

DOI:10.16136/j.joel.2023.03.0148

基于三维重建的虚拟现实类鸟飞行系统

缪长蔚, 陈 铭, 张淑芳*, 张 涛

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 随着虚拟现实(virtual reality, VR)技术的飞速发展,各种应用层出不穷。然而目前大多应用仅限于定点的静态全景展示及游览,无法利用VR化不可能为可能的优越性。本文提出了一种融合VR技术与三维重建算法的类鸟飞行交互模拟系统。该系统搭建了结构稳定的硬件控制平台用以改变实际姿态,同时通过软件仿真了虚拟环境中鸟类的飞行,结合硬件驱动及软件模拟实现了深层次的飞行模拟。现有的虚拟环境大多通过人工建模、激光扫描仪或无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)航拍构造,其中建模存在费时费力的缺点,激光扫描仪则无法适应大规模重建,而UAV成本高且需专业培训。本文引入了基于图像分簇的PMVS(patch based multi-view stereopsis)算法,只需输入特定场景的图片即可利用计算机自动恢复出三维结构,不仅快速而且可对任意场景重构。使用户在足不出户的情况下即可在世界各地体验飞行,为旅游事业及VR产业提供了一种新的可能。

关键词: 计算机仿真; 虚拟现实(VR); 运动恢复结构(SFM); 多视图立体; 软硬件平台开发

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)03-0268-10

Virtual reality bird like flight system based on 3D reconstruction

MIAO Changwei, CHEN Ming, ZHANG Shufang*, ZHANG Tao

(School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the rapid development of virtual reality (VR) technology, various applications emerge. However, the current applications can not make full use of the advantages of VR, and are mostly limited to fixed-point static panoramic display and tour. Therefore, this paper proposes a bird like flight interactive simulation system which integrates VR technology and 3D reconstruction algorithm. The system builds a hardware control platform with stable structure to change the actual posture, and at the same time the bird flight in the virtual environment is simulated by software, thus a deep flight simulation combined hardware driving and software simulation is realized. Most of the existing virtual environments are constructed by artificial modeling, laser scanning or unmanned aerial vehicle (UAV) aerial photography. The artificial modeling is time-consuming and laborious, the laser scanner can not adapt to large-scale reconstruction, and the UAV needs professional training. This paper introduces the patch based multi-view stereopsis (PMVS) algorithm based on image clustering, which can automatically restore the three-dimensional structure. By inputting a specific set of images, the algorithm can reconstruct any scene quickly. Users can experience to fly around the world without leaving home, which provides a new possibility for tourism and VR industry.

Key words: computer simulation; virtual reality (VR); structure-from-motion (SFM); multi view stereo; software and hardware development platform

0 引 言

虚拟现实(virtual reality, VR)作为一项新兴技术自提出以来,在场景展览、军事演练、文物保

护、医学模拟、航空航天等领域发挥着越来越重要的作用。它在多维信息空间上创建一个虚拟信息环境,使用户具有身临其境的沉浸感^[1],同时它具有完善的与环境交互的能力,有助于启发构思^[2]。

* E-mail: shufangzhang@tju.edu.cn

收稿日期: 2022-03-10 修订日期: 2022-06-06

基金项目: 天津大学自主创新基金资助项目

创建这个虚拟环境的过程就是三维建模的过程,常见的建模手段包括人工软件建模、激光扫描仪重构、无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)航拍建模以及多视图立体算法建模。

由于信息技术的高速发展,人们对于 VR 应用的需求不再局限于简单的定点全景展示以及仿真模拟,而更想借助 VR 实现许多原本想做却又较难实现的事情,这很大程度上依赖虚拟场景的构建。吴涛等^[3]通过 UAV 航拍建模并结合图像拼接及后期处理重建了校园虚拟现实全景,完成了扬州大学校园漫游导航系统。王志伟等^[4]基于 VR,选取了三自由度的运动平台,设计与研制了一种滑雪模拟器。李明^[5]和金若梅^[6]分别采用 3dsMax 和 Unity3D 进行建模和渲染,并结合汽车动力学引擎设计了基于 VR 的汽车模拟驾驶系统。贺静静^[7]和 CAKIROGLU^[8]利用虚拟现实以及建模技术分别设计了地震紧急疏散演练模拟系统以及公共建筑火灾人员逃生训练系统,有利提高民众防范重大灾害技能水平。JIANG^[9]基于 FPGA 和 VR 技术进行了游泳技术训练三维仿真研究。

由此可见,VR 结合建模技术产生的模拟系统已十分广泛,但由于硬件的制约及技术的瓶颈,仍存在许多问题。首先,大部分 VR 应用只有虚拟环境中的平面静态展示和游览;其次,特定场景的人工软件建模极大地浪费时间且缺乏真实性,激光扫描仪不适应大场景重构,且由于结构光易受环境光影响导致室外效果差^[10],而 UAV 航拍又存在成本高昂以及要求专业技术的问题;第三,受限于各种外接设备,包括手柄在内的控制设备极大地降低了用户的沉浸式体验;最后,大量的 VR 模拟系统仅存在软件仿真,没有真正的交互体验控制台。

