的格网点密度稀疏,但边长精度较差,集成 DSM 和矢量地图数据进行房屋全自动提取则取得了较好的结果^[1]。由于全自动系统在可预见的将来无法满足实际应用的要求^[2],半自动系统获得了广泛地运用。基于少量 CSG 模型的房屋 3 维重建过程是半自动系统常采用的策略^[8],但是大量的人工交互过程降低了单个房屋模型的获取效率,尽量减少人机交互仍然是半自动系统的重要目标。总体上讲,传统摄影测量侧重于点的量测,而不是针对主要由直线特征组成的结构化对象,因此目前的摄影测量系统并不是 3 维城市建模最高效地解决办法,事实上,即使是仅考虑平屋顶类型的房屋建筑,半自动的摄影测量提取系统也离实际应用的要求相差甚远,对于航空影像而言,明显的问题就是房屋垂直墙面纹理的获取。

为了寻找一条工程化的途径以解决 3 维汽车导航中沿街建筑 3 维模型数据的快速获取问题,以直升机在高空使用数码摄像机摄取的高重叠度的序列图像以及低精度的城市矢量数字地图、激光扫描深度数据 LIDAR 作为数据源,通过利用数字摄影测量中自动三角测量的理论获取序列图像的外方位元素,以及直线匹配模板、多片空间前交等技术来获得带纹理的平屋顶房屋几何模型。由于充分利用了序列图像中同名特征点、线的多余观测值,不仅房屋模型得到了修正,并且使几何模型与其影像特征自动对应关系的建立成为可能,从而较好地解决了纹理快速获取这一城市 3 维建模过程中的“瓶颈”问题,汽车导航 3 维数据生产中的具体实践证明了其诱人的效率和效果。

2 数据的准备与要求

平屋顶房屋建筑是本文研究的主要房屋类型。考虑到数据源获取的便捷及经济因素,房屋建筑初始几何模型 (B-Rep) 的建立采用“地图 + 高程”方式进行,即从城市矢量数字地图中获取房屋建筑的平面基底信息,从激光扫描深度数据 LIDAR 中自动得到高度值;纹理数据则从直升机在高空使用数码摄像机摄取的图像中获得。由于矢量地图和

LIDAR 数据几何精度较差,尤其是前者存在着严重的几何变形,图像中的点、线特征信息将对初始的房屋建筑几何模型进行重新修正。综合考虑大范围房屋建筑模型几何以及纹理快速重建的要求,使用已检校 (内方位元素已知) 的数码摄像机获取序列影像数据,并对直升飞机的飞行路线 (如图 1 所示) 及数码摄像机的摄影方式作如下的规定:

(1) 直升机沿道路平行方向飞行,飞行路线包括 3 条,道路正上空及道路两侧。

(2) 位于道路正上空飞行时,摄像机主光轴垂直指向地面,所摄录的影像主要提供建筑屋顶面的纹理信息;位于道路两侧上空飞行时,摄像机主光轴偏离地面铅垂方向约为 45° ,指向沿街的建筑,所摄录的影像主要提供房屋墙面的纹理信息。

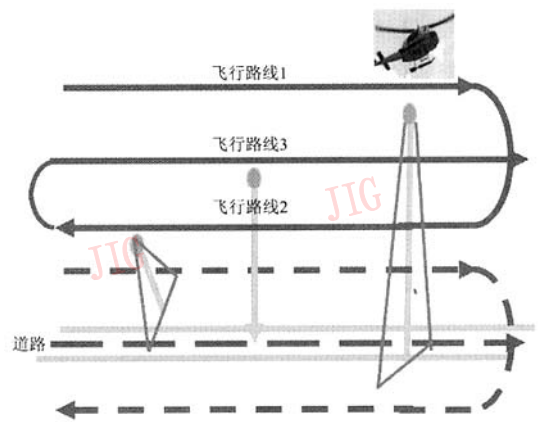


图 1 3 条拍摄序列影像的飞行路线

Fig. 1 The three flying routes for image sequences capturing

以上对直升机飞行路线及数码摄像机摄影方式的要求源于以下问题的考虑:

(1) 数码摄像机摄取的序列图像不仅具有高重叠度,还具有严格的顺序关系,有利于目标建筑相关影像的快速检索;不同航线、不同角度拍摄的影像可为同一房屋提供不同墙面的纹理信息;可利用多度重叠影像中同名特征点、线的多余观测值,对房屋模型进行几何修正,同时提高建筑轮廓线影像配准的自动化程度和质量。

(2) 出于对交通出行及基础设施使用 (供水、供电、供热、通讯等) 的方便,城市建筑大都沿道路进行建造;解算影像外方位元素时,涉及到大量影像特征的同名匹配,为避免过大的透视效果对影像匹配造成困难,要求直升机尽可能沿直线飞行。

根据上述规定的飞行路线进行影像摄录,将产生 3 条航线的序列影像:一条垂直航线的序列影像(称之为水平影像),两条倾斜航线的序列影像(称之为倾斜影像)。由于直接获取的序列影像的重叠度非常高(接近于 99.9%),影像数据量过于冗余,在具体使用时,还必须逐条航线进行抽稀处理(重叠度约为 98%),经过抽稀后的 3 条航线的序列影像才作为实际数据源,进行房屋建筑 3 维重建工作。

