

# 10886348\_qyf\_基于手绘草图的三维模型检索\_基于 手绘草图的三维模型检索初稿8.0

## 【原文对照报告-研究生版】

报告编号: 231e4049f36a5f91

检测时间: 2021-05-21 10:17:37

检测字符数: 28411

作者姓名: 10886348

所属单位: 山东省图书馆

检测结论: 全文总相似比 
$$= \text{复写率} + \text{他引率} + \text{自引率} + \text{专业术语}$$
 **21.49%** 
$$= 20.28\% + 1.21\% + 0.0\% + 0.0\%$$

其他指标: 自写率: 78.51%

高频词: 模型, 三维, 检索, 草图, 一个

典型相似文章: 无

指标说明: 复写率: 相似或疑似重复内容占全文的比重

他引率: 引用他人的部分占全文的比重

自引率: 引用自己已发表部分占全文的比重

自写率: 原创内容占全文的比重

典型相似性: 相似或疑似重复内容占全文总相似比超过30% 专业术语: 公式定理、法律条文、行业用语等占全文的比重

相似片段: 总相似片段 167  
期刊: 29 \ 博硕: 88 \ 综合: 0  
外文: 0 \ 自建库: 0 \ 互联网: 50

检测范围: 中文科技期刊论文全文数据库 中文主要报纸全文数据库 中国专利特色数据库  
博士/硕士学位论文全文数据库 中国主要会议论文特色数据库 港澳台文献资源  
外文特色文献数据全库 维普优先出版论文全文数据库 互联网数据资源/互联网文档资源  
高校自建资源库 图书资源 古籍文献资源  
个人自建资源库 年鉴资源 IPUB原创作品

时间范围: 1989-01-01至2021-05-21

颜色标注说明:

- 自写片段
- 复写片段 (相似或疑似重复)
- 引用片段 (引用)
- 专业术语 (公式定理、法律条文、行业用语等)

## 基于手绘草图的三维模型检索

### 摘要

随着计算机CPU和GPU的计算能力大大提高,三维模型不仅变得越来越复杂,而且细节信息也越来越丰富,在许多不同的领域应用得愈来愈广泛,如动画相关领域、机械行业领域、医疗事业领域等,三维模型的数量也越来越多,而三维模型的分类和检索已成为一个重要的研究方向。尽管许多学者对三维模型检索技术进行了各种研究,并提出了许多不同的模型检索算法,但对于三维模型检索而言,仍有许多问题有待解决。

本文通过对现有三维模型检索技术的研究分析,发现三维模型固有的复杂性和高维度数据的计算会严重影响了模型的检索速度和准确性。本文采用如下方法来进行处理。首先,对三维模型进行降维处理,接着,通过将二维视图作为三维模型的检索条件,以降低检索成本。最后,提出了一种基于手绘草图的三维模型检索方法。本文对以下内容做了主要的研究。

为了提高检索的准确性,首先通过适当的空间位置变化来渲染三维模型,然后根据固定投影的方法得到二维视图图集。每个模型选择6个2D视图作为3D模型的特征视图集。然后从手绘草图和二维视图图集中提取特征向量,并以Zernike矩和Fourier描述符作为集成特征描述符,构造加权的全局视图特征和D2描述符集。通过集成特征描述符来检索三维模型,以充当用户手绘草图和模型的二维视图的特征向量,从而执行相似性评估。实验结果表明,该方法能够有效地对三维模型进行分类。

关键词 三维模型检索; Zernike矩; Fourier描述符; D2形状描述符; 集成特征描述符

3D model retrieval based on hand drawn sketch

### Abstract

With the rapid development of CPU and GPU, 3D models are not only becoming more and more complex and rich in details, but also widely used in animation, machinery, medical and other fields. The number of 3D models is also increasing. The classification and retrieval of 3D models has become an important research direction. Although many scholars have done different researches on 3D model retrieval technology and proposed many different model retrieval algorithms, there are still many problems to be solved.

Through the research and analysis of the existing 3D model retrieval technology, this paper finds that the inherent complexity of 3D model and high-dimensional calculation seriously affect model retrieval. In this paper, the three-dimensional model dimension reduction method is used, and the two-dimensional view is used as the retrieval condition of the three-dimensional model to reduce the retrieval cost. This paper presents a 3D model retrieval method based on hand-drawn sketches.

In order to improve the accuracy of retrieval, firstly, the 3D model is rendered according to the appropriate spatial position change, and then the 2D view set is obtained according to the fixed

projection method. Each model selects 6 2D views as the feature view set of 3D model. Secondly, feature vectors are extracted from sketch and 2D view sets, and weighted sets of global view features and D2 descriptors are constructed by Zernike moments and Fourier descriptors as integrated feature descriptors. By integrating feature descriptors to serve as feature vectors of user's hand drawn sketches and 2D views of the model, similarity evaluation is performed to retrieve 3D models. Experimental results show that this method can effectively classify 3D models.

Keywords 3D model retrieval, Zernike, Fourier descriptor, D2 shape descriptor, Integrated feature descriptor

符

目 录

摘要I

AbstractII

第1章 绪论1

1.1 课题背景1

1.2 研究意义1

1.3 国内外研究现状2

1.4 课题的主要研究内容3

1.5 本文文章结构安排3

第2章 基于手绘草图的三维模型检索的总体框架5

2.1 三维模型检索的体系架构5

2.2 三维模型检索的处理流程6

2.2.1 三维模型投影的处理架构6

2.2.2 三维模型检索的处理架构7

2.3 本章小结8

第3章 三维模型的处理9

3.1 OFF模型文件格式解析及渲染9

3.2 固定视角的模型投影技术10

3.3 三维模型的光照和材质添加14

3.4 三维模型的空间变化16

3.5 三维模型投影系统结果17

3.6 本章小结18

第4章 草图的绘制处理19

4.1 直线类图形绘制19

4.1.1 直线20

4.1.2 矩形20

4.1.3 三角形20

4.2 曲线图形绘制21

4.3 圆形绘制22

4.4 铅笔线绘制24

4.5 手绘草图的优化24

4.6 草图绘制的结果25

4.7 本章小结26

第5章 草图及三维模型的特征提取27

5.1 全局试图特征描述符27

5.1.1 Zernike矩27

5.1.2 Fourier描述符29

5.2 D2描述符30

5.3 集成描述符	31
5.4 本章小结	33
第6章 基于手绘草图的三维模型检索	34
6.1 相似性计算	34
6.1.1 欧几里得距离	35
6.1.2 曼哈顿距离	35
6.1.3 切比雪夫距离	35
6.1.4 闵可夫斯基距离	36
6.1.5 马氏距离	36
6.2 基于手绘草图的三维模型检索结果	37
6.3 本章小结	38
结论	40
致谢	41
参考文献	42
附录A	43
附录B	44
附录C	45

## 第1章 绪论

### 1.1 课题背景

随着三维建模技术的进步，特别是三维扫描仪相关设备的逐步成熟和相对普及，当今的互联网上积累了大量的三维模型，这使得模型数量在迅速增加。举例来说，在模型交易平台Turbosquid中，用户可以直获取海量的不同的三维模型。在Google 3D 仓库中，用户可以从拥有超过上万个的模型中任意选择自己所需要的模型。为了合理且有效率的利用现有的三维模型，有必要开发一个便捷可靠的三维检索引擎。一个高效可靠的三维模型检索引擎是通过特定的交互操作从数据库中找到一个满足用户意图的三维模型，待检索的对象可以是整个模型（如整台电脑）或模型的一部分（如电脑的显示屏）。

目前三维模型在种类与个数上的增长的速率日渐增加，而且应用越来越广泛。三维模型广泛应用于较多的不同领域，如加工制造业产品的开发设计、建筑模型的电脑绘制、各类游戏的虚拟现实技术、计算机辅助开发和绘图、三维游戏的开发和影视动画特效等。不难发现，**三维数据模型库变得愈来愈普遍。在互联网上，每天都有各种各样的三维模型产生。目前，MPEG-7标准模型的一个重要研究内容便是三维模型。由此可见，三维模型的检索是现在计算机图形检索的一个热点研究课题。**

### 1.2 研究意义

相关三维建模企业应该优先把握在当前激烈的市场竞争中的商机，生产出符合用户需求的产品，并从中获取利润，就不得不思考降低三维模型设计和三维模型处理的高昂成本。研究和调查表明，在产品的设计过程中，只需从头开始制作约20% 个设计。40% 设计可以通过直接重用现有设计来完成；此外，可以通过对现有设计进行适当的修改来获得40% 设计。如果您在每次生产新产品时从头开始选择材料，绘制图纸并设计加工计划，这不仅要花费时间，而且会增加成本。在生产过程中，经常发生重复设计，其本质原因是没有高效的CAD模型检索工具。快速有效的CAD模型检索无疑将大大缩短开发周期，不仅提高了设计效率，而且为企业带来更多的效益。重用现有的CAD模型也将使企业节省更多的成本。

如今，市面上常见的CAD模型库的规模因受到三维CAD模型的种类和数量的扩大而快速加大。据Wikipedia的不完全统计，目前世界上现存的三维模型将近有300亿个。随之而来的问题便是：三维模型的结构变得更加复杂多样。同时，国内外专家和工程师开始对三维CAD模型的检索研究投入了更多的精力，因为从模型库中找到符合用户设计意图的模型越来越重要。

三维CAD模型检索不但成为了计算机图形学中的计算机辅助设计领域的一个重要研究课题，也推动了近年来该图形学领域的一个研究热潮。该研究不仅仅让三维CAD模型的重用技术变成具有较高的实用意义，同时也加深了对基于计算机的设计和人工智能的理解，促进了相关学科的发展如数学、物理和计算机图形学等。

### 1.3 国内外研究现状

近年来,国内的对图形检索的研究也有了更进一步的发展,目前,在国内对三维图形检索的研究中,基于草图的识别方法主要包括以下几类:

- (1) 数理数据统计法。通过数理统计草图中不同类型的线条的数据,以此进行识别。
- (2) 模糊类检测法。通过利用模糊处理原理和技术,识别出草图位置和笔画的特征向量,以此进行识别。
- (3) 几何框架交互法。通过分析草图的笔画,使用预先设置好的不同阈值进行分类,以此进行识别。
- (4) 基于滤波器和神经网络的识别方法,即构造滤波器对笔画进行分类。

基于手绘草图的3D模型检索,尽管不同的用户会根据其主观意图对同一模型进行不同的描述,但模型的组成是固定的。例如,显示器由两个主要部分组成,一个是底座,另一个是屏幕。绝大多数屏幕是矩形的,并且屏幕必须在底座上方,并且显示屏比显示器的底座大得多。由此可以得出结论,我们可以根据用户绘制的不同的简单草图,简单地确定出用户想要得到的检索的预期三维模型结果。Sezgin T M等 [1] 提出了一种可以识别线、圆等几何图形的算法,Li B等 [2] 开发了一种基于监督学习的草图识别器,使得草图欲表达的语义可以被准确的获取到。觉飞 [3] 建立了基本的基于草图的三维场景检索基准,并在该基准上评估了14种基于草图的检索方法。Zhu [4] 将三维图形投影到二维空间中,并使用自动编码器对二维图像进行特征学习。传统的局部图像描述符辅以深度学习功能。Konstantinos等 [5] 和周岩等 [6] 利用三维模型的二维全景表示作为卷积神经网络的输入,利用卷积神经网络计算特征。张云峰 [7] 利用图像与三维模型表达信息的互补性,建立图像与模型的关系。在通过Canny算子来获取的边缘信息的基础上,张艺琨 [8] 等进一步提取形状上下文特征描述的全局信息,将ORB特征和形状上下文特征进一步融合,得到一种新的集成描述特征,用这种新的特征表示三维模型。李海生 [9] 等提出了基于模型中二面角分布直方图的特征描述方法。安伯青 [10] 利用深度学习技术,解决了基于手绘草图的三维模型检索问题。

#### 1.4 课题的主要研究内容

在分析二维视图特征定义和三维模型相似度计算的基础上,对三维模型检索策略进行一定程度的研究。首先,从不同角度投影三维模型得到相应的二维视图。接着,计算草图与三维模型的每个二维视图之间的相似度。最后,选择最大相似度值作为草图与三维模型的每个二维视图之间的相似度。于此同时,开发了基于草图的三维模型检索系统。

通过阅读大量文献,不但了解了国内外几种三维模型检索方法的开端、发展历程和现今的发展趋势。并且分析总结了存在的问题和不足,并对三维模型的检索方法进行了严格的分析和更进一步的研究。本文的主要研究内容如以下几个模块所示:

- 1) 从不同角度投影3D模型,以获得相应的2D视图,并收集所有2D视图以形成最佳视图集。
- 2) 综合利用多个特征来描述草图的二维视图和三维模型,并使用欧几里得距离来计算草图与二维视图之间的相似性。基于三维模型的二维图集计算草图与三维模型之间的相似度。
- 3) 开发三维模型检索系统,从模型库中找到与草图最相似的三维模型,并显示多个相似的三维模型排序列表。

#### 1.5 本文文章结构安排

三维模型检索方法的研究的主要研究重点在于,在模型特征向量的提取和模型相似度计算,以此为基础,便可以探索出了一套基于手绘草图的三维模型检索方法。三维模型的相应的二维视图是通过不同角度的投影获取的。计算草图的每个二维视图与三维模型之间的相似性。选择最大相似度值作为草图和3D模型之间的相似度。论文共6章,各章的内部结构安排如下:

第一章是绪论。本章首先简要介绍了本文的研究背景和意义,接着分析了目前国内外的研究现状,以及存在的问题,然后介绍了本文的主要研究内容,最后讲述了本文的章节安排。

第二章是基于手绘草图的三维模型检索的总体框架。该系统主要包括两部分,一是模型投影的处理,二是检索系统的处理。对于这两部分的过程进行梳理和介绍。

第三章是三维模型的处理。本章主要介绍了本文实验所需的数据采集,分析了所采用的模型格式,具体介绍了各种投影方式在坐标空间上的变化以及灯光效果的添加。对模型进行渲染以获得合适的三维模型,并进行投影以获得二维视图集。

第四章是手动绘制绘图的处理。本章主要介绍手绘草图绘图板的设计。在硬渲染的基础上,采用软渲染的算法实现了基本图形的绘制,包括直线、矩形、三角形、圆形、曲线和铅笔线的绘制。

第五章是三维模型的草图和特征提取。本章提出了一种集成描述符,将全局视图描述符(包括了Zernike矩和Fourier描述符)与二维形状分布相结合,提取手绘草图和二维视图的特征,以解决单个描述符对二维视图特征提取不完全的问题。



第六章是基于手绘草图的三维模型检索。本章主要比较几种距离计算方法，选择最佳距离来计算草图与二维视图的相似度。

最后对全文的工作进行总结并对未来发展进行了展望。

## 第2章基于手绘草图的三维模型检索的总体框架

现在市面上常见的三维模型检索方法都是以基于内容的检索方式为主的。简单来说，是用用户自己所拥有的三维模型检索资源来搜索未知的三维模型资源。这种方法有一个较大的弊端，便是对与新手用户相当的不友好，因为大多数的普通用户不一定拥有大量现成的三维模型资源，这就就会导致这种方法有一定的局限性。

本文的基于手绘的三维模型检索相较于上述的方法更加的方便，适合大多数的普通用户。并且可以更加方便的获取用户的搜索意图。通过使用用户的手绘草图与模型数据库中的不同的三维模型的6张不同的二维视图集进行相似性的比较，最后可以得到多个检索模型。本章描述基于手绘草图的三维模型搜索的体系框架。

### 2.1 三维模型检索的体系架构

本文实现的检索系统是基于手绘草图的三维模型检索。基于手绘草图的三维模型检索主要模块可以分为手绘草图的导入或绘制、手绘草图的特征向量的提取、三维模型的实时渲染、三维模型的固定投影、二维视图视图集的特征提取、相似度比较。图2-1显示了系统的总体框架。

1. 手绘草图的绘制。用户可以在纸上画出简单的草图并上传到检索系统，也可以在系统中给出的简单画板中画出草图，画板中包含部分绘图时会用到的常见工具（包括有：直线、矩形、三角形、圆形、曲线、铅笔线，橡皮擦）。

2. 手绘草图的特征提取。本文提出了一种结合全局视图特征和D2形状描述符的集成描述符作为新的描述符，全局视图特征包括了Zernike矩和Fourier描述符，本系统使用该集成描述符提取手绘草图的特征以检索3D模型。

3. 3D模型的渲染。本系统的三维模型采用ModelNet40。模型库包含40种不同类型的3D模型。并且模型的存储文件格式为Object file format。因此，有一个简单的渲染器可以渲染所有模型，并且渲染器集成了一些基本操作（包括了：模型的旋转，模型的缩放，模型的移动，模型的不同光照效果添加和模型不同材质材料的修改）。

4. 三维模型的固定投影。倘若直接通过使用用户绘制好的二维草图来进行3D模型检索，则结果便是因为三维模型的大小而造成特征的较大差异，本文中的方法是对现有的三维模型进行一定程度的处理，如模型降维操作，也就是说，通过投影将三维模型转换二维视图集。

5. 二维视图集的特征提取。提取模型的特征的方法与提取草图特征的方法相同。

6. 相似性比较。使用距离公式来计算得出最接近草图检索的8个检索模型。

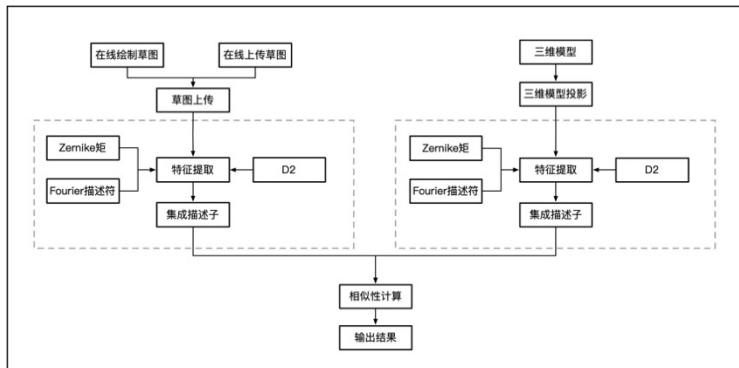


图2-1 系统的总体框架

### 2.2 三维模型检索的处理流程

本系统主要用于三维模型的检索，为了因对草图与不同模型的二维视图集的相似性比较，因此需要有一个模型渲染和投影的程序。该程序主要用来实现将不同的三维模型渲染出来，并在显示器上投影出6张不同的二维视图。

本系统的三维模型的处理流程主要可以分为两大部分。一部分是三维模型的处理架构，主要负责将模型库中的三维模型渲染出来，并进行替一定角度的投影，最后得到二维视图集。另一部分是三维模型检索的处理架构，主要是将用户手绘的草图与三维模型投影系统中获得的二维视图进行特征提取，并进行相似性计算，最后得到三维模型检索的结果，并将它返还给用户。

#### 2.2.1 三维模型投影的处理架构

基于手绘草图的三维模型投影过程如图 2-2 所示。相较于后续的三维模型的检索是较为简单的。首先，本系统会先解析模型库中不同的Object File Format格式的模型文件，接着，将解析后的模型导入该三维模型投影系统后，为解析并且渲染出来的三维模型添加材质和各种光照效果如平行光，点光源，聚光灯等效果，然后，对渲染出来的三维模型进行模型的平移操作，模型的旋转操作，模型的缩放操作。最后，在渲染出的三维模型中，通过在水平方向上放置一个虚拟的摄像机，该虚拟的摄像机会按照一定的角度，对模型进行投影。通过这些操作，便可以得到三维模型的二维视图集。

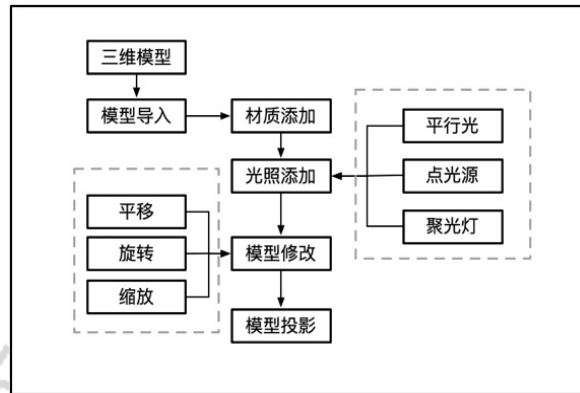


图2-2 三维模型投影的处理架构

## 2. 2. 2三维模型检索的处理架构

基于手绘草图的三维模型检索过程可以简单的分为两个阶段：在线检索阶段和线下检索阶段，具体的过程如图 2-3 所示。

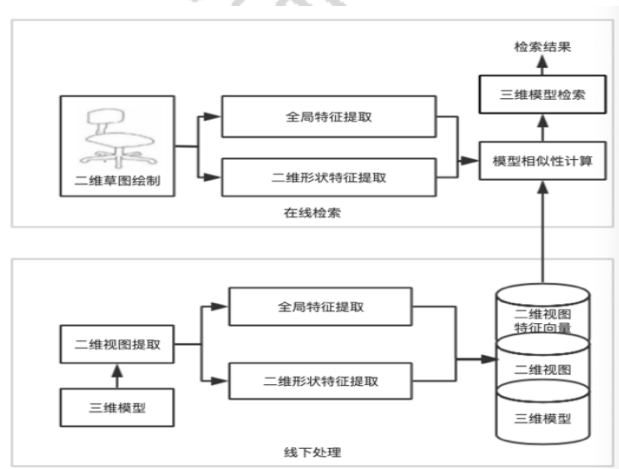


图2-3 三维模型检索的处理架构

在线下检索过程中，首先利用固定投影的方法对三维模型进行降维处理，获取6张三维模型库的二维视图集，接着利用集成描述子提取最优视图集的特征包含了全局视图特征与二维形状特征，对于提取的特征进行加权得到 55维集成描述特征，并存入数据库。在线上用户检索阶段，首先用户进行人工手绘草图，接着利用集成描述子提取集成特征。再与数据库内保存的三维模型的集成特征进行相似度比较。按相似度从大到小依次排序，相似度最高的前 8 个模型显示在检索界面。

## 2. 3本章小结

本章主要介绍了三维模型检索算法的两部分，一部分是三维模型投影的完成过程，包括模型渲染、光照、材料添加和模型修改，包括旋转、平移和缩放。另一部分是完整的检索过程，包括基于草图的三维模型检索过程来分析各部分模块的功能和功能，并给出流程图。

## 第3章三维模型的处理

### 3. 1OFF模型文件格式解析及渲染

本系统的三维模型采用ModelNet40。模型库包含40个不同的3D模型，模型的存储文件格式为Object File Format。想要读取和渲染出所需要的3D模型，那么需要解决的第一步便是分析出计算机中的文件是如何存储这些模

型的。通常模型由众多不同大小的各异网格组成，一般为三角形网格。这是因为其他多边形网格可以由一至多个不同或者相同的三角形来组成，并且由三角形组成的平面因为三点共面可以保证平面性。同时可以很快速地定义出内部方向和外部方向。因此，需要先解析Object File Format文件格式。目前，大多数的Object File Format文件的主要目的是用于表示给定曲面多边形的模型的可以有任意数量的顶点的几何形状。ModelNet40中的Object File Format文件必然遵循以下标准：

- (1) 第一行：所有Object File Format文件都是以OFF开头。
- (2) 第二行：描述顶点、面片和边的数量。同时，边的数量可以被省略。
- (3) 每一个顶点都将包含3个分量(X, Y, Z)。
- (4) 每一个面列表将会指定顶点的数量。

如图3-1所示，这是浴缸的Object File Format格式模型。

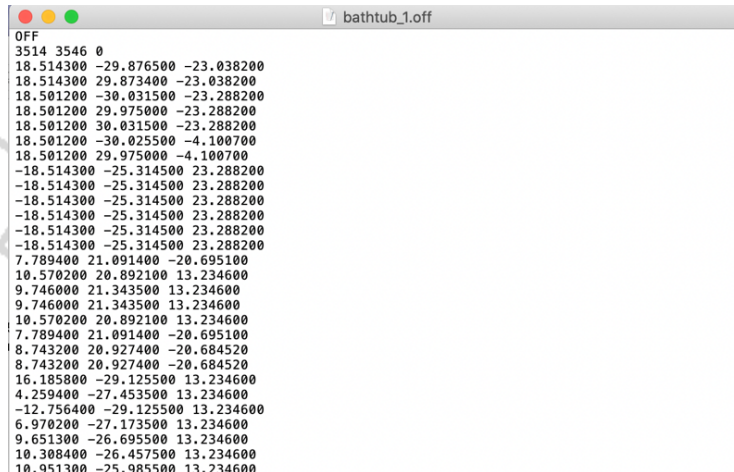


图3-1 Object File Format模型

现在，主流的存储模型的数据结构有面列表，邻接矩阵，以及半边结构。

首先，面列表是存储面中顶点的三元组(Vertex1, Vertex2, Vertex3)它的优点比较的方，面列表是可表达非流行网格的，但面列表的缺点是不支持V-F(Vertex to Face)的快速查询。

