

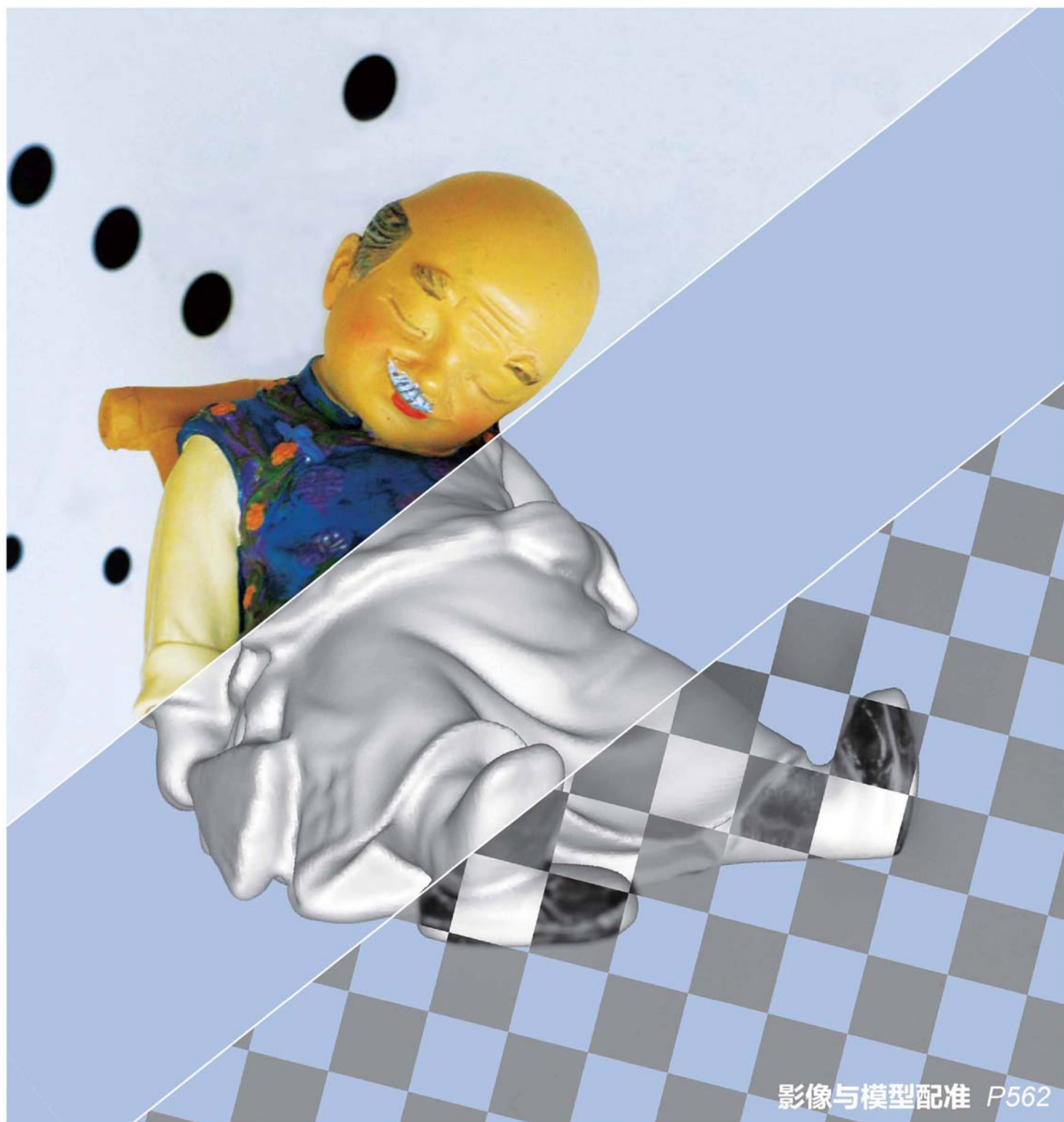


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
04
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



影像与模型配准 P562



第19卷第4期（总第216期）

2014年4月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

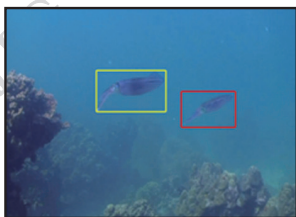
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

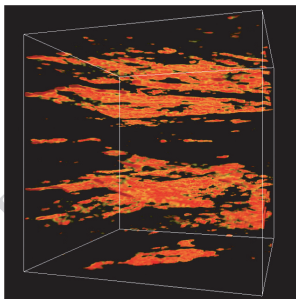
国内定价 50.00元



面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理(第512页)



融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪(第534页)



针对全空子数据体的GPU体绘制(第577页)

图像处理和编码

- 梯度矢量扩散控制实现边缘保持的彩色图像去噪
贾迪, 孟祥福, 张一飞, 董娜, 李思慧 0493
- 联合矩阵F范数的低秩图像去噪
刘新艳, 马杰, 张小美, 胡钊政 0502
- 面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理
周漾, 郑顺义, 黄荣永, 马电 0512
- 改进的局部方向模式纹理表示方法
刘海军, 常东超, 张凌宇 0520
- 图像插值空间大容量可逆数字水印算法
王继军 0527

