

4-16-2020

3D Tree Model Matching Based on Tree Shape Space

Liang Shuang

1, School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;*

Zuoteng Zhu

1, School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;*

Jinyuan Jia

1, School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

3D Tree Model Matching Based on Tree Shape Space

Abstract

Abstract: The retrieval of the 3D tree models cannot get the higher accuracy, retrieving efficiency and describing match. In order to solve the problems, a three-dimensional tree model matching method based on *tree space* is proposed. By constructing the tree space of the three-dimensional tree model dataset, the method computes the difference between the Euclidean distance and *the geodesic distance* in the tree space by means of *spindle matching*, *contour matching*, and *branch matching*, and gradually matches the corresponding model. The matching implementation results are displayed in the general model dataset and the self-designed model dataset respectively. The method can improve the accuracy of the tree model matching, and is beneficial to the large-scale retrieval and the reuse of 3D tree models.

Keywords

tree shape space, tree model dataset, 3D tree model matching, geodesic

Recommended Citation

Liang Shuang, Zhu Zuoteng, Jia Jinyuan. 3D Tree Model Matching Based on Tree Shape Space[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 582-590.

基于树型空间的三维树木模型匹配

梁爽, 朱作腾, 贾金原*

(同济大学软件学院, 上海 201804)

摘要: 为解决三维树木模型的检索具有正确率低、检索效率低、描述不匹配等问题, 提出一种基于树型空间的三维树木模型匹配方法。该方法通过构建三维树木模型数据集的树型空间, 辅以主轴匹配, 轮廓匹配, 枝干匹配等方式, 经过树型空间中欧氏距离和测地线度量差异值, 逐步匹配到相应的三维树木模型, 该方法分别在通用模型数据集和自我设计的模型数据集进行了匹配性实现, 结果表明可以较大幅度提升树木模型匹配的准确率, 利于三维树木模型的大规模检索和重用。

关键词: 树型空间; 树木模型数据集; 三维树木模型匹配; 测地线

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 04-0582-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-VR0472

3D Tree Model Matching Based on Tree Shape Space

Liang Shuang¹, Zhu Zuoteng¹, Jia Jinyuan^{*}

(1,* School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The retrieval of the 3D tree models cannot get the higher accuracy, retrieving efficiency and describing match. In order to solve the problems, a three-dimensional tree model matching method based on *tree space* is proposed. By constructing the tree space of the three-dimensional tree model dataset, the method computes the difference between the Euclidean distance and *the geodesic distance* in the tree space by means of *spindle matching*, *contour matching*, and *branch matching*, and gradually matches the corresponding model. The matching implementation results are displayed in the general model dataset and the self-designed model dataset respectively. The method can improve the accuracy of the tree model matching, and is beneficial to the large-scale retrieval and the reuse of 3D tree models.

Keywords: tree shape space; tree model dataset; 3D tree model matching; geodesic

引言

在图形图像领域, 三维模型具有内容丰富真实, 展现能力强的优势, 是 3D 领域中良好的媒介。伴随计算机图形学以及图形支撑硬件的不断发展, 三维模型的使用越来越频繁。如何实现三

维模型的快速检索也逐渐成为世界检索领域内的研究方向。三维模型搜索可以极大提升三维模型的复用率, 对于加速三维模型重用效率有着重大的影响。然而目前关于三维模型检索的方法中, 均聚焦在通用模型的探索开发上面, 大量特定细分领域的三维模型均未能在通用检索方法中取得良好的搜索效果, 因为很多方法对于三维树木模型检索会存在着结果不正确, 语义不符合等问题。

为了较好解决上述问题, 本文提出一种基于树型空间的三维树木模型匹配方式。将用户的手绘轮



收稿日期: 2019-08-30 修回日期: 2019-11-21;
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U19A2063),
上海市自然科学基金面上项目(19ZR1461200);
作者简介: 梁爽(1983-), 女, 辽宁沈阳, 博士, 副教授, 研究方向为计算机图形学、智能人机交互、模式识别、多媒体检索。

