引文格式：王彦良,张长杰,杜鹏超,等. 沉浸式视角下地质陈列馆全息复刻与展品数字化研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(9): 80-83. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2024.09.017

沉浸式视角下地质陈列馆全息复刻与展品数字化研究

王彦良[1]，张长杰[1]，杜鹏超[1]，陈富强[1*]，刘艳华[1]，李亚冬[1]，宋会传[1]
（1. 河南省地质局矿产资源勘查中心，河南 郑州 450006）

摘　要：随着各类展馆越来越重视公众的体验感受，线下展馆线上展示的需求逐渐增多。为实现沉浸式视角下地质陈列馆低成本线下展馆线上表达，提出了一种视觉SLAM全息复刻场景，嵌入三维数字化展品模型，应用WebGL网页端部署的技术方案。从测绘科学的角度提出解决方案，应用测绘工程的技术流程实现了河南省地质文化陈列馆的低成本线上展示，并提供了虚拟导览和自主参观两种沉浸体验模式。研究结果可提高河南省地质行业社会宣传、科普教育、公众便捷访问的服务能力，为各类馆藏机构向多元化和多维度方向发展提供技术参考。

关键词：沉浸式；全息复刻；三维扫描；数字资源建设；VR
中图分类号：P235　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）09-0080-04

Holographic Reproduction and Digitization Exhibit of Geological Exhibition Hall from Immersive Perspective

WANG Yanliang[1], ZHANG Changjie[1], DU Pengchao[1], CHEN Fuqiang[1], LIU Yanhua[1], LI Yadong[1], SONG Huichuan[1]
(1. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: With various types of pavilions attaching importance to the public's experience, the demand for online representation of offline pavilions has increased. In order to realize the low-cost offline pavilion online representation of geological exhibition hall under the immersive perspective, we proposed a technical solution of visual SLAM holographic reproduction scene, embedding 3D digitzation exhibit model and applying WebGL publishing. Then, we realized the low-cost online representation of geological exhibition hall in Henan Province, and provided two immersive experience modes, such as virtual tour mode and autonomous visit mode. This study result can provide technical reference for various types of pavilions to develop in the direction of diversification and multi-dimensionality, and improve the service capability of social propaganda, science education and convenient public access of geological industry in Henan Province.

Key words: immersive, holographic replication, 3D scanning, digital resource construction, VR

随着科技的不断发展和创新，数字化技术在各个领域的应用越来越广泛。地质陈列馆作为一种重要的科普教育场所，展示着地球历史和地质演化的丰富内容；但传统的展品展示方式已难以满足人们对科技和文化的多元化需求[1-3]。线下展馆线上表达能提供更加多样化和互动化的体验[4]，增强公众对地质科学的认知和了解。沉浸式技术和全息技术已在一些博物馆得到应用。例如，德国海德堡自然历史博物馆采用VR技术创建了“海德堡时光隧道”，使观众可通过VR设备沉浸到一个虚拟的时空隧道中，体验地球历史上各个时期的地质变化[5-6]；美国纽约自然历史博物馆则利用全息投影技术展示了恐龙和其他化石动物的全息影像，使观众可以近距离观察这些古生物的形态和结构[7-8]；中国安徽博物院通过信息化技术开发线上平台，用于保护安徽省老博物馆[9]；山东大学考古博物馆采用虚拟现实技术实现了文物展示和场景漫游[10]；刘厚泉[11]等采用Photoshop和3ds Max纹理粘贴技术研发了分布式虚拟现实奥运博物馆。虽然沉浸式线下展馆线上表达已被广泛应用，但在数量和质量上，距离沉浸式体验还有不小差距[12]。究其原因，沉浸式线下展馆线上表达需要先进技术和大量人力支持，包括数字化设备、软件和技术人员等多学科交叉，需要投入大量的资金和精力。

为探索一种低沉本、易操作的沉浸式线下展馆线上表达方案，本文从测绘角度提出了一种视觉SLAM全息复刻框架，通过嵌入结构光三维扫描、应用GIS

收稿日期：2023-07-12。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41671507、U1810203）；河南省青年骨干教师资助项目（2019GGJS059）。
第一作者简介：王彦良（1982—），硕士，高级工程师，研究方向为实景三维建设，E-mail：94661608@qq.com。
通信作者：陈富强（1980—），硕士，高级工程师，研究方向为工程测量和实景三维建设，E-mail：58287247@qq.com。