其次，邻接矩阵是一种表示顶点与顶点之间相邻关系的多维矩阵。邻接矩阵的优点是支持顶点之间的邻接信息V-V(Vertex to Vertex)的高效查询以及支持非流行网格。但是邻接矩阵的缺点除了没有边的显示表达、并且不支持V-F(Vertex to Face)，V-E(Vertex to Edge)，E-V(Edge to Vertex)，F-E(Face to Edge)，E-F(Edge to Face)的快速查询。

最后，半边结构是记录所有的面、边和顶点，包括几何信息、拓扑信息、附属属性，流行于大部分集合建模应用。半边结构的优点是所有查询操作时间复杂度均为 $O(1)$ ，所有编辑操作时间复杂度均为 $O(1)$ 。半边结构的缺点是只能表达流行网格。在该系统中，我采用的是面列表的数据结构。读取模型的流程图如图3-2所示。

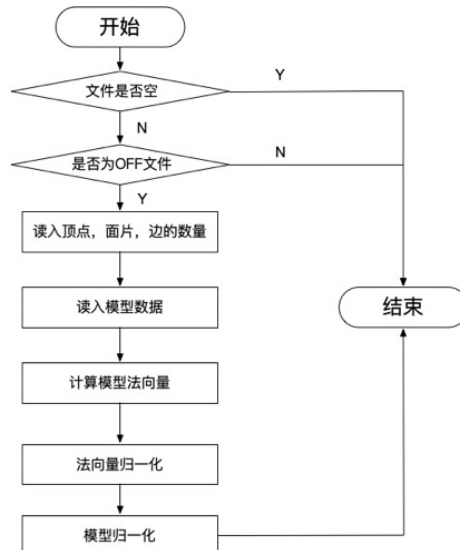




图3-2 模型流程图

### 3.2 固定视角的模型投影技术

该系统基于手绘草图检索。目前主流的研究方法之一是获得一组较为理想的最优视图作为检索数据库，以增加检索的成功率；另一种是探索一种较为合适的特征描述符作为模型的特征向量，从而增加检索的准确率。本文将输入模型的最优视图定义为6个不同的二维图集。采用固定视角的投影技术。

因为用户所绘制的草图是二维的，而模型是三维的，因此需要将三维模型进行降维处理。避免后续相似性计算时因维数灾难而带来的额外的时间上的开销。此外，不同的用户在绘制二维的草图的时候，事实上已经对三维空间的物体做了一个降维处理。绘制的是一个固定视角的物体的投影。因此，为了适应不同用户可能绘制不同视角下的同一物体。并且考虑到了检索系统的效率，本系统只获取了同一个模型的六个不同视角的投影，并以此组成该模型的最优视图集。在尽可能包含用户所绘制物体的视角的同时，减少因视图集合过多冗余而造成的时间上的额外开销。

为了解决草图和模型在维度上的不统一，Su[11]等人采用了固定视角的方法。该方法的具体过程是，将模型放在水平平面上，使得模型竖直向上。对于每一个充当检索数据库的三维模型，在其水平面以上 30度角位置，每隔30度设置一个摄像机，摄像机指向三维模型的中心，每个摄像机获取一张该模型的二维视图。如图所示3-3。该投影方法可以生成12张视图。此外，对于不满足直立向上的模型，将模型周围的正二十面体上的二十个顶点上放置相机。并以此来获取视图。并组成最优视图集。

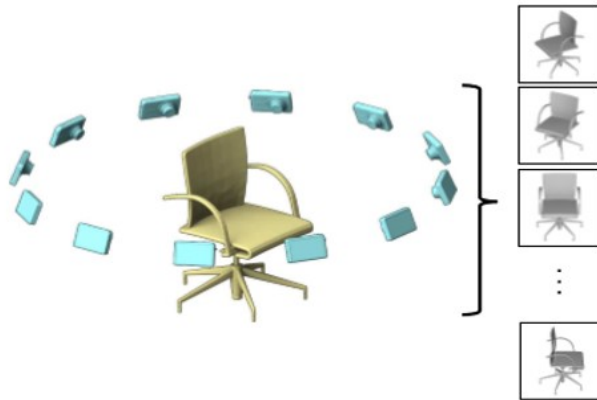


图3-3 三维模型投影

潘婷 [12] 提出了一种基于球面投影的三维模型检索方法。如图3-4所示，它用于解决域的不匹配问题。

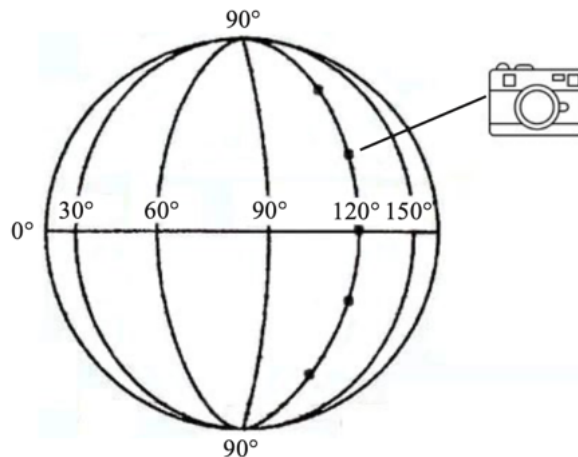


图3-4 球体投影

用一个球体将已经预处理的3D模型包围起来，在这个外接球体的半弧上以一定的间隔放置一个虚拟的摄像机。虚拟的摄像机获得的每个视图后，将半弧旋转30度，然后重复该步骤，直到半弧返回其原始位置。在上图所示之后，通过草图 and 不同投影图像之间的关系来构造特定的分类器，最后便可以得到模型的最优视图。

Christopher M. Cyr[13]等以规定的间隔（5度）对观察球进行采样，如图3-5所示，该图给出了对象视觉球空间被划分成若干个区域，每个区域对应一个二维视图。并在迭代过程中，使用曲率匹配和视图相似群组来定义形状相似度量将视图组合成各个方面。之后将得到的视图集输入数据库中。

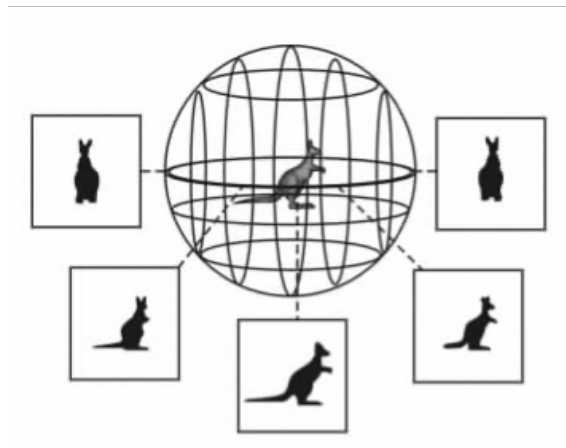


图3-5 物体视球空间

在对模型进行投影时，当代计算机图形学中常用的投影有两种。一种是正交投影，而另一种便是透视投影。两种投影的区别如图3-6所示。首先，正交投影中使用的投影射线彼此平行的，其次，透视投影变换中使用的投影射线是从同一个点射出的，射线以锥体的形式投射到三维模型中。

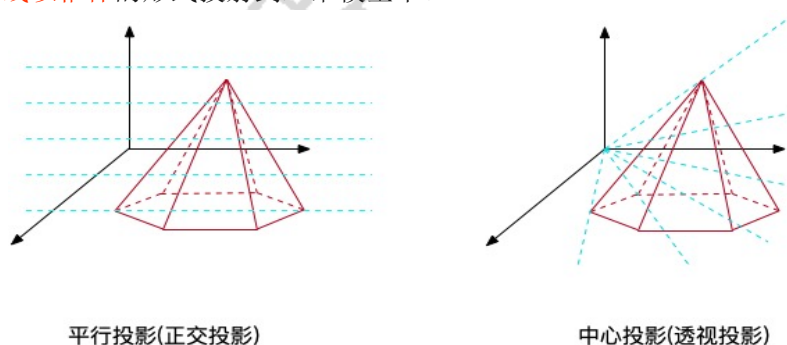
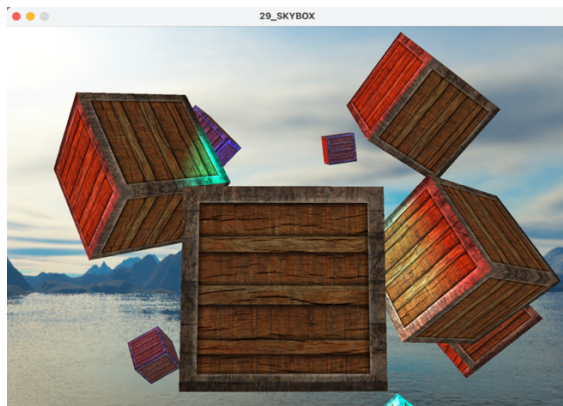


图3-6 正交投影和透视投影

透视投影的最为显著的一个特点是投影线的起点位置。所有的投影线都是从投影中心出发的，因此透视投影的中心也称之为视点。离视点近的物体投影大，反之，离视点远的物体的投影小。当小到无穷远的时候便会消失，消失的点便可以称之为灭点。简单来说，使用透视投影，会达到一种近大远小的效果。如同生活中一些常见的例子：使用数码相机拍摄出来的照片；不同画家的写生作品。如图3-7所示，便是一个透视投影的简单例子。绘制了不同的箱子。加入材质贴图，光照效果，以及一个天空盒。

与透视投影相比较来说，正交投影是相对简单的一种。因为模型坐标的相对位置都不会根本性的变化，在这种投影模型中，所有的光线都是彼此平行的，是平行传播，因此只需将物体的可视部分全部转换到一个立方体空间中即可以完成正交投影。



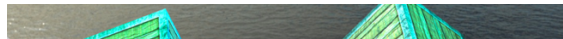


图3-7 透视投影的例子

同理，如图3-8，在上述的箱子的例子中，更改了投影的方式，将其变为正交投影的。可以明显看到，所有的箱子都是一样大的，不再有近大远小的效果，天空盒也因为正交投影的原因，导致失去了作用，因此独立了出来。

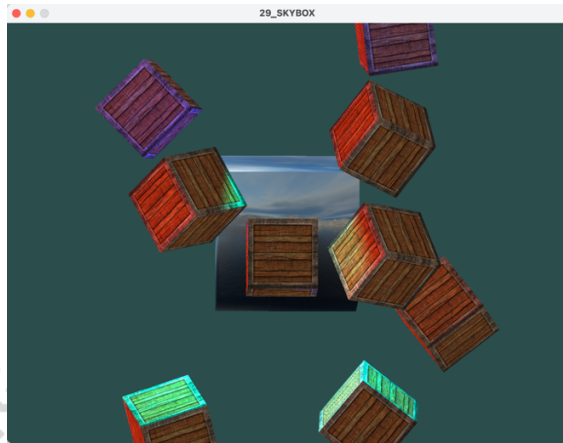


图3-8 正交投影的例子

本系统采用中心投影，即透视投影，因为中心投影在绘制草图时更符合用户的绘制方法。本文所采用的固定投影的思想是，在Su的方法上进行一定的程度的改进。将待投影的三维模型固定于中央不动，投影是通过选择固定的角度和固定的投影数量来进行的。对于每一个三维模型，在与水平面成30度夹角的位置，以模型为中心，每隔60度便放置一个虚拟摄像机，摄像机指向三维模型的中心，该投影方法可以生成6张视图。这6张视图便组成该模型的最优视图集。

### 3.3 三维模型的光照和材质添加

本系统中，在读入Object File Format模型后，会自动计算该模型的各个顶点的法向量。使用法向量，系统可以为模型添加照明效果。采用的Phong光照模型。Phong光照模型的主要由三个不同的光照部分来组成：环境光照，漫射光照以及镜面光照。Phong光照模型的组成结果如图3-9所示。

