

本文引用格式: 曾嘉琪,王春鹏,王桂棠,等.光束逆投影的三维模型可视化交互系统设计[J].自动化与信息工程,2024,45(4):10-17.  
ZENG Jiaqi, WANG Chunpeng, WANG Guitang, et al. Design of 3D model visualization interactive system for bundle back projection[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(4):10-17.

## 光束逆投影的三维模型可视化交互系统设计

曾嘉琪<sup>1</sup> 王春鹏<sup>2</sup> 王桂棠<sup>1</sup> 高梓皓<sup>1</sup>

(1.广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

2.广东工业大学先进制造学院, 广东 揭阳 515200)

**摘要:** 针对现有三维可视化交互系统通用性差、交互能力有限等问题, 基于光束逆投影技术以及相对运动坐标系转化原理, 设计一套光束逆投影的三维模型可视化交互系统。利用自定义的球坐标系, 使旋转功能更完善且可回溯; 通过三维光束逆投影实现三维空间点选取功能, 并允许存在交互点击误差; 实现了模型表面自由绘制空间轨迹的功能。该系统通用性好、交互能力强, 可应用于自动控制系统, 实现执行机构运动轨迹的自由控制。

**关键词:** 光束逆投影; 坐标系转化; 三维可视化; 球坐标系

中图分类号: TP311.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)04-0002-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.04.002

开放获取

## Design of 3D Model Visualization Interactive System for Bundle Back Projection

ZENG Jiaqi<sup>1</sup> WANG Chunpeng<sup>2</sup> WANG Guitang<sup>1</sup> GAO Zihao<sup>1</sup>

(1.School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2.School of Advanced Manufacturing, Guangdong University of Technology, Jieyang 515200, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor universality and limited interaction capability of existing 3D visualization interaction systems, a 3D model visualization interaction system based on bundle back projection technology and the principle of relative motion coordinate system transformation is designed. Using a custom spherical coordinate system to make rotation more complete and traceable; Realize the function of selecting three-dimensional spatial points through three-dimensional bundle back projection, and allow for interactive click errors; Implemented the function of freely drawing spatial trajectories on the surface of the model. This system has good universality and strong interaction ability, and can be applied to automatic control systems to achieve free control of the motion trajectory of the executing mechanism.

**Keywords:** bundle back projection; coordinate system transformation; 3D visualization; spherical coordinate system

### 0 引言

三维重建技术可实现三维空间信息的复原, 广泛应用于虚拟现实<sup>[1]</sup>、无人驾驶<sup>[2]</sup>、农业生产<sup>[3]</sup>等领域。现有的三维模型可视化软件虽然可以呈现三维重建的数据信息, 但交互性不强、可扩展性低, 不具有通用性<sup>[4-6]</sup>。目前, 已有学者提出基于坐标系转换的三维可视化模型框架<sup>[7-8]</sup>, 实现了三维模型的旋转、平移、缩放等交互操作<sup>[9]</sup>, 并利用堆栈拾取算法, 实现了鼠

标选取功能<sup>[10-11]</sup>。但旋转操作改变了物体原有的顶点坐标, 计算过程繁琐, 且多次旋转时, 无法记录每次的旋转矩阵以供回溯。基于堆栈拾取算法的鼠标选取功能, 只能选取整个物体或面片, 不能特定选取物体上的一个顶点, 导致无法提取三维模型的所有尺寸信息。基于 OpenGL 实现的三维可视化交互系统, 不具备向三维模型文件写入信息的功能, 影响了三维重建步骤以及模型与后续执行机构之间运动信息的传输。

为此, 本文基于光束逆投影技术和相对运动坐标系转化原理, 设计了一套三维模型可视化交互系统, 实现通用的三维模型文件读取, 实时交互性更强, 旋转功能更完善, 可用于机械手等执行机构的控制<sup>[12-14]</sup>。

### 1 三维模型可视化设计与理论分析

三维模型可视化通过图形处理器的渲染功能实现。利用光束将三维模型中的三维空间点投影到二维屏幕坐标系上, 达到可视化的三维效果, 坐标系转换与映射过程如图 1 所示。