图像分析和识别

- 融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪
王慧斌, 程勇, 陈哲 0534
- 融合颜色属性和空间信息的显著性物体检测
徐丹, 唐振民, 徐威 0541
- 采用人工鱼群的改进广义Hough变换目标定位
李志, 谢强 0549
- 非规则弯曲形变的不变量表示
李国祥, 夏国恩 0556

图像理解和计算机视觉

- 小物体3维重建中影像与几何模型的配准
郑顺义, 王晓南 0562
- 像素聚类改进二进制描述子鲁棒性
惠国保, 李东波 0569

计算机图形学

- 针对全空子数据体的GPU体绘制
李国和, 段忠祥, 吴卫江, 洪云峰, 刘智渊, 程远 0577

医学图像处理

- 基于无损水印的医学图像篡改检测和质量恢复
邓小鸿, 陈志刚, 毛伊敏 0583

遥感图像处理

- 特征点和不变矩结合的遥感图像飞机目标识别
曾接贤, 付俊, 符祥 0592
- 结合稀疏识别的自适应Wallis滤波在高分辨率影像控制点匹配中的应用
耿蕾蕾, 孙权森, 纪则轩, 刘佑鑫, 袁凯 0603

第9届和谐人机环境联合学术会议专栏

- 局部特征点的3维模型变换域水印算法
张建明, 周小梅, 王新宇, 詹永照 0613
- 足球视频搜索引擎中的用户偏好挖掘
胡雨成, 于俊清, 黄贤强, 何云峰, 管涛 0622
- 随机亮度差量化的二进制特征描述
庄东晔, 张冬明, 张勇东, 李锦涛 0630
- L_1 优化在网格去噪中的应用
王鹏, 王胜法, 曹俊杰, 李楠楠, 李波, 苏志勋 0637
- 多视点视频双向实时转码技术的设计与实现
孙立峰, 蔡飞飞, 杨士强 0645

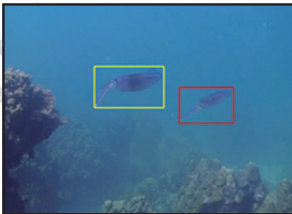
- 第五届数字地球高峰会议征文通知 封三

CONTENTS

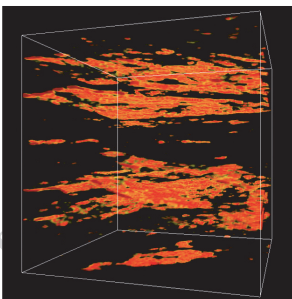
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing(P512)



Visual depth based feature calculation and underwater target tracking(P534)



GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks(P577)

Image Processing and Coding

Edge preserving denoising of color image through controlling the gradient vector Jia Di, Meng Xiangfu, Zhang Yifei, Dong Na, Li Sihui	0493
Image denoising of low-rank matrix recovery via joint Frobenius norm Liu Xinyan, Ma Jie, Zhang Xiaomei, Hu Zhaozheng	0502
Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing Zhou Yang, Zheng Shunyi, Huang Rongyong, Ma Dian	0512
Improved local directional pattern texture descriptor Liu Haijun, Chang Dongchao, Zhang Lingyu	0520
High capacity reversible watermarking for image interpolation space Wang Jijun	0527

Image Analysis and Recognition

Visual depth based feature calculation and underwater target tracking Wang Huibin, Cheng Yong, Chen Zhe	0534
Combining color names with spatial information for salient object detection Xu Dan, Tang Zhenmin, Xu Wei	0541
Improved generalized Hough transform using artificial fish swarm algorithm in target location Li Zhi, Xie Qiang	0549
The global descriptor for bending non-rigid shapes Li Guoxiang, Xia Guoen	0556

Image Understanding and Computer Vision

Images and geometric model registration in 3D reconstruction of small objects Zheng Shunyi, Wang Xiaohan	0562
Robust descriptor structured by pixel clustering Hui Guobao, Li Dongbo	0569

Computer Graphics

GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks Li Guohe, Duan Zhongxiang, Wu Weijiang, Hong Yunfeng, Liu Zhiyuan, Chen Yuan	0577
--	------

Medical Image Processing

Lossless watermarking algorithm for medical image's tamper detection and recovery with high quality Deng Xiaohong, Chen Zhigang, Mao Yimin	0583
---	------

Remote Sensing Image Processing

Aircraft target recognition in remote sensing images based on distribution of the feature points and invariant moments Zeng Jiexian, Fu Jun, Fu Xiang	0592
Adaptive enhancement via sparse recognition for automatic control point extraction in high-resolution images Geng Leilei, Sun Quansen, Ji Zexuan, Liu Jixin, Yuan Kai	0603