针对上述问题,本文设计了一套基于三维重建技术的 VR 类鸟飞行系统。首先,本文在虚拟

环境中引入了高度的变化,体验者通过类鸟飞行系统可以实现随心所欲的飞行;其次,采用了多视图立体重建算法,利用三维点云完成 VR 中真实场景的建模^[11],只需输入场景的 2D 图片即可还原出 3D 场景,高度自动化;第三,采用六轴陀螺仪替代了传统的 VR 手柄,通过传感器读取数据到硬件电路解析数据再到上位机软件处理数据,实现用双手控制飞行的体感效果;最后,本文完成了机械结构设计,底层硬件搭建以及上位机软件开发的整个流程,并成功研制出了一套经大量测试的 VR 类鸟飞行系统。具体来说,本文基于 Unity 平台编写了 C# 脚本实现陀螺仪数据到 VR 场景视角运动的映射及坐标变换,通过挥动双手模拟了鸟类扇动翅膀,达到类似体感飞行的效果。同时,改变的姿态信息经过硬件电路驱动电缸在上下自由度的运动,在视角变换的同时能得到实际身体运动的反馈。用户只需躺在体验台上,挥动双手,即可在虚拟环境中体验飞行。其中,挥动双手使陀螺仪数据变动,作为系统输入的姿态信息,而虚拟环境则是通过三维重建算法自动重构的。

1 基本原理

1.1 整体系统框架

本文基于 VR 技术并结合三维重建算法设计并研制了一套鸟类飞翔模拟系统,系统整体框架如图 1 所示。传感器进行数据采集,将六轴加速度数据经控制板进行姿态解算后分为两路,一路通过上位机进行姿态估计,而后通过 Unity 平台编写的 C# 脚本完成视角的坐标变换。另一路通过主控板的硬件电路驱动底层 24 V 直流电缸的升降,反馈飞行姿态的变化。结合 Unity 平台的其他功能控制脚本、外设及名为 SteamVR 的 SDK(software development Kit),构成了如图 1 的基本 VR 飞行模拟系统,具体软硬件设计见 1.2 节。

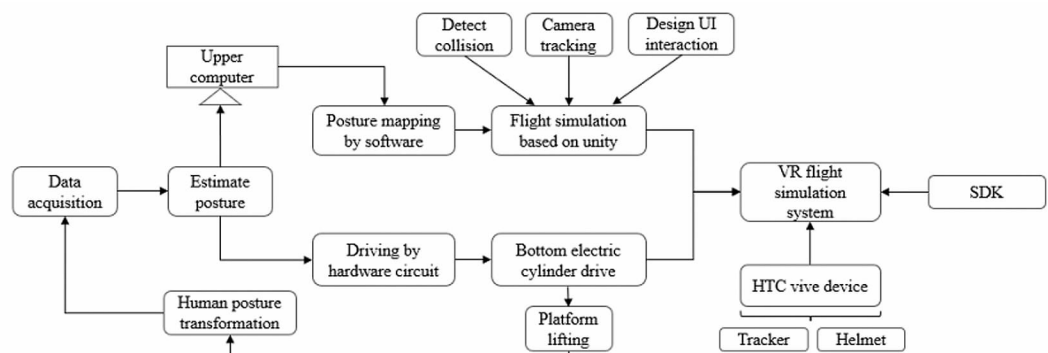


图 1 软硬件平台框架

Fig. 1 Software and hardware platform framework

图 2 是三维重建的过程。输入一组实际场景的图片,要求其两两图片间存在一定数量的共视点,通过特征匹配并细化后得到较为精准的图像匹配对,至运动恢复结构(structure-from-motion, SFM)框架中进行稀疏点云重建,经光束法平差不断迭代得到置信度较高的稀疏特征点及对应视图间相机的位姿。为了实际算法的可扩展性并考虑到大规模输

入,本文在稠密点云重建之前引入对图像聚类分簇的过程,将其分解成可并行处理的子集,分别进行基于面片的稠密重建,再进行点云融合得到稠密点云。最后通过网格生成及纹理映射等后处理得到效果较为良好的三维重建场景,并将其输入 VR 飞行模拟系统,构建了无需人工建模的场景自生成 VR 系统。