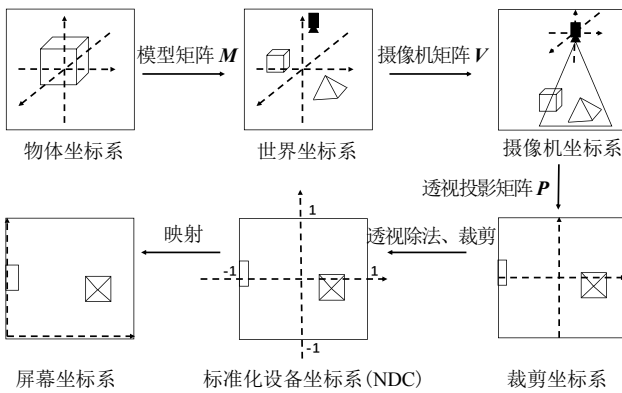


图 1 坐标系转换与映射过程

从摄像机坐标系转换到裁剪坐标系的过程中, 投影矩阵创建了一个平截头体观察箱, 每个出现在平截头体范围内的坐标都被映射到屏幕坐标系中, 此过程称为投影。投影矩阵分为正射投影和透视投影 2 种形式, 每种形式都定义了不同的平截头体。基于真实性考虑, 本文选择透视投影矩阵作为摄像机坐标系到裁剪坐标系的转换矩阵。透视投影矩阵定义的平截头体如图 2 所示。

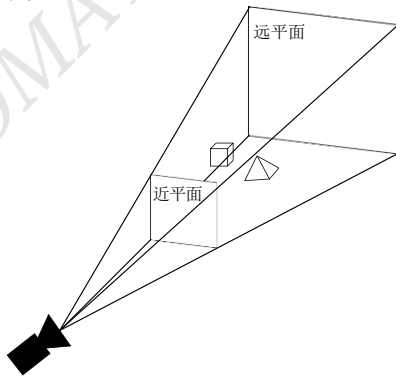


图 2 透视投影矩阵定义的平截头体

从物体坐标系到裁剪坐标系的坐标转换过程可表示为

$$\begin{pmatrix} x_{clip} & y_{clip} & z_{clip} & w_{clip} \end{pmatrix} = \mathbf{P}_{ro} \times \mathbf{V} \times \mathbf{M} \times \begin{pmatrix} x_{object} & y_{object} & z_{object} & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\begin{pmatrix} x_{clip} & y_{clip} & z_{clip} & w_{clip} \end{pmatrix}$  为裁剪坐标系的坐标;  $\begin{pmatrix} x_{object} & y_{object} & z_{object} & 1 \end{pmatrix}$  为物体坐标系的坐标, 同时也是三维模型文件中的三维顶点坐标;  $\mathbf{P}_{ro}$  为  $4 \times 4$  的透视投影矩阵,  $\mathbf{V}$  为  $4 \times 4$  的摄像机矩阵,  $\mathbf{M}$  为  $4 \times 4$  的模型矩阵。

裁剪坐标系中的坐标经过透视除法与裁剪后, 映射到标准化设备坐标系。标准化设备坐标系是一个  $x$ 、 $y$ 、 $z$  值都在  $(-1, 1)$  之间的小部分空间, 这部分空间外的坐标都会被裁剪掉。

标准化设备坐标系中的坐标根据屏幕的宽高映射到屏幕坐标系, 屏幕坐标系中的每个坐标都关联了一个屏幕上的像素。映射过程如图 3 所示。

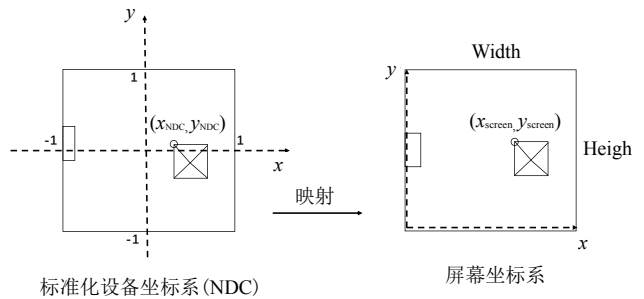


图 3 标准化设备坐标系到屏幕坐标系的映射

从标准化设备坐标系映射到屏幕坐标系的运算过程如下:

$$x_{screen} = \frac{(x_{NDC} + 1) \times W_{Width}}{2} \quad (2)$$

$$y_{screen} = \frac{(y_{NDC} + 1) \times H_{Height}}{2} \quad (3)$$

式中:  $(x_{screen}, y_{screen})$  为屏幕坐标系中的坐标,  $(x_{NDC}, y_{NDC})$  为标准化设备坐标系中的坐标,  $W_{Width}$