手段发布的技术方案，研究河南省地质文化陈列馆低成本线上展示方案。

1　技术原理与方法

1.1　技术路线设计

以全息复刻的地质陈列馆三维地图为数据基础，对地质陈列馆中的展品进行三维数字化，采用VR技术实现沉浸式视角下地质陈列馆漫游。首先在任意点位利用设备采集图像，并融合视觉SLAM中的SVO算法构建该点位的三维地图，继续移动相机，重复上述步骤，获得地质陈列馆三维地图；然后采用三维扫描仪对展品进行数据采集，经点云封装、纹理映射、高清贴图等一系列处理，获得展品三维模型；再以地质陈列馆三维地图和展品三维模型为沉浸式场景的底层数据，进入VR模式，将当前视角朝向的图像双目渲染并显示渲染后的图像，当访客移动或旋转时，头部追踪算法调整图像适应当前视角，重复渲染并显示图像；最后获得沉浸式视角下地质陈列馆浏览体验。

1.2　基于视觉SLAM的地质陈列馆全息复刻

视觉SLAM是一种利用相机和视觉信息实现同步定位和地图构建的技术，主要用于解决地质陈列馆的全息复刻，为沉浸式视角漫游提供无限贴近真实感受的数据基础。常用的视觉SLAM算法为特征点法和直接法，特征点法精度较高但速度较慢，直接法依据像素灰度值进行求解但可靠性较差。本文采用特征点法与直接法相结合的SVO算法[13]，跟踪关键点但不计算描述子，根据关键点周围的小图像块信息估计相机的运动位姿。算法流程见图1。

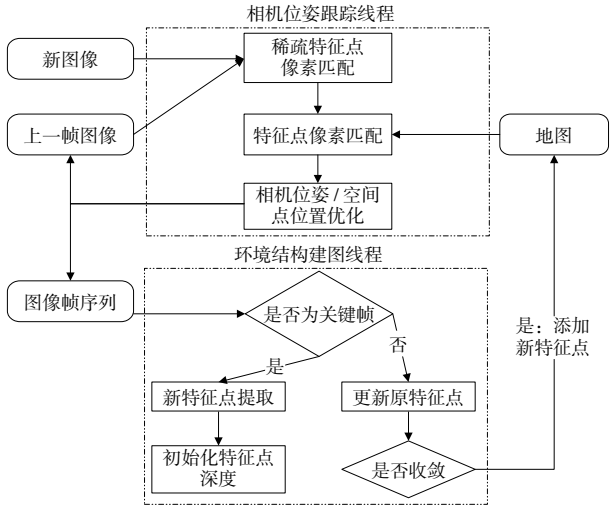


图1　SVO算法流程图

1.2.1　基于稀疏模型的图像对齐

本文采用直接法最小化图像块重投影残差来获取位姿，图2中 $T_{k,k-1}$ 为相机 $k-1$ 帧到 k 帧的位姿。利用相邻两帧图像中的特征点对，计算第 k 帧图像和第 $k-1$ 帧图像中特征点对（特征点周围4×4区域）的灰度差异，构建光度误差的优化函数[14]，即

$$T_{k,k-1}=\arg\min_{T_{k,k-1}}\frac{1}{2}\sum_{i\in R}\left\|\delta I\left(T_{k,k-1},u_i\right)\right\|^2 \tag{1}$$

$$\delta I(T,u)=I_K(\pi(\boldsymbol{T}\times\pi^{-1}(u,d_u)))-I_{k-1}(u) \tag{2}$$

式中，$u=(u,v)^2$；d_u 为点的深度；$\pi(\cdot)$ 为相机投影模型函数；$\pi^{-1}(\cdot)$ 为逆投影函数；I_k 为 k 帧时刻的图像灰度。

首先根据 $k-1$ 帧图像的位置和深度逆投影到三维空间，即 $\pi^{-1}(u,d_u)$；再将三维坐标点旋转平移到 k 帧坐标系下，即 $\boldsymbol{T}\times\pi^{-1}(u,d_u)$；最后将三维坐标点投影回 k 帧图像坐标，优化变量为相机的变换矩阵 $\boldsymbol{T}$。