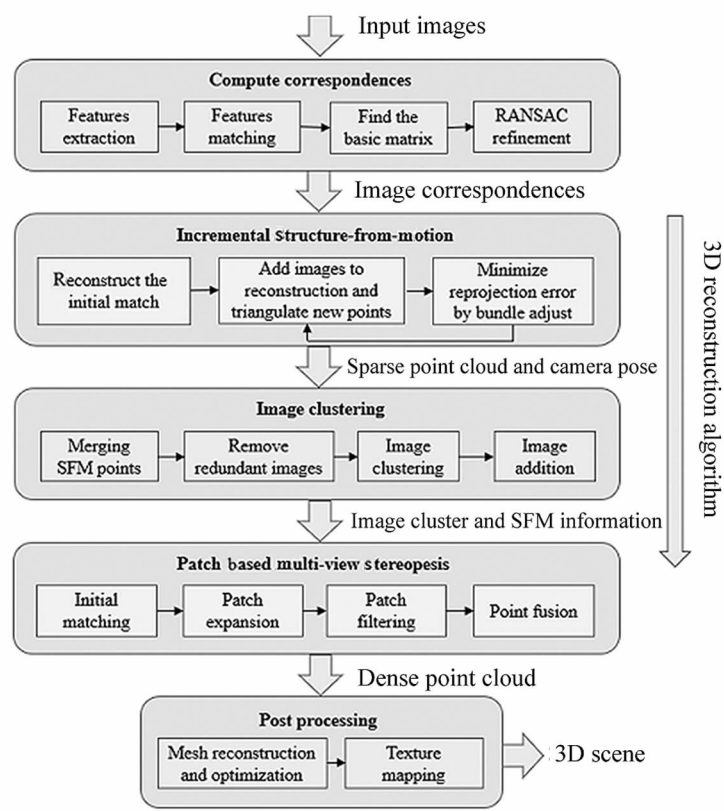


图 2 重建算法

Fig. 2 Reconstruction algorithm

1.2 软硬件平台设计

1.2.1 硬件控制及驱动系统

本文设计的系统底层硬件电路如图 3 所示,使用 32 位单片机 STM32F103ZET6 作为主控板,并将六轴传感器 mpu6050 与 Arduino Uno 集成为一个数据读取与预处理模块,左右两侧均自布放该模块读取双手姿态信息。该模块实时采集变化的六轴传感器数据,利用 Arduino Uno 对其进行预处理和姿态估计,通过与主控板交叉连接的 TXD 和 RXD 引脚将数据传输至主控板。主控板得到姿态信息后进一步进行姿态解算将抽象的角度数据对应到实际的电机运动方式上,从而驱动各直流电机的上下运动模拟飞行姿态。同时主控板将解读到的信息通过串口传输至上位机,用于后续 Unity 平台的软件开发。

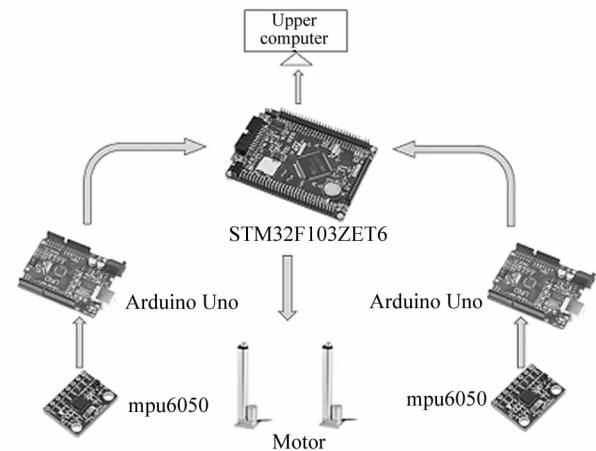


图 3 硬件控制及驱动

Fig. 3 Hardware control and driving

1.2.2 面向 Unity 3D 的 VR 仿真系统

本文基于 Unity 进行 VR 开发,首先通过 C# 脚本实现了 Unity 平台与底层硬件之间的串口通信,得到姿态信息后,将传感器数据对应的现实坐标系变换到 Unity 场景的相应坐标系,见图 4。规定两坐标以 x 轴对齐,记传感器对应实际坐标系为 x, y, z , Unity 坐标系为 U_x, U_y, U_z , 转换关系见式(1):

$$U_x = x, U_y = z, U_z = y. \quad (1)$$

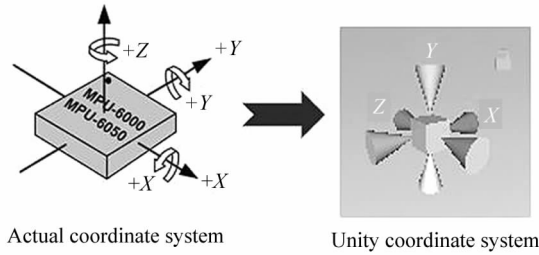


图 4 转换至 Unity 坐标

Fig. 4 Convert to Unity coordinate

完成转换后将鸟飞翔的一个动作分解为旋转和平移两个坐标变换过程,可记为作用一个旋转矩阵 R 以及加上一个平移向量 T 。对于人的视角 C 矩阵,有如下关系:

$$C_{n+1} = C_n R + T, \quad (2)$$

式中, C_{n+1} 表示 $n+1$ 时刻相机视角的 Unity 坐标。将读取到的姿态信息转化为对应的变换矩阵,通过式(2)实现了具体动作到相机变换的正确映射,模拟了飞行时的视角变换。

1.3 相机参数

多视角三维重建需要得到不同视角间相机的位姿关系,重建稀疏点云时也需要相机的投影矩阵,均涉及到图 5 所示的像素坐标系到图像坐标系,图像坐标系到相机坐标系及相机坐标系到世界坐标系的坐标变换关系,具体见式(3)—(5):

$$\begin{cases} u = \frac{x}{dx} + u_0 \\ v = \frac{y}{dy} + v_0 \end{cases} \rightarrow \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式(3)—(5)分别给出了像素坐标 (u, v) 到图像坐标 (x, y) , 图像坐标 (x, y) 到相机坐标 (X_c, Y_c, Z_c) , 相机坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 到世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 的齐次坐标变换关系,其中 dx, dy 分别指单像素在 u, v 轴方向的实际物理尺寸, u_0, v_0 指像素坐标系中心, f 指相机焦距, R, T 分别指世界坐标转换到相机坐标的 3×3 旋转矩阵及 3×1 平移向量。对上三式进行整合归纳出世界坐标到像素坐标的投影关系得到式(6)如下:

$$p' = K \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} P = K [R \ T] P = MP, \quad (6)$$

式中, p' 为 3×1 的齐次像素坐标, P 为 4×1 的齐次世界坐标, K 表示与上述相机参数 f, dx, dy, u_0, v_0 有关的内参矩阵,为 3×3 大小, M 表示从 P 到 p' 的投影矩阵,为 3×4 大小。式(6)表明了实际空间点到图像像素点的投影关系。

