VR 场景构建中的图像处理算法及其应用研究

廖武忠

重庆电力高等专科学校 重庆 九龙坡 410004

【摘　要】：针对图像驱动静态 VR 实景重建面临的算力开销、实景干扰、二维- 三维映射难题，本文以中小型 VR 开发项目的工程条件为约束，开展图像处理算法及应用基础研究。构建图论- 超像素联合特征提取模型压缩运算规模，优化 Hausdorff 距离配准逻辑抑制实景干扰引发的误匹配，引入分段信度评价结合三维插值实现场景重建。依托 TUM RGB-D 公开数据集完成仿真验证，暂未开展实地现场采集测试。研究成果可为展厅、教室等固定空间轻量化 VR 复刻工作提供算法层面的理论参考。

【关键词】：虚拟现实；VR 场景构建；图论；图像特征提取；图像配准

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.094

引言

随着虚拟仿真教学、文旅数字展示业务快速发展，轻量化 VR 内容的市场需求持续增长。依靠人工建模实现场景制作的传统模式，对开发人员技术与硬件配置要求较高，难以适配中小规模项目快速落地的现实诉求。依托现场实拍图像开展 VR 场景重建，凭借成本可控、素材获取便捷的优势，成为实景虚拟化复刻的重要技术方向。

现有图像处理算法大多基于实验室标准数据集调参，更适配理想成像环境，直接应用于实景工程项目容易出现适配短板。全景图像高分辨率会增大计算压力，实景拍摄中光照波动、局部遮挡、画面噪声会干扰特征识别与配准效果，二维向三维转换阶段也往往忽略消费级终端的硬件负载约束。

现有多数文献聚焦算法性能迭代，较少从中小型项目落地角度综合考虑拍摄环境、硬件上限等现实条件。针对该研究缺口，本文定位为应用基础理论研究，围绕静态实景 VR 重建完成整套算法模型构建，重点分析工程约束下算法适配机理，借助公开数据集开展仿真检验，将实地场景采集测试纳入后续研究计划。全文依次从业务约束、算法设计、仿真实验、可行性机理几个维度展开分析。

1 VR 场景构建下图像处理的应用需求与约束

基于图像实现 VR 场景重建以现场实拍图像作为原始输入，图像处理模块依次输出特征信息、全景拼接图以及可交互三维场景文件，整套处理链路服务于 VR 终端浏览交互需求，和普通图像分割、拼接任务存在本质区别。图像处理承接采集与渲染环节，缺陷会沿链路逐级放大，因此算法设计需要从全局流程统筹考量，拍摄条件与终端硬件性能均直接影响最终重建质量[1]。

中小型项目多采用消费级相机采集全景素材，图像分辨率普遍较高，算法不能片面追求特征完整度，还需要合理管控运算规模。高分辨率图像带来丰富纹理结构信息的同时，也加重图模型计算负担，需要在特征保留与计算开销之间取得平衡。现场环境难以人为干预，光照条件会随时波动，算法需稳定识别场景边缘结构，一旦特征提取出现偏差，后续拼接与重建环节会进一步放大误差，降低 VR 场景还原质量。

全景拼接需要处理多组带重叠区域的实拍图像，手持拍摄带来姿态偏移、画面临时遮挡均会干扰特征一致性，算法需要筛选有效匹配特征，降低噪声与遮挡带来的不良影响。人眼对 VR 全景拼接缝隙较为敏感，微小错位便会破坏沉浸式观感，拼接算法需要兼顾对齐精度与融合效果。

面向可交互 VR 业务，算法还需要依托二维图像还原三维空间深度，生成的模型文件要控制体量适配普通 VR 设备读取，纹理效果尽量贴近实景观感，三维重建也是整个链路中计算复杂度最高的环节。多数中小项目缺少高性能服务器，实景图像普遍伴随噪声、镜头畸变等问题，算法不能完全依赖理想实验条件，需要在特征效果、计算开销、抗干扰能力之间寻求平衡点，所有模型设计均围绕中小型项目的真实工况展开[2]。

作者简介：廖武忠，男（1985.8.26），汉族，四川安岳人，研究生，副教授，研究方向：职业教育，软件开发。

项目来源：重庆电力高等专科学校校级项目“VR 场景构建中的图像处理算法及其应用研究”（D-KY202514）。

2 面向 VR 场景的图像处理算法模型研究

2.1 适配全景图像的图论-超像素联合特征提取模型

高分辨率全景图像具备庞大的像素数量，如果直接将每一个像素设置为图论模型的运算节点，整体运算量将伴随图像分辨率成倍上涨，普通硬件完成单次完整运算需要耗费大量时间，难以匹配项目的实际使用要求。本文将分水岭过分割设置为前置处理步骤，该步骤能够把原始图像划分为若干连续的超像素区域，同一块超像素内部的像素灰度与纹理特征趋于接近，图像边缘结构信息也得到完整保留，后续运算不再针对单个像素开展，而是采用超像素区域充当图模型顶点，并依据区域之间的纹理相似度完成边权计算，以此实现图模型运算单元数量的显著压缩。