Special Issue on HHME 2013

Transform domain watermarking scheme of 3D models based on local feature points Zhang Jianming, Zhou Xiaomei, Wang Xinyu, Zhan Yongzhao	0613
User preference mining for soccer video search engine Hu Yucheng, Yu Junqing, Huang Xianqiang, He Yunfeng, Guan Tao	0622
Novel binary feature from intensity difference quantization Zhuang Dongye, Zhang Dongming, Zhang Yongdong, Li Jintao	0630
The application of l_1 -optimization in mesh denoising Wang Peng, Wang Shengfa, Cao Junjie, Li Nannan, Li Bo, Su Zhixun	0637
The design and implementation of real time MVC transcoding Sun Lifeng, Cai Feifei, Yang Shiqiang	0645

中图法分类号: TP234.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)04-0562-07

论文引用格式: 郑顺义, 王晓南. 小物体 3 维重建中影像与几何模型的配准[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(4): 562-568. [DOI:10.11834/jig.20140410]

小物体 3 维重建中影像与几何模型的配准

郑顺义, 王晓南

武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘要: 目的 近景摄影测量中的目标几何形状复杂, 且拍摄影像的角度变化大, 给影像与几何模型的配准带来了困难。传统单幅影像与几何模型配准的做法, 由于缺乏自动粗配准的方法, 效率相对较低。将多视影像首先统一坐标系的做法, 在近景目标的复杂背景下也难以实现。**方法** 为此, 将近景目标置于平面标定板上, 利用相机标定的方法同时解算出影像的内外方位元素, 实现多视影像坐标系的统一。然后人工选取 3 组以上同名点, 做多视影像与几何模型的绝对定向, 得到初始配准参数。最后使用多视影像与几何模型漫反射渲染图之间的归一化互信息作为相似性测度, 用 Powell 非线性优化方法得到配准参数的精确值。**结果** 实验结果表明, 使用标定板可以稳定地获取多视影像的内外方位元素, 用绝对定向得到的配准参数进行影像和几何模型的交替显示仍然可以看到明显的裂缝, 在经过互信息优化后裂缝现象得到明显改善。**结论** 多视影像与几何模型配准相比传统单幅影像与几何模型配准, 人工选取同名点的工作量大大减少, 由于人工选点存在误差, 影响绝对定向的精度, 使用归一化互信息作为测度进行非线性优化, 可以获得更高的精度。

关键词: 3 维重建; 纹理; 几何模型; 配准; 互信息; 非线性优化

Images and geometric model registration in 3D reconstruction of small objects

Zheng Shunyi, Wang Xiaonan

School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objective** Because the digitalization of real objects often entails the texture mapping of the 3D geometry model, images-to-geometry registration is indispensable. The geometry of the target in close-range photogrammetry is complex, and the shooting angle of the image changes largely, which makes images-to-geometry registration difficult to process. Traditionally, a single image is registered with a geometric model by manually selecting the corresponding points. Thus for tens of images this processing can be very time consuming. For efficiency, the position and orientation of the multi-view images can be unified in one coordinate system at first. However, this process is also difficult because of the complex and uncertain background in close-range photogrammetry. **Method** To this end, we put a plane calibration board under the target while taking images, and use the camera calibration to get both, the internal and external orientation parameters; thus, the multi-view images are placed in one coordinate system. The unified coordinate system means when the registration parameters of one image are known, the registration parameters of all other images can be calculated through the relative positions and orientations among them. Then, at least three groups of corresponding points are manually selected, and the registration parameters are calculated by using the absolute orientation. The achieved registration parameters are not precise enough but can be used as an initial value. Finally, by making the normalized mutual information between multi-view images and the

收稿日期: 2013-06-20; 修回日期: 2013-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171357, 41071293); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2012213020202, 2012213020212)

第一作者简介: 郑顺义(1973—), 男, 教授, 2000 年于北方交通大学获道路与铁道工程专业博士学位, 主要研究方向为计算机视觉、工业测量与检测等。E-mail: syzheng@263.net

diffuse rendered maps of the geometric model as a similarity measure, we use Powell's nonlinear optimization method to get the precise registration parameters. In the final process, we optimize all images together, while the traditional methods optimize each single image separately; the difference is we have only 7 parameters for all images, but the traditional methods have 7 parameters for each image. **Result** The experimental results show that using the calibration board we obtain robust internal and external orientation parameters of multi-view images, and after the absolute orientation process, we find obvious gaps between the images and the rendered maps. However, after a normalized mutual information based optimization process, the gaps are significantly improved. The typical total registration work takes about 10 minutes, in which there are 4 minutes for manual work and 6 minutes for computation; by contrast, the fully manual texture-mapping work by using the commercial software-Cinema4D takes nearly 4 hours. **Conclusion** Registration between multi-view images and geometric model compared to registration between single image and geometric model, the workload of manually selecting corresponding points is greatly reduced. The errors of manually selected points can affect the accuracy of absolute orientation, but after using normalized mutual information based nonlinear optimization, we can still get precise registration parameters. The normalized mutual information based nonlinear optimization can also be used for single image-to-geometry registration, but for multi-view images the method is more robust. The optimization method has one drawback: it requires the geometric model has a high quality. This is because the normalized mutual information has a close relationship to the surface's normal vector of the geometric model. This drawback can be avoided by using high accurate 3D scanners.