为屏幕宽度， $H_{\text{Height}}$  为屏幕高度。

通过坐标系变化与坐标映射，使三维模型文件中的三维顶点坐标与屏幕上的像素点一一对应。本文利用 OpenGL 控制渲染过程，将三维物体的形状结构以可视化的方式呈现；同时利用冯氏光照模型给可视化后的画面添加光影效果，使可视化更具真实性，利于交互操作。

本文采用自行设计的气室零件作为实验对象，如图 4(a)所示，三维模型的可视化效果如图 4(b)所示。

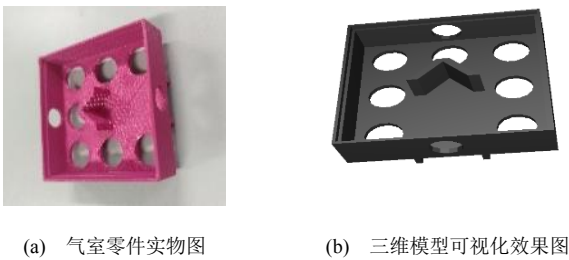


图 4 气室零件实物图与可视化效果图对比

## 2 三维模型的旋转功能

目前，实现视角旋转功能的算法大都根据鼠标在屏幕上的横纵坐标偏移量，映射一个相应的旋转矩阵作用在物体上，即通过旋转物体达到视角旋转的效果。但旋转矩阵作用在物体上，改变了物体各顶点的坐标。虽然可以通过逆矩阵重新得到旋转前的物体顶点坐标，但多次旋转后，物体若要恢复到某个指定的状态，需要记录每次旋转所使用的旋转矩阵，这给计算机内存带来较大的负担；且重新得到物体旋转前的坐标，需要计算多个旋转矩阵的逆矩阵，增加了计算量。因此，由鼠标横纵坐标偏移量映射相应旋转矩阵的过程，存在计算繁琐、计算过程不直观等问题。若采用欧拉角旋转的方式，还可能产生万向节死锁等问题。

针对上述方法的局限性，本文在相对运动理论的基础上，通过控制摄像机的拍摄角度达到视角旋转的效果。自定义一个球坐标系代替现有的直角坐标系形式的物体坐标系，如图 5 所示。

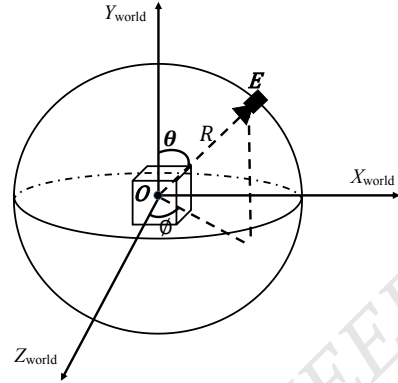


图 5 自定义的球坐标系

在球坐标系中，参数  $R$  为摄像机到球坐标系原点的距离，保持不变；参数  $\theta$  为向量  $\overline{OE}$  与  $Y_{\text{world}}$  轴正方向之间的夹角，随着鼠标在屏幕上的纵坐标偏移量在  $0^\circ \sim 360^\circ$  的范围内变化；参数  $\phi$  为向量  $\overline{OE}$  在  $X_{\text{world}}OZ_{\text{world}}$  平面上的投影与  $Z_{\text{world}}$  轴正方向之间的夹角，随着鼠标在屏幕上的横坐标偏移量在  $0^\circ \sim 360^\circ$  的范围内变化。

通过球坐标系与直角坐标系之间的坐标转换公式（公式(4)、(5)、(6)），确定摄像机在世界坐标系的位置，保证摄像机始终在球坐标系表面运动，且拍摄方向始终指向球心，以达到视角旋转的视觉效果。

$$X_{\text{world}} = R \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \quad (4)$$

$$Y_{\text{world}} = R \cdot \sin \theta \quad (5)$$

$$Z_{\text{world}} = R \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \quad (6)$$

上述算法在物体每次旋转时只需记录变化后的  $\theta$  与  $\phi$ ，节省了大量的存储空间，且物体多次旋转后，仍能退回到任一次旋转前。同时，鼠标横纵坐标偏移量直接控制  $\theta$  和  $\phi$  的增减，不需要额外计算旋转矩阵，减少了算法运行的时间及复杂度，使旋转过程直观、易于理解。

## 3 三维模型的交互功能

### 3.1 基于光束逆投影的三维空间点选取原理

通过人机交互的方式，在可视化的三维模型上自由选取任意三维空间点，并通过计算顶点之间的欧氏

距离，可得到三维模型相对应的尺寸信息。

本文摒弃 OpenGL 原有的拣选机制，通过光束逆投影以及射线交互的方式实现鼠标点击选取功能；通过反转可视化过程中的映射与坐标系变换，得到鼠标点击处的屏幕坐标所对应的物体坐标系的坐标，从而实现逆投影，其过程如图 6 所示。