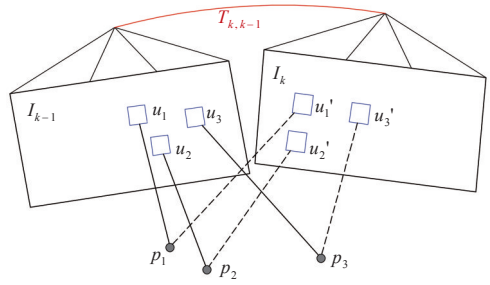


图2　基于稀疏模型的图像对齐示意图

1.2.2　基于特征对齐的松弛

相机相对位姿 $T_{k,k-1}$ 定义了新图像中可见三维点的特征点位置，为减少三维点位置粗差带来的漂移，通过光流跟踪优化特征点位置。对于每个当前帧捕捉的地图点 p（深度已收敛），u_i 为角度最小关键帧 r 上的对应点，基于光度不变性假设，重新构造当前帧与关键帧同一图像块的光度误差，即

$$u_i'=\arg\min_{u_i'}\frac{1}{2}\left\|I_k(u_i')-A_i\times I_r(u_i)\right\|^2 \tag{3}$$

式中，A_i 为仿射变换；u_i' 为优化变量。

1.2.3　位姿和结构优化

像素位置优化后，再次优化空间三维点和相机位置，构建像素重投影误差的优化函数，则有：

$$T_{k,w}=\arg\min_{T_{k,w}}\frac{1}{2}\sum_i\left\|u_i-\pi(T_{k,w}\times P_i)\right\|^2 \tag{4}$$

式中，P 为空间三维点。

1.2.4　环境结构建图

SVO算法采用概率模型计算特征点的深度[15]，即高斯分布加上一个设定在最小与最大深度之间的均匀分布，则有：

$$P(\tilde{d}_i^k|d_i,\rho_i)=\rho_i N(\tilde{d}_i^k|d_i,\tau_i^2)+(1-\rho_i)\mathrm{U}(\tilde{d}_i^k|d_i^{\min},d_i^{\max}) \tag{5}$$

式中，ρ_i 为概率内点；τ_i^2 为测量方差；$\tilde{d}_i^k$ 为三角化得到的深度。

1.3　基于SVF技术的展品三维数字化

SVF技术[16]是三维重建的关键，通过投射具有一定

结构的光斑或条纹形成纹理，以确定被扫描物体表面的三维坐标，主要用来获取展品的点云数据。物体表面上某一点投射的光斑或条纹在二维图像中的坐标为 (u,v)，其对应的三维坐标为 (X,Y,Z)，二者的关系为：

$$\frac{X}{Z}=\frac{u-c_x}{f},\ \frac{Y}{Z}=\frac{v-c_y}{f} \tag{6}$$

式中，c_x、c_y 分别为相机光学中心在二维图像中的坐标；f 为相机焦距。

物体表面另外一点所在二维图像坐标 $(u+\Delta u,v+\Delta v)$ 与对应的三维坐标 $(X+\Delta X,Y+\Delta Y,Z+\Delta Z)$ 的关系式为：

$$\frac{X+\Delta X}{Z+\Delta Z}=\frac{u+\Delta u-c_x}{f},\ \frac{Y+\Delta Y}{Z+\Delta Z}=\frac{v+\Delta v-c_y}{f} \tag{7}$$

将式（6）与式（7）相减可得：

$$\Delta X\approx\frac{z}{f}\Delta u,\ \Delta Y\approx\frac{z}{f}\Delta v,\ \Delta Z\approx-\frac{z^2}{f}\left(\frac{\Delta u}{u}+\frac{\Delta v}{v}\right) \tag{8}$$

根据像素点 (u,v) 与其周围像素点 $(u+\Delta u,v+\Delta v)$ 的变化关系，可由图像中像素点的位置变化计算得到物体表面任意一点的三维坐标，从而获取物体的点云数据。

1.4 沉浸式漫游的VR技术

VR[17]技术通过计算机生成的三维图形来模拟真实世界的双视角图像环境和交互，分为显示、成像、头部追踪3项内容，用来设置地质陈列馆中的沉浸式视角。采用双目渲染的方式将数据渲染成双视角图像，分别呈现给双眼，以增加立体感和真实感。双视角图像显示对视场角具有较大的约束，视场角的表达式为：