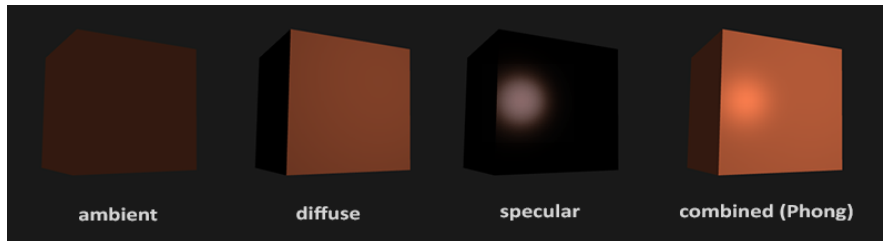


图3-9 Phong光照模型

环境光：大自然中光通常不是仅仅来自于某个唯一的光源，而是来自散布在我们周围的许多不同的光源，即使它们不是立即可见的。光的特性之一是，光可以进行散射和反弹在多个不同的方向上，最终到达不直接可见的点。因此，光可以在其他表面上反射，并间接影响对象的照明。因此，可以在对象的最终最终颜色中添加一种非常小的恒定的颜色来充当环境光，因此即使在没有直接光源照射的情况下，物体对象看起来也总会有一些轻微的光亮，更加贴近生活实际。物体上一点P的环境光光强 $I_e$ 可以表示为

$$I_e = k_a I_a, k_a \in [0,1] \quad ( )$$

$I_a$ 表示来自周围环境的入射光强， $k_a$ 为材质的环境反射率。

漫反射光：模拟灯光对象对对象的方向性影响。兰伯特余弦定律总结了漫反射光的强度与光入射方向与物体表面法向量之间的角度之间的相关性。当 $\theta = 0$ 时，物体表面正好垂直于光线方向，这是获得的光照强度最大；当 $\theta = 90$ 时物体表面与光线方向平行，此时光线照射不到物体，光的强度最弱；最后，物体的表面转向到光线的背面，此时物体对应的表面接受不到光照。物体上一点P的漫反射光强 $I_d$ 表示为：

$$I_d = k_d I_p \cos \theta, \theta \in [0, 2\pi], k_d \in [0, 1] \quad ( )$$

$I_p$ 为光源发出的入射光强， $k_d$ 为材质的漫反射率， $\theta$ 为入射光与物体表面法向量之间的夹角，称为入射角。

**镜面反射光：**镜面光成分所代表的并不是物体的直接颜色，而是在比较光滑的物体对象表面的一个高光亮斑。

通常是光的颜色一个体现。物体上一点P的镜面反射光的光强 $I_s$ 可以表示为：

$$I_s = k_s I_p \cos^n \alpha, 0 \leq \alpha \leq 2\pi, k_s \in [0, 1] \quad ( )$$

$I_p$ 为入射光光强， $k_s$ 为材质的镜面反射率，镜面反射光光强与 $\cos^n \alpha$ 成正比。

计算漫反射和镜面光成分时，要考虑众多关系，如光源和顶点位置之间向量L、法向量N、反射方向R、观察者和顶点位置之间的向量V之间的关系。已经光线的衰弱情况。因此，Phong光照模型可以被定义为：

$$I = k_d I_d + f(d) [k_d I_p \max(N \cdot L, 0) + k_s I_p \max(R \cdot V, 0)^n] \quad ( )$$

$f(d)$ 表示光照的衰弱，可以定义为：

$$f(d) = \min(1, \frac{1}{c_0 + c_1 d + c_2 d^2}) \quad ( )$$

$c_0$ 为常数衰减因子， $c_1$ 为线性衰减因子， $c_2$ 二次衰减因子， $d$ 为光源位置到物体上点P的距离。

基于Phong光照模型的材质。通过多次实验，得到数据如表3-1 所示。

表3-1 Phong光照模型的材质

材质名称	环境光参数 (rgba)	漫发射参数 (rgba)	镜面反射参数 (rgba)	高光指数 (float)
黄铜	R:0.329412, G:0.223529, B:0.027451, A:1.000000,	R:0.780392, G:0.568627, B:0.113725, 1.000000,	R:0.992157, G:0.941176, B:0.807843, 1.000000,	27.897400,
青铜	R:0.212500, G:0.127500, B:0.054000, A:.000000,	R:0.714000, G:0.428400, B:0.181440, 1.000000,	R:0.393548, G:0.271906, 0 B:.166721, 1.000000,	25.600000,
铬	R:0.250000, G:0.250000, B:0.250000, A:1.000000,	R:0.400000, G:0.400000, B:0.400000, A:1.000000,	R:0.774597, G:0.774597, B:0.774597, A:1.000000,	76.800003,
金	R:0.247250, G:0.199500, 0.074500, A:1.000000,	R:0.751640, G:0.606480, 0.226480, A:1.000000,	R:0.628281, G:0.555802, B:0.366065, A:1.000000,	51.200001,
翡翠	R:0.021500, G:0.174500, B:0.021500, A:0.550000,	R:0.075680, G:0.614240, B:0.075680, A:0.550000,	R:0.633000, G:0.727811, B:0.633000, A:0.550000,	76.800003,
黑曜石	R:0.053750, G:0.050000, B:0.066250, A:0.820000,	R:0.182750, G:0.170000, B:0.225250, A:0.820000,	R:0.332741, G:0.328634, B:0.346435, A:0.820000,	38.400002,

### 3.4 三维模型的空间变化

在渲染模型中，一个非常重要的功能就是对模型进行空间上的修改变化。把变换看成是一组顶点移动到一个新的位置的过程。把渲染后的模型的某个顶点从一个位置移动到另一个位置，永远是只存在一个矩阵，把它应用到该模型的全部的顶点后，该模型的大小仍然保持不变。

平移操作。将平移定义为将同一方向上的所有点移动相同距离的操作。因此，倘若想确定平移变换便可以通过只确定一个位移向量来实现。平移是在原向量上增加另一个向量，以在不同位置获得新向量，从而在位移向量的基础上移动原向量的过程。具体公式为：

$$[X' \ Y' \ Z' \ 1] = [X \ Y \ Z \ 1] * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Tx \\ 0 & 1 & 0 & Ty \\ 0 & 0 & 1 & Tz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ( )$$

缩放变换。缩放是一种非刚性仿射变换，可以适当选择缩放、平移和旋转的组合顺序，以获得任何仿射变换。定义缩放变换是为了使几何对象变大或变小。缩放分为两种情况。一种是各个方向的均匀缩放变换。另一种是单一方向上的缩放变换。

缩放变换有一个固定点，因此要定义一个缩放变化，首先，必须先确定几个变量：一个固定点、一个缩放方向、以及三个缩放因子 $\alpha$ 。对于缩放因子而言，如果 $\alpha > 1$ ，对象必然沿着缩放方向逐渐变大；如果 $\alpha$ 在(0, 1)之间，则对象必然沿着缩放方向逐渐变小；如果为 $\alpha$ 负，则将表示以固定点为中心沿缩放方向的反射变换。因此，确定了一个固定点的空间位置和3个独立缩放因子，因此缩放有6个自由度，具体的公式为：

$$[X' \ Y' \ Z' \ 1] = [X \ Y \ Z \ 1] * \begin{bmatrix} Sx & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Sy & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Sz & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ( )$$

旋转变换。旋转是一个比较难定义的概念，它需要较多的参数。它是于标架无关且具有普遍意义。同样也需要3个变量：一个固定点，一个旋转角，旋转轴。使用三角函数，给定一个角度，便可以将一个单一向量变换为一个经过旋转的新向量。这通常是通过使用几组正弦函数(sin)和余弦函数(cos)的各种不同的组合来得到的。在3D空间，旋转矩阵中每个单位轴都有不同定义，旋转角度用 $\theta$ 表示，则具体公式为：

绕X轴旋转：

$$[X' \ Y' \ Z' \ 1] = [X \ Y \ Z \ 1] * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ( )$$

绕Y轴旋转：

$$[X' \ Y' \ Z' \ 1] = [X \ Y \ Z \ 1] * \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ( )$$

绕Z轴旋转：

$$[X' \ Y' \ Z' \ 1] = [X \ Y \ Z \ 1] * \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ( )$$

### 3.5 三维模型投影系统结果

本文的三维模型的投影系统采用OpenGL和OpenCV为几何造型平台，采用ImGui为UI界面，使用C++语言编写。实现了一个简易渲染器，主要的功能有：读取和现实模型；旋转，缩放，移动模型；对模型添加不同的光照效果(平行光，点光源，聚光灯)；不同的材质效果；三维模型的投影。该渲染器的框架界面如图3-10所示。

用户步骤包括如下几步：

步骤1. 选择需要渲染的三维模型。

步骤2. 使用鼠标来旋转，缩放，移动三维模型。

步骤3. 调节光照效果，可选择平行光，点光源，聚光灯，可以分别调整这些光的环境光，漫反射光和镜面反射光。

步骤4. 调节三维模型的材质。

步骤5. 按下键盘'a'和's'以固定水平面60度来旋转三维模型。

步骤6. 按下保存按钮，保存该模型的一张二维视图。

步骤7. 按下自动截图按钮，批量处理三维模型，以获取不同三维模型的二维视图集。

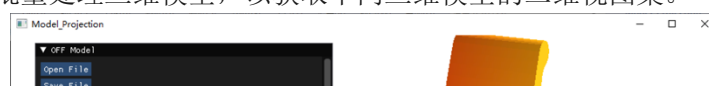






图3-10 渲染器的框架界面图

本文采用了ModelNet40作为模型数据库。对该数据库的部分模型进行渲染，渲染后的结果如图3-11所示。



图3-11 部分模型

### 3.6本章小结

本章主要介绍了检索系统中用到的数据集 ModelNet-40，说明了如何解析Object File Format模型文件格式，并渲染并且加入基于Phong光照模型的平行光，点光源和聚光灯以及材质效果。提出了基于草图检索算法的视图集选择方法。在草图检索算法中采用固定投影的方法，将获得的6张投影作为一个模型的二维视图集。

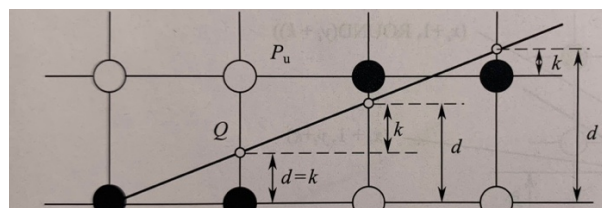
### 第4章草图的绘制处理

设计一个简易的二维绘画板，为不同的用户解决了在线绘制草图的功能的需求。程序界面的大小为了避免不同操作系统以及不同的分辨率，默认为800 X 600。屏幕显示的是一张黑色的背景，可以在上面绘图，点击鼠标右键弹出绘图板的可选菜单栏，上面有不同的绘图功能以及操作功能。基本图形的绘制功能(包括了点，直线，矩形，三角形，圆形，曲线，铅笔线)；实现橡皮筋技术；基本图形的修改功能(包括了橡皮擦技术，草图保存技术)。

#### 4.1直线类图形绘制

Bresenham算法用于绘制直线图，该算法是在主位移方向上每一次都会递增一个单位距离，与此同时，另一个方向上递增零单位距离或者递增一个单位距离。这取决于像素点与理想直线之间的距离，这一距离定义为d。

如图4-1 Bresenham直线算法所示，该直线斜率在区间0-1中，因此X方向为主要的位移方向。假设 $P_i(x_i, y_i)$ 为当前像素， $Q(x_i + 1, d)$ 为理想直线与下一垂直网格的交点。并且假设该直线的起点为 $P_i$ 且位于网格点上，所以可以定义 $d_i$ 的初始值为0。



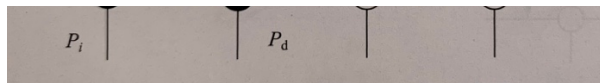


图4-1 Bresenham直线算法

沿着X方向递增一个单位，即可以得到 $x_{i+1} = x_i + 1$ 。下一个候选点为 $P_d(x_i + 1, y_i)$ 或者 $P_u(x_i + 1, y_i + 1)$ 。根据Q点的位置来选择 $P_d$ 或者 $P_u$ 。而Q点的位置是由直线的斜率所决定的。Q点与像素点 $P_d$ 的误差项为 $d_{i+1} = k$ 。当 $d_{i+1} < 0.5$ 时，像素 $P_d$ 距离Q点更近，选择 $P_d$ ，反之选择 $P_u$ 。若Q点到这两个像素点的距离相等，选择任一像素均可。约定选择 $P_u$ 。

因此，可以得到一个简单的递推公式：

$$y_{i+1} = \begin{cases} y_i + 1, & d_{i+1} \geq 0.5 \\ y_i, & d_{i+1} < 0.5 \end{cases} \quad ( )$$

其中，该递推公式的关键在于计算误差项 $d_i$ 。沿着X方向递推一个单位，有 $d_{i+1} = d_i + k$ 。一旦Y方向向上走了一步，就将其减1。由于只需要检查误差项的符号。因此，定义 $e_{i+1} = d_{i+1} - 0.5$ ，来消除小数所带来的影响。改写上述的递推公式可以得到：

$$y_{i+1} = \begin{cases} y_i + 1, & e_{i+1} \geq 0 \\ y_i, & e_{i+1} < 0 \end{cases} \quad ( )$$