<http://www.china-simulation.com>

• 582 •

廓与三维树木模型数据集中的树木模型结合, 通过树型空间把三维树木模型的完整信息表达出来, 即使用简洁的方式对三维树木模型中存在的关键性特征进行提取进而量化; 并且辅以主轴匹配、枝干匹配, 扫描算子匹配等多种匹配形式, 通过多维度匹配尽可能全面地将手绘轮廓与数据集中的树木模型进行匹配, 最后通过树型空间中对应的欧几里得距离和测地线对三维树木模型差异值的度量, 高效地解决大规模三维模型与手绘轮廓的差异值度量问题, 进而高效地实现针对三维树木模型的正确检索和重用。

依据所选取特征的差异, 主要有基于统计学的三维模型检索、基于形态骨架的三维模型检索、基于低维嵌入的三维模型检索、基于函数变换的三维模型检索^[1]; Torrente^[2]改进了 Hough 变换, 使用代数方法提取曲面特征来识别 3D 形状, 模型处理步骤异常复杂, 计算量过大。基于形态骨架对于小型模型较友好, 对整体模型区分度较差。基于多视图的描述子, 通过获取二维视图并且计算其相似性得到相应的匹配模型。Liu^[3]提出如何选取三维模型投影的最佳视角, 且在不丢失有效信息的情况下与手工草图进行成功匹配。依据统计学来进行三维模型检索是常用的方式, 因为统计学多视图的方式贴合生活习惯, 可快速获取期望的结果, 而且也容易搭配手绘等辅助形式来实现高精度的匹配。

纵然多视图可以实现较好的三维模型检索效果, 但是难点是决定获取哪些部分的模型视图以及最终如何度量三维模型之间的相似性。傅里叶、zernike 矩都能实现三维模型差异之间的衡量, guan^[4]提出构建树型空间通过欧几里得距离和测地线距离来度量模型之间的差异。

目前三维模型搜索算法对于三维模型数据集尚能取得较好的检索效果, 但对于特定领域的三维模型, 检索效果却非常不理想。Fan^[5-6]提出基于局部视图的三维树木模型递进检索的方法来实现三维树木模型的检索, 但是其对于手绘输入接口进行

了形式限制, 用户并不能按照自己的某些意愿来绘制自身想要的树木模型轮廓, Guan^[7]提出使用树型空间来度量生成同种异态的树木模型, 通过欧几里得距离和测地线来衡量差异值。

综上, 对于树木模型以上通用的检索方法采取的特征描述过于简单, 导致树木模型不能得到很好的区分, 导致最终实现的检索效果必然不准确。为了实现三维树木模型的正确匹配, 需要针对性地对于树木模型特有的特征进行优化, 才有可能得到区分度较好的匹配结果。在植物研究领域中, 基于树种分类对树木模型进行检索是通用的做法^[7], 然而要求用户需要专业的植物树木知识, 才可能手绘出满足需求的输入。因此在约束条件下的手绘形式无疑对于用户是一类非常友好的输入形式, 而且通过树型空间中的测地线距离来度量能高效地解决各模型之间的差异值计算。因此本文将采用基于树型空间的方式来针对三维树木模型进行匹配工作。

1 树木模型数据集的设计

1.1 树木模型数据集的设计内容

建立树木模型数据集一定不是简单把某一类的树木模型存储起来, 首先必须要考虑到整体三维树木模型的组织架构, 在建模领域存在着种类繁多的三维模型数据格式, 到底是采用统一的数据格式还是兼容各类数据格式直接在程序中输出接口进行转换呢? 对于采用统一格式需要自身先选取好合适的数据格式, 对于兼容各种格式, 则需要思考如何高效率进行格式转换以便于外部访问。而且将三维模型仅仅存储起来并不是那么简单的。只是经过简单堆砌的树木模型数据集对于后续的检索操作或者其他的目的并不友好, 总之, 树木模型数据集的设计必须要三维树木模型如何规范化地存储, 使得检索程序读取以及外部查询能够更加方便。接下来是对于三维树木模型分类标准的设计, 虽然当前对于三维树木模型分类是手动完成的, 但是对于三维模型检索来说, 一