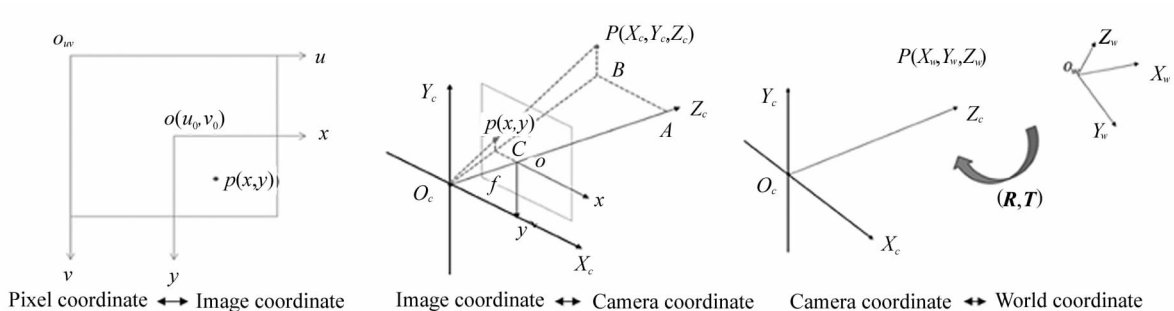


图 5 坐标变换关系

Fig. 5 Coordinate transformation relationship

1.4 稀疏重建

SFM 解决如何从多视图恢复稀疏点云结构的问题,不同于单视图缺失深度信息,多视图存在着不同视图间的对极约束,基础矩阵 $\mathbf{F}$ 描述了这一约束关系。若一个空间点在一个像平面上的像素坐标为 $\mathbf{p}$, 在另一个像面上的像素坐标为 $\mathbf{p}'$, 则有以下式:

$$\mathbf{p}'^T \mathbf{F} \mathbf{p} = 0, \quad (7)$$

式中, $\mathbf{F}$ 描述了两视图间的约束关系, 隐含了两相机间的位姿关系。求解 $\mathbf{F}$ 过程如下: 首先采用尺度不变特征变换 (scale-invariant feature transform, SIFT)^[12] 获取空间点在两视图中的匹配像素点, 再利用式 (7) 通过归一化八点法求解 $\mathbf{F}$, 最后经 RANSAC (random sample consensus) 算法迭代求得该条件下的最优基础矩阵。分解基础矩阵即可得到两视图间相机的位姿关系 $\mathbf{R}, \mathbf{T}$, 再通过式 (6) 得到投影矩阵 $\mathbf{M}$ 完成初始匹配的三角化 (即恢复出具有实际三维坐标的空间点)。而后进行增量式重建^[13], 具体过程如图 6 所示。

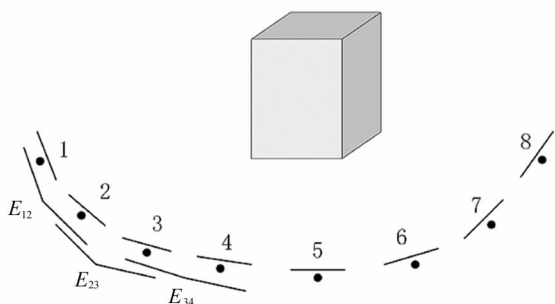


图 6 增量式 SFM

Fig. 6 Incremental structure-from-motion

将世界坐标系定在第一个相机坐标系的位置上, 可以获得世界坐标系下相机 2 到 1 的 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$, 从而得到投影矩阵 $\mathbf{P}_1$ 和 $\mathbf{P}_2$ 如下式:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_1 = \mathbf{K}[\mathbf{I} & \mathbf{0}] \\ \mathbf{P}_2 = \mathbf{K}[\mathbf{R} & \mathbf{T}] \end{cases} \quad (8)$$

经过三角化可以恢复相机 1、2 视角下图像特征点所对应的空间结构。增量式方法即在初始结构的基础上不断加入新的图像特征点三角化后的空间点, 这需要不断利用已恢复结构的信息以及图像间的共视观点。在恢复相机 2 和相机 3 视角下的特征点匹配时, 需要利用其与已恢复结构中的公共特征点, 已知其图像坐标及实际坐标通过式 (6) 可以得到这些公共点在相机 3 的投影矩阵 $\mathbf{M}$, 对其分解得到相机 3 的位姿信息 $\mathbf{R}, \mathbf{T}$ 。而后将所有特征点进行三角化添加至原有的空间结构中, 后续不断迭代即可。

增量法易出现误差累积, 在完成所有空间点的三角化后, 需要通过光束法平差最小化重投影误差^[14]。

特征点是不密集的, 通过 SFM 最后得到了稀疏的点云模型以及各相机之间的位姿关系, 后续本文采取了基于特征点生长的稠密点云重建算法。

1.5 图像聚类

考虑到非结构化图像输入及大规模重建, 本文在进行基于特征点的稠密重建前, 通过对图像聚类将其分为可以并行处理的重叠较小的簇^[15]。对图片集 $\{I_i\}$ 经 SFM 可得到各相机位姿及稀疏的空间点集合, 将点集合记为 $\{P_j\}$, 且每个点在对应为 $\{V_j\}$ 表示的一组图像中可见, 聚类算法要求每个稀疏的 SFM 点可以被至少一个簇精确重构, 图像分簇如图 7 所示。