取 $e_0 = -0.5$ 。沿着X方向每更新一个单位，则有 $e_{i+1} = e_i + k$ 。当 $e_{i+1}$ 不小于0的时候，下一个像素点更新为 $P_u(x_i + 1, y_i + 1)$ 。同时将 $e_{i+1}$ 更新为 $e_{i+1} - 1$ 。反之，下一个像素点更新为 $P_d(x_i + 1, y_i)$ 。

#### 4.1.1 直线

点击直线功能的按钮后，在绘图面板上，实现画直线的功能，在屏幕的鼠标的当前点的位置画下一个黑点，移动鼠标，按下的第一个点与此时鼠标的位置上的点，连成一条直线。当鼠标按键抬起的时候，直线生成，不再变化。当鼠标移动的时候，直线生成，但根据当前鼠标的位置进行改变。达到一个橡皮筋的效果。

#### 4.1.2 矩形

点击矩形功能的按钮后，在绘图面板上，实现画矩形的功能，在屏幕的鼠标的当前点的位置画下一个黑点，移动鼠标，按下的第一个点与此时鼠标的位置上的点，连成一个矩形。当鼠标按键抬起的时候，矩形生成，不再变化。当鼠标移动的时候，矩形生成，但根据当前鼠标的位置进行改变。达到一个橡皮筋的效果。鼠标的两个点的位置关系如图4-2所示。

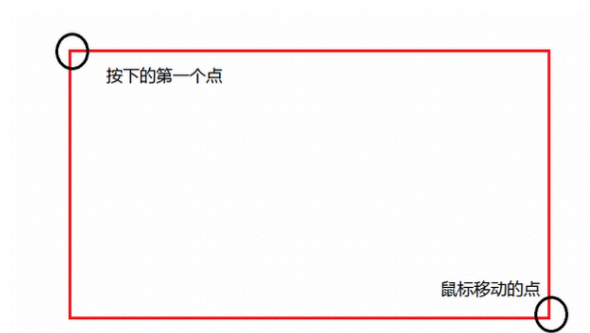


图4-2 矩形绘制的位置关系

#### 4.1.3 三角形

单击三角形功能的按钮后，在绘图面板上，实现绘制三角形的功能，在屏幕上的鼠标当前点绘制一个黑点，移动鼠标，第一个按下的点与此时鼠标位置上的点相连，形成一个三角形。当鼠标按键抬起的时候，矩形生成，不再变化。当鼠标移动的时候，三角形生成，但根据当前鼠标的位置进行改变。达到一个橡皮筋的效果。鼠标的两个点的位置关系如图4-3所示。



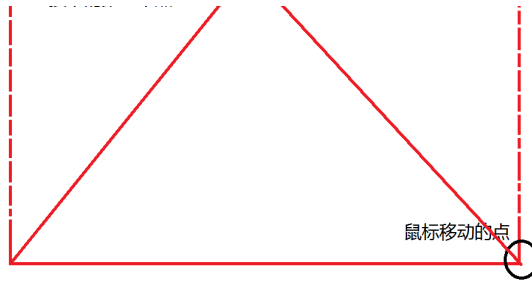


图4-3 三角形绘制的位置关系

#### 4.2 曲线图形绘制

选择曲线按钮可以在屏幕中通过鼠标点击任意四个点来绘制出一段三次被贝塞尔曲线。

给定 $n+1$ 个控制点 $P_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$ ，则 $n$ 次贝塞尔曲线定位为：

$$p(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(t) \quad t \in [0, 1] \quad ( )$$

其中， $B_{i,n}(t)$ 为贝塞尔曲线的基函数，其表达式可以定义为：

$$B_{i,n}(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}, i = 0, 1, 2, \dots, n \quad ( )$$

当 $n=3$ 的时候，贝塞尔曲线的控制多边形有4个控制点，将设其分别为 $P_0, P_1, P_2, P_3$ ，贝塞尔曲线是三次多项式如图4-4所示。

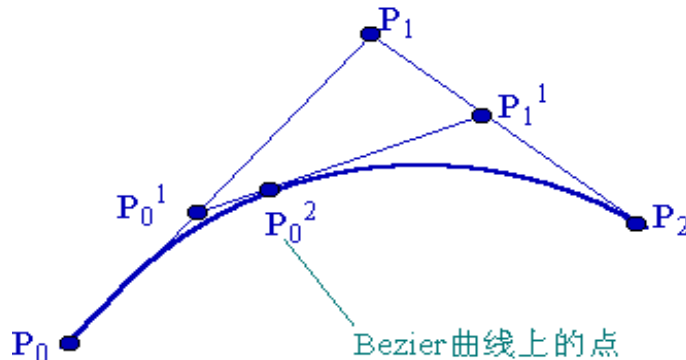


图4-4 三次贝塞尔曲线

将该类贝塞尔曲线称其为三次贝塞尔曲线，将其定义为：

$$p(t) = \sum_{i=0}^3 P_i B_{i,3}(t) \quad ( )$$

拆分开，既可以得到：

$$(1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3 \quad ( )$$

写成矩阵形式为：

$$p(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad ( )$$

#### 4.3 圆形绘制

对于圆形的绘制，常用的有三种方法：第一种是采用Bresenham中点画圆法来绘制一个圆，具体思路与Bresenham绘制直线相似。第二种方法是采用细分的方法，将一个正多边形进行大量的细分，当多边形的变数足够多，多边形的边长足够小的时候，便可以得到一个近似的圆。第三种方法是采用贝塞尔曲线绘制一段圆弧，将多段圆弧拼接起来，便可以得到一个完整的圆。

本系统采用的是第三种方法，使用一段三次贝塞尔曲线可以模拟出1/4的单位圆。如图4-5所示。假定 $P_0^0$ 的坐标为(0, 1)， $P_1^0$ 的坐标为(m, 1)， $P_2^0$ 的坐标为(1, m)， $P_3^0$ 的坐标为(1, 0)。

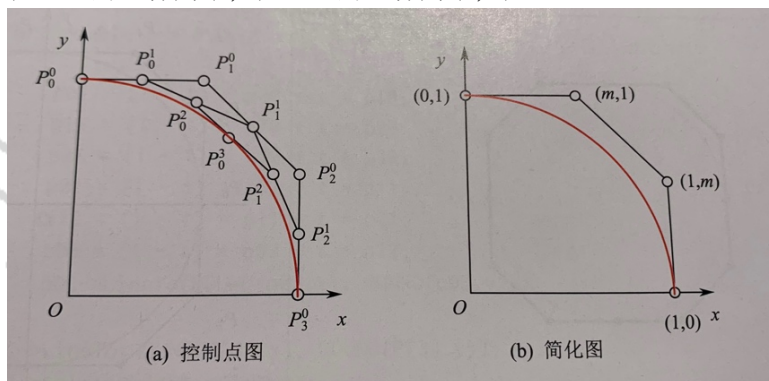


图4-5 贝塞尔曲线模拟1/4圆弧

对于一段三次贝塞尔曲线，其参数表达式为：

$$p(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3 \quad ( )$$

将 $P_0^0$   $P_1^0$   $P_2^0$   $P_3^0$ 代入，对于圆弧的中点，取 $t=0.5$ ，则有：

$$p\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{8} P_0 + \frac{3}{8} P_1 + \frac{3}{8} P_2 + \frac{1}{8} P_3 = \sqrt{2}/2 \quad ( )$$

将控制点的坐标带入，可以得到一个m的近似值0.5523，称其为魔术常数。

点击圆圈功能的按钮后，在绘图面板上，实现绘制圆圈/椭圆的功能，在屏幕上鼠标的当前点绘制一个黑点，移动鼠标，第一个按下的点与此时鼠标位置上的点相连，形成一个圆。当鼠标按键抬起的时候，圆形生成，不再变化。当鼠标移动的时候，圆形生成，但根据当前鼠标的位置进行改变。达到一个橡皮筋的效果。根据鼠标的位置，显示为圆形或椭圆。鼠标的两个点的位置关系如图4-6所示。

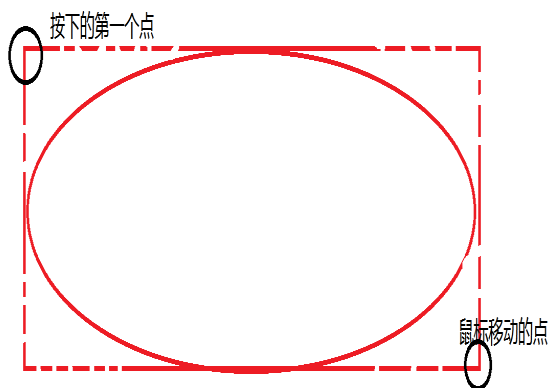


图4-6 圆形绘制的位置关系

#### 4.4 铅笔线绘制

点击铅笔功能的按钮后，在绘图面板上，实现现实生活中的铅笔功能，在屏幕的鼠标的当前点的位置画下一个黑点，移动鼠标，这些黑点就会连接成任意的线，可以是直线，也可以是曲线。

#### 4.5 手绘草图的优化

使用上述方法绘制直线相关的草图时，会发现在一些情况下，直线会出现很明显的锯齿，或者台阶的边界。如图4-7所示。这是因为使用光栅扫描显示器上的图像是由一系列亮度相同的但是面积却是不同的离散的像素点组成的。对于这种现象：因由用离散量表示连续量而造成的失真现象称之为走样。走样是由连续图形离散为图像后引起的失真，走样是数字化图像的必然产物。因此，走样是光栅扫描显示器的一种固有的现象，走样只可以减轻，是不可能完全消除的。

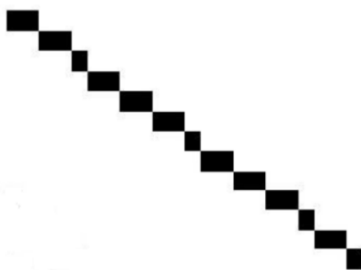


图4-7 直线走样

目前，解决走样的方法主要有两种：一种是考虑计算机的硬件设施。既然是因为光栅化而造成的锯齿形状，只需要提高显示器的分辨率便可以优化这种走样现象。举例来说，当把当前的显示器的分辨率提高了一倍时，那么此时，由于每个锯齿所在的光栅网格由于分辨率的关系，在X方向和Y方向只有原来分辨率的一半，所以走样的现象有所缓和，由此来达到优化的目的。

虽然硬件优化的方法比较简单，但是硬件方法同样拥有其固定的局限性：硬件的反走样技术会受到当今制造工艺的水平限制以及工厂生产的成本限制。实际上来说，是不可能将分辨率做得很高的。所以很难达到理想的效果。

Wu提出了一种反走样算法。简单来说，这是一种不需要硬件设施便可以实现的方法。这是一种模糊直线边界的方法。如图4-8所示。



图4-8 直线反走样

这便是软件反走样，对于在白色背景中的黑色矩形，通过在矩形的边界附近掺入一些灰色像素，可以柔化从黑到白的尖锐变化从远处观察这幅图像时，人眼能够把这些缓和变化的暗影融合在一起，从而看到了更加平滑的边界。

#### 4.6 草图绘制的结果

本文的三维模型的投影系统采用OpenGL和OpenCV为几何造型平台，采用MFC为UI界面，使用C++语言编写。实现了一个简易草图画板，主要的功能有：基本图形的绘制(点，直线，矩形，三角形，圆形，曲线，铅笔线)和基本图形的修改(橡皮擦技术，草图保存技术)该简易草图画板的框架界面如图4-9所示。用户步骤包括如下几步：

步骤1. 点击绘制草图按钮。

步骤2. 调节弹出窗口的大小，准备绘制。

步骤3. 点击鼠标右键，弹出绘制菜单，并选择要绘制的图形。



步骤4. 绘制图形

步骤5. 可选步骤，进入上述菜单，选择修改图形或清除画板，重新绘制。

步骤6. 按下保存按钮，保存所绘制的草图。

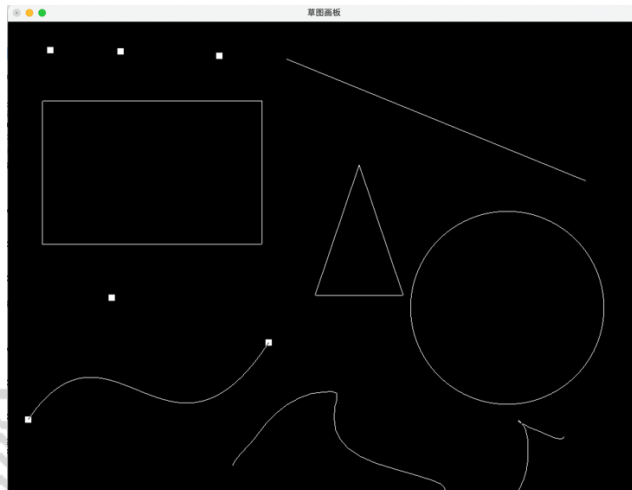


图4-9 简易草图画板的框架

#### 4.7本章小结

本章主要介绍了检索系统中用到简易草图画板的设计，在该草图绘制板中加入了部分基础画图的功能，包括了直线，矩形，三角形，圆形，曲线，铅笔线，对于Bresenham算法和三次贝塞尔去曲线算法进行了推导。同时对这两个算法进行了应用，比如使用Bresenham算法来绘制直线类的图形如矩形和三角形，也对贝塞尔曲线算法进行了应用如使用多段贝塞尔曲线来绘制出一个圆形。