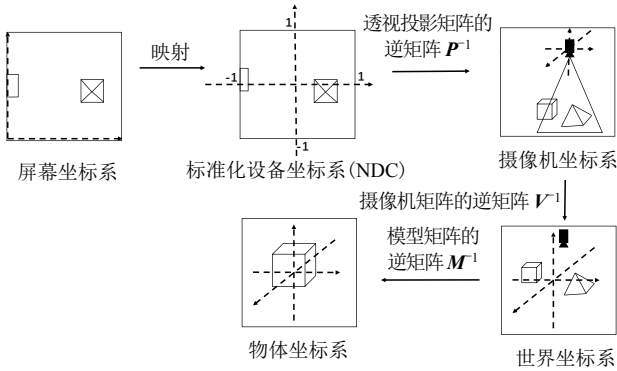


图 6 光束逆投影过程

屏幕坐标系  $z$  值的含义如图 7 所示。

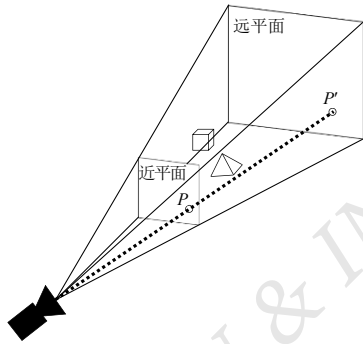


图 7 屏幕坐标系  $z$  值的含义

平截头体中近平面上的画面，即在屏幕上所看到的画面。当鼠标点击屏幕上的点  $P$  时，实际上该点是由平截头体上近平面与远平面之间的空间线段  $PP'$  上的所有空间点叠加投影得到的。屏幕坐标的第三维坐标变量  $z_{\text{screen}}$  指定了空间点在线段  $PP'$  上的具体位置。 $z_{\text{screen}} = 0$ ，表示近平面上的点  $P$ ； $z_{\text{screen}} = 1$ ，表示远平面上的点  $P'$ 。

光束逆投影前，屏幕坐标应先转换成标准化设备坐标。本文的屏幕坐标系原点位于屏幕左下角，坐标变换为

$$x_{\text{NDC}} = \frac{x_{\text{screen}} \times 2}{W_{\text{Width}}} - 1 \quad (7)$$

$$y_{\text{NDC}} = \frac{y_{\text{screen}} \times 2}{H_{\text{Height}}} - 1 \quad (8)$$

$$z_{\text{NDC}} = z_{\text{screen}} \quad (9)$$

设  $z_{\text{screen}} = 0$ ，求解近平面上点  $P$  在物体坐标系上的坐标为

$$\begin{pmatrix} x_p & y_p & z_p & w_p \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{P}_{\text{ro}}^{-1} \cdot (x_{\text{NDC}} \quad y_{\text{NDC}} \quad 0 \quad 1) \quad (10)$$

式中： $(x_p \quad y_p \quad z_p \quad w_p)$  为近平面上点  $P$  在物体坐标系上的坐标， $\mathbf{M}^{-1}$  为模型矩阵的逆矩阵， $\mathbf{V}^{-1}$  为摄像机矩阵的逆矩阵， $\mathbf{P}_{\text{ro}}^{-1}$  为透视投影矩阵的逆矩阵， $(x_{\text{NDC}} \quad y_{\text{NDC}} \quad 0 \quad 1)$  为近平面上点  $P$  转换成标准化设备坐标系后的坐标。

将齐次坐标转换成三维坐标后，得到近平面上点  $P$  在物体坐标系上的坐标为

$$\begin{pmatrix} X_p & Y_p & Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p & y_p & z_p \\ w_p & w_p & w_p \end{pmatrix} \quad (11)$$

同理，设  $z_{\text{screen}} = 1$ ，求解远平面上点  $P'$  在物体坐标系上的坐标为

$$\begin{pmatrix} x_{p'} & y_{p'} & z_{p'} & w_{p'} \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{P}^{-1} \cdot (x_{\text{NDC}} \quad y_{\text{NDC}} \quad 1 \quad 1) \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} X_{p'} & Y_{p'} & Z_{p'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{p'} & y_{p'} & z_{p'} \\ w_{p'} & w_{p'} & w_{p'} \end{pmatrix} \quad (13)$$