3 影像方位元素的解算

影像方位元素的获取是 3 维重建工作的基础步骤,本文所使用的序列影像涉及到 3 条不同航线(一条垂直航线、两条倾斜航线)中数百乃至上千幅影像,序列影像方位元素的获取方式将直接决定整个 T3DCM 获取过程的效率。考虑到主要是获取影像的外方位元素(数码摄像机在使用前已经过检校),运用数字摄影测量中的自动空中三角测量(automatic aerial triangulation,简称 AAT)技术,对 3 条航线的序列影像逐一实施以下两步骤,来快速获取序列影像外方位元素。

(1) 自动相对定向建立单航线序列影像的自由航带网

由于不存在框标信息,传统 AAT 中内定向过程可忽略,像点直接以扫描坐标进行表示。在这一步骤中,如何自动提取分布合理的同名点是进行自动相对定向的关键问题。与传统 AAT 中匹配 6 个标准点位不同,由于序列影像具有更高的重叠度,且城市场景中存在有丰富的特征点(房屋角点、道路标志点),这里匹配过程针对整幅影像进行,以获得大量的同名点特征参与计算影像的相对方位元素,提高计算精度。由于在相对定向前,系统不知道立体像对的相对方位,无法制作核线影像进行一维匹配,采用金字塔分层影像匹配的策略来进行,即将原始影像分解成影像分辨率由低到高的子影像集,相应地形成由粗到细的金字塔影像匹配层次,为了进一步提高匹配效率,采用高精度的点定位算子,如 Forstner 算子提取影像特征点作为目标特征点进行匹配,并将低一级分辨率层的匹配结果作为高一级的分辨率层的匹配初值,在逐渐变小的搜索区内进行更高精度的匹配,这样的匹配结果精度既高,可靠性又强,且使影像匹配的搜索范围大大缩小。在获取大量的同名点特征后,可采用最小二乘法计算相

对方位元素,在平差过程中,每迭代一次就把误差大于某限差的同名点去掉,这样最后剩下匹配精度最好的点参与平差,以提高相对定位元素的解算精度,这里的限差随着迭代次数的增加而减小,一般地最后一次限差不能大于 0.3 个像素。当完成相对方位元素的计算后,所保留下的三度重叠同名点还将作为模型公共点,采用最小二乘法进行模型连接的计算,逐步统一各模型的比例尺和坐标原点,形成如图 2 所示的一个统一的自由航带网。

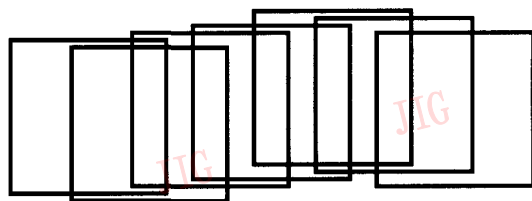


图 2 单航线序列影像的自由航带网

Fig. 2 Free network for single strip

(2) 自由航带网的绝对定向和变形改正

由自动相对定向建立的自由航带网是基于像空间辅助坐标框架,必须将其纳入到物方空间(世界坐标框架),该过程本质上是一个相似变换过程,通过人工输入少量控制点并建立与相应影像点的对应关系,来计算出相似变换参数,获得最终的绝对外方位元素结果。考虑到自动相对定向过程中误差累积传播所造成的自由航带网扭曲变形,引入多项式改正过程,以获得最终的绝对外方位元素结果。由于不存在地面控制点,如图 3 所示将矢量地图数据和 LIDAR 数据套合在一起,对照量测出少量的房屋建筑轮廓角点或道路交叉点作为物方控制点,并同时在序列影像上指定同名像点,如图 4 所示。