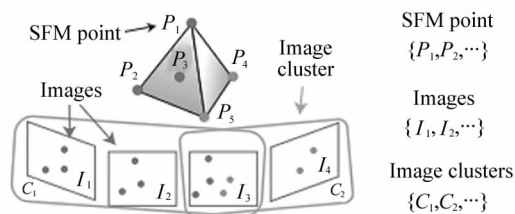


图 7 图像分簇

Fig. 7 Image clustering

图 7 中, 图像 I_1, I_2, I_3 中 SFM 特征点 P_1, P_2, P_3 可见, 将其划分为图像簇 C_1 , 图像 I_3, I_4 中 P_4, P_5 可见, 将其划分为 C_2 。将聚类问题公式化, 需满足下述三个约束。首先, 相比于直接处理所有图像, 分簇处理的内容和细节损失要最小, 即覆盖约束。同时, 每个簇要足够小以进行重构, 即为尺寸约束。最后, 分簇处理要在保持覆盖约束的前提下去除冗余图像。具体来说, 就是在最小化簇中图像总数的前提下保证图像集 $\{I_i\}$ 中特征点的覆盖率不低于阈值 δ (常设为 0.7), 且 $|C_k| \leq \alpha$ 对任意 k 成立, 其中 $|C_k|$ 为第 k 个簇中图像的数量。同时, 最小化的过程会导致冗余图像被丢弃, 满足了上述的三个约束, 公式总结如下:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \sum |C_k| \text{ while:} \\ & \begin{cases} \forall k, |C_k| \leq \alpha \\ \forall i, \frac{\text{covered points in } I_i}{\text{points in } I_i} \geq \delta \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

在此引入一个函数 $f(P, C)$ 来测量一组图像 C 在空间位置 P 上实现的预期重建精度。如果点 P 在所有图像簇集合 C_k 中的重建精度的最大值不低于 P

在其对应可视图片集 V 重建精度的 λ (设为 0.7) 倍, 则称该点被覆盖。

$$P \text{ is covered if } \max_k f(P, C_k \cap V) \geq \lambda f(P, V). \quad (10)$$

实际聚类过程分为四个步骤。第一步聚合 SFM 点, 从一组 SFM 点开始, 随机选择一个点与相邻点合并, 删除两点并输出新点, 新点空间位置取两点平均值且保持新点对原有两点的可视图像集的可见性。重复该过程直到输入集为空, 得到新点集 $\{P\}$ 。第二步去冗余图像, 按图像分辨率递增先后测试每个图像, 若删除后仍能保持覆盖约束, 则删去该图像。第三步进行簇分割以确保尺寸约束, 重复进行簇的划分以保证所有图像簇满足式(9)。由于这个过程忽略了覆盖约束, 所以第四步需要进行图像添加以保证覆盖。通过构建 action list, 每个 action 度量向图像簇添加一张图像对改善覆盖率的有效性。对每个 SFM 点 P , 创建一个 action $\{(I \rightarrow C_k), g\}$, 表示添加图像 $I(I \in V, I \notin C_k)$ 到 C_k 中, g 用来衡量添加图像后改善重建的有效性, 且定义为 $f(P, C_k \cup \{I\}) - f(P, C_k)$ 。对所有 action 打分并选取得分大于 0.7 倍最高得分的 action 加入 list, 执行其 action 添加图像, 添加后可能不满足尺寸约束, 重复第三, 第四步直到满足两个约束。整体算法见图 8。

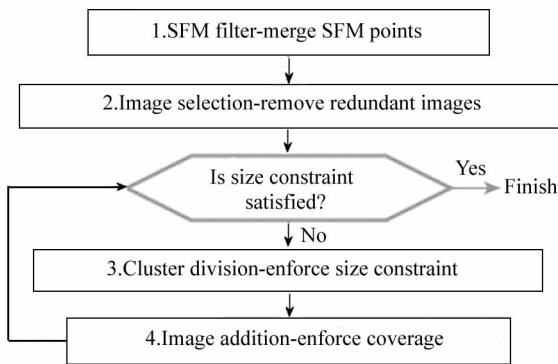


图 8 整体算法

Fig. 8 Overall algorithm

1.6 稠密重建

在图像分簇的基础上, 采取基于特征点生长的算法, 对每个图像簇进行稠密重建后融合点云即可得到整体稠密点云。PMVS (patch based multi-view stereopsis) 算法^[16]就是最为流行且准确度最好的算法之一。其中, 基本的面片模型如图 9 所示。

$C(p)$ 为面片中心, $n(p)$ 为指向对应面片 p 的相机光心的单位法向量, $R(p)$ 指对于一个面片 p 的参

考图像, $T(p)$ 指对面片 p 所有可见的图像集合, 需保证 $|T(p)| \geq \gamma$, γ 取为 3。 $S(p)$ 指本应可见的所有图像集, 包括了由于遮挡、高亮引起的不可见图像。图像模型如图 10 所示, 图像 I_i 分成了许多 $\beta \times \beta$ 像素的像素网格 $C_i(x, y)$, x, y 表示图像块的下标, i 表示第 i 张图像。给定一个面片 p 和对应的可视图像集 $T(p)$, 把 p 投影到 $T(p)$ 的图像中, 得到面片 p 对应的图像块, 不同颜色的点为不同面片在图像 I_i 上的投影。每个图像块 $C_i(x, y)$ 用一个集合 $Q_i(x, y)$ 记录了所有投影到这个图像块的面片, 并将面片 p 的深度信息存储在 $C_i(x, y)$ 中用于面片扩展时构造 $S(p)$ 。