此时，由鼠标点击处的屏幕坐标逆投影得到的 2 个点  $P$  和  $P'$ ，与三维模型文件中的物体顶点均属于物体坐标系。通过三维模型文件中的物体顶点坐标与点  $P$  和  $P'$  的坐标，寻找三维模型文件中与线段  $PP'$  相交的顶点。

在人机交互过程中，难以保证点击选取操作的精确度。如图 8 所示，要选取的顶点投影到屏幕坐标系

上的坐标为  $(x_{screen}, y_{screen})$ ，但误点击坐标为  $(x_{pick}, y_{pick})$  的点。

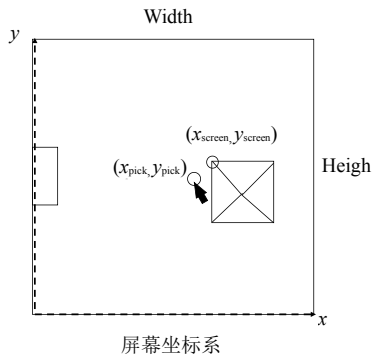


图8 人机交互偏差

为提高交互系统的实用性，本文添加了选取测试功能，用于寻找被选中的顶点，使点击选取功能具有一定的偏差容忍度。鼠标点击选取功能的算法流程如图9所示。

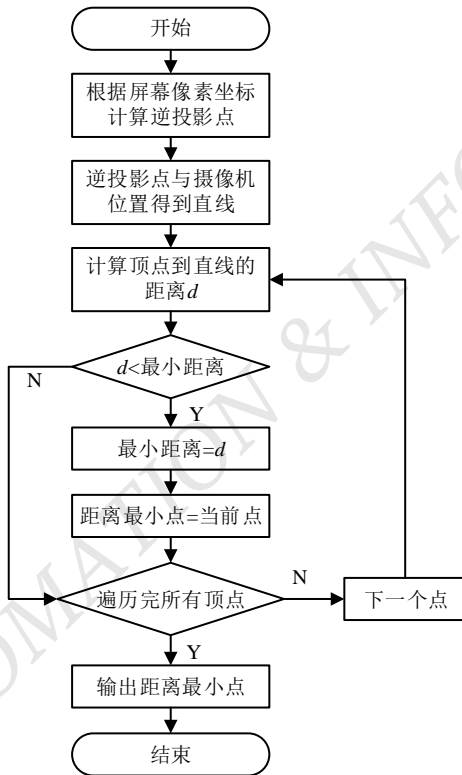


图9 鼠标点击选取功能的算法流程图

鼠标点击选取功能输出的顶点坐标，可用于计算所要提取物体的尺寸数据，如图10所示。



图10 鼠标点击提取物体的尺寸数据效果图

### 3.2 空间轨迹自由绘制

可视化的三维模型由多个空间三角形组成，通过求解逆投影光束形成的射线与空间三角形的交点，实现空间轨迹自由绘制功能，同时各交点坐标可用于控制执行机构的运作。

以摄像机所在位置点  $O$  为起点，以指向近平面上点  $P$  的方向为方向，生成一条射线。点  $O$ 、 $P$  的坐标均为世界坐标系上的坐标。鼠标点击交互生成射线如图11所示。

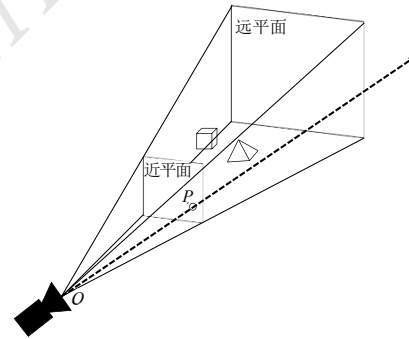


图11 鼠标点击交互生成射线

点  $P$  的坐标由鼠标点击处的屏幕坐标通过逆投影方式得到，但转换后的最终坐标系不再是物体坐标系，而是世界坐标系。假设鼠标点击处的屏幕坐标为  $(x_{screen}, y_{screen})$ ，设  $z_{screen} = 0$ ，求解近平面上点  $P$  在世界坐标系上的坐标  $(X_{pw}, Y_{pw}, Z_{pw})$  为

$$x_{NDC} = \frac{x_{screen} \times 2}{W_{Width}} - 1 \quad (14)$$

$$y_{NDC} = \frac{y_{screen} \times 2}{H_{Height}} - 1 \quad (15)$$

$$z_{NDC} = z_{screen} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} x_{pw} & y_{pw} & z_{pw} & w_{pw} \end{pmatrix} = \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{P}_{ro}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x_{\text{NDC}} & y_{\text{NDC}} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} X_{pw} & Y_{pw} & Z_{pw} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{pw} & y_{pw} & z_{pw} \\ w_{pw} & w_{pw} & w_{pw} \end{pmatrix} \quad (18)$$