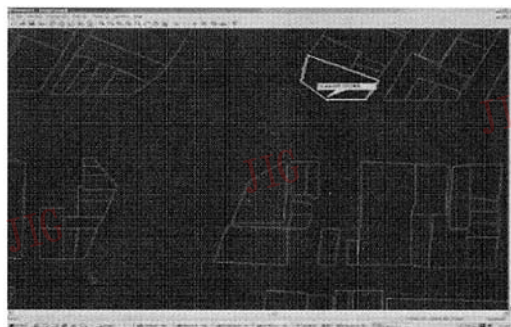


图 3 矢量数据和 LIDAR 数据

Fig. 3 Vector map and LIDAR data

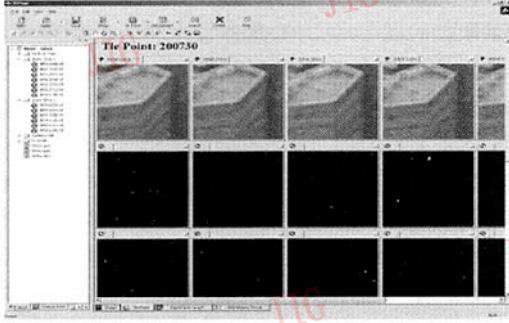


图 4 选择控制点

Fig. 4 Control point selecting

4 建筑真 3 维模型的生成

建筑真 3 维模型的生成包括初始几何模型的建立、目标影像的自动选取、建筑轮廓线影像配准和建筑纹理获取 4 部分。

4.1 初始几何模型的建立

初始的建筑几何模型由建筑的平面位置和高度决定,其获取过程如图 5 所示。首先根据城区数字

矢量地图获取建筑基底的轮廓(封闭的多边形)信息,然后在 LIDAR 数据上自动获得轮廓线上顶点分别作为底面及屋顶面的高程(由于本文假定建筑的底面及屋顶面均为水平面,底面高程和顶面高程分别取该平面上所有轮廓点的高程平均值,即对所有轮廓点,取以其为圆心,半径为 r_0 的圆形邻域内最高高程点的平均高程作为顶面高程,最低高程点的平均高程作为底面高程)。虽然初始建筑几何模型不准确,但经透视变换投影到对应影像上,能提供初始位置、直线长度、方向等先验知识,并在后续的轮廓线影像配准过程中,逐步进行修正,最终获得正确的结果。

4.2 影像注册和几何投影

从序列影像中选出与建筑实体相对应的目标影像(称为影像注册, image registration) 是进行后续几何和纹理重建工作的基础,由于已知每张影像的内、外方位元素,因此通过假定地面高程(取所有建筑底面高程的均值),大致计算出单张影像覆盖的地面范围,再根据地图所提供的建筑的平面位置信息自动选定包含建筑的目标影像,并将初始建筑几何模型投影到选定影像上(如图 6 所示),进行下一阶段的建筑轮廓线影像配准过程。

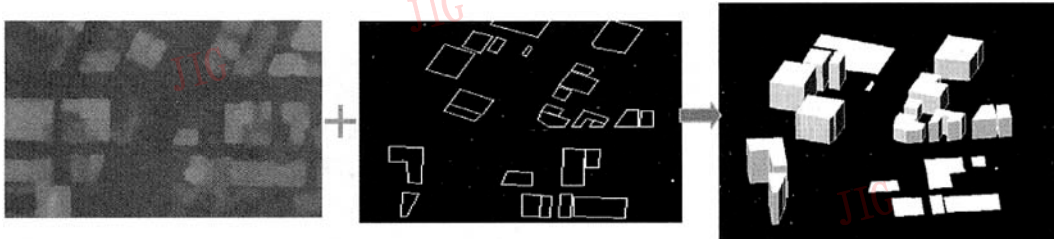


图 5 目标建筑初始几何模型的建立

Fig. 5 Generating initial building geometric model

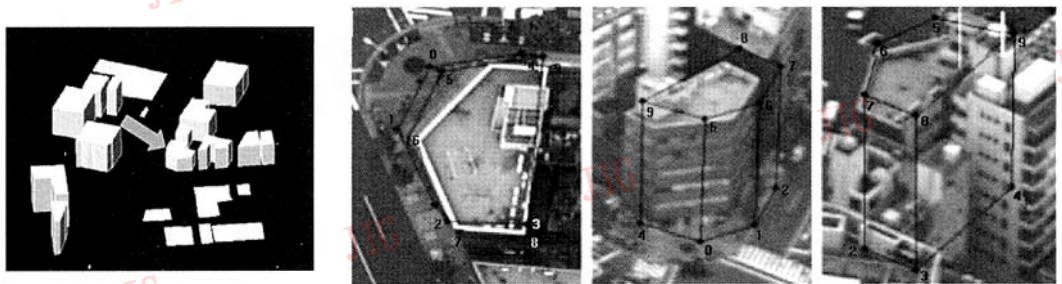


图 6 目标建筑影像注册和几何投影

Fig. 6 Image registration and back-projection for building geometric model

4.3 几何模型重建

房屋实体几何模型重建的实现是通过建筑轮廓线在影像上的迭代配准来实现的,即通过对初始建筑几何模型进行逐步修正,使其在影像上的投影轮廓与实际影像轮廓相一致。显然,这一配准过程的实现不仅意味着建筑几何模型得到了重建,并且由于建筑的几何矢量 B-Rep 模型所描述的实体信息包括几何信息和拓扑信息两方面,因此可通过点、面拓扑关系确定出每个建筑墙面与其纹理影像区域的对应关系,从而为纹理的自动获取提供了可能。本文的建筑轮廓线影像配准过程包括两部分,在水平影像上的屋顶轮廓线配准和在倾斜影像上的墙面轮廓线配准,前者是后者的基础。

4.3.1 屋顶轮廓线水平影像配准

就建筑屋顶面轮廓线而言,其水平影像是从上至下的角度拍摄,受透视变换的影响小,不仅自遮挡的情形较少,而且也能在一定程度上克服周围建筑遮挡的影响;此外,建筑屋顶面都具有一定的高度,尤其是对于比较高大的建筑而言,屋顶面在影像上直线特征的分辨率相对较高,呈现出明显的灰度变化特性,这在一定程度上保证了直线特征提取结果的稳定和质量,有利于目标轮廓线影像直线特征的获取,因此,建筑轮廓线影像配准首先是在水平影像上的屋顶轮廓线配准,是一个如图 7、图 8 所示的迭代过程(重复 2~3 次),以修正建筑的平面形状。