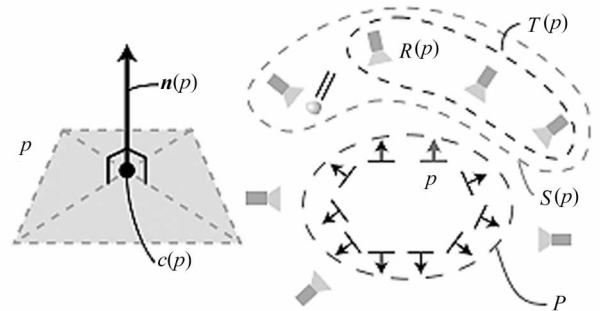


图 9 面片模型

Fig. 9 Patch model

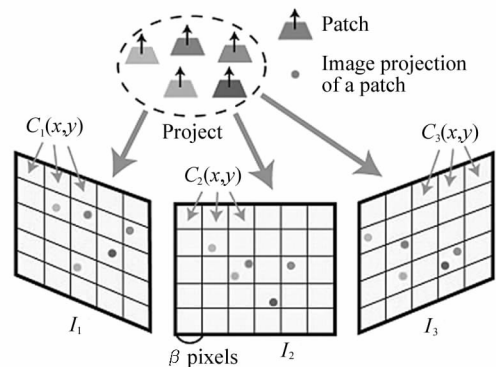


图 10 图像模型

Fig. 10 Image model

该算法以稀疏的特征点为初始匹配构造面片, 并通过面片的扩展以及过滤优化完成稠密化的过程, 整个过程需要满足光度一致性约束以及可见性一致约束。给定一个面片 p , 使用其投影在不同图像间的归一化互相关系数衡量光度一致性^[17], 具体如下:

$$h(p, I, J) = 1 - NCC(p, I, J). \quad (11)$$

通过双线性差值的方法, 对 p 在图像 I 和 J 上的投影进行差值, 得到像素灰度 $q(p, I)$ 及 $q(p, J)$, 计

算其两者的归一化互相关系数 $NCC(p, I, J)$, 并通过式(11)得到光度一致性的度量 $h(p, I, J)$ 。若已知其参考图像 $R(p)$ 及可视集 $T(p)$, 通过最大化未知参数的平均 NCC 得分即可估计 $c(p)$ 及 $n(p)$, 即最大化下式:

$$\bar{N}(p) = \frac{1}{T(p) - 1} \sum_{I \in T(p), I \neq R(p)} N(p, R(p), I). \quad (12)$$

而可见度一致性则表明每个面片 p 的可见性由 $S(p)$ 和 $T(p)$ 决定, 算法的初始匹配阶段, 面片 p 重建于稀疏的特征匹配对, 此时更关注光度一致性来确定可见度的初始猜测, 由下式初始化 $S(p)$ 及 $T(p)$:

$$S(p) = T(p) = \{I \mid N(p, R(p), I) > \alpha_0\}, \quad (13)$$

式中, α_0 为设定阈值。而在扩张阶段, 需要构造足够密集的面片将深度图与所有图像相关联, 并将这些深度图阈值化为每个面片构造 $S(p)$:

$$S(p) = \{I \mid d_I(p) \leq d_I(x, y) + \rho_1\}, \quad (14)$$

式中, ρ_1 由参考图像深度确定, $d_I(p)$ 指面片 p 中心沿着图像对应的深度, $d_I(x, y)$ 指记录在图像 I 中与面片 p 所对应的 $C(x, y)$ 的深度。确定完 $S(p)$ 后利用光度一致性构造 $T(p)$, 其中 α_1 初始为 0.7。

$$T(p) = \{I \in S(p) \mid N(p, R(p), I) > \alpha_1\}. \quad (15)$$

算法的具体操作如下, 首先进行初始化特征匹配及面片构造, 由于进行了上述 SFM 过程, 流程可简化。考虑一幅图像 I_i , 对任一特征点 f 在图片集中沿着对应极线的 $\tau = 2$ 像素邻域内寻求其匹配点 f' , 并将其所有匹配点集合记为 F 。通过前文已进行的稀疏点云重构可直接获取 (f, f') 的空间点坐标, 按其到光心距离先后将其考虑为面片中心 $c(p)$, 且令其到光心方向为面片法向量 $n(p)$ 构造面片 p , 返回其中至少在 γ 幅图像中保证光度一致性, 即满足 $|T(p)| \geq \gamma$ 的第一个面片。通过式(13)构造 $S(p)$ 及 $T(p)$, 并最大化式(12)优化面片 p 的参数。对所有图像的所有特征点进行操作即可为每个特征点构造面片。

而后进行面片扩张, 不断在现有的面片上添加新的邻居至覆盖可见表面。给定面片 p , 其对应图像块 $C(x, y)$ 中若记录面片 p' , 且 p 与 p' 为近邻, 即满足 $|(c(p) - c(p')) \cdot n(p)| + |(c(p) - c(p')) \cdot n(p')| < 2\rho_2$ 时, 删去面片 p' 无需扩展, 若不满足且 $C(x, y)$ 未记录任何面片, 则执行扩张过程。将面片

p 的相关参数赋给 $R(p')$ 、 $T(p')$ 、 $n(p')$, 并将通过 $C(x, y)$ 中心的射线与包含面片 p 平面的交点赋值给 $c(p')$, 按最大化式(12)优化面片, 其中 ρ_2 取决于图像在 $c(p)$ 和 $c(p')$ 的深度。