点  $O$  的坐标为世界坐标系，摄像机所在位置的坐标在三维模型可视化阶段定义摄像机矩阵  $\mathbf{V}$  时设定。

由 3 个顶点  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  组成的空间三角形，对于三角形内任意一点  $I$ ，求射线与空间三角形的交点如图 12 所示。

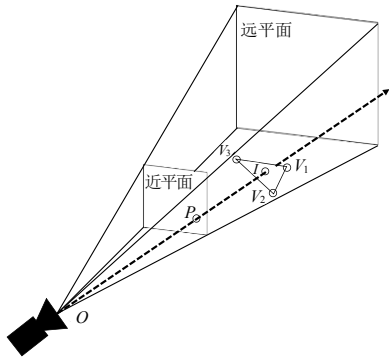


图 12 求射线与空间三角形的交点

求射线与空间三角形的交点有如下参数方程：

$$\vec{I} = (1-u-v)\vec{V}_1 + u\vec{V}_2 + v\vec{V}_3 \quad (19)$$

式中： $u$ 、 $v$  分别为  $\vec{V}_2$  和  $\vec{V}_3$  的权重； $1-u-v$  为  $\vec{V}_1$  的权重，且满足  $u \geq 0, v \geq 0, u+v \leq 1$ 。

对于以  $O$  为起点，以  $\vec{D}$  为方向向量的射线，其上任意一点  $I$ ，有

$$\vec{I} = \vec{O} + t\vec{D} \quad (20)$$

联立空间射线与空间三角形的参数方程，有

$$(1-u-v)\vec{V}_1 + u\vec{V}_2 + v\vec{V}_3 = \vec{O} + t\vec{D} \quad (21)$$

整理可得线性方程组：

$$\begin{pmatrix} -\vec{D} & \vec{V}_2 - \vec{V}_1 & \vec{V}_3 - \vec{V}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ u \\ v \end{pmatrix} = \vec{O} - \vec{V}_1 \quad (22)$$

根据克莱姆法则 (Cramer's Rule)，若系数行列式  $\begin{vmatrix} -\vec{D} & \vec{V}_2 - \vec{V}_1 & \vec{V}_3 - \vec{V}_1 \end{vmatrix} = 0$ ，则该方程组没有解，即空间射线与空间三角形没有交点；若系数行列式  $\begin{vmatrix} -\vec{D} & \vec{V}_2 - \vec{V}_1 & \vec{V}_3 - \vec{V}_1 \end{vmatrix} \neq 0$ ，则该方程组可解得

$$\begin{cases} t = \frac{\begin{vmatrix} \vec{O} - \vec{V}_1 & \vec{V}_2 - \vec{V}_1 & \vec{V}_3 - \vec{V}_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\vec{D} & \vec{V}_2 - \vec{V}_1 & \vec{V}_3 - \vec{V}_1 \end{vmatrix}} \\ u = \frac{\begin{vmatrix} -\vec{D} & \vec{O} - \vec{V}_1 & \vec{V}_3 - \vec{V}_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\vec{D} & \vec{V}_2 - \vec{V}_1 & \vec{V}_3 - \vec{V}_1 \end{vmatrix}} \\ v = \frac{\begin{vmatrix} -\vec{D} & \vec{V}_2 - \vec{V}_1 & \vec{O} - \vec{V}_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\vec{D} & \vec{V}_2 - \vec{V}_1 & \vec{V}_3 - \vec{V}_1 \end{vmatrix}} \end{cases} \quad (23)$$

令  $\vec{E}_1 = \vec{V}_2 - \vec{V}_1, \vec{E}_2 = \vec{V}_3 - \vec{V}_1, \vec{T} = \vec{O} - \vec{V}_1$ ，根

据向量混合积公式，有

$$\begin{cases} t = \frac{(\vec{T} \times \vec{E}_1) \cdot \vec{E}_2}{(\vec{D} \times \vec{E}_2) \cdot \vec{E}_1} \\ u = \frac{(\vec{D} \times \vec{E}_2) \cdot \vec{T}}{(\vec{D} \times \vec{E}_2) \cdot \vec{E}_1} \\ v = \frac{(\vec{T} \times \vec{E}_1) \cdot \vec{D}}{(\vec{D} \times \vec{E}_2) \cdot \vec{E}_1} \end{cases} \quad (24)$$

