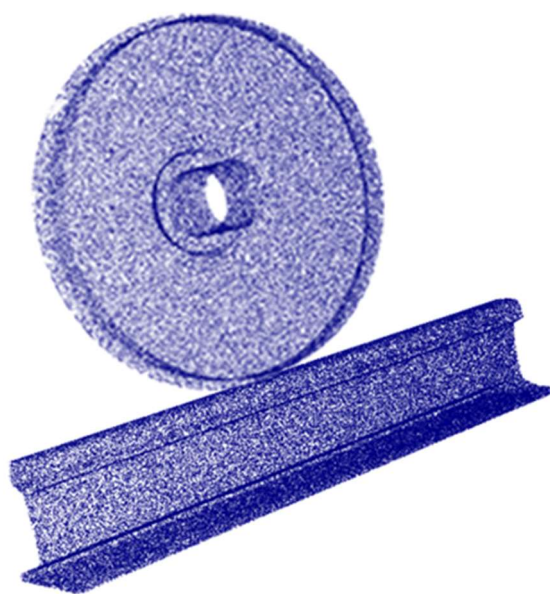




结构光三维重建软件

用户手册 V1.0



北京交通大学计算机学院

2020 年 5 月 25 日

目录

1 引言	1
1.1 编写目的	1
1.2 项目背景	1
1.3 阅读对象	1
1.4 术语定义	1
2 软件概述	2
2.1 目标	2
2.2 功能	2
2.3 性能	3
3 运行环境	3
3.1 硬件环境	3
3.2 软件支持	4
4 使用指南	4
4.1 软件启动	4
4.2 系统标定	5
4.3 三维重建	7
4.4 点云渲染	9
5 错误处理	14

1 引言

1.1 编写目的

本文档是结构光三维重建软件 V1.0 针对用户所进行的用户手册，在本文档中我们通过对结构光三维重建系统（包含硬件设施与软件两个部分）的需求和结构光三维重建软件 V1.0 中的功能进行描述，帮助用户使用该文档了解软件的所有功能、使用和部分错误处理机制。

在进行软件的设计与实现时，我们根据系统的需求将软件划分为系统标定、三维重建和点云渲染三个功能模块，分别对应结构光三维重建过程中相机（相机和投影仪）标定、解码结构光和点云可视化三个功能性需求，模块化设计既保证了系统功能的完整性，又实现了模块功能的独立性。

1.2 项目背景

项目来源于国家重大科研仪器研制项目：基于高精度结构光的高速铁路轮轨动态接触姿态检测系统，依托于北京交通大学高性能计算与应用实验室及轨道交通智能检测与监测研究所。

1.3 阅读对象

本手册的编写对象为期望通过本软件对运动物体（尤其是高铁轮轨姿态）实现三维重建和点云可视化的用户，手册中也为不太熟悉结构光三维重建流程（如相机标定）和 PCL 进行点云可视化的用户提供了基本的教程。

1.4 术语定义

表 1-1 软件术语定义及说明参考表

序号	术语	说明
1	编码结构光三维重构测量技术	一种主动式三角测量技术，该技术以激光三角测量原理为理论基础，并融合了计算机测量技术、数字图像处理技术和相机标定技术等多种技术。其基本原理是：由投影仪将结构光编码图案投影到被测物体的表面，然后摄像机在另外一个角度对结构光图像进行同步拍摄，再将捕获的结构光图像输入计算机，进行解码处理，最后再根据系统标定的结果来计算特征点的三维坐标，从而完成被测物体表面的三维重构。
2	点云	在同一空间参考系下表达目标空间分布和目标表面特性的海量点集合，包含点的三维坐标（XYZ）和颜色信息（RGB）。

2 软件概述

2.1 目标

本软件为基于编码结构光的高铁轮轨姿态三维重建的项目成果,旨在通过软件进行相机标定、投影编码结构光图案、完成相机拍摄、进行拍摄图像解码,计算三维坐标并将携带三维坐标信息的点云数据进行可视化展示。