最后还需要执行面片过滤以保证可见一致性约束。第一步删除真实表面之外的面片以避免遮挡, 第二步滤除聚焦于真实表面内部的异常值, 如图 11 所示。最后执行一个弱正则化, 剔除掉相邻网格单元中相邻面片个数占总面片数小于 $1/4$ 的面片。重复扩张和过滤的过程, 每次迭代 α_1 降低 0.2, 初始为 0.7。

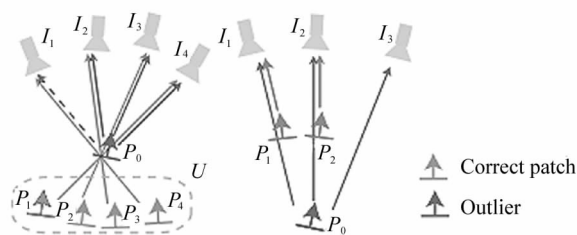


图 11 面片过滤

Fig. 11 Patch filtering

得到稠密点云后进行网格重建、优化^[18]及纹理映射^[19]即可得到重建的三维场景。

2 分析与讨论

2.1 三维重建实验

本文选择 Tsar Nikolai I 作为数据集作为 SFM 输入图像进行稀疏点云重建。该数据集^[20]共 89 张图片, 共 59.8 MB, 为了加速进程, 选择了支持 gpu 的开源 SFM 框架 visuaSFM 进行稀疏重建, 而后采用^[15,16]提出的图像分簇及 PMVS 算法进行了稠密点云重建, 得到了初始稠密点云模型, 如图 12 所示。

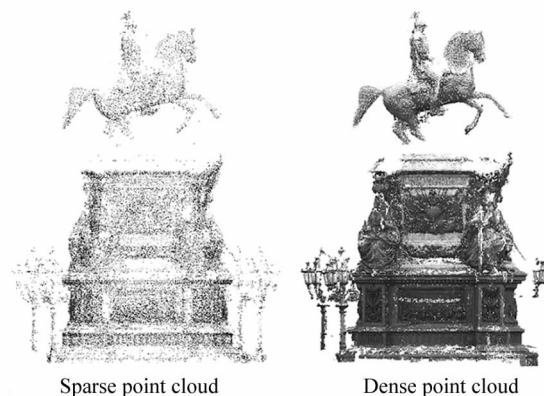


图 12 初始稀疏及稠密点云

Fig. 12 Initial sparse and dense point cloud

为了进行后续的网络重建优化及纹理映射,将得到的稀疏及稠密点云模型、输出的相机位姿及纹理信息导入 Meshlab。MeshLab 是一个开源的三维几何处理系统,主要用于交互处理三维模型。对稠密点云去除杂点并通过泊松表面重建得到图 13 右侧效果,最后经过纹理映射还原了效果良好的真实模型,如图 14 所示。



Dense point cloud after removing impurities After Poisson reconstruction

图 13 去除杂点后及泊松重建效果

Fig. 13 Poisson reconstruction effect after removing impurities



Final 3D reconstruction model

图 14 最终表现

Fig. 14 Final performance

从实验结果可以看出,相比于传统建模方法,本文的算法速度快,成本低,且重建效果较为良好。

2.2 整体系统效果

为了展示整体系统效果,本文还对户外场景进行了重建,恢复的稠密点云及最终效果见图 15、16。

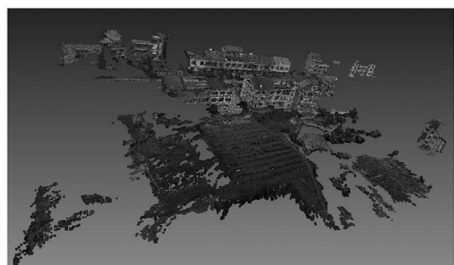


图 15 室外场景稠密点云

Fig. 15 Dense point cloud of outdoor scene

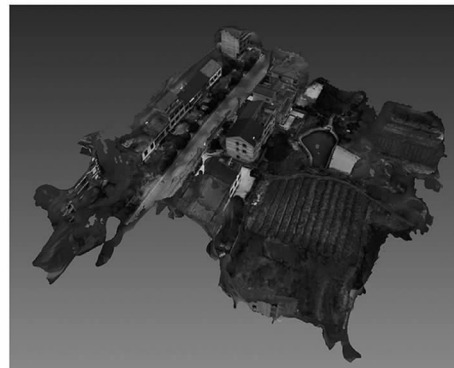


图 16 室外场景最终效果

Fig. 16 Final effect of outdoor scene

本文设计并研制的 VR 类鸟飞行模拟系统已经大量的实际测试,系统实际效果见图 17。在对系统进行高集成化改进的基础上,图 18、19 分别展示了系统对户外场景重建并运行的效果以及实际户外场景重建的效果。