将  $t$  代入空间射线的参数方程，可求得交点  $I$  的坐标为

$$\vec{I} = \vec{O} + \frac{(\vec{T} \times \vec{E}_1) \cdot \vec{E}_2}{(\vec{D} \times \vec{E}_2) \cdot \vec{E}_1} \vec{D} \quad (25)$$

若  $u$ 、 $v$  满足  $u \geq 0, v \geq 0, u+v \leq 1$ ，则交点  $I$  位于该空间三角形内；否则，交点  $I$  不在该空间三角形内。

当同时存在多个三角形与鼠标点击形成的射线相交时，需要添加距离测试。通过交点与摄像机位置坐标  $O$  之间的欧氏距离，选择摄像机视角看到的第一个交点  $I_1$ ，以保证绘制的交点位于三维模型表面。鼠

标点击交互自由绘制功能算法流程如图 13 所示，获得的空间轨迹自由绘制曲线效果如图 14 所示。

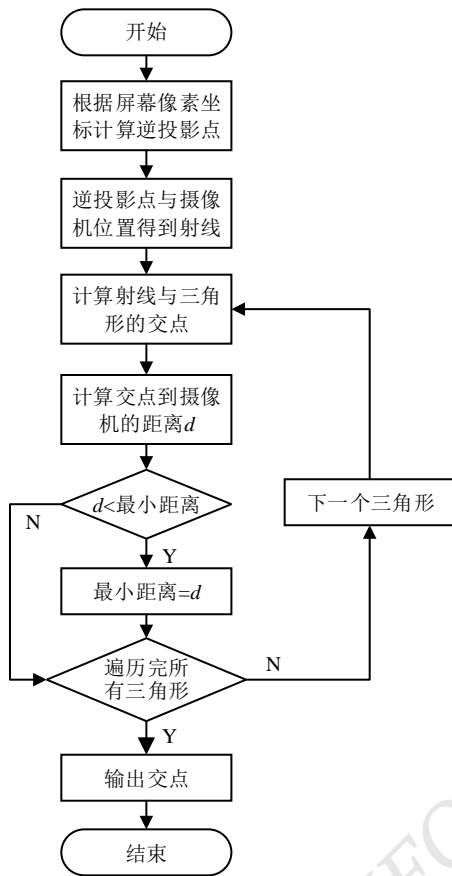


图 13 鼠标点击交互自由绘制功能算法流程图

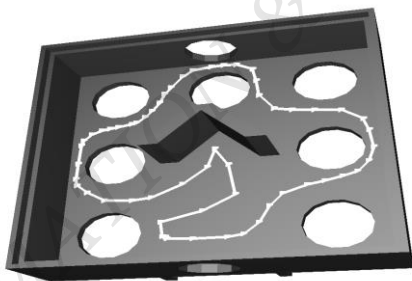


图 14 空间轨迹自由绘制曲线效果图

## 4 结论

本文基于光束逆投影技术以及相对运动坐标系转化原理，设计光束逆投影的三维模型可视化交互系统，解决了三维重建得到的三维模型文件的后续应用问题，完善优化了三维可视化软件的交互功能，达成

了三维模型的可视化展示及旋转功能，并在此基础上基于光束逆投影原理实现鼠标点击选取和空间轨迹自由绘制 2 种交互方式。这 2 种交互方式使得用户能提取到三维模型文件中储存的尺寸信息，且能在三维模型表面上自由绘制空间轨迹并用于控制执行机构的运作。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## 参考文献