本软件通过投影和拍摄预先设计的空间编码结构光图案,既可以增加高铁轮轨表面的特征点,从而提高点云的稠密度,获得更加精确的数据,又可以解决物体高速运动不易拍摄多幅图片进行重建的问题。对解码和计算得到的三维坐标进行渲染,可以获得高铁轮轨姿态。高铁轮轨姿态反映了车轮与钢轨之间复杂的动态相互作用和约束关系,掌握他们之间真实接触姿态是保障高速铁路安全运营的重要基础。

(本软件也可以运用到静态物体的三维重建和其他运动物体的三维重建)

2.2 功能

根据结构光系统进行三维重建的需求,本软件可分为相机标定、三维重建和点云渲染三个模块,下面分别对三个模块的功能进行介绍。

➤ 系统标定模块

- 配置相机和投影仪
- 上传标定图像
- 相机拍摄
- 设置标定板参数
- 相机(相机和投影仪)标定
- 保存标定结果

➤ 三维重建模块

- 投影编码图案
- 拍摄投影图像
- 上传本地图像
- 保存拍摄图像
- 进行三维重建

- 点云渲染模块
 - 渲染点云
 - 改变点云颜色
 - 异常点选择和剔除
 - 泊松曲面重建
 - 导出点云数据
 - 使用帮助

2.3 性能

表 2-1 部分性能参考表

功能	输入（文件格式及规格）	响应时间
结构光图像解码和计算三维坐标	PNG / 1024×1280 pixel	10~15 秒
点云渲染	PCD / 170362×1 point	1 秒
点云渲染	PLY / 202979×1 point	1 秒

3 运行环境

3.1 硬件环境

表 3-1 硬件环境参考表

硬件环境	版本
Point Grey Camera	——
LightCrafter4500	——

说明：相机（Point Grey Camera）和投影仪（LightCrafter4500）环境为进行相机标定和拍摄投影图案功能的硬件依赖。

3.2 软件支持

表 3-2 软件支持参考表

软件环境	版本
Windows	Windows 10
QT	5.12.3
OpenCV	4.2.0
FlyCapture2	2.12.3.2
PCL	1.8.1
VTk	8.0

说明：软件运行必要的 DLL 已与软件可执行文件一起发布。

4 使用指南

4.1 软件启动



图 4-1 软件启动界面图

在软件启动后，软件显示启动界面并初始化相机和投影仪等，软件未检测到相机设备或

投影仪设备，将触发软件的错误处理机制，保障软件其他功能（如对本地图像进行解码、重建，可视化点云）正常使用，防止软件崩溃。

4.2 系统标定

系统标定模块主要是完成相机（相机和投影仪）标定功能，通过投影一组编码图案在标定板上，利用标定板的角点计算出相机和投影仪的平移、旋转关系（即相机的内参和外参）。

无论是在图像测量或者机器视觉应用中，相机参数的标定都是非常关键的环节，这些参数将用于确定空间物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系，因此，其标定结果的精度及算法的稳定性直接影响相机工作产生结果的准确性。

系统标定模块的界面如下图所示，图中标记的 1~6 为操作过程序号，接下来将分点进行具体阐释。



图 4-2 系统标定功能模块界面图

1. 相机和投影仪的配置

本地接入相机和投影仪，界面中 Live Video 模块中展现相机视野。根据相机视野调整相机焦距、光圈、曝光等参数，直到视野内的图像清晰。

在此过程中，可将标定板调至视野中央，便于后续的拍摄标定。

2. 上传投影图案

相机和投影仪配置完成之后，点击 2-“添加图像”按钮上传投影图案。投影图案应是如下图所示的一系列格雷编码灰度图像的组合，一个组合为 44 幅图像（下图仅为部分投影图案的示意图，见下页）。

