

结构光系统结合数码相机的小物体高质量纹理重建

郑顺义¹ 周 漾¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:针对双鸟饕餮纹夔神鬲鼓等小文物或其他小型物体,提出了基于结构光扫描系统结合普通高分辨率单反数码相机的纹理重建方法。该方法具有自动化程度高、效率和质量高的特点,其中主要解决了单张高分辨率影像与物体几何模型的自动配准,以及配准后从多张影像生成无缝纹理模型的问题。实验证明了本文方法的可行性和有效性。

关键词:数字文物;纹理重建;影像配准;无缝纹理

中图法分类号:P234

目标的三维重建主要包括几何重建和纹理重建两个部分^[1]。近年来,随着硬件技术的飞速发展和学者们的持续研究,基于激光扫描或结构光系统的几何重建方法越来越成熟,相比传统的基于影像的摄影测量或多视几何的方法,它更加简单快速、可靠性高,在城市建筑建模^[2]、大型文物景观三维重建^[3]和小文物重建^[4]中得到了广泛的应用。但几何重建完成之后,结合数字影像的纹理重建方法仍不成熟,是当前的又一热门课题,如在数字文物等领域,就需要具有高质量真实纹理的三维模型。翟瑞芳曾对小型文物双鸟饕餮纹夔神鬲鼓进行了纹理重建尝试^[4]。本文针对这类小文物或其他类似的小型目标,从结构光扫描系统出发,结合普通高分辨率(相对扫描系统的同步影像而言)单反数码相机,提出了一种高效率、高质量的纹理重建方法。它包含两个问题:① 高分辨率影像与点云的配准,即恢复高分辨率影像相对几何模型的方位元素;② 多张影像的无缝纹理映射^[5-7]。

1 方法综述

1.1 影像与点云的配准

通常,光学影像与点云的配准可以分为单张影像配准和多影像配准^[8]。其中,多影像配准主要是通过摄影测量方法先恢复所有高分辨率影像

的相对方位元素,然后再整体跟扫描点云配准,如通过配准摄影测量点云与扫描点云^[9],或通过其他公共参照物,如平面格网板^[4]完成配准。对于小物体的纹理重建来说,公共参照物的限制很大,而且也并不需要配准所有的高分辨率影像。另外,对于补拍的数据等仍然需要进行单张影像的配准。因此,单张影像与点云的配准是小物体纹理重建的重点问题。

目前,单张影像与点云的配准包括基于点特征、线特征^[7,8]和面特征^[9]的配准方法以及基于互信息^[10]的配准方法。这些方法中,基于互信息的点云与光学影像配准尚处于实验阶段,基于线和面特征的配准主要应用于建筑物和城市地区的重建。而基于点特征的配准目前虽然已有成熟的商业软件,如 Polyworks 和 MAYA 等,但是它们均需要大量的人机交互,且由于点云的离散性质,像方与物方的特征点之间并不是严格的对应关系。另一方面,由于小物体及其场景复杂多变,难以保证存在足够的线或面特征,仍然只能通过点特征进行配准,因此,对于小物体的纹理重建来说,如何提高点特征的对应性以及配准的自动化程度,是单张影像配准中迫切需要解决的问题。

1.2 无缝纹理映射

纹理接缝的产生可以归结为几何和辐射两方面的原因。几何上主要是由点云精度、配准误差以及透视变换等引起的;辐射上主要是由光照条

件和相机感光变化等原因引起。2007 年, Lempitsky 首先将该问题视为马尔柯夫随机场 (Markov random field) 问题^[5], 为无缝纹理走出了开创性的一步。之后, Allene 等人在此方法的基础上使用了多波段混合方法来处理纹理辐射上的差异^[6]。2010 年, Gal 等人又对 Lempitsky 的方法进行了改进, 考虑了纹理的几何误差, 允许投影三角形在影像上作小范围内的平移, 寻找其最佳投影, 从而解决了接缝的几何问题^[7]。他在辐射处理上使用的是泊松影像处理方法, 这是 Pérez 等人 2003 年提出的一种用于二维影像的无缝镶嵌和插值的综合性处理方法^[11], 也是该领域的经典方法之一。

1.3 本文方法

在高分辨影像与点云的配准问题上, 本文针对单张影像提出了利用结构光同步影像的自动配准方法。其主要思路是: 首先对同步影像与高分辨率影像进行快速匹配, 然后从同步影像的匹配点出发进行光线投射, 在物体的几何模型上内插出匹配点所对应的物方点, 最后使用 RANSAC 稳健方法进行后方交会, 实现高分辨率影像的自动配准。图 1 是本文配准方法的示意图, 它实际上是一个利用匹配和光线投射代替人工选点的过程, 相比以往人工选点的方法, 它不但自动化程度高、速度快, 而且特征点的对应性提高了, 因此精度和可靠性也提高了。