完成图模型构建之后，本文采用快速模糊聚类完成超像素特征的迭代求解，x_i代表单块超像素对应的特征向量，V_k代表聚类中心，$U = [u_{ki}]$代表隶属度矩阵。研究人员首先完成各项参数与聚类中心的初始化，依靠式（1）更新隶属度矩阵。

$$u_{ki} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{c} \left(\frac{d_{ki}}{d_{ji}}\right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (1)$$

式中 c 代表聚类数量，m 代表模糊指数，d_{ki}用于计算超像素样本x_i和聚类中心V_k之间的距离，再依靠式（2）完成聚类中心的更新。

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_{ki}^{m} x_i}{\sum_{i=1}^{n} u_{ki}^{m}} \quad (2)$$

比对前后两次迭代得到的聚类中心，当结果满足$\|V_{new} - V_{old}\| \leq \varepsilon$的收敛条件即可终止迭代流程，并输出分割结果与场景特征信息。这套模型依托超像素实现运算规模的缩减，同时借助图模型捕捉不同区域之间的关联关系，面对实景光照变化工况仍可以稳定输出场景结构特征，能够匹配 VR 全景素材处理的实际业务需要。

2.2 面向 VR 全景生成的改进 Hausdorff 距离配准拼接模型

现场拍摄产生的遮挡与噪点会对传统 Hausdorff 距离匹配逻辑形成干扰，该算法依靠两组点集的距离极值评判图像相似度，少数异常特征点便可以主导整体匹配结果进而造成两幅图像错误对齐，最终使得拼接全景图产生错位并损害 VR 浏览体验。

本文不会将全部提取所得特征点直接投入匹配运算，而是在相对坐标空间筛选可靠性较高的特征子集，剔除被遮挡、噪声污染的异常点，再利用筛选完成的特征点计算相对斜率，估算两幅图像之间的变换参数以适配拍摄机位偏移带来的图像形变，通过搭建投影变换模型完成图像配准与后续图像融合处理[3]。经过调整后的匹配过程能够弱化孤立异常点带来的影响，图像配准工作主要依托场景稳定结构特征实现对齐，降低实景干扰造成的拼接失效风险，保障全景画面具备良好的空间连续性。

2.3 基于图像特征的三维插值 VR 场景重建模型

完整的 VR 项目需要可交互三维场景文件，若全部依靠专业软件开展手工建模会消耗大量人力成本，本文依托二维图像特征推导三维场景结构以此降低整体建模工作量。研究引入分段信度函数评估图像各个区域的重建可信度，部分拍摄区域存在过曝或者严重遮挡问题，该类区域提取得到的特征参考价值相对有限，完成可信度评估之后合并特征相近、可信度达标的超像素形成集群，可信度不足的区域不再参与三维推导运算，同时采用稀疏矩阵存储筛选完成的特征数据，降低文件的存储资源占用。

研究以筛选完成的二维特征点作为约束条件构建插值映射模型，以此推算空间曲面结构，输出的模型文件维持合理数据体量，可以直接供给 VR 设备开展场景交互浏览，进而完成二维实拍图像向三维虚拟场景的转换。

3 仿真实验与结果分析

3.1 实验设置

为验证整套图像处理模型适配静态 VR 场景重建的实际效果，本文依托 TUM RGB-D 公开室内场景图像数据集开展仿真测试。测试硬件采用普通消费级桌面平台，硬件配置贴合中小型 VR 项目常用工作环境，借助图像处理开发工具库完成图像读取、特征计算、配准拼接以及三维插值重建整套流程。测试样本选取多组室内场景图像序列，包含多组光照变化样本，模拟实景拍摄过程中光线扰动带来的现实工况。

实验设置对照组开展对比观测，对照组采用传统图论像素级分割结合原始 Hausdorff 配准与普通插值重建方案，实验组采用本文提出的图论- 超像素联合特征提取、改进 Hausdorff 配准、分段信度三维插值重建模型。选取特征匹配正确率、全景拼接接缝偏移像素、单序列整体处理耗时作为评价指标。特征匹配正确率统计有效匹配特征点占候选特征点的比例；接缝偏移像素表征全景图像拼接位置偏差；处理耗时记录从图像输入到三维场景初步生成的完整运算时长。