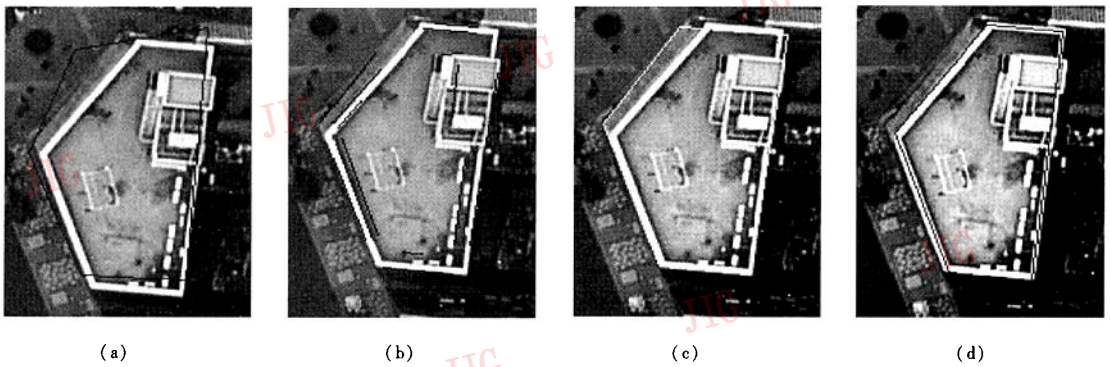


图 7 屋顶轮廓线水平影像配准第 1 次迭代

Fig. 7 The first matching iteration of space edge for building roof

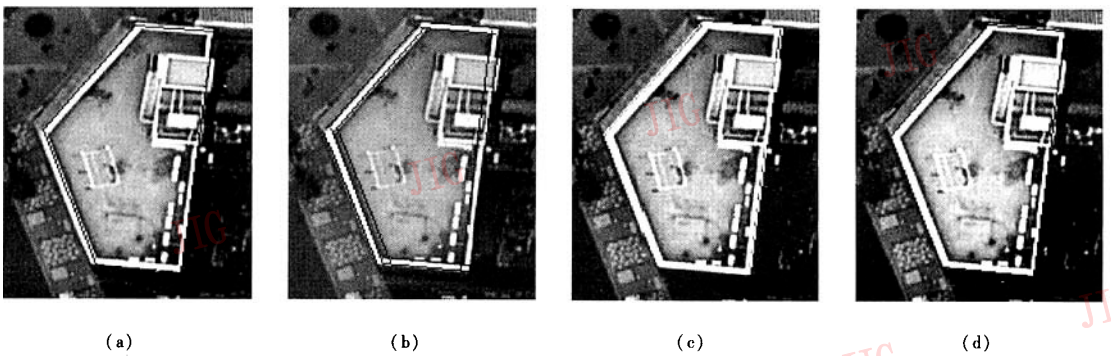


图 8 屋顶轮廓线水平影像配准第 2 次迭代

Fig. 8 The second matching iteration of space edge for building roof

(1) 建立建筑轮廓线的备选影像直线特征集

尽管轮廓线在影像上的初始投影可能偏离实际的位置,但作为一种客观存在,轮廓线所对应的

实际影像直线特征应表现为其局部区域内的主要特征,并在多重影像上表现出一致性,因此,借助于多重影像所提供的冗余影像直线特征信息,可

在某种最优策略下,从可能的备选直线特征集中确定出准确的或者接近于主要的影像直线特征,为此,首先为建筑轮廓线任一空间直线段(其在影像上投影必须可见)建立包含成像直线特征在内的备选影像直线特征集 PILC (possible image line collection),这一过程由直线提取算子对该空间直线段在影像上投影的邻域(以投影线段为中心,间隔为 d 的矩形区域)实施直线提取操作来完成。考虑到投影与实际成像在形状、影像平面位置上的差异,直线提取分“粗”提取和“精”提取两种方式:初始时,可在投影较大的邻域范围($d = 30 \sim 50$)内进行直线“粗”提取(如图 7(a)、(b)),该过程可在影像金字塔上进行,通过边缘检测、边缘跟踪、直线特征拟合^[9]等过程获取较长的、主要的直线特征;在经过 1~2 次迭代配准后,房屋建筑的屋顶几何模型已得到了一定程度的修正,其投影在长度、距离、方向等几何特性上已趋近于实际的影像特征,此时可在投影较小的邻域范围($d = 8 \sim 10$)内利用最小二乘影像匹配^[9~11]进行直线特征的“精”提取(见图 8(a)、(b))。