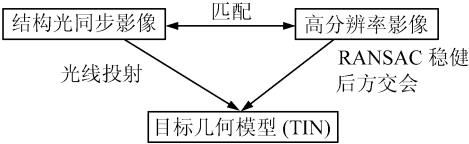


图 1 本文的高分辨率影像自动配准示意图
Fig. 1 Sketch Map of Automatic Registration for High-Resolution Images

在无缝纹理的问题上, 本文使用了 Gal 的方法, 不过本文利用了前面的配准结果来约束 Gal 方法中几何改正的取值范围, 因此提高了结果的可靠性。值得指出的是, 本文假设目标的几何重建结果是不规则三角网点云模型, 且单反相机已经经过了标定, 内方位元素已知, 配准只需要恢复其相对于点云坐标系下的外方位元素。

2 单张高分辨率影像与点云的自动配准

当前结构光扫描系统在获取点云的同时还能

获取一幅扫描场景的同步影像。利用这些同步影像实现高分辨率影像与点云的自动配准是本文纹理重建方法的主要步骤, 其中主要解决了如下 4 个问题: ① 同步影像与高分辨率影像匹配的效果和效率问题; ② 像方特征点在物方的对应点的问题; ③ 大量错匹配下稳定估计外方位元素的问题; ④ 配准精度与可靠性问题。

2.1 基于 GPU 加速的 SIFT 匹配

由于结构光同步影像与单反相机所拍摄的高分辨率影像之间的分辨率和色彩属性的差别非常大, 再加上成像角度、光照条件也不相同, 基于灰度的匹配往往失效, 因此, 本文采用了基于 GPU 加速的 SIFT 特征匹配。一方面, 相比其他常用的点特征算子, 如 Harris 算子、SUSAN 算子等, Mikolajczik 等^[12]通过实验对比研究发现, SIFT 算子是各种现有的特征描述算子中综合性能最好的, 它不但提取的特征多、抗噪性强, 而且对图像缩放、旋转甚至仿射变换保持不变的优点。另一方面, 当前基于 GPU 加速的 SIFT 匹配在内存消耗和匹配速度方面都远超基于 CPU 的 SIFT 匹配^[13], 这是提高本文方法效率的关键之一。封三彩图 1 是某陶塑玩偶正面和背面的匹配结果, 其中左影像为结构光同步影像 (分辨率为 $1\,280 \times 1\,024$), 右影像为高分辨率同步影像 (分辨率为 $4\,288 \times 2\,848$)。

从封三彩图 1 可以看出, 由于两幅影像差异太大, 匹配粗差率非常高。表 1 给出了陶塑玩偶所有站的匹配结果, 可以看到, 最小的粗差率都达到了 31%。目前, 常规的剔除匹配粗差是使用 RANSAC 等稳健方法进行相对定向或估计基础矩阵, 恢复左右影像的核线关系, 从而剔除上下视差很大的错误匹配点。本文直接通过 RANSAC 稳健后方交会来消除这些错匹配的影响, 这样不但省去了剔除匹配粗差的工作, 而且还有计算上的优势, 效率更高。

2.2 光线投射

从二维像点直接求其三维坐标是个病态问题。本文采取的方法是使用光线投射, 在物体的几何模型 (TIN) 上内插出特征点的物方近似点。具体如下: 从同步影像上的像点出发, 恢复特征点的空间射影光线, 计算其与三角网的相交情况, 若存在交点, 则取第一个交点作为该特征点对应的物方点。图 2 是本文光线投射的示意图。

经过光线投射, 对于高分辨率影像而言, 像点及其对应的物方点都有了, 接下来就是以这些物方点为控制点进行后方交会, 解求其外方位元素。

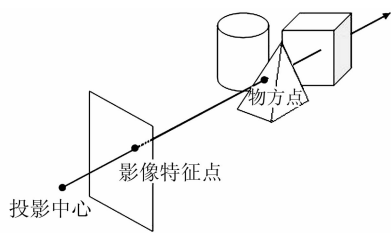


图 2 光线投射示意图
Fig. 2 Sketch Map of Ray-casting

2.3 基于单位四元数后方交会的 RANSAC 稳健估计

RANSAC 是 1981 年 Fischler 和 Bolles 提出的一种鲁棒性很强的参数估计方法,它通过对数据点进行随机采样,寻找数据点的最佳一致集,最后以该最佳一致集所估计出的参数作为模型的最佳参数^[14]。不过 RANSAC 作为一种随机算法,它最大的缺点是在有限迭代次数内只能以一定的概率保证结果的正确性。这说明除非尝试所有可能的采样组合,否则结果不可能完全稳定。因此,一次采样所需的点越少,采样组合总数就越小,最终有限次迭代覆盖所有可能采样组合的概率也就越高。这就是本文采用基于单位四元数的后方交会的最大原因。