个明确的分类结果却能大大提升模型检索的效率,例如 SHREC15, SHREC18 和 CIFAR-10 是通过自然界中事物间属性进行分类的,在对三维模型进行检索的过程中,准确率和召回率是对检索结果评价最重要的两个参数^[7],如果需计算这两个参数必须要精确了解到树木模型数据集中的三维模型分类情况,分类情况便依赖于三维模型分类标准。而且,对于三维树木模型检索涉及到的一些算法对于类别特征提取这一环节也依赖于有效分类标准的建立。分类标准主要是两方面的内容:一是树木模型数据集的文件格式选取;二是树木模型数据集的层次分布结构。

1.2 树木模型数据集的组织结构

为了后续检索实验的顺利进行,需要构建完备的树木模型数据集,以充分检验检索方法。本文对于树木模型数据集的获取主要是两大方向:一是通用数据集的树木模型提取;二是网络共享树木模型的提取。

首先通用数据集选取的是 COCO2017, COCO (Common Objects in Context)是一个大规模的图像识别、标注数据集。COCO 目标检测数据集标注目标信息采用的是数据格式是 json,其内容本质是一种字典结构,字典堆栈和列表信息内容维护。COCO 里面的 id 和类名字对应,总共 80 类,提供了 118 287 张训练图片,5 000 张验证图片,以及超过 40 670 张测试图片,而且还具有 Object segmentation (物体分割)、Recognition in context : (上下文识别)、Superpixel stuff segmentation: (超分辨率的实物分割)等特点。

在 COCO^[8]的标注中存在着多角度的特征描述信息,使用者可以从中直接提取到想要的特征。由于近几年来 COCO 的进一步研究开放,使得图像识别技术有了更加长足的发展,而且这一系列的

优点使得图像识别领域均把它作为性能评价以及测试的常备数据集。因此本文主要使用了 COCO 数据集中的树木类型分类数据,先把树木类型按照作为一大类进行整合处理,但是为了准确评价本文方法的检索效果,会将通用树木模型数据集进行分类,主要分为乔木、灌木、草本植物等 3 类,其中乔木模型有 175 个,灌木模型 65 个,草本植物有 40 个。

因为 COCO 数据集中的三维树木并不是十分完备,所以本文还通过网络共享树木模型对树木模型数据集中的树木模型数据进行有益补充。

网络共享树木模型:此集合树木模型数据集主要是对网络中已经建模好的三维树木模型进行部分收集以及在模型数量质量无法保证的情况下进行部分购买,对于收集网络中的树木模型数据主要是设定爬虫程序爬取树木模型数据或者是对某些模型展示网页进行部分模型保存,后续也从网络中以及老师同学的帮助下购买以及收集了部分专业的树木模型,经过自身的预处理操作(去除低质量、重复模型)之后,最后网络共享树木数据集有三维树木模型共享的树木模型数据集经过整理之后主要分为如下几类:乔木、灌木、草本植物等 3 类,网络共享树木模型乔木有 560 个,灌木有 390 个,草本植物有 200 个,其相应的三维树木模型示例图片如图 1~3 所示。接下来本文将对这些种类的树木模型进行相关操作。