(2) 直线特征评价确定最佳候选影像直线特征

建筑轮廓线影像配准的目的是由相邻影像直线特征的求交来获取空间点所对应的影像点。由于同一建筑实体对应着多张重叠影像,且实体轮廓线上的任一空间直线在同一张影像上又对应着数目不等的备选直线特征,因此,通过直线特征间简单的排列组合进行求交计算是不现实的,必须建立评判准则,确定出最佳的备选候选直线特征作为目标特征参与求交计算,本文对直线特征的评价通过计算其“可信度”来完成(见图 7、图 8(b)、(c)),即设建筑屋顶面上某一空间直线 L 在影像上的投影为直线段 l_p ,备选直线特征为 $l_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$, LEN_{l_i} 为 l_i

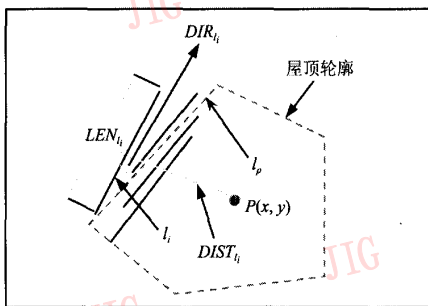


图 9 直线特征评价

Fig. 9 Evaluation for each line in PILC

的长度, DIR_{l_i} 表示 l_i 与 l_p 的夹角(锐角), $DIST_{l_i}$ 表示参考点 $P(x, y)$ (该点为屋顶轮廓线在影像上投影的几何中心)到 l_i 的距离,则选取下列函数计算备选直线特征的“可信度”:

$$F(l_i) = p_1 * \frac{LEN_{l_i}}{\text{MAX}(LEN_{l_i})} + p_2 * \left(1 - \frac{DIR_{l_i}}{\text{MAX}(DIR_{l_i})}\right) + p_3 * \left(1 - \frac{DIST_{l_i}}{\text{MAX}(DIST_{l_i})}\right) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^3 p_j = 1.0 (0 < p_j < 1.0)$$

其中, $\text{MAX}(\ast)$ 表示取备选直线特征中关于 \ast 的最大值。 $p_j (j = 1, 2, 3)$ 表示不同几何特性对“可信度”的贡献率,为经验常数(初始时,轮廓线在影像上的投影偏离实际的位置较远,主要以备选直线特征的长度作为判断准则,贡献率的取值取为 $p_1 = 0.8, p_2 = p_3 = 0.1$;当轮廓线在影像上的投影接近于实际的位置时,则可同时以长度、角度及距离作为判断准则,此时贡献率的取值分别为 $p_1 = 0.4, p_2 = p_3 = 0.3$)。

(3) 空间前交修正建筑屋顶面几何模型

经过对候选直线求交,获得了屋顶空间点在不同影像上的同名像点。由于具有冗余的同名像点信息,并且屋顶各空间点满足同高的限制,可采用附带条件的间接平差模型来进行空间前交,建立如下关于像点的共线方程和空间点间的限制条件方程,对屋顶空间点进行最优估计,从而修正建筑屋顶面几何模型(如图 7、图 8(d)):

$$\begin{cases} x_i - u_0 = -f \frac{a_1(X_i - X_s) + b_1(Y_i - Y_s) + c_1(Z_i - Z_s)}{a_3(X_i - X_s) + b_3(Y_i - Y_s) + c_3(Z_i - Z_s)} \\ y_i - v_0 = -f \frac{a_2(X_i - X_s) + b_2(Y_i - Y_s) + c_2(Z_i - Z_s)}{a_3(X_i - X_s) + b_3(Y_i - Y_s) + c_3(Z_i - Z_s)} \\ Z_{i+1} - Z_i = L_{i,i+1} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, (X_s, Y_s, Z_s) 为摄站中心; $f, (u_0, v_0)$ 为焦距和像主点; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 为旋转矩阵元素; (X_i, Y_i, Z_i) 为建筑屋顶的物方房屋角点; (x_i, y_i) 为建筑屋顶的像方房屋角点。

经过以上 3 步的迭代处理,大多数建筑屋顶面轮廓线在水平影像上都得到配准,但在遮挡严重或几何模型发生较大偏差的情况下,还需少量的人工引导以确保配准正确,此时,可通过人工交互在确保某一单张影像上的屋顶面轮廓线得到配准的情形下,利用序列影像间的同名直线匹配过程来搜索得到所有最佳的配准轮廓线,详细过程参见文献[12]。

4.3.2 墙面轮廓线倾斜影像配准

经过屋顶轮廓线在水平航线影像上的配准过程,房屋墙面轮廓线(铅垂线)的平面位置得到了纠正。将整个房屋模型重新投影到两条倾斜航线影像上,如图 10 所示,重投影结果图 10(b)和(e)较之初始投影结果图 10(a)和(d)有了很大程度上的改

善,但墙面轮廓线还沿铅垂方向存在位移,此时可通过简单的人机交互对房屋上、下底面高程进行调整(当纵向位移较小时,可通过角点匹配来自动完成),使得所有墙面轮廓线在倾斜航线影像上获得完全的配准图 10(c)和(f)。