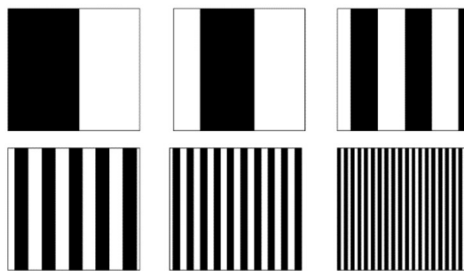


图 4-3 标定投影组图(部分)

3. 相机拍摄

完成添加投影图案之后，点击 3-“相机拍摄”按钮进行拍摄。此时投影仪将依次投影已上传的投影组图中的每一帧图案，同时相机进行拍照，每次拍照将生成 44 幅拍摄图像（说明：为提高相机标定的精确度，应进行多次拍照，建议拍摄 5~8 组标定图像）。

4. 进行标定板设置

在此栏中,将实验所用的标定板的参数记录下来。棋盘尺寸为一格标定板棋盘格的尺寸，行数和列数分别为标定板棋盘的行数和列数。如下图所示的标定板设置为：

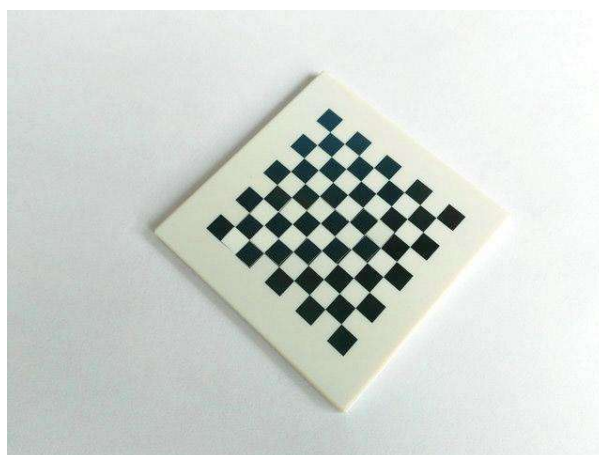


图 4-4 标定板示例

表 4-1 标定板参数示例表

棋盘尺寸(mm)	10
行数	9
列数	9

5. 相机标定

确定标定板设置无误后，点击 5-“相机标定”按钮进行后续标定。

当软件计算出相机内置参数后，会将参数更新到右侧“相机参数栏”中。

6. 保存标定结果

当相机标定完成后，点击 6-“保存结果”按钮，软件会将相机参数以 *.xml* 文件格式保存到指定目录下，如下图所示。

```
<Kc type_id="opencv-matrix">
  <rows>3</rows>
  <cols>3</cols>
  <dt>d</dt>
  <data>
    2.1282011933935164e+003 0. 5.9217550223801436e+002 0.
    2.1298248914710512e+003 5.3030634436407399e+002 0. 0. 1.</data></Kc>
<kc type_id="opencv-matrix">
  <rows>5</rows>
  <cols>1</cols>
  <dt>d</dt>
  <data>
    2.0932328389725887e-002 2.6443400388796767e-001
    -2.2712989170532742e-003 -3.3067879139578567e-003
    1.5559588491690581e+001</data></kc>

<Rp type_id="opencv-matrix">
  <rows>3</rows>
  <cols>3</cols>
  <dt>d</dt>
  <data>
    9.7514294715256888e-001 -7.5998322350117721e-003
    2.2144632570580627e-001 7.2768884013486423e-004
    9.9951607309368673e-001 3.1098072228479885e-002
    -2.2157550200226175e-001 -3.0163921783738348e-002
    9.7467657955604448e-001</data></Rp>
<Tp type_id="opencv-matrix">
  <rows>3</rows>
  <cols>1</cols>
  <dt>d</dt>
  <data>
    -1.4417873103761687e+002 1.9879634260321492e+001
    -1.5734695758006282e+001</data></Tp>

<Kp type_id="opencv-matrix">
  <rows>3</rows>
  <cols>3</cols>
  <dt>d</dt>
  <data>
    1.7197576052893089e+003 0. 4.3168344386576598e+002 0.
    3.4456013928533262e+003 5.6398825387458635e+002 0. 0. 1.</data></Kp>
<kp type_id="opencv-matrix">
  <rows>5</rows>
  <cols>1</cols>
  <dt>d</dt>
  <data>
    -6.7125073335329959e-003 2.1083769945435460e+000
    -2.4995245176273342e-003 -1.5204978778923053e-003
    -5.6040960043780984e+001</data></kp>
```