$$\mathrm{FOV}=2\times\tan^{-1}(d/2f) \tag{9}$$

式中，d 为显示设备的对角线长度；f 为显示设备到VR设备的距离。

成像的关键取决于VR设备的瞳距，最佳瞳距应满足式（10）：

$$PD=2|s-e| \tag{10}$$

式中，s 为双眼距离；e 为鼻梁到VR设备中心位置的距离。

头部追踪即VR设备根据访客头部姿态和运动的传感器数据，实时调整显示和成像视角的技术。访客头部姿态和运动数据 q 可表示为四元数模型：

$$q=w+x_i+y_j+z_k \tag{11}$$

$$i^2=j^2=k^2=i\times j\times k=-1 \tag{12}$$

式中，w 为 q 的实部；x、y、z 分别为 q 的虚部；i、j、k 分别为 x、y、z 对应的虚数单位。

四元数模型很好地避免了传统算法带来的欧拉角奇异性和万向节死锁的问题，提高了场景与头部运动的同步率。VR设备重复图像显示、成像与头部追踪线程，从而实现沉浸式视角。

2 数字地质陈列馆应用案例

2.1 河南省地质陈列馆概况

河南省地质文化陈列馆是河南省地质局建设的地质类主题展馆，坐落于河南省郑州市郑东新区商鼎路70号；分为地质历史、地质河南、地质成果、地质科技4个板块，整个地质文化长廊呈回字形布局，除展板、多媒体资料、地质工具外，还陈列了具有地质特色的岩矿标本。陈列馆不仅展现了河南省地质文化，还是河南省地质知识科普基地，更是河南地质系统对外展示的窗口，因此陈列馆全息复刻与展品数字化研究具有重要的宣传意义。

2.2 陈列馆全息复刻

陈列馆全息复刻采用双目相机视觉SLAM重建技术。采集路线遵从先控制后碎部的原则，即在相邻采集点位具有足够特征重叠度的条件下，满足起始点位与最终点位的闭环。对于场景中的分叉路口，利用回环检测将分叉点位与衔接点位全局约束，将分叉部分地图归算到全局地图中，最终实现全息复刻。依据视觉SLAM回环检测原则，陈列馆采用回形路线与蛇形路线相结合的采集方式，实际采集点位见图3，全部采集完成后的全息三维地图见图4。



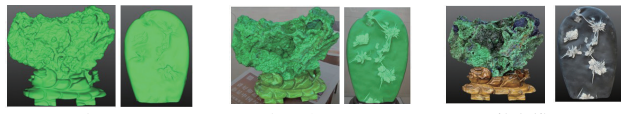
图3 实际采集点位分布



图4 全息复刻陈列馆三维结构模型

2.3 展品三维数字化

展品数字化采用结构光三维扫描技术，主要分为点云扫描、纹理拍摄和纹理映射3个步骤。首先利用结构光扫描仪扫描展品的不同姿态并同步纹理数据采集，经过去噪、曲率计算、破洞填充、拼接等处理，将点云数据封装为展品的网格模型；然后运用贴近摄影测量技术获取展品的高清纹理，经过特征提取与匹配、畸变处理、光束法平差获得高清纹理的三维空间坐标；最后建立网格模型与高清纹理数据的对应关系，完成纹理的精准映射，获得展品三维数字模型（图5）。



点云　点云纹理配准　数字模型

图5 展品数字化模型

2.4 陈列馆沉浸体验

完成场馆全息复刻和展品数字化后，在虚拟引擎的基础上自主研发陈列馆展示平台。平台包括三维模

型展示、场景漫游、VR体验、属性查询、展品简介等功能。利用WebGL技术将平台部署成网页端，为HTML5 Canvas提供硬件三维渲染，访客可在远端沉浸式参观河南省地质陈列馆。体验模式包括虚拟导览和自主参观两种。

1）虚拟导览模式体验。网页端数字陈列馆是面向公众免费开放的网上陈列馆，目前已部署在河南省地质局官方网站。设计符合多终端展示的需求，网络形式采用普通互联网，网络带宽为100 MB，帧率为60 FPS，PC端使用Google Chrom、Microsoft Edge、360等主流浏览器，访问网址http://hnbd.net:8807/spc.html?m=KJ-HIkLubdc5G，即可跟随设计者预先设定路线和镜头方向，在裸眼视角下访问高分辨率陈列馆三维场景（图6），画面渲染质量还原度高。

2）自主参观模式体验。访客通过轻量级网页浏览器、PAD或手机移动端访问上述网址时，可佩戴VR眼镜进入VR模式；通过触摸屏幕控制路线和方向，从任意角度走进陈列馆，在VR视角下细看展品，并可触碰展品文字简介、音视频介绍等二级界面，以获取更加真实的沉浸式浏览体验。Android手机VR视角下陈列馆浏览场景见图7。