表 1 陶塑玩偶高分辨率影像自动配准结果
Tab. 1 Automatic Registration Results of High-Resolution Images for the Pottery “Player 23”

同步影像扫描站	SIFT 匹配点数	光线投射有效点数	目视判别的错匹配(对应了大粗差)	最终判别为粗差的点数	粗差率	平均反投差/像素	配准精度/像素
I	18	18	6	7	39%(7/18)	2.162	0.582
II	27	27	6	12	44%(12/27)	2.604	0.698
III	25	24	6	13	54%(13/24)	2.257	0.599
IV	37	35	6	11	31%(11/35)	3.383	0.902
V	48	46	6	15	33%(15/46)	2.950	0.792
VI	32	31	6	15	48%(15/31)	2.711	0.737
VII	24	23	7	14	60%(14/23)	2.588	0.699
VIII	43	40	11	18	55%(22/40)	2.478	0.669

基于单位四元数的后方交会与传统的基于欧拉角的后方交会一样,最少需 3 对点就能解算,但它具有不依赖于外方位元素初值和迭代收敛快的优点^[15],且相比繁琐的后方交会直接解法,它又有计算上的优势。而另一个不依赖初值的直接线性变换一次最少需要 6 对点。前面提到的剔除匹配粗差,用相对定向法最少需要 5 对同名点,且依赖初值(当然也有比较繁琐的直接解法),而计算机视觉中的基础矩阵估计常用的是 7 点法或 8 点法,因此,相比较而言,本文直接在后方交会时剔除粗差,不但

省去了一个步骤,而且还有明显的计算上的优势。

采样迭代完成后,得到了 RANSAC 最佳一致集,为了增加结果的可靠性以及最终定位所有的粗差,本文令它们的权为 1,其他非一致集的点的权为一极小数,然后进行一次整体的验后方差选权迭代法平差。在封三彩图 1 的陶塑玩偶正面及背面的结果截图中,红色点表示选权迭代中被判为粗差的点,绿色点表示判别为正确的匹配点,可以看到,SIFT 匹配中的错误匹配点都能被正确地识别出来。其他站的数据如表 1 所示。

2.4 配准精度分析与可靠性评定

由于高分辨率影像的外方位元素没有真值,也没有外界控制,考虑到本文配准方法中低分辨率同步影像的基准作用,对精度的评定步骤如下:

① 借鉴文献[7]的精度评定方法,将物方控制点反投回高分辨率影像,计算像方投影点与其对应的特征点之间的距离,本文称之为反投差。

② 分别估计同步影像和高分辨率影像的空间分辨率(GSD)。

③ 计算配准精度:

$$\text{Precision} = \bar{d} \times \text{GSD}_{\text{High}} / \text{GSD}_{\text{Low}} \quad (1)$$

其中, \bar{d} 为高分辨率影像的平均反投差; GSD_{High} 为高分辨率影像的 GSD; GSD_{Low} 为同步影像的 GSD。这实际上是计算高分辨率影像的平均反投差相对于低分辨率同步影像的值。

表 1 给出了陶塑玩偶 8 张高分辨率影像的自动配准精度结果。从平均反投差来看,所有影像都在 2~3 个像素左右,但按本文方法计算的配准精度均小于 1 个像素。这是由于二者的 GSD 相差将近 4 倍,虽然在高分辨率影像上有几个像素的偏差,但相对于低分辨率的同步影像而言,配准实际上已经达到子像素级精度。这一方面对于本文以低分辨率同步影像为参考基准的配准来说,精度是可以接受的;另一方面,对于纹理重建来说,尤其是本文后续的无缝纹理处理具备较强的几何误差容忍能力,高分辨率影像平均反投差在 3~4 个像素时,对最终的纹理结果几乎没有影响。

在配准完成后,将整个点云反投回高分辨率影像,由人工目视判别投影点的覆盖范围与影像上的目标范围是否重合,如封三彩图 1(c)所示,这主要是为了判别配准结果的可靠性。