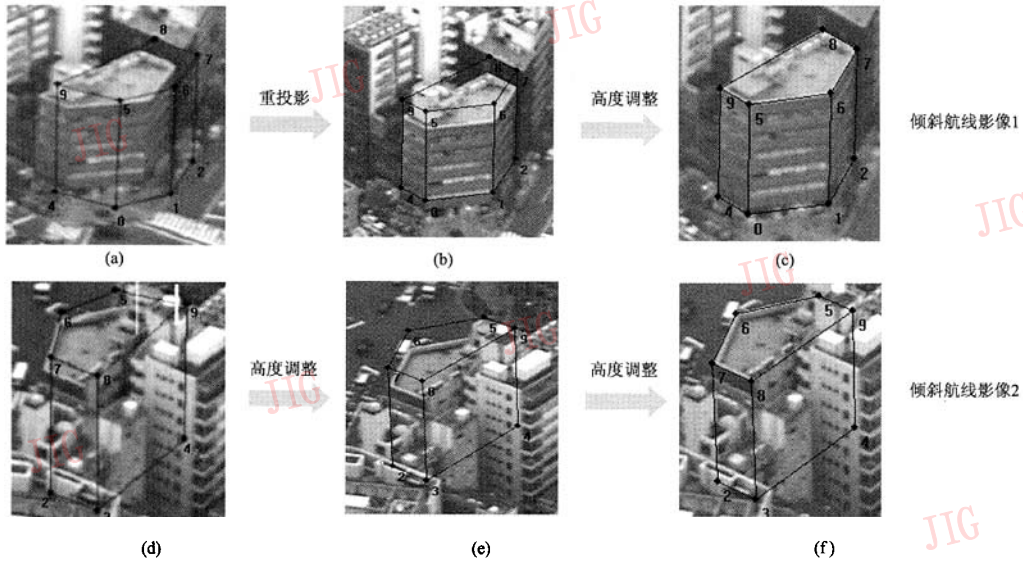


图 10 轮廓线倾斜航线影像配准

Fig. 10 Matching of building space edge in oblique images

4.4 纹理重建

经过轮廓线影像配准后的房屋不仅几何模型得到了重建,而且还建立了房屋建筑各空间墙面与其相应序列影像上纹理区域间的对应关系,但在自动获取纹理之前,还必须考虑如何从相关影像序列中选择最佳影像作为纹理数据源以及在输出墙面(主要是垂直墙面)的纹理数据时,克服由透视变换产

生的纹理扭曲现象。本文通过对纹理影像进行几何纠正和影像互相关计算来解决上述的问题,获得较高的纹理重建质量和效果(如图 11 所示,其中(a),(b),(c)分别为墙面轮廓线在水平影像及两倾斜影像上配准后的结果,(d)是从配准的影像上自动“剪裁”纹理,并进行几何纠正后,“粘贴”到建筑表面得到的真 3 维模型)。

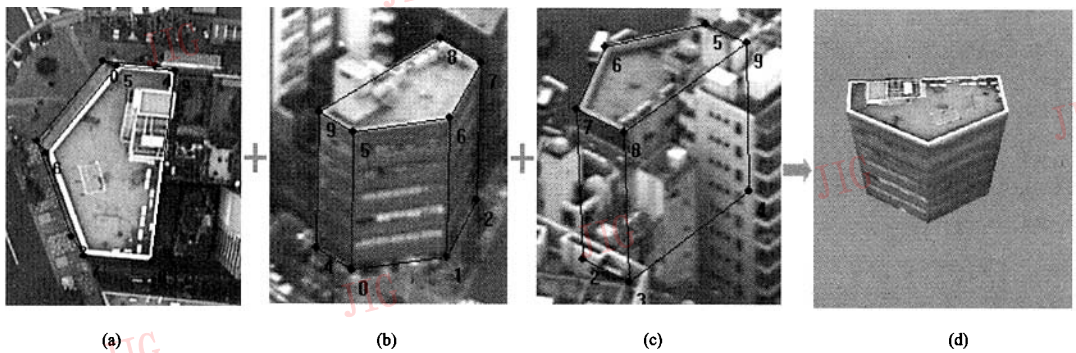


图 11 建筑墙面纹理重建结果

Fig. 11 3D visualization with reconstructed texture

4.4.1 纹理的几何纠正

该问题实质上是数字摄影测量中的数字微分纠正过程,可利用类似于反解法数字微分纠正^[13]的方法予以处理。传统的反解法数字微分纠正是利用正射影像的平面位置信息和 DEM 的高程信息计算出地面点的坐标,经共线方程反算到原始影像上获得影像点。由于所得像点不一定落在像元素中心,通常以灰度内插后的值作为纠正后像元素的灰度值。与传统的反解法不同,进行纹理几何纠正时,空间点信息将不再是地面点,而是房屋矩形墙面上的采样点,为保持墙面纹理合理的大小,将根据影像的地面分辨率(GSD)确定墙面采样点的间隔及墙面纹理影像的大小,具体的几何纠正过程为

$$\begin{aligned} x'' &= F_x(S_{ij}) \\ y'' &= F_y(S_{ij}) \\ x' &= f_{x'}(x'', y'') \\ y' &= f_{y'}(x'', y'') \end{aligned}$$