- [1] SAITO H, BABA S, KANADE T. Appearance-based virtual view generation from multicamera videos captured in the 3-D room[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2003,5(3):303-316.
- [2] LI P, CHEN X, SHEN S. Stereo R-CNN based 3D object detection for autonomous driving[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019:7644-7652.
- [3] SAMPAIO G S, SILVA L A, MARENGONI M. 3D reconstruction of non-rigid plants and sensor data fusion for agriculture phenotyping[J]. Sensors, 2021,21(12):4115.
- [4] 王启超,张维光,任永平.基于全景相机的 3D 坐标测量方法[J].电子测量技术,2017,40(12):203-208.
- [5] 贾佳璐,应忍冬,潘光华,等.基于ToF相机的三维重建技术[J].计算机应用与软件,2020,37(4):127-131.
- [6] 雷禧生,肖昌炎,蒋仕龙.基于 TOF 相机的喷涂工件在线三维重建[J].电子测量与仪器学报,2017,31(12):1991-1998.
- [7] 张祖勋,苏国中,郑顺义,等.OpenGL 成像机理及其与摄影测量方位元素的相关分析[J].武汉大学学报(信息科学版), 2004,29(7):570-574.
- [8] 徐凤雪.OpenGL 中三维图形的显示过程[J].电子技术与软件工程,2020(2):66-68.
- [9] 李军锋,巫庆辉,刘杰.基于 Unity3D 的《电机拖动》虚拟实验室设计与开发[J].国外电子测量技术,2016,35(10):87-90.
- [10] 孙妮芳,杨志强,陈诚,等. OpenGL 实现 3D 模型的交互控制[J].计算机应用与软件,2007,24(10):207-209.
- [11] 晏海平,吴禄慎,陈华伟.基于 VC 和 OpenGL 的三维点云处理软件系统设计[J].计算机应用与软件,2014,31(6):177-180; 207.

[12] 胡延平,崔凯.移运油管机械手设计及其轨迹规划[J].机床与液压,2022,50(3):26-30.

[13] 伊华伟.基于改进蚁群算法的机械手三维操作路径规划[J].计算机应用与软件,2014,31(4):302-304;307.

[14] 齐洪方,郭润琪.复杂曲面工件接触式在线测量路径规划研究[J].机电工程,2021,38(11):1472-1478.

作者简介:

曾嘉琪,男,1999年生,硕士研究生,主要研究方向:三维重建及可视化、点云处理。E-mail: 577248633@qq.com

王春鹏(通信作者),男,1974年生,本科,副教授,主要研究方向:智能感知、光机电一体化。E-mail: chunpeng@gdut.edu.cn

王桂棠,男,1964年生,硕士研究生,教授,主要研究方向:嵌入式控制、智能制造、机器视觉。E-mail: wanggt@gdut.edu.cn

高梓皓,男,1998年生,硕士研究生,主要研究方向:三维重建及可视化、计算机图形学。E-mail: 974725965@qq.com



(上接第9页)

[20] 李成勇,王莎,陈成瑞.基于 CMOS 图像采集的车道偏移识别系统设计与实现[J].中国测试,2022,48(6):106-110.

[21] 叶娜.基于 OpenCV 的数码管字符识别[J].机电工程技术,2021,50(11):196-198;239.

[22] ZHANG H, ZHU Y, FENG J, et al. Nonuniform ISRJ suppression based on time shift alignment and morphological processing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2414(1):012010.

[23] GAO Z, QIU Y, ZHOU J. Paper defect detection algorithm based on the mathematical morphology and computer vision[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022,2365(1):012045.

[24] 张贝.青海刺绣纹样的边缘提取研究与应用[D].西宁:青海师范大学,2021.DOI:10.27778/d.cnki.gqhzzy.2021.000428.

[25] WANG Z, LI K, WANG X, et al. An image edge detection algorithm based on multi-feature fusion[J]. Computers, Materials & Continua,2022,73(3):4995-5009.

[26] 臧沙沙.基于改进 HED 网络的地震图像边缘检测方法研究[D].西安:西安石油大学,2021.

[27] PAN Q, YU Y, HAFTOM H B. Research on lightweight few-shot learning algorithm based on convolutional block attention mechanism[J]. International Journal of Computational Intelligence and Applications,2023,22(3): 2350020.

[28] XU H, LAI S, Li X, et al. Cross-domain car detection model with integrated convolutional block attention mechanism[J]. Image and Vision Computing, 2023,140(12): 104834.

[29] 高冶.基于 RCF 网络的图像边缘特征提取[J].信息与电脑,2022,34(24):75-77.

[30] ZHONG W, JIANG Y, ZHANG X. Research on automatic recognition method of artificial ground target based on improved HED[J]. Applied Sciences, 2023,13(5):3163.

作者简介:

黄启华,男,1998年生,硕士研究生,主要研究方向:机器视觉。

杜玉晓(通信作者),男,1973年生,博士研究生,副教授,主要研究方向:自动化装备与集成、数字图像处理、医疗器械设备及脑机接口(BCI)技术。E-mail: yuxiaodu@gdut.edu.cn



《自动化与信息工程》期刊公众号、青年编委申请表及审稿专家信息表



期刊公众号



青年编委申请表



审稿专家信息表