Key words: 3D reconstruction; texture; geometric model; registration; mutual information; nonlinear optimization;

0 引言

小型物体的3维重建是数字摄影测量与计算机视觉中极富挑战性的一项研究课题,主要应用于小型文物的精细测绘、艺术装饰品的3维展示、工业零部件的逆向工程等方面。3维重建从技术流程上划分,可分为几何3维重建、纹理3维重建两个步骤,其中后者又可细分为影像与几何模型的配准、多视影像的纹理融合两个步骤。本文重点是影像与几何模型的配准,是一种从2维到3维的配准方法,两者之间的关系可以用影像本身的内方位元素和影像在几何模型坐标系下的外方位元素来表示,在这一点上不同于两种2维影像之间的配准。

把3维扫描仪和高分辨率相机集成到一起在航空摄影测量中是较常见的,但是在近景摄影测量应用中,Stamos^[1]指出这种方法缺少灵活性,需要单独地使用3维扫描仪和相机。Franken等人^[2]提出了一种最少人工交互的半自动配准方法,每一幅影像需要选择6个以上的对应点,相当于单片空间后方交会,对于数十幅甚至数百幅影像的情况,这个过程将非常费时。Viola和Wells^[3]使用最大化影像与3维几何模型的渲染图之间的互信息的方法来做配准。Cleju、Corsini等人^[4-5]分别扩展了这个方法,并引入了多种3维渲染的方法。Sottile等人^[6]提出了互相关(MC)的方法,即融合了基于互信息和同名

点的方法。Corsini等人^[7]提出了一整套全自动的从影像到3维模型的配准方法,但是他的方法依赖于SFM(structure from motion),需要大量的多视角影像,这在影像数量少、重叠度低的情况下是不可行的。Lensch^[8]提出了一种基于轮廓线的相似性测度,然后使用下山法来优化每幅影像的配准参数,但是他的方法需要在影像上人工地区分前景和背景。

国内研究影像与LiDAR点云的配准方法较多,研究影像与小物体3维模型的配准方法较少,两者的数据有很大的差异性,前者通常有强度图像^[9],或者包含一些明显的特征可以利用,如建筑物角点、平行线、正交线等^[10-11]。Wang等人^[12]提出了一种地面LiDAR点云与影像稳健配准方法,它仅从带控制点的光束法平差的角度来做配准,并没有真正用到影像的纹理信息,其配准结果也没有实现无缝纹理映射。Zheng等人^[13]提出了一种基于SIFT匹配的配准方法,它要求3维模型本身已有低分辨率的纹理,而需要配准的是高分辨率纹理,其配准方法本质上是2维到2维的配准。

几何3维重建是纹理3维重建的前提,几何模型数据可以有多种来源,本文所使用的数据来自精度较高的结构光扫描系统,与摄影测量影像匹配的结果相比,它可以更真实地反映物体的细节(如图1)。影像与几何模型的配准在几何3维重建和纹理融合之间起桥梁作用,将在后文中详细讨论,在假设已经求解出配准参数的情况下,通过多视

影像的纹理融合将得到带纹理的3维模型(如图2)。图3展示了本文配准方法的技术流程。

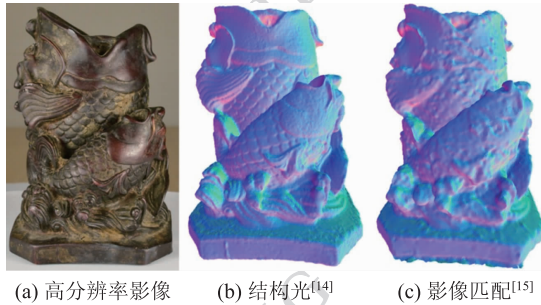


图1 鱼筒影像和模型

Fig. 1 Image and models of fish vase



图2 影像和纹理融合模型

Fig. 2 Image and texture blending model

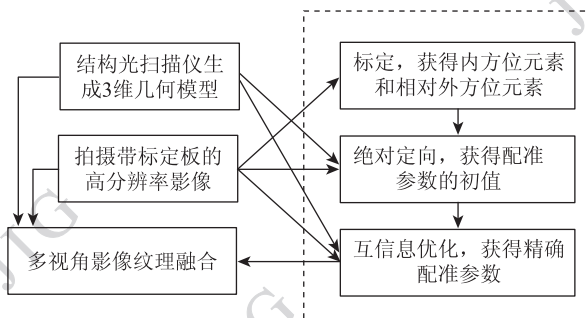


图3 配准流程图(虚线盒)

Fig. 3 Work flow of registration (dash line box)