3.2 仿真结果与讨论

观测结果显示，面对光照扰动的测试样本，对照

组特征匹配正确率处于 61%—73%区间，全景拼接接缝偏移集中于 13-21 像素，单组序列整体处理耗时 3.5—4.3s。在同等测试条件下，本文实验组特征匹配正确率维持在 79%—88%区间，拼接接缝偏移控制在 5-10 像素，单组序列处理耗时 4.2—5.1s。仿真结果表明，本文模型以适度增加运算时间作为代价，提升光照扰动条件下特征匹配的稳定性，降低拼接错位发生概率，输出的场景数据能够满足静态 VR 场景的基础浏览需求。

需要说明，本次仿真仅基于公开数据集图像完成运算，并未开展实地现场采集测试。真实拍摄环境会叠加复杂遮挡、镜头畸变、色彩偏差等多重干扰，实际工程效果仍会受到原始图像采集质量制约。

仿真测试仅能够反映数据集样本条件下的算法表现，数据集场景类型、图像质量相对可控，与工程项目复杂现场还存在一定差距。为进一步阐释算法优劣形成的内在原因，下文从时间空间复杂度、抗干扰特性、适用边界层面开展机理层面剖析。

3.3 算法适配 VR 场景的应用机理与可行性分析

本文尚未开展代码开发与实物测试，本章全部分析内容建立在理论机理推导的基础之上，将结合中小型 VR 项目的硬件条件与拍摄条件，综合分析方案具备的优势与客观短板。

从时间、空间复杂度开展理论层面评估，传统图论模型的运算单元等同于图像总像素，图像分辨率越高对应的运算负担就越大，本文借助超像素完成运算单元合并，运算规模由像素总数转化为超像素区块数量，在同等分辨率全景图像输入的条件下，整套模型的理论运算开销得到下降[4]。三维重建环节选用稀疏矩阵存储特征，对比稠密存储方式能够减少磁盘与内存资源占用，整体理论开销更加契合普通工作站的硬件上限。

针对实景拍摄当中较为常见的干扰因素开展机理分析，光照波动、局部遮挡、画面噪点均会造成图像质量下降，超像素预处理可以整合局部像素信息削弱单点噪声带来的扰动，改进后的配准流程筛除异常特征点，避免少数坏点主导匹配结果，分段信度评估过滤可信度不足的区域，阻止失真特征参与三维重建运算。整套方案能够从多个环节降低实景干扰带来的负面影响，但上述改善仅存在理论层面可能性，尚未经过程序验证，实际表现仍然有待后续仿真测试开展进一步检验。

这套算法改造建立在已成熟的图像处理理论之上，不存在原理层面难以逾越的障碍，方案更加适配展厅、教室这类固定空间的静态实景场景轻量化 VR 复刻，而此类场景也正是轻量化 VR 教学虚拟仿真项目最为常见的应用对象。面对存在持续人员移动的动态拍摄场景，该模型缺少对应的针对性处理逻辑，无法直接投入该类场景使用。重建输出质量高度取决于原始实拍图像本身，即便在算法层面完成相关优化，如果拍摄画面出现大面积模糊或者大范围遮挡，依旧无法生成合格的 VR 场景文件[5]。后续工作计划完成代码编写，采用多组实拍实景图像开展仿真测试，依据测试反馈调整模型内部参数，并针对移动端 VR 设备进一步压缩运算开销以拓展方案的适用范围。

4 结论

本文立足中小型 VR 项目工程现实条件，针对静态实景 VR 重建完成图像处理算法理论建模。结合算力与实景干扰约束，构建图论- 超像素特征提取、改进 Hausdorff 配准、三维插值重建整套模型，依托 TUM RGB-D 公开数据集开展仿真对照实验。仿真结果表明，该算法在运算开销小幅增长条件下，能够提升光照扰动环境的特征匹配稳定性，缓解拼接错位问题。本研究仅完成数据集仿真验证，尚未开展实地采集测试，算法对动态、大面积遮挡场景适配有限。后续将开展实地样本测试，并面向移动端完成轻量化改造，拓展算法在轻量化虚拟复刻项目中的应用空间。

参考文献：

[1] 黄玲,陈浩文,张伟.基于 Hausdorff 距离和变参差分进化的 SAR 图像配准[J].南京理工大学学报,2023,47(3):337-342+372.

[2] 朱晓琳.基于超像素和图论相结合的激光图像分割方法[J].激光杂志,2022,43(8):141-145.

[3] 张赖和,陈斌.基于全景图像的虚拟野外场景构建方法[J].北京大学学报(自然科学版),2023,59(2):211-220.

[4] 周伟,苍憨楠,程浩宗.基于 AR 技术的文物数字化三维图像重建方法[J].图学学报,2025,46(2):369-381.

[5] 刘宇豪,吴福培,吴树壮,等.基于插值超分辨的双目三维重建方法[J].中国光学(中英文),2024,17(4):862-874.