### 第5章草图及三维模型的特征提取

在基于手绘草图的三维模型检索问题中，需要计算所有源模型与目标模型之间的相似度，以便找到与目标模型最相似的源模型。随着三维模型的数量越来越多，这样的做法显然是非常低效的。在实践过程中，我们发现直接将草图与三维模型或者三维模型的二维视图集合进行比较是没有意义的。所以需要一种能够表达二维视图和草图特征的描述符。为了能够解决二维视图和草图之间存在旋转和尺度大小的不同，本文需要的特征描述符应当具有平移、尺度和旋转不变等特性。在计算机图形学领域应用过大量的描述符，包括 HOG、SIFT、Zernike 和形状上下文等描述符。本章主要研究 Zernike描述符、傅立叶描述符、二维形状分布和集成描述符，本章中的集成描述符可以解决单个描述符不完全特征提取的问题。

#### 5.1全局试图特征描述符

全局特征是指图像的整体属性，常见的全局特征包括颜色特征、纹理特征和形状特征，比如强度直方图等。由于是像素级的低层可视特征，因此，全局特征具有良好的不变性、计算简单、表示直观等特点，但特征维数高、计算量大是其致命弱点。此外，全局特征描述不适用于图像混叠和有遮挡的情况。

本文提出的全局视图特征包含 Zernike 矩和Fourier描述符。首先，本文提取二维视图的 Zernike 矩，并采用标准矩的方法归一化到(0, 1)范围。然后，取得二维视图的轮廓视图，提取它的一维傅立叶算子，除以直流分量标准化到(0, 1)范围。基于草图的三维模型检索不应该受到草图绘制位置、尺度大小以及旋转角度的影响。

##### 5.1.1Zernike矩

图像的矩通常描述了改图像的全局特征，并提供了大量的关于该图像不同类型的几何特征信息，比如大小，位置，方向以及形状。

在基于手绘草图的三维模型检索汇总，一个核心问题就是图像的特征提取，简单描述即为用一组较为简单的数据来描述整个图像，这组数据越简单并且越具有代表性越好。一个好的特征矩不守光线，噪点，几何形变的干扰。

Zernike矩是一个正交矩，是基于Zernike多项式正交化的函数。Zernike矩具有以下几个特点：完备性，正交性，旋转不变形。Zernike矩是一个复数矩，一般把Zernike矩的模作为特征来描述物体的形状。一个目标对象的特征矩可以用一组很小的Zernike矩特征向量来表示。低阶矩阵、特征向量描述的是一幅图像的目标的整体形状，高阶

矩特征向量描述的是图像目标的细节信息。

一组定义在单位圆上的复值函数集具有完备性和正交性，使得它可以表示定义在单位圆内的任何平方可积函数，定义为：

$$V_{pq}(x, y) = V_{pq}(\rho, \theta) = R_{pq}(\rho) e^{jq\theta} \quad ( )$$

其中， $\rho$ 表示圆点到 $(x, y)$ 的矢量长度， $\theta$ 表示矢量 $\rho$ 与X轴逆时针方向的夹角。 $R_{pq}(\rho)$ 是实值径向多项式：

$$R_{pq}(\rho) = \sum_{s=0}^{(p-|q|)/2} (-1)^s \frac{(p-s)!}{s! \left(\frac{p+|q|}{2} - s\right)! \left(\frac{p-|q|}{2} - s\right)!} \rho^{p-2s} \quad ( )$$

称其为Zernike多项式。

Zernike多项式满足正交性：

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{pq}^*(x, y) V_{pq}(x, y) dx dy = \frac{\pi}{p+1} \delta_{pn} \delta_{qm} \quad ( )$$

其中， $V_{pq}^*(x, y)$ 是 $V_{pq}(x, y)$ 的共轭多项式。并且由于Zernike多项式具有正交完备性，所以在单位圆内的任何图像 $f(x, y)$ 可以用唯一的式子来展开：

$$f(x, y) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} Z_{pq} V_{pq}(\rho, \theta) \quad ( )$$

式子中 $Z_{pq}$ 就是Zernike矩：

$$Z_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) V_{pq}(\rho, \theta) \quad ( )$$

针对Zernike矩进行平移和尺度变换得到具有平移，尺度和旋转不变性的图像 $g(x, y)$ 。 $g(x, y)$ 的Zernike矩定义为：

$$\begin{aligned} Z_{pq} &= \frac{p+1}{\pi} \sum_x \sum_y g(x, y) V_{pq}(\rho, \theta) \\ &= \frac{p+1}{\pi} \sum_x \sum_y g\left(\frac{x}{q_{00}} - \bar{x}, \frac{y}{q_{00}} - \bar{y}\right) V_{pq}(\rho, \theta) \end{aligned} \quad ( )$$

其中， $\bar{x} = \frac{q_{01}}{q_{00}}, \bar{y} = \frac{q_{10}}{q_{00}}$ ； $q_{01}$ 表示视图轮廓内所有黑色像素点的横坐标的和， $q_{10}$ 表示视图轮廓捏所有黑色像素点的纵坐标相加的和。 $q_{00}$ 表示投影视图中所有白色像素点的总和。 $(\bar{x}, \bar{y})$ 表示手绘草图的中心。

由于Zernike矩定义在单位圆内，故映射在单位圆外的像素点不参与计算，这是Zernike矩固有的几何误差。Zernike矩计算时间补觉长，因此需要选择一种快速的算法来减少时间。

徐旦华[14]等提出了一种Zernike矩的快速算法。利用 Zernike多项式迭代性质，找出了 Zernike正交矩之间的内在关系，这样，高阶的 Zernike矩可由低价的 Zernike矩求出，再在 Chan[15]等人提出的关于一维几何矩有效算法的基础上，得出了一种快速算法。与已有方法相比，该算法大大减少了求解过程中的乘法次数，降低了计算复杂度，从而提高了运算速度和效率。

### 5.1.2 Fourier描述符

傅里叶描述子的作用是用来描述图像的轮廓信息，具有平移、旋转、尺度不变性特征。对于一幅图像，通过傅里叶描述子获得其图像轮廓信息，其本质就是空间、频域变换问题。通过将图像中的像素点进行傅里叶变换，得到得到图像的轮廓信息。

如果对傅立叶描述子进行低通滤波，Fourier描述子的低频分量捕获对象的一般形状特性，高频分量捕获更精细的细节，而且Fourier描述子是不考虑空间位置，因此，傅立叶描述子的作用与矩非常相似：低阶项/矩给出近似的形状，添加额外的项可以细化该形状。

傅里叶形状描述符基本思想是用物体边界的傅里叶变换作为形状描述，利用区域边界的封闭性和周期性，将二维问题转化为一维问题。由边界点导出三种形状表达，分别是曲率函数、质心距离、复坐标函数。

假设一个特定形状的边界有从0到n-1的n个像素。沿轮廓的第k个像素具的位置定义为 $(x_k, y_k)$ 。对于曲线上一

点，可以用复数表示：

$$\begin{aligned} S(t) &= X(t) + jY(t) \\ &= \frac{ax_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_{xk} \cos(kwt) + b_{xk} \sin(kwt)] \\ &= j[\frac{ay_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_{yk} \cos(kwt) + b_{yk} \sin(kwt)] \end{aligned} \quad ( )$$

对S(t)进行傅立叶变换可以得到：

$$a(k) = \sum_{t=0}^{T-1} S(t) e^{-j2\pi k \frac{t}{T}} \quad ( )$$

其中，a(k)为傅里叶描述子，为了使其具有平移，缩放，和旋转不变性需要对其进行归一化  
归一化后的模为：

$$\frac{\|a_k\|}{\|a_1\|} \quad ( )$$

这个描述符具有平移、尺度和旋转不变特性。其中，平移不变性和旋转不变性是它本身的特性，归一化和绝对值操作保证了尺度不变性。

## 5. 2D2描述符

二维形状分布是在三维形状分布的基础上变化得来的。三维形状分布的主要思想是利用形状函数来表示三维模型表面上点对的距离关系、模型内部角度关系和区域面积，构建表达形状特征的统计分布直方图。同理，二维形状分布能够构建出二维视图的统计分布直方图。二维形状主要包括 A3、D1、D2、D3 和 D4 等五种形状函数。

A3:在模型表面随机选取三个点，三点构成的三角形内角的概率分布构成 A3 形状特征。

D1:连接模型表面任意一点，与模型中心位置产生的距离概率分布构成 D1形状特征。

D2:在模型表面选取任意两点相连，两点之间距离的概率分布构成 D2 形状特征。

D3:在模型表面选取任意三点，三点构成的三角形面积的平方根的概率分布构成D3 形状特征。

D4:在模型表面选取任意四点，四点构成的立方体体积的概率分布构成 D4 形状特征。不同的形状分布描述符如图5-1所示。

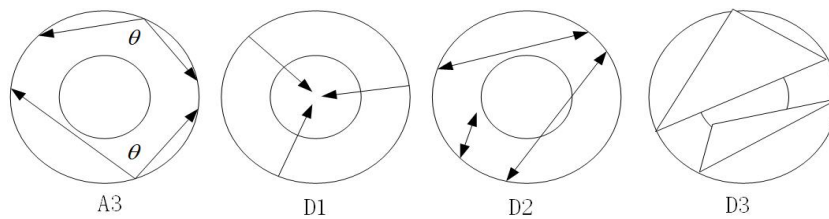


图5-1 不同的形状分布描述符

本文采用效果较好的 D2 形状描述符来描述二维视图的形状区域特征。本文在三维模型的每个二维视图和输入草图上采用随机采样。采用的样本点 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 不是全部在外部的边界上，每个采样点 $p_i$ 可以位于给定视图的任意边缘线上。二维形状分布特征提取的算法描述如下：

1. 在绘制草图过程中，记录草图绘制的所有像素点，把这些像素点放入集合

$S = \{p(x_i, y_i) | i = 0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 中，N是所有像素点的总数。对像素点进行随机采样，本文选取采样个数为

1024.