图 4-5 标定结果保存文件内容（部分）

4.3 三维重建

三维重建模块主要是完成对拍摄（或上传）图像的结构光解码和三维坐标计算的功能，通过投影预先设计的编码图案并拍摄或上传之前拍摄的图像，在解码过程中利用图像处理的方法提取物体表面特征点，然后计算特征点的三维坐标，即完成图像获取、结构光解码和三维坐标计算 3 个关键技术。

投影设计的编码结构光图案，可以增加物体表面的特征点，而我们所采用的空间编码方式的优点在于可以用于动态物体三维重构，它只需一幅图像按某种方式来进行编码，图案中每个特征点的码字根据其周围邻近特征点的颜色信息、强度信息或者几何特性信息得到。

三维重建模块的界面如下图所示（见下页），图中标记的 1~6 为操作过程序号，接下来将分点进行具体阐释。



图 4-6 三维重建功能模块界面图

1. 相机视野和展示拍摄图像

界面中 Live Video 模块中展现相机视野，可以看到投影仪投射的编码图案和物体的关系，便于调整物体位置，尽可能地使物体在图案投影范围内，增加物体表面特征点。此外，相机拍摄的用于结构光解码的单幅图像或上传的图像也将在这里显示。

2. 投影编码图案

点击 2-“投影图案”按钮使投影仪投射预先设计好的编码图案。软件设计的投影图案是如下图所示的基于 De Bruijn 序列编码的条纹结构光图案，图片的大小为 912×1140 pixel，条纹宽度为 14 pixel，条纹的光强变化规律符合余弦函数。