图 17 实际系统

Fig. 17 Actual system



图 18 改进后系统户外效果

Fig. 18 Outdoor effect of the improved system



图 19 户外场景重建效果

Fig. 19 Reconstruction effect of outdoor scene

由实验结果可见,本文设计并研制的系统能使用户体验 VR 类鸟飞行,且利用了当前最为先进的三维重建算法之一,无需人工建模即可为系统输入任意场景,极大地便利了体验者与开发者。

3 结 论

本文针对现有 VR 应用大多只用于定点展示,且无法充分发挥 VR 特点的缺陷,创新性地提出了结合软硬件平台的 VR 类鸟飞行模拟系统。考虑到现有 VR 场景大多采用人工建模,较为费时费力,本文结合三维重建算法设计了并研制出了一套高集成化的设备,并已经大量用户体验测试。该系统通过硬件驱动及软件仿真打破了现有 VR 应用无法随心所欲移动的限制,实现了不通过 VR 就无法实现的类鸟飞行,真正意义上发挥出了 VR 技术的优越性。同时通过适应性极强的三维重建算法,可对任意场景进行取景重建,为旅游业及 VR 产业提供了一种新的方向。

参考文献:

- [1] LI L Z. Research on virtual reality technology and its application[J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2019(3): 30-31.
李良志. 虚拟现实技术及其应用探究[J]. 中国科技纵横, 2019(3): 30-31.
- [2] DA M H. Research on the application of virtual reality technology [J]. Computernik, 2019(1): 53.
笪旻昊. 虚拟现实技术的应用研究[J]. 电脑迷, 2019(1): 53.
- [3] WU T, YANG J L, TAO X. Application research of Yangzhou University campus roaming navigation system based on VR panoramic technology[J]. Huazhong Architecture, 2019, 37(12): 28-31.
- 吴涛, 杨甲乐, 陶欣. 基于 VR 全景技术的扬州大学校园漫游导航系统的应用研究[J]. 华中建筑, 2019, 37(12): 28-31.
- [4] WANG Z W. Design and development of ski simulator system based on virtual reality [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017: 13-14.
王志伟. 基于虚拟现实的滑雪模拟器系统设计与研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2017: 13-14.
- [5] LI M. Research on vehicle simulation driving system based on virtual reality[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016: 20-21.
李明. 基于虚拟现实的汽车模拟驾驶系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016: 20-21.
- [6] JIN R M. Design and implementation of vehicle driving simulation system based on virtual reality[D]. Nanjing: Southeast University, 2015: 12-13.
金若梅. 基于虚拟现实的汽车驾驶模拟系统的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2015: 12-13.
- [7] HE J J. Research on simulation of earthquake emergency evacuation drill based on virtual reality technology[D]. Yunnan: Yunnan Normal University, 2014: 23-24.
贺静静. 基于虚拟现实技术的地震紧急疏散演练模拟研究[D]. 云南: 云南师范大学, 2014: 23-24.
- [8] CAKIROGLU U, GOKOGLU S. Development of fire safety behavioral skills via virtual reality[J]. Computers & Education, 2019, 133: 56-68.
- [9] JIANG L. Research on 3D simulation of swimming technique training based on FPGA and virtual reality technology[J]. Microprocessors and Microsystems, 2020, 81: 103657.
- [10] WEI Y C, DENG C Y, HE Q Z. Space calibration method for three-dimensional measurement of structured light [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2020, 31(4): 367-371.
魏永超, 邓春艳, 何秋钊. 一种用于结构光三维测量的空间标定方法[J]. 光电子·激光, 2020, 31(4): 367-371.
- [11] HE Z Y, JIANG Z D, YU M. Exploiting global and local perceptual features for quality assessment of 3D colored point cloud[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2021, 32(10): 1046-1054.
何周燕, 蒋志迪, 郁梅. 基于全局与局部感知特征的三维彩色点云质量评价[J]. 光电子·激光, 2021, 32(10): 1046-1054.
- [12] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [13] TAO Y Z. 3D reconstruction of weakly textured targets

- based on incremental motion restoration structure[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018: 15-17.
- 陶易之. 基于增量式运动恢复结构的弱纹理目标三维重建[D]. 武汉: 武汉大学, 2018: 15-17.
- [14] WU C, AGARWAL S, CURLESS B, et al. Multicore bundle adjustment[C]//Computer Vision & Pattern Recognition, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE, 2011: 3057-3064.
- [15] FURUKAWA Y, CURLESS B, SEITZ S M, et al. Towards Internet-scale multi-view stereo [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, June 13-18, 2010, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2010: 1434-1441.
- [16] FURUKAWA Y, PONCE J. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2010, 32(8): 1362-1376.
- [17] SEITZ S, CURLESS B, DIEBEL J, et al. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms [C]//Computer Vision and Pattern Recognition. June 10-15, 2006, New York, USA. New York: IEEE, 2006: 519-528.
- [18] VU H H, LABATUT P, PONS J P, et al. High accuracy and visibility-consistent dense multiview stereo [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 34(5): 889-901.
- [19] WAECHTER M, MOEHRLE N, GOESELE M. Let there be color! large-scale texturing of 3D reconstructions[C]//European Conference on Computer Vision, ECCV 2014, September 6-12, 2014, Zurich, Switzerland. Cham: Springer International Publishing, 2014: 836-850.
- [20] ENQVIST O, KAHL F, OLSSON C. Non-sequential structure from motion[C]//IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE, 2011: 264-271.

作者简介:

张淑芳 (1979—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事自动化控制、嵌入式系统开发、人工智能、图像处理方面的研究。