2. 针对1024个随机采样点，可以知道二维形状描述符产生所有点对的公式，具体公式如下：

$$Num = \frac{1024!}{2!(1024-2)!} = 523776 \quad ( )$$

3. 计算所有点对之间的欧几里得距离。

4. 统计随机点对之间的距离，构建二维形状分布直方图。统计分布直方图的横坐标范围应该从 0 到点对之间的最远距离。在计算两个直方图之间的相似度时，应该保证直方图区间数目是相同的。对于区间较少的直方图，应该采用归零的方法去填充区间。整个流程图如图5-2所示。

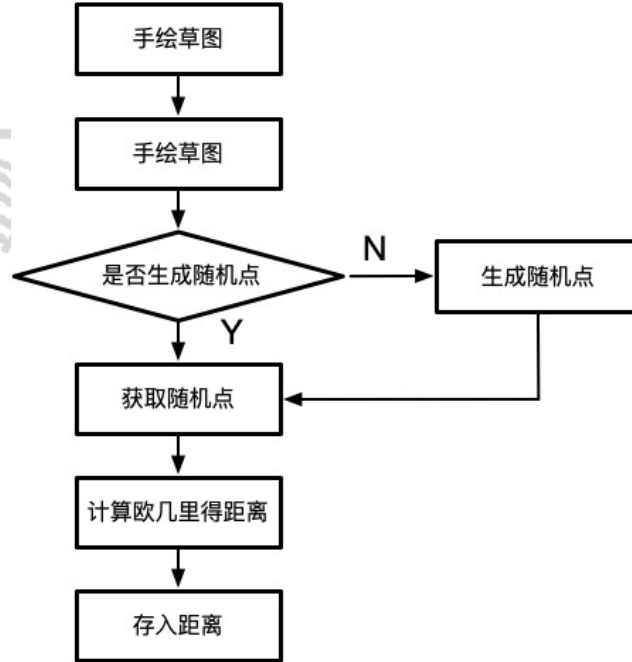


图5-2 D2流程图

### 5.3 集成描述符

经过大量的实验表明傅里叶描述符中较小的值适用于表示全局视图特征。Zernike 描述符中较大的值适用于表示全局视图特征。本文的傅里叶描述符与 Zernike 描述符均选取经验值[16]。其中，傅里叶描述符选取前 10 个较小的值；Zernike 矩描述符使用前 35 阶较大矩。对于一幅草图和三维模型的二维视图，本文使用向量的 L1 范式去度量 Fourier 描述符、Zernike 描述符和 D2 描述符之间的距离，公式为：

$$D_F = \sum_{p=1}^{10} |F_1(p) - F_2(p)|$$

$$D_Z = \sum_{q=1}^{35} |Z_1(q) - Z_2(q)| \quad ( )$$

$$D_D = |D_1 - D_2|$$

其中， $F(p)$ 、 $Z(q)$  分别表示草图和二维视图的傅里叶变换特征和 Zernike 矩特征。 $D_1$ 、 $D_2$  分别表示草图和二维视图的二维分布特征。 $D_F$ 、 $D_Z$  和  $D_D$  分别为使用 Fourier 描述符、Zernike 矩描述符和 D2 形状描述符的二维草图与投影视图之间的相似性结果。其中，Fourier 描述符和 Zernike 矩描述符构成本算法的全局视图特征描述符，公式为：

$$D_G = D_F + D_Z \quad ( )$$

为了解决单一描述符对二维视图特征提取不全面的问题，本文在全局视图描述符和二维形状分布的基础上进行一定权重的集成，得到一个能更好地表示二维视图特征的描述符。集成描述符D定义为：  
( )

$\omega$ 为全局视图描述符的权重，它与二维形状分布的权重相加为1。草图与二维视图相似度越高，D越小。不同用户绘画风格不同，绘画出的草图可能差异很大，集成描述子特征也会不一致，因此本文有如下方法避免检索结果的不准确。首先本文提出的集成描述子具有平移、尺度和旋转不变等特性，避免了旋转、大小等对检索结果的影响，因此，只有绘画风格存在对草图的影响，而绘画风格存在两方面问题。1) 绘制者对模型观察角度的不同，影响集成描述子的特征，因此本文采用多投影的方式，尽可能多的考虑不同用户观察角度的差异。2) 本文草图检索对绘制有一定要求，绘制越精准检索效率越高，需要检索的准确率越高。

伊明[17]对不同的 $\omega$ 值进行实验。 $\omega$ 在[0-1]之间以每次0.1的速率进行增长。在不同 $\omega$ 值时，记录三维模型在查全率为 0.1 时的查准率。 $\omega$ 在[0.3-0.6]范围时，集成描述子的检索性能较好； $\omega$ 为0.4时，检索效果最佳。在后续验证本文提出算法与其它算法的优劣中， $\omega$ 取值为 0.4。不同 $\omega$ 的检索结果如图5-3所示。

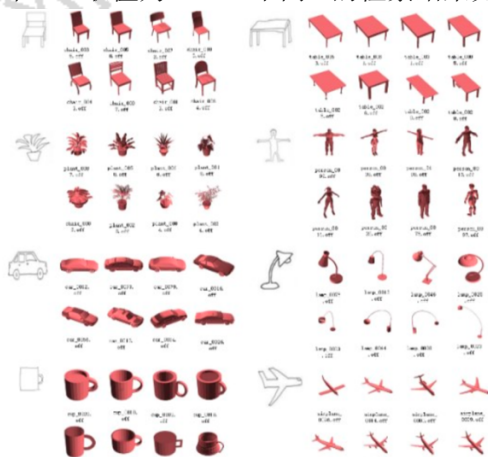


图5-3 不同 $\omega$ 的检索结果

#### 5.4本章小结

本章主要介绍了集成描述子，并详细分析了集成描述子的特征构造，它是由 Zernike 矩和Fourier描述符组合的全局视图特征与D2形状特征按照一定比例加权得到的。集成描述子作为特征提取的描述符，能够解决单一描述符对二维草图信息描述不全的问题。

千万。

#### 第6章基于手绘草图的三维模型检索

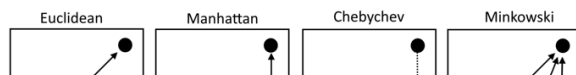
相似性度量是对事物之间相似程度的综合评价。两个事物之间的距离越近，它们的相似度越大，而距离越远，它们的相似度越小。相似度通常以数值表示：当数据样本更相似时，相似度度量越高。它通常通过转换表示为0和1之间的数字。相似性度量的方法有很多种，一般是根据实际问题选择的。常用的相似度有：相关系数、角度相似度。本文使用距离来衡量样本之间的相似程度。

##### 6.1相似性计算

距离度量是数学上的一个基本概念，对于任意一个定义在两个矢量X和Y上的函数d(X, Y)只要满足如下4个性质就可以称作是一个距离度量。

- 1) 非负性:  $d(X, Y) \geq 0$ ;
- 2) 对称性:  $d(X, Y) = d(Y, X)$ ;
- 3) 自反性:  $d(X, Y) = 0$ , 当且仅当  $X = Y$ ;
- 4) 三角不等式:  $d(X, Y) + d(Y, Z) \geq d(X, Z)$ 。

常见的几种距离度量如图6-1所示。





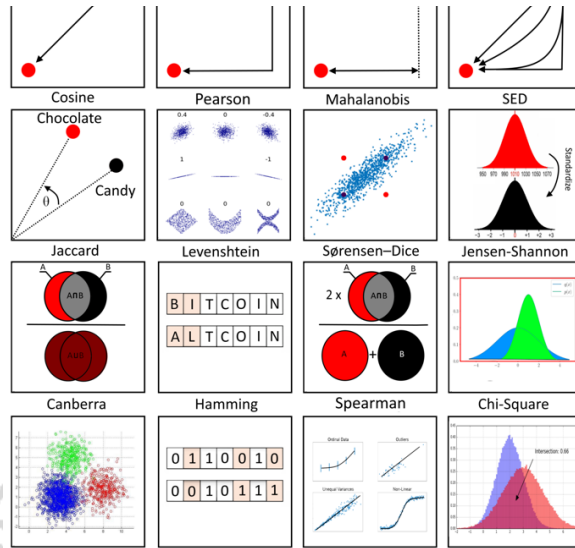


图6-1 常见的距离度量

#### 6.1.1 欧几里得距离

欧几里得距离是一种最为常见和简单的距离度量方式，又叫欧式距离，它的公式为：

$$d(x, y) = \left[ \sum_{i=1}^d (x_i - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad ( )$$

欧几里得距离的直观理解是特征空间中X和Y两个点之间的直线距离，距离度量与矢量度量的长度是密切相关的。欧几里得距离也可以看作是差矢量 $X-Y$ 的长度。矢量的长度在数学上也被称为范数，欧几里得距离对应的是矢量 $l_2$ 范数，也可表示为：

$$d(x, y) = \|x - y\|_2 = \sqrt{(x - y)^T (x - y)} \quad ( )$$

#### 6.1.2 曼哈顿距离

曼哈顿距离又称为街区距离，也就是在欧几里德空间的固定直角坐标系上两点所形成的线段对轴产生的投影的距离总和。定义点A到点B的曼哈顿距离就是两点坐标之差绝对值的和。曼哈顿距离对应矢量的 $l_1$ 范数，可以表示为：

$$d(x, y) = \|x - y\|_1 \quad ( )$$

#### 6.1.3 切比雪夫距离

两个N-D观测值或向量之间的切比雪夫距离等于数据样本坐标变化的最大绝对值。在二维世界中，数据点之间的切比雪夫距离可以确定为它们的二维坐标的绝对差之和。因此，切比雪夫距离定义为：

$$d(x, y) = \max_{1 \leq i \leq d} |x_i - y_i| \quad ( )$$

举例而言，在国际象棋中国王和王后所走过的两点之间最少的格数便可以用切比雪夫距离来度量，数学上切比雪夫距离对应于矢量的 $l_\infty$ 范数：

$$d(x, y) = \|x - y\|_\infty \quad ( )$$

#### 6.1.4 闵可夫斯基距离

闵可夫斯基距离是之前距离度量的一个推广：欧几里德距离、曼哈顿距离和切比雪夫距离。它定义为N-D空间中两个观测值之间的距离，公式为：

$$d(x, y) = \left[ \sum_{i=1}^d |x_i - y_i|^p \right]^{\frac{1}{p}}, p \geq 1 \quad ( )$$

闵可夫斯基距离对应于矢量的 $l_p$ 范数，不同的 $p$ 可以得到不同的距离度量，很明显，欧几里得距离和曼哈顿距离都是闵可夫斯基距离的特例，分别对应于 $p=1$ 和 $p=2$ 的特殊情形，实际上，切比雪夫距离也是闵可夫斯基距离的一种特例，对应于 $p$ 趋向于正无穷大。

在欧几里得距离度量下于坐标原点距离为1的点的轨迹是一个单位圆如图6-2所示，在曼哈顿距离度量下则变成了单位圆的内接正方形，随着闵可夫斯基距离中 $p$ 的不断增大，单位圆不断向外扩张，直到 $p$ 趋近于正无穷的时候，演变为外接正方形。

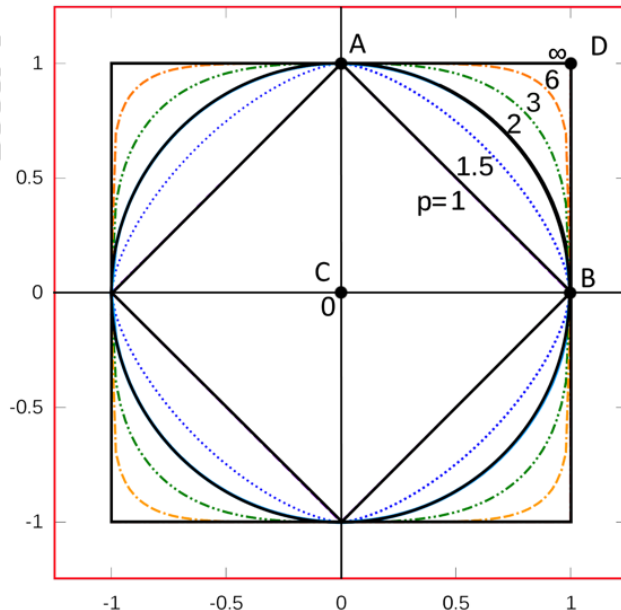


图6-2 不同距离度量下的单位圆

### 6.1.5 马氏距离

尽管上述距离相对简单，但它们也有明显的缺点。对样本不同属性之间的差异（即各指标或变量）一视同仁，这一点有时不符合实际要求。马氏距离表示数据的协方差距离。这是计算两个未知样本集相似度的有效方法。与欧几里得距离的区别在于，它考虑了各种特性之间的联系，并且与尺度无关，即与测量尺度无关。马氏距离也可以定义为服从相同分布且协方差矩阵为 $\Sigma$ 的两个随机变量之间的差异程度。如果协方差矩阵是单位矩阵，则马氏距离简化为欧几里得距离。如果协方差矩阵是对角矩阵，也可以称为归一化欧几里得距离。

对于一个均值为 $\mu$ ，协方差矩阵为 $\Sigma$ 的多变量矢量 $x$ ，其马氏距离为：

$$D_M(x) = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)} \quad ( )$$

### 6.2 基于手绘草图的三维模型检索结果

在分析了上述的距离计算方法后，本文采用了最为简单的欧几里得距离公式来计算草图和二维视图集的相似性。基于该相似性算法，设计了基于手绘草图的三维模型检索。

本文的三维模型的检索系统采用OpenGL和OpenCV为几何造型平台，采用MFC为UI界面，使用C++语言编写。实现了一个检索程序系统，并且该程序中嵌入了一个简易的草图绘制花瓣的程序。目前，该系统的主要的功能有：导入和绘制草图，绘制草图的功能的具体实现参照第4章的简易草图画板的实现；可以选择不同的数据库；显示出绘制的草图；图形检索功能；显示8张最优的结果图，以及一张全局最优结果。该检索器的框架界面如图6-3所示。