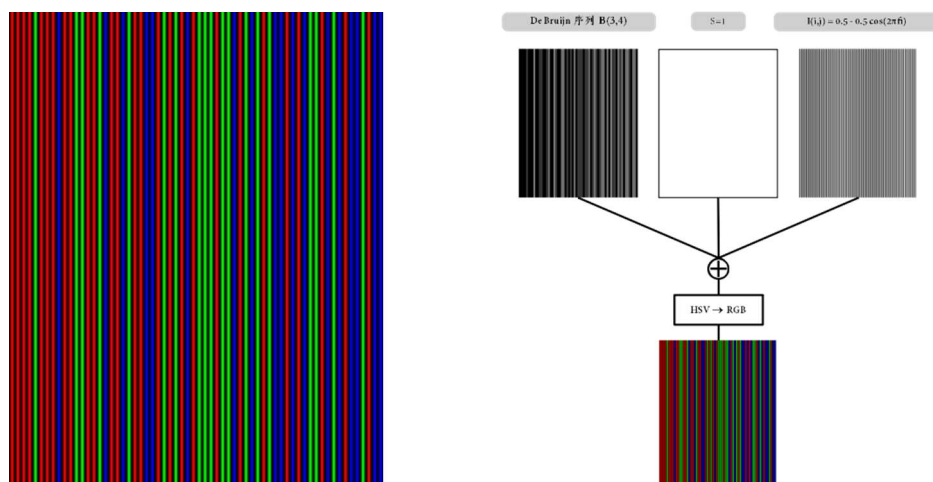


图 4-7 编码图案及其生成原理图

3. 相机拍照

调整好物体的位置后，点击 3-“相机拍照”按钮进行拍照。此时 Live Video 模块中将展示拍摄的图像。

4. 保存照片

在确认拍摄的图像后，点击 4-“保存照片”按钮，软件会将捕获的图像以 *.png* 文件格式保存到指定目录下。

5. 开始重建

通过 Live Video 模块确认要进行重建的图像后，点击 5-“开始重建”按钮，软件将对图像进行结构光解码，提取物体表面的特征点并计算三维坐标。

6. 载入投影图像

在未连接相机和投影仪的情况下，为重建功能的正常使用，软件支持上传之前拍摄的图像进行三维重建。点击 6-“选择文件”按钮上传图像，此时 Live Video 模块中将上传的图像，之后便可以点击 5-“开始重建”按钮对图像进行结构光解码和计算物体的三维坐标。

4.4 点云渲染

点云渲染模块主要是完成对重建结果可视化展示的功能，通过 PCL、VTK 等第三方库，实现多样可视化展示、剔除异常点、重建曲面等操作。

三维图像是一种特殊的信息表达形式，其特征是表达的空间中三个维度的数据，点云数据是最为常见也是最基础的三维模型。通过摄影测量原理得到的点云，包含了物体的三维坐标 (XYZ) 和颜色信息 (RGB)。

点云渲染模块的界面如下图所示（见下页），图中标记的 1~7 为界面序号，接下来将分点进行具体阐释。

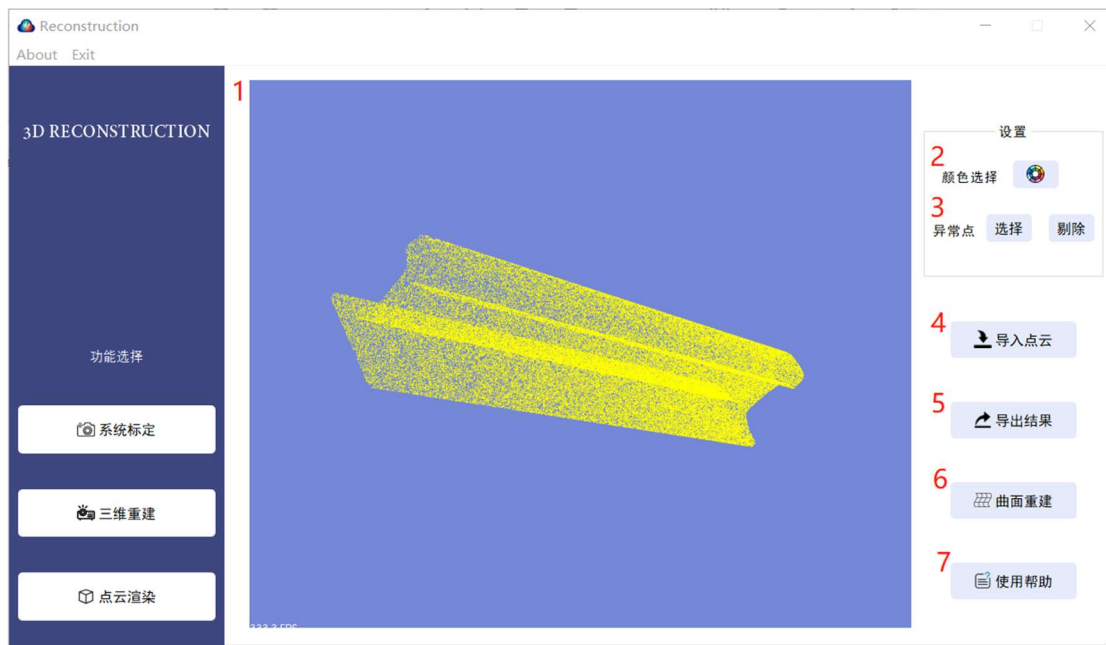


图 4-8 点云渲染功能模块界面图

1. 点云可视化

界面中“窗口-1”对点云事件进行渲染，同时是部分鼠标事件和键盘事件的相应窗口，如对点的放大/缩小、点云对象的放大/缩小、进入框选模式等。

2. 颜色选择

软件默认点的颜色为黄色，可在‘颜色选择’模块进行修改，点击 2-“颜色选择”按钮，支持在 Basic colors 中选择已有的颜色和用户输入选择自己期待的颜色，通过输入 Red、Green、Blue 分量（或 H、S、V 分量/HTML 十六进制颜色代码）就可以自定义点的颜色，如下图所示。