综上所述,本文判别某次配准是否成功的方法是配准精度小于 1 个像素,且点云的反投范围重合良好。

3 多张影像的无缝纹理映射

当恢复了所有相关的高分辨率影像的方位元

素后,从这些各个不同角度的影像生成无缝纹理是非常重要的。它包含两个步骤,①几何上寻求最优纹理;②辐射上的无缝镶嵌。本文在这两个问题上分别使用了Gal改进的考虑几何误差的马尔柯夫随机场方法和多波段混合法。

在最优纹理的问题上,传统的方法只考虑每个三角形的纹理都应取自其质量最优的一张影像,而最优准则包括顾及纹理正射性的最佳角度准则,或者顾及纹理分辨率的最大投影面积准则,或者顾及影像畸变的投影与像主点距离最小准则等。Lempitsky在此基础上提出应同时考虑接缝处的纹理差别,并用能量函数来描述最优准则^[5]。设一几何模型包含 N 个三角形,记为 $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$,又有 M 张影像为其纹理来源,记为 $\{I^1, I^2, \dots, I^M\}$,此时纹理的选择可视为一标记向量 $L=\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$,其中 $l_i \in [1, n]$ 表示三角形 T_i 的纹理取自影像 I^{l_i} 。则对 L 建立能量函数:

$$E(L) = E_Q(L) + \lambda E_S(L)$$

(2)

其中, $E_Q(L)$ 表示某一标记状态下三角形纹理的质量之和,质量越好,能量越小; $E_S(L)$ 表示某一标记状态下接缝处的纹理差别之和,差别越小,能量越小。因此,最优纹理的问题就转化为寻找某一标记向量 L^* ,使得全局能量最小,即

$$E(L^*) = \min\{E(L)\}$$

(3)

式(3)的求解过程是一个典型的离散标记马尔柯夫随机场的问题。之后,Gal对该方法所作的改进是将标记向量扩充为 $L=\{(l_1, t_1), (l_2, t_2), \dots, (l_N, t_N)\}$,其中 $t_i \in R^2$,为三角形 T_i 在影像 I^{l_i} 上的投影在像平面的二维平移向量。这时所求得的最终标记向量不但最优化了纹理,还能改正由于几何误差而引起的纹理错位现象,如特征线断裂等^[7]。不过文献[7]中 t_i 的分量取值范围为经验值 $[-1, 1]$,而本文则利用前面配准结果中的平均反投差对平移向量 t_i 的取值范围进行了约束,这样有利于提高结果的可靠性。

在确定了每个三角形的最佳纹理片之后,本文在无缝镶嵌上沿用了文献[5]的多波段混合方法。封三彩图2是一组关于纹理效果的对比截图,其中封三彩图2(b)为按传统的最大投影面积原则取纹理且不作辐射上的无缝过渡处理的纹理效果,封三彩图2(c)是经过本文的无缝纹理处理之后的结果,通过图中放大的细节对比可以看出,无缝纹理处理之后,纹理镶嵌自然,没有可见的接缝。

4 实验结果

为了验证本文的纹理重建方法,笔者对各种

材质类型和不同结构的小物体进行了大量的纹理重建实验。实验使用的结构光系统为武汉大学数字摄影测量与计算机视觉中心研制的三维摄影测量扫描系统PhotoScanner。扫描时,光栅机向物方投影结构光,摄像头实时捕捉影像,快速匹配前交,生成目标表面点云。在结构光投影完毕后,摄像头会再采集一张影像作为目标的纹理影像,这两幅 $1\,280 \times 1\,024$ 的纹理影像即是本文所指的结构光同步影像。在所有站扫描完成后,经过点云拼接,各同步影像的外方位元素便统一到一个坐标系下。另外,本文实验数据中所有的高分辨率影像均由尼康D300相机拍摄,其分辨率为 $4\,288 \times 2\,848$,镜头焦距约50 mm,拍摄距离约50~70 cm,而扫描仪镜头焦距约12 mm,扫描距离约60 cm。

表2列出了本文的4个实验数据及其纹理重建结果。通过本文方法重建的纹理模型分别如封三彩图2、彩图3和彩图4所示。其中,彩瓷狮子和“Blue Love”的结构非常复杂,从表2可以看到,它们的扫描站数和纹理片数都很多,不过正如封三彩图3、彩图4所示,使用本文的纹理重建方法仍然能得到十分好的纹理结果。