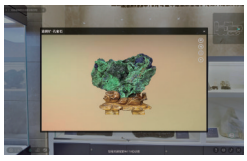


图6　裸眼视角下陈列馆浏览场景



图7　VR模式下陈列馆浏览场景示意图

3　结　语

本文研究了河南省地质陈列馆的虚拟化云展馆技术，利用视觉SLAM技术和结构光三维扫描技术实现了馆体的全息复刻和展品数字化；采用WebGL技术和C++语言自主研发陈列馆展示平台，并实现了网页端部署。

1）本文提出的视觉SLAM—结构光三维扫描—云展馆技术方案，完成了河南省地质陈列馆的全息复刻和展品数字化，实现了线下陈列馆的线上表达。相较于单张全景图片浏览方式，VR虚拟化技术的云展馆具有更立体、更流畅、更真实的体验感。

2）本文采用测绘工程的工作思路和技术方案完成了线下陈列馆的线上表达，可为地质和其他行业馆藏机构提供新的技术思路和经验分享，以提高地质行业社会宣传、科普教育的服务能力。

3）未来将加强云渲染技术的研究，以降低计算和渲染访客设备硬件性能的要求，保证虚拟场景的流畅性和体验感。当前网络环境下GPU和带宽受限，影响了云展馆的应用深度和广度，未来将引入5G、数字孪生等技术，可在线下展馆线上表达应用中发挥更大的作用。

参考文献

[1] 周瑞. 云端博物馆，触摸历史的记忆:陕西数字博物馆全媒体平台建设[J]. 东南文化，2021(增刊2):103-106

[2] 吴泳，黄天勇，闻平. 基于Cesium的虚拟旅游系统研究[J]. 地理空间信息，2021，19(11):155-157

[3] 吴红波，张瑞君，杜玉龙，等. 基于MapGIS和SketchUp的景区古建筑三维虚拟场景实现[J]. 地理空间信息，2020，18(9):52-56

[4] 金晓明，吴成浩. 基于VR/AR实感交互设计的八大山人纪念馆视觉导览研究[J]. 包装工程，2019，40(6):87-93

[5] Shehade M，Stylianou-Lambert T. Virtual Reality in Museums: Exploring the Experiences of Museum Professionals[J]. Applied Sciences，2020，10(11):4 031

[6] Hooper-Greenhill E. Museum，Media，Message[M]. Routledge，2013

[7] Caggianese G，Gallo L，Neroni P. Evaluation of Spatial Interaction Techniques for Virtual Heritage Applications: A Case Study of an Interactive Holographic Projection[J]. Future Generation Computer Systems，2018，81:516-527

[8] Pagano A，Pietroni E，Ferdani D，et al. User Experience (UX) Evaluation for MR Cultural Applications: The CEMEC Holographic Showcases in European Museums[J]. Applied System Innovation，2021，4(4):92

[9] 刘婷婷. 安徽博物院(老馆)数字化保护研究[J]. 东南文化，2021(增刊2):97-101

[10] 向辉，孟祥旭，杨承磊. 山东大学考古数字博物馆设计与实现[J]. 系统仿真学报，2003，15(3):319-321

[11] 刘厚泉，李忠福，袁海波，等. 虚拟奥运博物馆中的场景建模[J]. 系统仿真学报，2008，20(增刊1):288-290

[12] 林立. 元宇宙图书馆3D/VR资源建设与服务:以美国图书馆3D/VR资源服务项目为例[J]. 图书馆论坛，2023，43(6):124-132

[13] 朱晨昊. 基于SINS/单目视觉/激光雷达组合定位方法研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)，2022

[14] Forster C，Pizzoli M，Scaramuzza D. SVO: Fast Semi-direct Monocular Visual Odometry[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation，Piscataway，2014:15-22

[15] Forster C，Zhang Z，Gassner M，et al. SVO: Semidirect Visual Odometry for Monocular and Multicamera Systems[J]. IEEE Transactions on Robotics，2017，33(2):249-265

[16] 冯叶涵. 基于百度街景的SVF计算方法及其在城市热岛研究中的应用:以上海市为例[D]. 上海:华东师范大学，2022

[17] 肖建业. 基于广义立方体投影的360 VR视频编码算法研究[D]. 上海:华东师范大学，2021