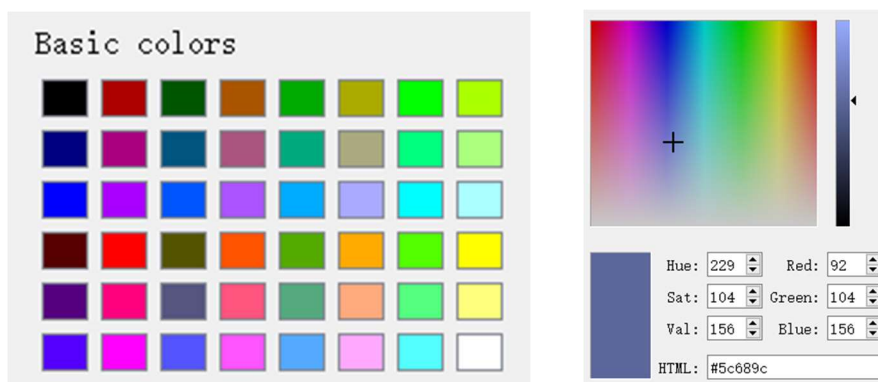


图 4-9 点的颜色选取

3. 异常点选择和剔除

点击 3-“异常点”中的异常点选择按钮，弹出如下图所示的对话框（见下页）。



图 4-10 提示框

提示通过点击键盘的 *X* 键，就可以进入匡选模式选择异常点。点击 *X* 键，再长按鼠标左键，会出现一个拉取的窗口，窗口范围内的点云就是被选择的点。

点击剔除按钮，即可将已被选择的异常点删除，同时退出异常点选择状态。想要继续删除异常点，需要重新键入 *X*，框选新的点并删除，如下图所示。

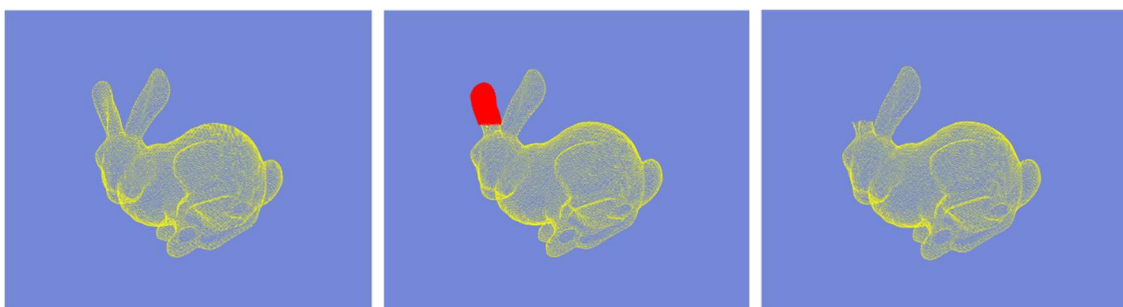


图 4-11 点云的框选与删除

4. 导入点云

支持从任意目录导入 *.pcd* 和 *.ply* 两种格式的点云文件。点击 4-“导入点云”按钮，可以进行文件的选择。点云加载完成后，点云模型呈现在视窗中央。

5. 导出结果

点击 5-“导出结果”按钮，可以将（修改后的）点云数据导出，支持两种格式的自定义目录导出，分别是 *.pcd* 和 *.ply* 格式。