(1)确定墙面采样点间隔和纠正纹理影像的大小。如图 12 所示,设建筑墙面空间长度为 L ,高度为 H ,沿长度方向采样间隔为 S_L ,沿高度方向采样间隔为 S_H ,纠正纹理影像的长度为 l ,高度为 h ,若 GSD 为 S_0 ,则有:

$$\begin{cases} l = INT(L/S_0) + 1 \\ h = INT(H/S_0) + 1 \\ S_L = L/l \\ S_H = H/h \end{cases} \quad (3)$$

其中, $INT(*)$ 表示取整运算。

(2)按照从下至上,从左往右的顺序,根据确定的采样间隔 S_L 、 S_H 和已知的墙面角点位置信息计算出采样点 S_{ij} 空间坐标,并利用共线方程得到原始序列影像上的相应像点 $P''_{ij}(x'', y'')$

(3)采用双线性内插,求得像点 P 的灰度值 $g(x'', y'')$,将像点 P''_{ij} 的灰度值赋给纠正后像元素 $P'_{ij}(x', y')$ 。

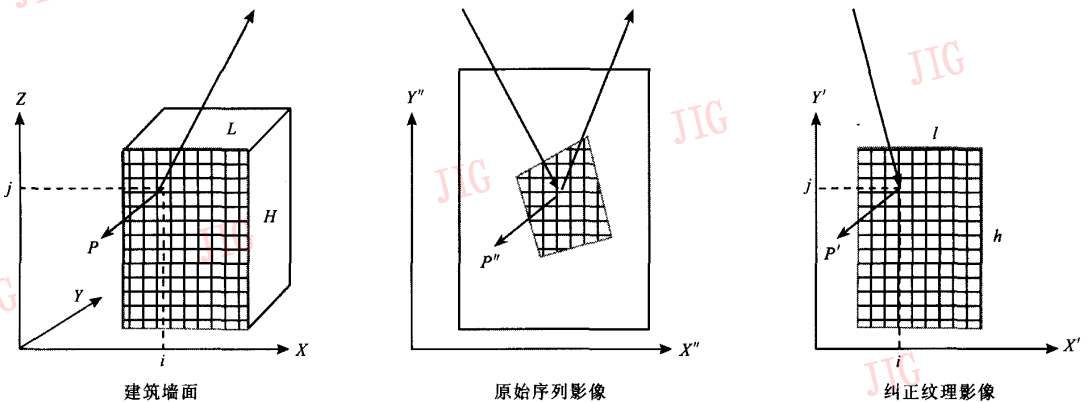


图 12 建筑墙面纹理的几何纠正

Fig. 12 Geometric correctness for texture in wall

4.4.2 基于影像互相关的纹理源影像选优

由于同一墙面在多幅影像上可见,并且可见区域和程度不可避免地会涉及到序列影像的选优问题。这里考虑以下 3 种可能的情形,并以如下的准则作为影像选优的依据,即

(1) 当同一墙面在多幅 (≥ 2) 备选影像中均完全可视(不存在任何遮挡)时,则以相应纹理区域面积最大的影像优先。该准则基于这样一种事实:纹理区域面积越大表明摄像机离墙面越近,则纹理质量越好(清晰);

(2) 当同一墙面在所有备选影像中均存在遮挡时,则应以纹理区域中被遮挡面积最小的影像优先。

(3) 当同一墙面仅在一幅影像中完全可视(不存在任何遮挡)时,则以该影像为最优。

理论上,上述问题可以从纯几何的角度予以解决,即借助于计算机图形学中一些经典的算法,如光线跟踪、画家算法等,对墙面在每幅影像中的遮挡状况进行判定,当存在遮挡时,还可直接计算出遮挡范围的大小。但在实际的场景中,对所有遮挡对象进行几何建模是不现实的,例如树、车等复杂对象的建

模是非常困难的。事实上,即使仅考虑规则的建筑几何模型,对其进行遍历,并做大量的线面、面面求交计算,当房屋建筑增多时,其效率将是非常低下的。因此,这里将考虑另外一种算法,纯粹利用影像的灰度特性来实现影像选优。

当使用移动的摄像机连续摄录序列影像时,由于摄影位置不重复,当有遮挡状况存在时,被遮挡纹理区域的程度和内容是不一样的,对于未被遮挡的纹理区域而言,由于它们对应的是同一建筑墙面,则其内容是一致的,这就意味着,影像中对应纹理区域受遮挡的影响越小,则彼此就越相似。根据这一特性,可利用影像匹配的方法来确定遮挡最小的两幅影像,并选择其中面积最大者作为最终的纹理源影像。具体过程为

(1) 对所有备选影像中的纹理区域进行 4.4.1 节中几何纠正处理,以消除由于透视效果造成的影像灰度分布差异,同时形成同一尺寸大小的纹理区

域,便于进一步的影像匹配计算。

(2) 以纠正后的整体纹理区域作为影像匹配窗口,计算任意两幅纠正纹理影像间的相关系数 ρ ,

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy}}} = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(n \sum xx - \sum x \sum x)(n \sum yy - \sum y \sum y)}} \quad (4)$$