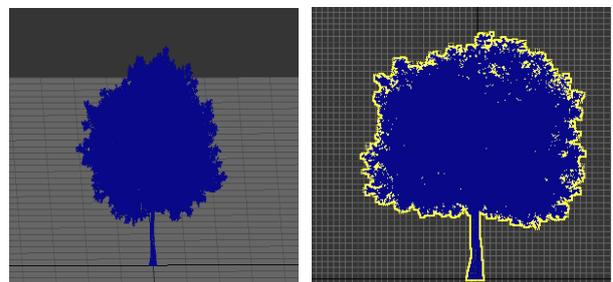


图 1 乔木树木模型示例
Fig. 1 Example of a arbor model

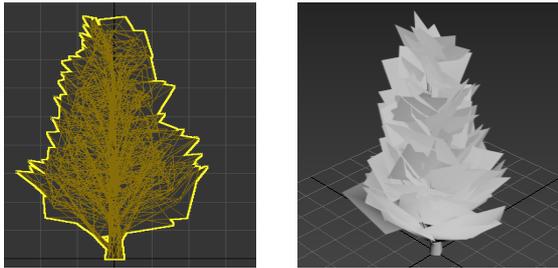


图 2 灌木树木模型示例
Fig. 2 Example of a shrub model



图 3 草本植物模型示例
Fig. 3 Example of a herb model

为了更好地执行匹配流程, 本文将所有的树木模型数据集做如下命名操作: 类别_编号, 首先是类别便是上述分类标准中的 3 类典型树木类别代号为 0, 1, 2。0 指代的是乔木, 1 是灌木, 2 是草本植物, 接下来是编号, 为了匹配程序的简化读取操作流畅, 本文对于编号采用的是 1~1 000 的阿拉伯数字编号, 例如乔木模型为 `TreeDataset\arbor\0_1.obj`。

2 基于树型空间的三维树木模型匹配

在组建树木数据集的工作之上, 本文设计并实现了一个基于树型空间的三维树木模型匹配, 以对之前构建的树木模型数据集进行测试。本文基于树型空间三维树木模型匹配的流程如图 4 所示, 主要是树型空间构建以及相似性匹配两大环节, 首先是对手绘轮廓进行提取使用向量式存储, 从而根据数据构建树型空间, 进而计算凸包以及以类似的方式计算数据集中的三维树木模型凸包, 然后通过扫描算子对手绘轮廓以及数据集中的树木模型进行扫描, 随后通过欧几里得距离以及测地线距离计算手绘轮廓与树木数据集的损失对照, 按照损失大小进行排序, 返回相应的检索匹配结果。

首先选取数据集本文在这一部分的实验中所使用的数据集便是本文前述的已经构建好的三维树木模型数据集, 即之前所述的 3 大树木模型种类: 乔木、灌木、草本植物等。

PCA 预处理: 利用三维树木模型数据集对部分数据集中的三维树木模型数据集进行 PCA 预处理, 将高维的 obj 数据降维到低维空间, 并且对三维树木模型数据进行数据中心化处理, 将所有 obj 格式的三维树木模型全部移动到中心原点, 便于后续计算损失以及进行相似性比较。

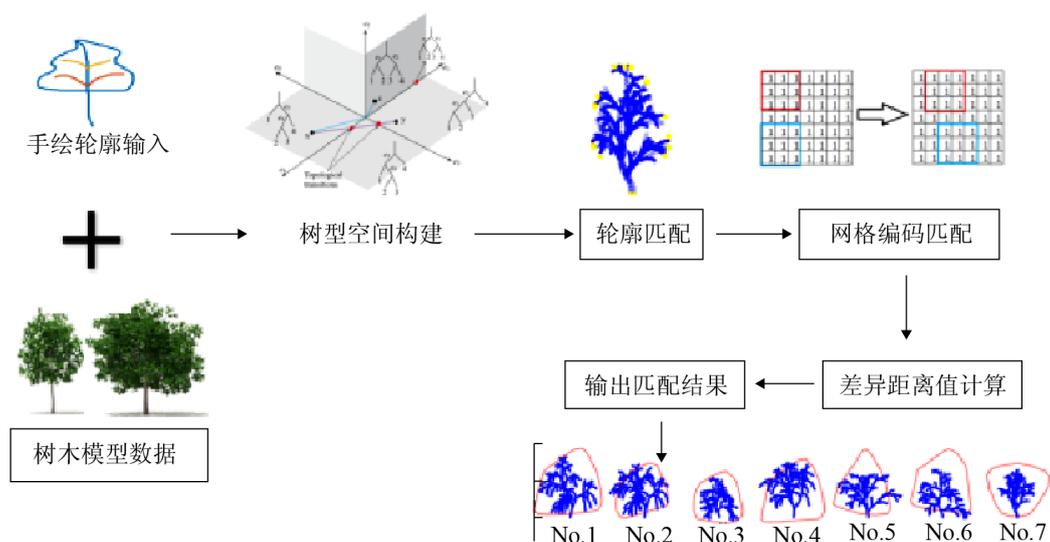


图 4 三维树木模型匹配流程图
Fig. 4 3D tree model matching flow chart

<http://www.china-simulation.com>

树型空间构建：根据相关文献的描述，依赖于树型空间构建的规则，将手绘轮廓以及树木模型数据集中的数据映射到树型空间中，至此树木模型相关的树型空间构建完毕，如图 5 所示。