1 影像与3维模型的粗配准

1.1 相机标定获取相对外方位元素

在拍摄高分辨率影像时,将物体放置在一个合适大小的平面标定板上,从不同的视角拍摄物体的

同时,把标定板也拍摄到影像中,由于物体和标定板是相对静止的,所以可以通过相机标定的方法获得内方位元素($f, x_0, y_0, k_1, k_2, p_1, p_2$)(f 代表相机的主距, x_0, y_0 代表像主点坐标, k_1, k_2 代表径向畸变参数, p_1, p_2 代表偏心畸变参数)和影像之间的相对外方位元素^[16-17]。由于标定得到的外参数位于标定板坐标系,故将外方位元素记为

$$(X_{s_{bd}}, Y_{s_{bd}}, Z_{s_{bd}}, \varphi_{bd}, \omega_{bd}, \kappa_{bd}) \quad (1)$$

式中, $(X_{s_{bd}}, Y_{s_{bd}}, Z_{s_{bd}})$ 代表相机的摄影中心在标定板坐标系下的位置3维向量, $\varphi_{bd}, \omega_{bd}, \kappa_{bd}$ 代表相机在标定板坐标系下的姿态的3个欧拉角。

1.2 绝对定向

配准的目的是将标定板坐标系下的影像统一到3维几何模型的坐标系中,两个坐标系中的位置和姿态分别存在关系

$$\begin{bmatrix} X_{s_{obj}} \\ Y_{s_{obj}} \\ Z_{s_{obj}} \end{bmatrix} = \lambda' \cdot R(\varphi', \omega', \kappa') \begin{bmatrix} X_{s_{bd}} \\ Y_{s_{bd}} \\ Z_{s_{bd}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{s'} \\ Y_{s'} \\ Z_{s'} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R(\varphi_{obj}, \omega_{obj}, \kappa_{obj}) =$$

$$R(\varphi', \omega', \kappa') R(\varphi_{bd}, \omega_{bd}, \kappa_{bd}) \quad (3)$$

式中, $X_{s'}, Y_{s'}, Z_{s'}$ 代表平移量, $\varphi', \omega', \kappa'$ 代表旋转系数, λ' 代表缩放系数,这7个参数称为配准参数, R 代表由3个欧拉角生成的旋转矩阵。 $(X_{s_{obj}}, Y_{s_{obj}}, Z_{s_{obj}})$ 代表相机的摄影中心在3维几何物体坐标系下的位置3维向量, $\varphi_{obj}, \omega_{obj}, \kappa_{obj}$ 代表相机在3维几何物体坐标系下的姿态的3个欧拉角。绝对定向是为了获取配准参数的初始值,只需要手动在影像和3维几何模型之间选3个同名点,其中影像的像点需要在两幅影像上同时选取,然后使用式(1)的参数做前方交会得到3维点,用于绝对定向的解算,绝对定向使用了 Horn^[18] 的方法。

2 影像与3维模型的精配准

2.1 归一化互信息

互信息(MI)是一种常用的衡量两个不同来源随机信号之间的相似性的测度,如可见光影像、红外影像、LiDAR强度图像、SAR图像^[19]之间一般不适合用归一化相关系数(NCC)来度量相似性,而可以用互信息来度量其非线性相关性。使用互信息的一个变种——归一化互信息(NMI)来测量真实影像与OpenGL渲染图之间的相关性,即

$$\begin{cases}
 E(I_{\text{real}}) = - \sum_{i=0}^{255} p_{\text{real}}(i) \ln(p_{\text{real}}(i)) \\
 E(I_{\text{opengl}}) = - \sum_{j=0}^{255} p_{\text{opengl}}(j) \ln(p_{\text{opengl}}(j)) \\
 E(I_{\text{real}}, I_{\text{opengl}}) = - \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} p_{\text{joint}}(i, j) \ln(p_{\text{joint}}(i, j)) \\
 NMI(I_{\text{real}}, I_{\text{opengl}}) = \frac{E(I_{\text{real}}) + E(I_{\text{opengl}})}{E(I_{\text{real}}, I_{\text{opengl}})}
 \end{cases} \quad (4)$$

式中, E 代表单幅图像的熵(entropy)或者两幅图像的联合熵(joint entropy), I_{real} 为真实影像, I_{opengl} 为 OpenGL 渲染图, i, j 为灰度级, p_{real} 和 p_{opengl} 分别为真实影像与 OpenGL 渲染图的灰度直方图中每个灰度级的频率, p_{joint} 为联合灰度直方图中每个灰度级二元组的频率。

2.2 非线性优化

给定一组配准参数, 可以通过式(2)(3)求出一组3维几何物体坐标系下的外方位元素, 然后用 OpenGL 虚拟一个位于该位置和姿态的摄像机, 生成一幅在给定光照条件下的3维几何物体的渲染图(如图4, 与图1的区别在于, 图4中渲染图的视角与影像一样), 通过式(4)可以求出真实影像与渲染图之间的归一化互信息。合并所有视角的影像的归一化互信息, 得

$$F = \sum_{k=1}^n NMI(I_{\text{real}}^k, I_{\text{opengl}}^k) \quad (5)$$

式中, F 为影像归一化互信息的总和, 作为被优化的指标。注意到, 式(5)是配准参数的函数, 由于求偏导数存在困难, 所以不能用常规的线性化误差方程的方法来最优化指标 F , 使用 Powell^[20-21] 的方法来最优化求解配准参数的精确值。注意到,