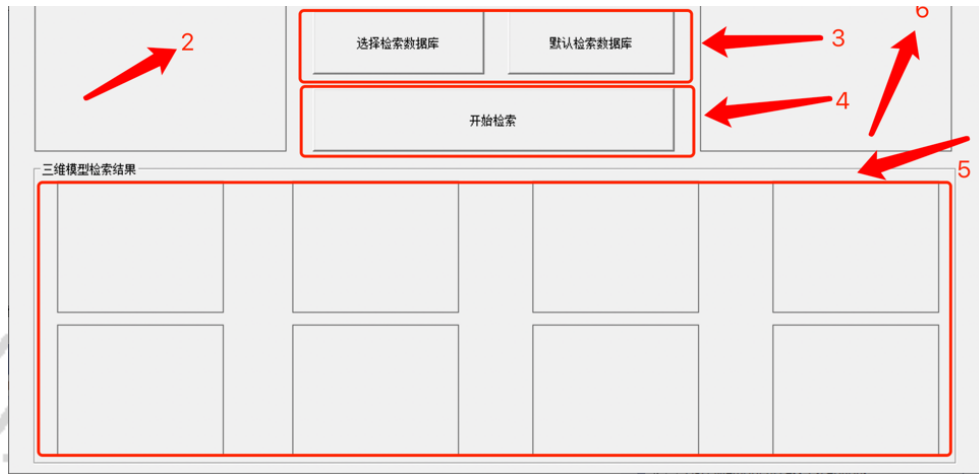


图6-3 检索器的框架界面

用户步骤包括如下几步：

步骤 1. 用户选择绘制在线绘制草图，或者导入已经绘制好的草图的图片。如果按下绘制草图，会弹出一个简易草图绘制画板供用户绘制草图，具体功能参照第4章。

步骤 2. 在程序的左侧会的图片显示框中会显示出用户导入或者已经绘制好的草图图片。

步骤 3. 选择检索三维模型库路径，默认有一个较小的数据库，用户可以通过简易渲染器的程序来获得不同数量级的模型数据库。简易渲染器的具体功能参照第3章。

步骤 4. 点击检索，进行草图检索。

步骤 5. 输出结果，返回8张结果图。

步骤 6. 输出结果，返回1张最接近的结果图。以一个显示器为例子，进行基于手绘草图的检索，检索的结果如图6-4所示。

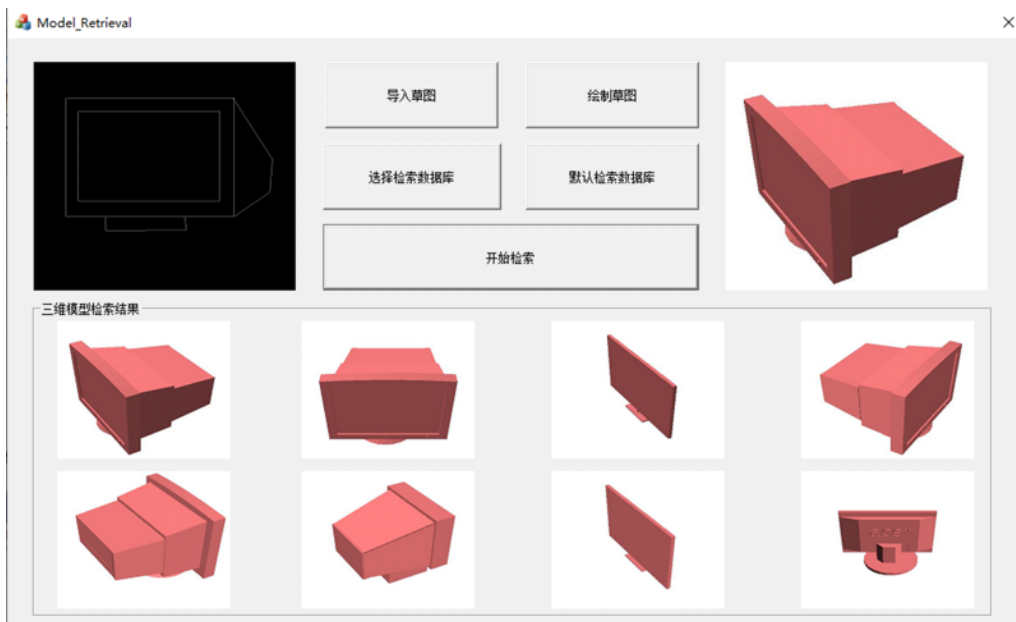


图6-4 草图检索结果

### 6.3本章小结

本章主要介绍了基于不同距离公式的相似性度量，推到了不同距离公式的计算方法和范数。本文利用欧式距离计算二维视图与草图之间的相似性，对手绘草图的检索结果进行从小到大的排序显示。本章还着重介绍了基于手绘草图的三维模型检索系统的应用。针对草图的检索过程的第一步为绘制草图，为了降低了对用户的要求，提供了在线绘制或者线下绘制的功能，只需要简单的草图即可完成检索，实验结果也表明本文的方法可以有效地检索相关的三维模型。

千万不。

## 结论

伴随着国内外科学家们对计算机计算能力的研究, 计算机的计算速度日新月异。这带来的一个显著的影响就是计算机辅助设计相关技术的蓬勃发展, 三维CAD模型的数量从从前的零星个数到现在的成千上万。如何从海量模型数据中快速准确地检索出所需的模型变得尤为重要。如果可以快速的检索三维空间的模型, 那么该技术对现有的众多产业的发展将有明显的促进作用。尤其是加工制造业, 不但可以在促进新模型的更替的同时, 并只需花费先前设计新模型的部分时间, 节省下大量的人力与财力, 减少了设计人员的工作量, 缩短了产品设计周期, 提高了产品设计质量。

本文叙述了三维模型检索技术的国内外研究现状和该技术的发展及主要方法。本文主要对基于手绘草图的三维模型检索进行了研究。在基于草图的检索过程中, 首先利用OpenGL来渲染出模型, 并采用固定投影的方式来获取模型点云二维视图集。提供给用户不同的绘制方法, 来使得用户可以线上或者线下绘制草图以此来提高识别准确率。使用了一种新的描述子, 即集成描述子, 该描述子有效地利用了视图的区域特征和边界轮廓特征, 最后利用距离公式完成检索。实验验证本文方法效果更好。基于草图的检索算法相对于其他算法的优势在于便于普通用户检索, 不需要拥有大量三维模型的细节信息就可以检索出较为准确的三维模型。

本文利用 OpenGL 和 OpenCV为几何造型平台, 采用MFC和ImGui为UI界面, 采用C++ 为编程语言开发了一个三维模型检索。该系统集成了本文提出的所有算法, 包括了简易模型的渲染, 简易草图的绘制, 三维模型检索。利用ModelNet-40 完成模型库, 验证了本文提出算法的优良性能和检索系统的人性化开发。

虽然上述研究在目前已经取得了一些成果, 但当前也还是存在许多需要问题需要进一步研究, 主要有:

1. 由于有些三维模型的结构很复杂, 不同的用户在绘制草图时候容易带来一定的误差因素, 如笔画的闭合等, 因此需要降噪处理, 手绘草图降噪的目的是将用户绘画时不小心或者无意识造成的聚点, 绘制草图时图形封闭处的较小的缝隙, 提笔或者收笔造成的毛刺消除, 防止手绘草图过于粗糙, 导致手绘草图离用户原本意图差异较大。
2. 由于现在的三维模型的构成复杂, 采用的相似性计算为欧几里得距离, 因此, 当模型数量急剧增大时, 检索的准确率会有一定程度的下降。因此, 在初次检索后, 可以通过二次检索来提高三维模型检索的准确率。

## 致谢

时光荏苒, 岁月如梭。四年的大学生活马上就要结束了, 有太多的收获和不舍。春梦秋云, 聚散无常。随着离校日期的日趋渐近, 毕业论文的完成也随之进入了尾声。在这短短四年的求学旅途中, 不仅学习到了很多在未来工作中将要用到的知识技能, 还让我学会了一些为人处世的经验, 收获到了和同学间宝贵的友情。

感谢我非常尊敬的导师高雪瑶老师。本论文在高老师的悉心指导下完成的。高老师在学术研究上秉承着专注负责、精益求精的治学态度, 诲人不倦的高尚师德。不仅使本人树立了远大的学习目标, 还使本人明白了学多为人处事的道理。在校期间, 在高老师的教导下, 也逐渐做了几个项目, 收获良多。本次论文从宣帝到完成, 都离不开导师的良苦用心, 倾注了老师大量的心血。在此, 谨向高老师表达由衷的感谢。感谢大学中其他老师在学习和生活当中对我的关心和帮助。感谢于林森老师、李莎莎老师在课后听我询问问题和耐心的解答, 感谢所有老师提供了一个学习氛围浓厚的校园环境,

四年前的一次选择, 便一人独自跨越半个中国来到哈尔滨求学。非常荣幸能够在哈尔滨理工大学完成自己本科学习。求学生涯最想感谢的是我的父母, 求学以来, 已经过了16年, 是他们的默默付出, 鼓舞着我学习。感谢我的母亲为了让我在更好的学习环境中, 走遍了家乡城市的所有学校。感谢我的父亲, 在我初高中阶段, 每周开车送我往返于石狮和厦门两个城市之间。在哈理工的四年中, 感谢我的5个舍友们, 你们一直的陪伴让我明白了友情的可贵。

感谢答辩组中的所有老师, 感谢老师们在百忙之中可以抽出时间参加硕士本科生的毕业答辩, 祝老师们在今后的工作和生活中健健康康, 心想事成, 万事如意。

## 参考文献

- [1] Sezgin T M, Stahovich T, Davis R. Sketch based interfaces: early processing for sketch understanding[C].The Workshop on Perceptive User Interfaces.ACM, 2001:1-8
- [2] Li B, Lu Y, Fares R. Semantic sketch-based 3D model retrieval[C]. IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops. IEEE, 2013:555-558
- [3] Yuan Juefei, Abdul Rashid Hameed, Li Boet al.A comparison of methods for 3D scene shape retrieval[J] Computer Vision and Image Understanding, 2020,201:103-120

- [4] Zhu Z, Wang X, Bai S, et al. Deep learning representation using autoencoder for 3D shape retrieval[J]. Neurocomputing, 2016, 204:41-50.
- [5] Konstantinos Sfikas, Ioannis Pratikakis, Theoharis Theoharis. Ensemble of PANORAMA-based convolutional neural networks for 3D model classification and retrieval[J] Computers & Graphics. 2018: 208-218
- [6] 周燕, 曾凡智, 吴臣, 罗粤, 刘紫琴. 基于深度学习的三维形状特征提取方法[J]. 计算机科学. 2019(09):47-58
- [7] 张云峰. 图像与三维模型匹配方法的研究及应用[D]. 南京: 南京大学, 2019. [8] 张艺琨, 唐雁, 陈强. 基于多特征融合的三维模型检索[J]. 郑州大学学报(工学版). 2019(01):1-6
- [9] 李海生, 孙莉, 吴晓群, 蔡强, 杜军平. 基于模型内二面角分布直方图的非刚性三维模型检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报. 2017(06): 1128-1134
- [10] 安勃卿. 基于手绘草图的三维模型检索研究与实现[D]. 西北大学, 2017.
- [11] Su H, Maji S, Kalogerakis E et al. Multi-view convolutional neural networks for 3d shape recognition[C]//Proceedings of ICCV2015, 2015
- [12] C. M. Cyr and B. B. Kimia. A similarity-based aspect-graph approach to 3D object recognition. 57(1), 2004. 3
- [13] 潘婷. 基于草图的三维模型检索方法研究与应用[D]. 中北大学 2020
- [14] 徐旦华, 辜嘉, 李松毅, 舒华忠. Zernike矩的快速算法[J] 东南大学学报2002(03):32:2
- [15] Chan FHY, Lam FK. An all adder systolic structure for fast computation of moments[J]. JVL SI Signal Process, 196, 12:159 175.
- [16] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection[C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on, 2005, 1: 886-893.
- [17] 伊明. 基于内容与草图的三维模型检索方法[D]. 哈尔滨理工大学. 2020
- [18] 强会英, 李雨虹, 王洪申, 等. 基于 HMM 和仿射不变矩三维模型归类与检索算法[J]. 制造业自动化, 2019, 41(3): 40-46.

附录A

附录B

附录C

### 相似片段说明

相似片段中“综合”包括:《中文主要报纸全文数据库》《中国专利特色数据库》《中国主要会议论文特色数据库》《港澳台文献资源》《图书资源》《维普优先出版论文全文数据库》《年鉴资源》《古籍文献资源》《IPUB原创作品》

### 须知

- 1、报告编号系送检论文检测报告在本系统中的唯一编号。
- 2、本报告为维普论文检测系统算法自动生成, 仅对您所选择比对资源范围内检验结果负责, 仅供参考。

客服热线: 400-607-5550、客服QQ: 4006075550、客服邮箱: vpcs@fanyu.com

唯一官方网站: <http://vpcs.cqvip.com>



关注微信公众号