表2 不同材质和结构的小型物体纹理重建结果

Tab.2 Results of Texture Reconstruction

for Various Test Data

数据	扫描片数	TIN(简化后的点数/三角形数)	高分辨率影像共拍摄片数	自动配准成功片数	最终纹理片数
陶塑“23号”	8	100 002/200 000	11	8	8
双鸟饕餮纹夔神鼉鼓	16	100 029/200 000	27	11	11
彩瓷狮子	48	100 000/200 000	48	22	22
塑料雕塑“Blue Love”	26	50 002/100 000	27	18	18

值得指出的是,纹理重建并不需要配准所有拍摄的高分辨率影像,表2的数据也反映出了这一点。

5 结 语

目前,本文的纹理重建方法还不是全自动化,首先是为了保证较好的匹配结果,需要人工选定内容最为接近的一对扫描同步影像与高分辨率影像来进行匹配。这方面可以改进的方法是使用互信息匹配,自动找出最相似的一对。然后是当匹配结果差而配准失败,但该影像又不可或缺时,需要人工编辑增加一些匹配点,当然在影像之间选点肯定比在影像和点云之间选点的效率和准确性

要高。另外,由于使用了光线投射的方法内插物方点的三维坐标,因此包括点云拼接和三维构网的精度自然会影响到配准的精度。综上所述,使用本文的方法进行纹理重建,效率和效果都十分可观,对数字文物、工业建模和虚拟现实等都有着非常积极的意义。

参 考 文 献

[1] 张祖勋,张剑清. 城市建模的途径与关键技术[J]. 世界科技研究与发展,2003,25(3):23-29

[2] 黄先锋. 利用机载 LiDAR 数据重建 3D 建筑物模型的关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2006

[3] 赵煦,周克勤,闫利,等. 基于激光点云的大型文物景观三维重建方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(7):684-687

[4] 翟瑞芳. 激光点云和数字影像结合的小型文物重建研究[D]. 武汉:武汉大学,2006

[5] Lempitsky V, Ivanov D. Seamless Mosaicing of Image-Based Texture Maps[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, 2007

[6] Allene C, Pons J P, Keriven R. Seamless Image-Based Texture Atlases Using Multi-band Blending [C]. The 19th International Conference on Pattern Recognition, Tampa, Florida, USA, 2008

[7] Gal R, Wexler Y, Ofek E, et al. Seamless Montage for Texturing Models[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(2): 479-486

[8] 邓非. LiDAR 数据与数字影像的配准和地物提取 [D]. 武汉:武汉大学,2006

[9] 钟成,李卉,黄先锋,等. 利用 6 元组松弛法自动配准 LiDAR 数据与航空影像[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(12):1 426-1 430

[10] 邓非,杨海关,李丽英. 基于互信息的 LiDAR 与光学影像配准方法[J]. 测绘科学,2009,34(6):51-52

[11] Pérez P, Gangnet M. Poisson Image Editing[C]. ACM SIGGRAPH, San Diego, 2003

[12] Mikolajczyk K, Schmidt C. A Performance Evaluation of Local Descriptors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1 615-1 630

[13] Heymann S, Fröhlich B, Müller K, et al. SIFT Implementation and Optimization for General-purpose GPU[C]. International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Campus Bory, 2007

[14] Fischler M A, Bolles R C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395

[15] 江刚武,姜挺,王勇,等. 基于单位四元数的无初值依赖空间后方交会[J]. 测绘学报,2007,36(2): 169-175

第一作者简介:郑顺义,教授,博士,博士生导师,主要研究方向包括计算机视觉、数字摄影测量和虚拟现实等。
E-mail:syzheng@263.net

High Quality Texture Reconstruction for Small Objects Based on Structure Light Scanning System with Digital Camera

ZHENG Shunyi¹ ZHOU Yang¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: 3D models with high quality and realistic texture is a very significant topic in the field of digital museum, heritage conservation, and so on. For the small bronze artifact Shuangniaotaotiewenkushentuogu and other small objects, we propose a new texture reconstruction method of high-automation, high-efficient, and high-quality. Based on the structure light scanning system with common digital camera, our approach mainly resolved the registration for a single high-resolution image, and the seamless texture generation from multi-view images. Massive reconstruction tests proved the feasibility and validity of this method.

Key words: digital heritage; texture reconstruction; image registration; seamless texture

About the first author: ZHENG Shunyi, professor, Ph. D, Ph. D supervisor, majors in computer vision, digital photogrammetry and virtual reality.
E-mail: syzheng@263.net