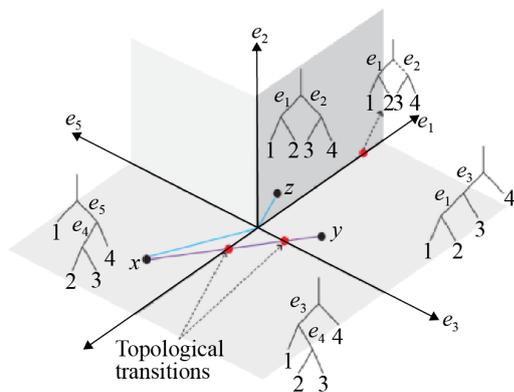


图 5 树型空间构建示例
Fig. 5 Constructing of tree shape space

2.1 树木模型凸包

输入手绘轮廓，向量式存储手绘轮廓数据，采样一定数量的点集，计算手绘轮廓的凸包。

向量式存储三维树木模型数据集的树木轮廓数据，采样一定数量的点集，计算树木模型库的凸包；在此使用凸包算法来对凸包进行计算^[9]。假设手绘轮廓以及数据集中模型的坐标分别为 (X, Y, Z) 和 $(x_{dk}, y_{dk}, z_{dk})(k \in N^+)$ 。

步骤 1：找到所有点 (X, Y, Z) 和 $(x_{dk}, y_{dk}, z_{dk})(k \in N^+)$ 中纵坐标 y 最小的点，也就是这些点中最下面的点，记为 Q_0 ；

步骤 2：将 $(x_{dk}, y_{dk}, z_{dk})(k \in N^+)$ 平移至以 Q_0 作为整个计算凸包流程的起点；

步骤 3：计算 $(x_{dk}, y_{dk}, z_{dk})(k \in N^+)$ 对于 Q_0 的仰角 β ，按照从小到大的顺序对得到的仰角结果进行排序，当 β 相同时，距离 Q_0 较近的点排列在前面；

步骤 4：接下来作直线 M 连接连接 Q_0 和位于栈顶的那个元素，识别当前计算元素是位于直线 M 的左侧还是右侧。若位于直线的右侧执行出栈操作；若位于直线上或位于直线左侧执行入栈操作；

步骤 5：当前数据点位于直线上或位于直线左侧则说明是凸包上的点，对其入栈操作即可，后续

执行步骤 7；

步骤 6：当前数据点若位于直线的右侧，则位于栈顶的数据点不是凸包上的点，将栈顶元素弹出作出栈操作，执行步骤 4；

步骤 7：校验当前数据点是否是整体找寻凸包节点的结束元素，若是则结束整个流程返回对应的凸包节点坐标即可，若否，则将当前数据点当做下一次计算的起始点，返回步骤 4。

以下是根据凸包算法求取的树木模型数据集中的树木凸包，如图 6~7 所示。

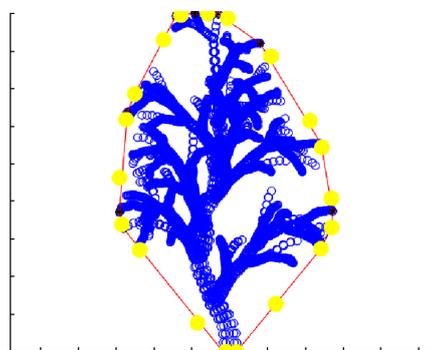


图 6 树木轮廓凸包示例(1)
Fig. 6 Example of a tree convex hull (1)