(a) 高分辨率影像 (b) OpenGL渲染图

图4 相同视角的影像和渲染图

Fig. 4 Image and rendered map with same viewpoint

本文假设影像在3维几何模型坐标系下的外方位元素为真实值时, 归一化互信息目标 F 的值取得局部最大值, 这就要求3维几何模型较为精细, 不能使用图1中影像匹配生成的模型。在实验中, 并没有使用影像全部的像素来计算 F , 而是 OpenGL 渲染图的“前景”做形态学“膨胀”运算后的全部“前景”像素。

3 实验结果与分析

相机标定是一项十分成熟的技术, 在本文中不再讨论。使用 Nikon D800 相机, 影像宽为 3 680 像素(记为 w), 影像高为 2 456 像素(记为 h), 在做完相机标定之后(结果见表1、表2), 需要使用内方位元素对影像做主点和畸变纠正, 而现有的方法通常不做纠正^[4-7]。相机标定得到的外方位元素决定了影像之间的相对位置和姿态关系。

原始影像中的像主点与图像中心点并不完全重合, 同时也存在由镜头等因素引起的畸变, 纠正后的影像中像主点与图像中心点完全重合, 且不存在畸变。以图像中心点为坐标原点(x_0, y_0), 水平向右为 x 方向, 竖直向上为 y 方向, 建立像平面坐标系, 单位是像素, 则原始影像中的像点坐标($x_{\text{ori}}, y_{\text{ori}}$)和纠正后影像的像点坐标($x_{\text{cor}}, y_{\text{cor}}$)存在关系^[17, 22]

$$\begin{cases}
 r^2 = (x_{\text{ori}} - x_0)^2 + (y_{\text{ori}} - y_0)^2 \\
 x_{\text{cor}} = x_{\text{ori}} - x_0 - \left[\frac{(x_{\text{ori}} - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1 [r^2 + 2(x_{\text{ori}} - x_0)^2] + 2p_2 (x_{\text{ori}} - x_0)(y_{\text{ori}} - y_0)}{2p_1 (x_{\text{ori}} - x_0)(y_{\text{ori}} - y_0)} \right] \\
 y_{\text{cor}} = y_{\text{ori}} - y_0 - \left[\frac{(y_{\text{ori}} - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_2 [r^2 + 2(y_{\text{ori}} - y_0)^2] + 2p_1 (x_{\text{ori}} - x_0)(y_{\text{ori}} - y_0)}{2p_1 (x_{\text{ori}} - x_0)(y_{\text{ori}} - y_0)} \right]
 \end{cases} \quad (6)$$

式中, k_1, k_2, p_1, p_2 为参数。

首先, 计算纠正影像的每一个像素在原始影像上的坐标: 每一个像素的行列号减去图像中心点的行列号($\frac{w-1}{2}, \frac{h-1}{2}$)即得到该像素的像点坐标($x_{\text{cor}}, y_{\text{cor}}$), 根据式(6)可以迭代求解出原始影像的像点坐标($x_{\text{ori}}, y_{\text{ori}}$)。然后, 在原始影像上使用双线性内插的方法进行重采样, 得到纠正后影像中对应像素的灰度值。

表 1 相机标定的内方位元素

Table 1 The internal parameters of camera calibration

参数	值	参数	值	参数	值
f	3 078.31	k_1	$-9.812\,594 \times 10^{-9}$	k_2	$1.234\,563 \times 10^{-15}$
x_0	8.52	p_1	$1.115\,947 \times 10^{-7}$		
y_0	8.70	p_2	$3.534\,274 \times 10^{-8}$		

表 2 相机标定的外方位元素

Table 2 The external parameters of camera calibration

影像	Xs_{bd}/mm	Ys_{bd}/mm	Zs_{bd}/mm	$\varphi_{\text{bd}}/\text{弧度}$	$\omega_{\text{bd}}/\text{弧度}$	$\kappa_{\text{bd}}/\text{弧度}$
0	126.82	-294.77	270.18	-0.447 4	0.820 3	0.803 1
1	286.29	-120.80	299.19	-0.838 3	0.298 1	1.536 0
2	292.31	122.23	322.57	-0.780 1	-0.295 7	1.469 8
3	142.35	293.09	299.36	-0.459 3	-0.717 9	2.477 0
4	-70.64	298.37	310.87	0.231 0	-0.787 1	-3.013 4
5	-273.63	141.47	360.91	0.683 2	-0.319 0	-1.415 0
6	-282.10	-98.83	341.63	0.699 1	0.215 8	-1.382 3
7	-141.46	-306.24	259.08	0.537 7	0.837 9	-0.696 4
8	108.75	-302.87	318.70	-0.340 3	0.783 9	0.785 5