并选取相关系数 ρ 最大的两幅原始影 I_1, I_2 。

(3) 分别计算 I_1, I_2 中对应的原始纹理区域(未纠正)的面积,以面积最大者作为最终的纹理源影像。

5 实验与结论

数据采集区域为日本东京 ginzav 约 1.7 公里长的沿街范围,数据内容如表 1 所示。

表 1 房屋建筑 3 维重建实验数据
Tab.1 Experimental data for T3DCM

影像数据			矢量地图数据	LIDAR 数据
垂直摄影航线	倾斜摄影航线 1	倾斜摄影航线 2		
03185901.tif ~ 03203821.tif, 共计 300 幅	00543920.tif ~ 00533310.tif, 共计 200 幅	00520020.tif ~ 00510720.tif, 共计 160 幅	提供试验区域内的高程信息	提供沿街建筑房屋的平面位置信息

其中,影像数据是利用数码摄像机在飞行高度为 400m 直升飞机上拍摄,垂直摄影航线序列影像像幅大小为 1080 × 1920,倾斜摄影航线序列影像像幅大小为 1920 × 1080(均以像素为单位),经影像抽稀后,垂直摄影航线序列影像重叠度约为 98%,倾斜摄影航线序列影像重叠度约为 90%;矢量地图是由人工粗略测量的,精度较差,比例尺约为 1:500;LIDAR 数据密度为每米 1 个点。

实验区内共有建筑 230 栋,其中因地图矢量数据问题(房屋未在地图上予以标注、平面轮廓严重失真)、房屋在影像上遮挡严重等原因,实际获得建筑 3 维模型 170 栋(如图 13 所示),整个重建时间开销包括系统自动处理(115min)和人工交互处理(480min)两部分时间,即每栋房屋重建所需时间小于 3min,每小时可处理 20 栋房屋。实验结果表明:

(1) 借助自动空中三角测量来获取序列影像的



图 13 重建后的实验区域整体 3 维建筑场景
Fig.13 Full flying view of 3D street scene

外方位元素在效率及效果上均是可行的。

(2) 利用序列影像所提供的冗余特征信息以及数字摄影测量关于空间前交的严密理论和解算策略,极大提高了建筑物几何和纹理重建的自动化程度,尤其是较好解决了纹理快速获取这一城市 3 维建模过程中的“瓶颈”问题。

(3) 基于机载视频量测的城市房屋建筑 3 维建模手段在经济上、效率上具有重要的实际意义。考虑摄影、数据格式转换、自动空中三角测量预处理时间以及不可预见因素,总体上每人每个工作日约至少可处理 80 栋房屋。就中国某一中等城市的重建项目而言,约 6 000 栋房屋,总共约 10 人用了 3 个月的时间,平均每人每个工作日小于 10 栋房屋,若采用本项目半自动的重建方式,效率可提高 8 倍,其经济价值是不言而喻的。

参考文献 (References)

- Brenner C. Interactive modeling tools for 3D building reconstruction [A]. In: Photogrammetric Week '99 [C], Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, 1999: 23 ~ 34.
- Forstner W. 3D-city models; automatic and semiautomatic acquisition methods [A]. In: Photogrammetric Week '99 [C], Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, 1999: 291 ~ 303.
- Brenner C. Towards fully automatic generation of city models [A]. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [C], Amsterdam, Holland, 2000: 85 ~ 92.
- Masafumi N, Ryosuke S. Study on making city model with image and laser range data [A]. In: Proceedings of the 22nd Asian Conference on Remote Sensing [C], Singapore, 2001: 1108 ~ 1112.
- Baillard C, Zisserman A. Automatic reconstruction of piecewise planar models from multiple views [A]. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Fort Collins, Colorado, USA, 1999: 559 ~ 565.
- Henricsson O, Baltasvias E. 3D building reconstruction with ARUBA: a qualitative and quantitative evaluation [A]. In: Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images II [C], Birkhauser Verlag, Basel, Switzerland, 1997: 65 ~ 76.
- Grun A, Wang X. CC modeler: a topology generator for 3d city models [A]. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [C], Stuttgart, Germany, 1998: 188 ~ 196.
- Van den Heuvel F A. Trends in cad-based photogrammetric measurement [A]. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [C], Amsterdam, Holland, 2000: 852 ~ 863.
- Forstner W. On the geometric precision of digital correlation [A]. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [C], Helsinki, Finland, 1982: 176 ~ 189.
- Gruen A. Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique [J]. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 1985, 14(3): 175 ~ 187.
- Ackerman F. Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry [J]. Photogrammetric Record, 1984, 11(64): 429 ~ 439.
- Wu J. The Research on Rapidly Reconstructing Texture for Facades in 3DCM [D]. Wuhan: Department of Remote Sensing and informatics engineering in Wuhan University, 2003: 217 ~ 218. [吴军. 三维城市建模中的建筑墙面纹理快速重建研究 [D]. 武汉: 武汉大学遥感信息工程学院, 2003: 37 ~ 41.]
- Zhang Zu-xun, Zhang Jian-qing. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Press of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1997: 217 ~ 218. [张祖勋, 张剑清著. 数字摄影测量学 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1997: 217 ~ 218.]