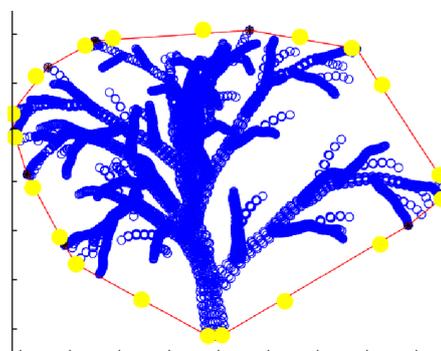


图 7 树木轮廓凸包示例(2)
Fig. 7 Example of a tree convex hull (2)

2.2 基于扫描算子的网格化编码

在机器学习领域中，卷积神经网络是比较常用的识别网络，是一种带有卷积结构的深度神经网络，通过输入一张图片，经过卷积神经网络的运算之后可输出关于识别结果的概率。

而在卷积神经网络中，滤波器^[10]扮演着至关重要的角色，首先滤波器是一个矩阵，大小为 $m \times n$ ，

它是用来检测图像中特定的特征的,不同的滤波器有不同的参数。图像在计算机中的数字信号其实是 $M \times N \times 3$ 大小的矩阵,假设我们只考虑图像的灰度,不考虑 RGB,那么图像的大小为 $M \times N$ 。某一个滤波器对图像进行滤波时,即将滤波器分别与图像的同大小区域进行点乘,每次滤波器依次从左往右从上往下滑过该图像所有的区域,让该滤波器对图像的某一个与滤波器尺寸同大小的图像区域($m \times n$)进行点乘,点乘后各个乘积求和得到新的过滤后图像。

卷积结构具有 3 个关键部分,分别是局部感受野、权值共享、pooling 层,通过卷积运算的卷积核滤波器操作可以大幅度降低计算量,缓解了模型的过度匹配问题,对于高维向量尤其适用,本文便使用其中的卷积核滤波器对手绘轮廓以及三维树木模型数据集进行网格编码化操作。

根据以上信息构建网格化扫描算子,使用网格化编码对手绘轮廓以及数据集三维模型进行匹配。然后通过 $3 \times 3 \times 3$ 过滤器对手绘轮廓以及三维树木模型进行卷积操作,降维得到相应的数据。

2.3 欧几里得距离与测地线

为计算手绘轮廓与三维树木模型轮廓之间的差异,需要选取关于度量函数来衡量直接的损失。由于三维树木模型数据集中的 obj 数据维数较高,并且 obj 格式的数据均是三维坐标的形式,因此没有涉及到量纲的之间消除与转换,所以本文并没有选择马氏距离,而且本文中的树木模型数据集都是经过中心化处理的,只需要计算轮廓之间的数值性差异即可,不存在方向上的差异性计算,所以本文并没有选择夹角余弦来进行相似性度量。树型空间内部对于欧几里得距离和测地线具有较好的融合

效果以及容忍度,并且欧几里得距离^[4]比较灵活,适应的范围较广泛,可以进行多角度的转换,更适用本文高维度的 obj 数据计算,因此本文选用欧几里得距离和测地线进行距离度量以及相似性计算。

假设手绘轮廓对应的坐标为手绘轮廓以及数据集中模型的坐标分别为 (X, Y, Z) 和 (x_{dk}, y_{dk}, z_{dk}) ($k \in N^+$) 为了更好地进行匹配,本文使用 PCA 算法进行主轴抽取,将整个三维模型投影到 XOZ 平面,转换成二维目标进行计算,对应的欧几里得距离为

$$d^2(x, z) = \sum_{i=1}^k [(X - x_{di})^2 + (Z - z_{di})^2] \quad (1)$$

计算测地线的算法流程为:

步骤 1: 将手绘轮廓以及数据集中模型的坐标与树型空间中的点进行对应,并且将部分值参数化;

步骤 2: 初始路径计算,找到测地线过渡的子空间序列;

步骤 3: 路径矫直,初始路径提供了测地线过渡的子空间(或 orthants)序列。然后理顺这条路径,即最小化其相对于度量的长度,同时保持路径在同一子空间序列内。详细信息请参考文献[4]。最终只需要计算测地线即可得知手绘轮廓与树木模型数据集的树木模型之间的差异,根据差异值进行结果排序,从而得出最终的匹配结果。