6. 曲面重建

曲面重建运用在点云分割后的显示上，可以增强点云分割后的可视化效果，点击 6-“曲面重建”按钮，可以对点云对象进行泊松曲面重建，如下如所示。

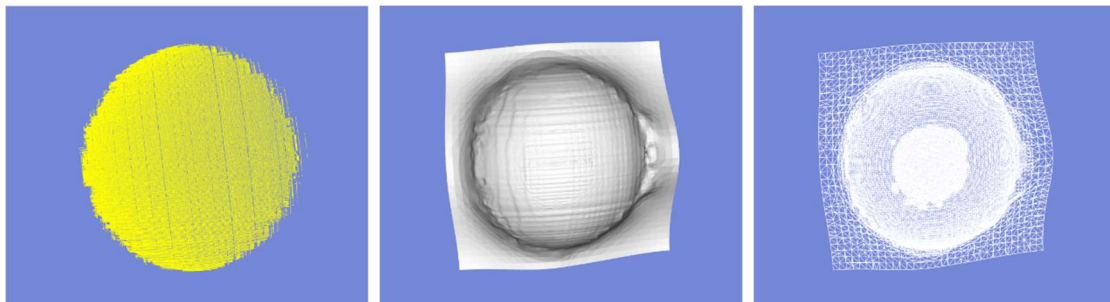


图 4-12 点云的曲面重建

7. 使用帮助

提供了一些界面操作的快捷键，包括视角控制、点云设置、显示设置等，点击 8-“使用帮助”按钮，弹出对话框如下图所示。

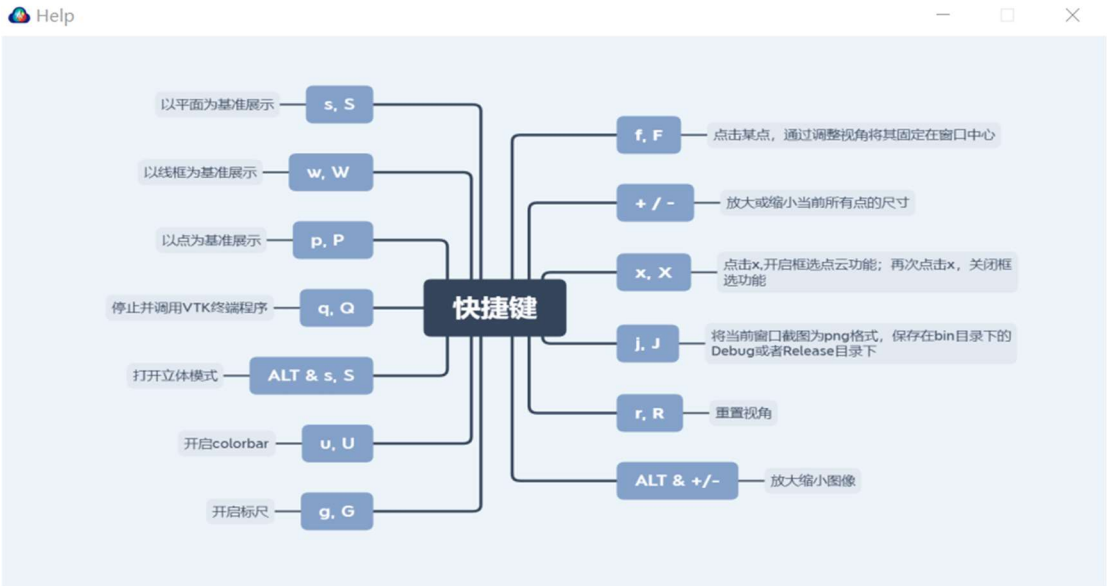


图 4-13 使用帮助对话框

5 错误处理

软件的部分功能模块依赖于相机和投影仪的使用，在软件启动后，若未检测到相机设备或投影仪设备，将触发软件的错误处理机制，保障软件其他不依赖于硬件设备的功能（如对本地图像进行解码、重建，可视化点云）正常使用，防止软件崩溃。

软件的错误处理机制将禁止相关按键的使用，防止用户误点造成软件崩溃。触发错误处理机制的软件界面如下图所示。



图 5-1 错误处理下的软件界面