在自主研发的软件中,通过鼠标交互的方式人工点击 3 组以上的同名点,即可进行绝对定向。绝对定向解算得到的配准参数的精度,依赖于人工选取同名点的精度,由于影像与 3 维几何模型的视觉效果有很大的不同,很难保证同名点的精度(图 5(a)中 3 维模型渲染图与真实影像之间的同名像点坐标差反映了同名点的精度)。在经过了基于

互信息的优化之后,配准参数的精度得到了显著提升,配准参数见表 3,优化后的结果见图 5(b),如果配准参数无误差,则影像与模型的渲染图应该完全无缝套和,在图 5 圆圈标识的位置,绝对定向后的结果(图 5(a))存在较为明显的错位,经过互信息优化后(图 5(b)),错位现象得到改善。影像与几何模型配准的目的是为了做基于多视角影像的纹理融合,经过互信息优化后,影像上轮廓线与几何模型的轮廓线吻合在 1 个像素以内,可以保证后续的纹理融合的质量。图 6 是更多的可视化结果。

从稳定性上来讲,Sottile 等人^[6]使用单幅影像做互信息优化存在不收敛的情况,本文对多视影像同时做互信息优化,因为多视影像之间存在着几何约束,所以要比对单幅影像逐个做互信息优化更稳定,不收敛的概率会降低。

从速度上讲,在典型的情况下,利用 Powell 方法进行互信息优化的程序耗时为平均每幅影像 15 s(生成 OpenGL 渲染图时使用了 GPU 加速)。使用本文方法,针对鱼筒数据,从相机标定开始,到互信息优化完成结束,需要 10 min 时间,其中人工交

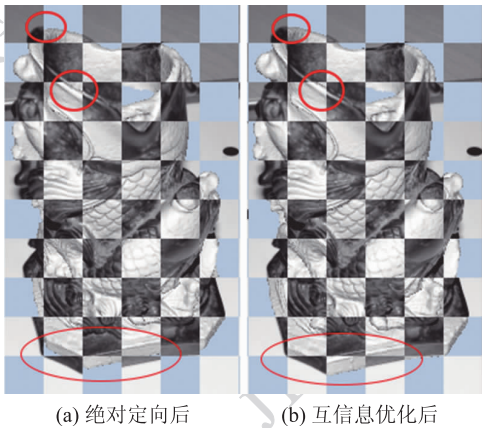


图 5 交替显示的影像错位
Fig. 5 Image gap in cross display



图6 更多配准结果

Fig. 6 More registration results

表3 互信息优化前后的配准参数

Table 3 Registration parameters before and after MI-based optimization

参数	绝对定向后	互信息优化后
Xs'/mm	57.75	52.77
Ys'/mm	-84.31	-86.35
Zs'/mm	-593.40	-594.44
$\varphi'/\text{弧度}$	1.8609	1.8976
$\omega'/\text{弧度}$	-1.4803	-1.5418
$\kappa'/\text{弧度}$	-1.1062	-1.0658
λ'	1.00747	0.99939

互时间为4 min,相比之下,要求娴熟的3D美工使用商用软件(Cinema4D)贴图,需要4 h的时间。

4 结论

提出了一种有效的2维影像与3维几何模型之间的配准方法,适用于表面基本符合漫反射模型、几何形状复杂的小型物体。本文方法的精度较高、人工交互量少、耗时较少,配准结果可以用于多视角无缝纹理融合,可以适用于博物馆文物3维重建、电子商城产品3维重建等应用领域。

本文方法与 Corsini 等人^[7]现有的方法相比,改进之处在于:现有方法无法精确控制多视影像之间

的相对关系,本文方法使用了相机标定,影像外方位元素之间的相对精度得到了很好地保证;现有方法对每一幅影像需要优化7个参数(对于 N 张影像就是 $7N$ 个参数),而本文方法对所有的影像仅需要优化7个配准参数,这样做的鲁棒性更高、耗时更少。

本文方法可以在以下几个方面进行扩展和深入研究:1)本文方法需要使用标定板,降低了方法的灵活性,可以研究使用位置随意摆放的编码标识点和一维定标尺的组合,在不能使用标定板的场合做高精度控制。2)本文方法要求3维几何模型有较高的精度,然而物体可能出现部分精度高、部分精度低的情况,可以研究在3维几何模型上自动选择具有高精度的局部区域,仅对感兴趣的区域统计互信息。

参考文献(References)