3 实验与分析

3.1 实验步骤

为了节约操作时间以及提升可交互性,可以考虑将某些输入手绘轮廓作为典型输入样例,通过图片载入的方式进行手绘轮廓的载入,将输入样例编号为 test01, test02, test03, test04 相应的测试样例如图 8~11 所示。

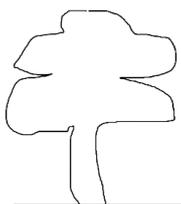


图 8 test01
Fig. 8 test01



图 9 test02
Fig. 9 test02

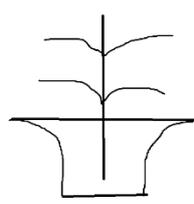


图 10 test03
Fig. 10 test03



图 11 test04
Fig. 11 test04

3.2 实验结果及分析

通过输入 3.1 节绘制的测试样例以及输入 COCO 通用数据集、自我组建的树木模型数据集，返回了 6~7 个相应的匹配结果，图 12 为通过手绘轮廓匹配得到数据集树木模型轮廓以及编号示意图，随后进行多次实验以去除随机干扰。

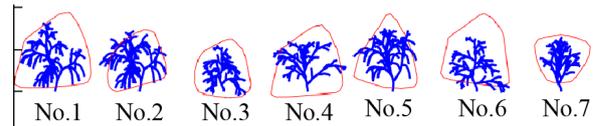


图 12 轮廓匹配结果及编号
Fig. 12 Contour matching result and number

根据轮廓匹配的树木编号可以拾取到相应的三维树木模型，其相应的检索匹配结果如图 13~15 所示。



图 13 乔木类结果
Fig. 13 Result of arbor



图 14 灌木类结果
Fig. 14 Result of shrub



图 15 草本植物类结果
Fig. 15 Result of herb

为了量化本文方法的有效性, 接下来使用 P-R、AP、MAP 等指标对结果进行评价。根据以上匹配结果做出的 P-R 评价曲线如图 16 所示。

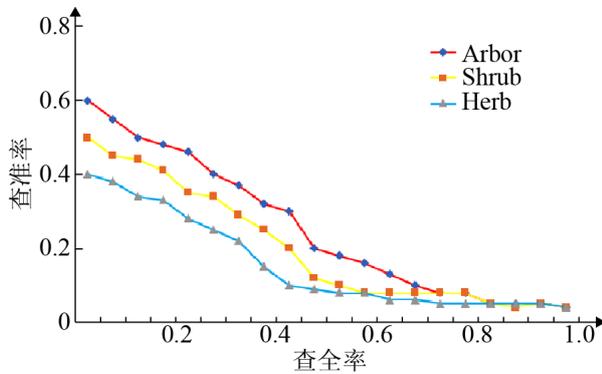


图 16 P-R 曲线
Fig. 16 P-R curve

经过多次实验计算相应的评价指标见表 1。

表 1 匹配评价结果
Tab. 1 Evaluation of matching results

AP	0.57
MAP	0.54

根据树木植物分类的标准, 以及匹配评价指标从中可以看出匹配方法的匹配正确率还是比较高的。使用匹配算法分别针对 3 大类树木进行匹配得出相应的 P-R 曲线如图 16 所示, 得知匹配算法对于乔木而言有较大的匹配度。

3.3 与其他方法对比分析

与实验方法^[5]进行部分实验结果的对比, 操作时间对比如表 2 所示。

表 2 Fan 与 mine 的操作时间对比
Tab. 2 Comparison of operating time between Fan and mine/s

方法	预处理	匹配	总和
Fan	0.11	1.83	1.94
mine	0	1.52	1.52

由于本文预处理步骤是在匹配程序中进行的, 因此与 Fan 方法不一致, 并不存在预处理的处理时间, 从数据可以看出, 本文的三维树木模型匹配方法能够较迅速的将手绘轮廓与数据集中树木模型进行匹配。