- [1] Stamos I. Automated registration of 3D-range with 2D-color images: an overview[C]// Proceedings of the 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems. Princeton, New Jersey: IEEE, 2010: 1-6. [DOI: 10.1109/CISS.2010.5464815]
- [2] Franken T, Dellepiane M, Ganovelli F, et al. Minimizing user intervention in registering 2D images to 3D models[J]. The Visual Computer, 2005, 21(8-10): 619-628. [DOI: 10.1007/s00371-005-0309-z]
- [3] Viola P, Wells W M. Alignment by maximization of mutual information[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 24(2): 137-154. [DOI: 10.1023/A:1007958904918]
- [4] Cleju I, Saupe D. Stochastic optimization of multiple texture registration using mutual information[M]//Pattern Recognition. Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2007, 4713: 517-526. [DOI: 10.1007/978-3-540-74936-3_52]
- [5] Corsini M, Dellepiane M, Ponchio F, et al. Image-to-geometry registration: a mutual information method exploiting illumination-related geometric properties[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(7): 1755-1764. [DOI: 10.1111/j.1467-8659.2009.01552.x]
- [6] Sottile M, Dellepiane M, Cignoni P, et al. Mutual correspondences: an hybrid method for image-to-geometry registration[C]//Proceedings of Eurographics Italian Chapter Conference. Genova, Italy: EGITALY, 2010: 81-88.
- [7] Corsini M, Dellepiane M, Ganovelli F, et al. Fully automatic registration of image sets on approximate geometry[J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 102(1-3): 1-21. [DOI: 10.1007/s11263-012-0552-5]
- [8] Lensch H, Heidrich W, Seidel H P. A silhouette-based algorithm for texture registration and stitching[J]. Graphical Models,

- 2001, 63(4):245-262. [DOI: 10.1006/gmod.2001.0554]
- [9] Zhang F, Huang X F, Fang W, et al. Non-rigid registration of mural images and laser scanning data based on the optimization of the edges of interest[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2012, 42:493-503. [张帆, 黄先锋, 方伟, 等. 基于兴趣边缘优化的壁画影像与激光扫描数据非刚性配准[J]. *中国科学: 信息科学*, 2012, 42:493-503.] [DOI: 10.1007/s11432-011-4440-3]
- [10] Zhang Y J, Xiong X D, Shen X. Automatic registration of urban aerial imagery with airborne LiDAR data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(3): 579-595. [张永军, 熊小东, 沈翔. 城区机载 LiDAR 数据与航空影像的自动配准[J]. *遥感学报*, 2012, 16(3): 579-595.] [DOI: 10.11834/jrs.20121082]
- [11] Ma H C, Yao C J, Wu J W. Registration of LiDAR point clouds and high resolution images based on linear features[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(2): 136-140. [马洪超, 姚春静, 邬建伟. 利用线特征进行高分辨率影像与 LiDAR 点云的配准[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2012, 37(2): 136-140.]
- [12] Wang Y M, Hu C M. A robust registration method for terrestrial LiDAR point clouds and texture image[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(2): 266-272. [王晏民, 胡春梅. 一种地面激光雷达点云与纹理影像稳健配准方法[J]. *测绘学报*, 2012, 41(2): 266-272.]
- [13] Zheng S Y, Zhou Y. High quality texture reconstruction for small objects based on structure light scanning system with digital camera[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 529-533. [郑顺义, 周漾. 结构光系统结合数码相机的小物体高质量纹理重建[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2012, 37(5): 529-533.]
- [14] Zhou L M, Zheng S Y, Huang R Y. A registration algorithm for point clouds obtained by scanning objects on turntable[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 73-79. [周朗明, 郑顺义, 黄荣永. 旋转平台点云数据的配准方法[J]. *测绘学报*, 2013, 42(1): 73-79.]
- [15] Furukawa Y, Ponce J. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(8): 1362-1376. [DOI: 10.1109/TPAMI.2009.161]
- [16] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334. [DOI: 10.1109/34.888718]
- [17] Zhang Y J, Zhang Z X, Zhang J Q. Camera calibration using 2D-DLT and bundle adjustment with planar scenes[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(6): 566-571. [张永军, 张祖勋, 张剑清. 利用 2 维 DLT 及光束法平差进行数字摄像机标定[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2002, 27(6): 566-571.]
- [18] Horn B K. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions[J]. *JOSA A*, 1987, 4(4): 629-642. [DOI: 10.1364/JOSAA.4.000629]
- [19] Kou Y, Xu J Z. Algorithm for remote sensing images matching based on the structure characteristics[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(5): 565-573. [寇媛, 徐景中. 基于结构特征的遥感影像匹配[J]. *中国图象图形学报*, 2013, 18(5): 565-573.] [DOI: 10.11834/jig.20130511]
- [20] Powell M J. The NEWUOA software for unconstrained optimization without derivatives[J]. *Large-Scale Nonlinear Optimization*, 2006: 255-297. [DOI: 10.1007/0-387-30065-1_16]
- [21] Powell M J. Developments of NEWUOA for minimization without derivatives[J]. *IMA Journal of Numerical Analysis*, 2008, 28(4): 649-664. [DOI: 10.1093/imanum/drm047]
- [22] Feng W H. Close Range Photogrammetry-photogrammetric Measurement of Objects' Shape and Motion[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002: 152-153. [冯文灏. 近景摄影测量——物体外形与运动状态的摄影法测定[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 152-153.]