为了更加严谨地表达本文匹配方法的有效性, 针对本文方法对于通用数据集 coco 和本文组建的树木模型数据集进行操作时间对比如表 3 所示。

表 3 操作时间对比
Tab. 3 Comparison of operating time of different data sets

模型组合	手绘轮廓输入
通用数据集 coco	1.84
组建树木数据集	1.79

根据操作时间对比可知, 本文三维树木模型匹配方法对于本文组建的树木模型数据集有较迅速的区分度。但是本文方法还是与一些现行检索算法有些差异, 在此初步探讨原因, 首先是通过自己构建三维树木模型数据集, 并且由于自己新建的三维模型数据集种类分类方法与数据集收集的差异, 所以得出的实验结果会与现行的匹配方法有某些差异, 但是检索匹配结果有了部分提升; 而且本文方法中手绘方式与现行通用的图片输入方式相比, 图片输入方式耗时、预处理计算量较大, 处理起来消耗的计算机资源较多, 在 Web3D 轻量化领域不太适宜进行大规模加载。

4 结论

在本文中, 我们使用了基于树型空间的手绘轮廓匹配三维树木模型, 通过对数据集中的树木模型进行凸包计算外部轮廓匹配, 生成相应的网格进行扫描子扫描编码, 最后进行手绘轮廓的多维度匹配, 并且通过欧几里得距离和测地线距离进行三维模型间的差异性度量。实验结果表明, 本文提出的方法在自我组建的三维树木模型数据集中取得了较好的结果, 然而计算的检索指标仅仅只是人工进行判断和识别的类目, 因此后期可以考虑加入较先进的机器学习训练方法以判断类目的方式以进一步提升检索匹配的准确率以及增强本文方法的鲁棒性以适应各种建模质量参差不齐的树木模型等。

参考文献:

[1] 林昕. 三维 CAD 模型的形状特征提取与检索[D]. 合

- 肥: 中国科学技术大学, 2017.
- Lin Xi. The Shape Feature Extraction and Retrieval of Three Dimensional CAD models[D]. Hefei: University of Science And Technology of China, 2017.
- [2] Torrente M L, Biasotti S, Falcidieno B. Recognition of feature curves on 3D shapes using an algebraic approach to Hough transforms[J]. Pattern Recognition (S0031-3203), 2017, 73(1): 111-130.
- [3] Liu A, Nie W, Gao Y, et al. Multi-Modal Clique-Graph Matching for View-Based 3D Model Retrieval[J]. IEEE Transactions on Image Processing (S1057-7149), 2016, 25(5): 2103-2116.
- [4] Wang G, Laga H, Xie N, et al. The Shape Space of 3D Botanical Tree Models[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2018, 37(1): 1-18.
- [5] 范菁, 李然, 董天阳. 基于局部视图的三维树木模型递进检索方法[J]. 计算机辅助设计与图形学, 2016, 28(1): 162-171.
- Fan J, Li R, Dong T. Progressive Retrieval Method for 3D Tree Model Based on Local View[J]. Journal of Computer-Aided Design & Graphics, 2016, 28(1): 162-171.
- [6] Eitz M, Richter R, Boubekeur T, et al. Sketch-based shape retrieval[C]. International conference on computer graphics and interactive techniques, 2012, 31(4).
- [7] Wang G, Laga H, Jia J, et al. Statistical Modeling of the 3D Geometry and Structure of Botanical Trees[J]. Computer Graphics Forum (S0167-7055), 2018, 37(5): 185-198.
- [8] Lan S. The research and implementation of tree species retrieval system based on tree biological characteristics[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [9] 秦启飞, 胡志刚. 基于凸包的最小有向包围盒生成算法[J]. 小型微型计算机系统, 2018, 39(11): 168-172.
- Qin Qifei, Hu Zhigang. Exact Algorithm for Finding Minimum Oriented Bounding Boxes Based on Convex Hull[J]. Mini-micro Systems, 2018, 39(11): 168-172.
- [10] He X, Zhou Y, Zhou Z, et al. Triplet-Center Loss for Multi-view 3D Object Retrieval[C]. computer vision and pattern recognition, 2018: 1945-1954.