

基于距离面积特征的农业机械三维模型相似性评价

张开兴^{1,2} 张亚雷¹ 赵秀艳¹ 刘贤喜¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 为更好地实现农业机械 CAD 模型的设计重用, 针对经典形状分布算法在特定 CAD 模型领域检索性能的不足, 提出一种基于三维 CAD 模型距离-面积统计特征的模型相似性评价方法。该算法首先在网格化的三角网格模型表面随机取点, 取点过程中为保证随机取点均匀性, 采用准随机数发生器 Halton - Sequence 产生随机数; 然后计算任意两点形成有向线段距离以及模型所有面面积之间的比值, 同时以距离、面积比为坐标轴构建网格坐标系, 统计出现在相应网格中特征点的频次, 形成模型的距离-面积特征分布矩阵; 最终以 Manhattan 距离评价分布矩阵的差异程度, 从而实现不同 CAD 模型相似性比较。将面积这一重要几何特征纳入评价算法中, 针对相同输入模型, 所提算法的检索结果中较为相近、相关的模型数量比文中对比的算法高, 算法特征平均提取时间也相对较少。试验结果综合表明, 所提算法能够较好地实现农业机械 CAD 模型相似性评价, 在提升时间性能基础上, 算法检索性能有较大提高。

关键词: 农业机械; 三维模型; 相似性评价; 设计重用; 距离-面积算法

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0403-09

Similarity Assessment of Agricultural Machinery 3-D Model
Based on Distance - Area

Zhang Kaixing^{1,2} Zhang Yalei¹ Zhao Xiuyan¹ Liu Xianxi¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Tai'an 271018, China)

Abstract: Aimed at the retrieval performance deficiency of the classic shape distribution algorithm in the field of professional CAD models, and to achieve the reuse of agricultural machinery CAD models better, a 3-D CAD model retrieval algorithm based on distance and area distributions was proposed to achieve the model similarity assessment. Firstly, hundreds of points were selected randomly on the grid of the triangular mesh surface, during which we adopted the quasi-random number generator and Halton - Sequence to generate random points to ensure the uniformity of corresponding points; then corresponding distance between two random points as well as area ratios between each surface were calculated, and the frequency of specific points was computed in the distance - area planar grid, forming a distance - area distribution matrix of a model; finally, we adopted the Manhattan to make an assessment about different matrixes to achieve the comparison of different CAD models. Area distribution is one of the essential characteristics of models. The innovation of this paper is that we put this factor and area feature into consideration. And the descriptor was distance feature with a fusion of area to implement the accurate depiction. Accuracy was higher compared with that of other methods with respect to same retrieval parts. Halton - Sequence was adopted to generate uniform random numbers and the sampling points can be reduced significantly due to this. Thus, efficiency was acceptable. Above all, test results show that the

收稿日期: 2015-07-12 修回日期: 2015-09-19

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD20B01)和山东省自然科学基金项目(ZR2015EL022)

作者简介: 张开兴(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业 CAD、制造业信息化研究, E-mail: kaixingzhang@139.com

通信作者: 刘贤喜(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业 CAD/CAM、虚拟现实技术研究, E-mail: wjbliu@sdau.edu.cn

algorithm is better in the field of agricultural CAD models compared with other shape distribution algorithms for the similarity assessment.

Key words: agricultural machine; 3-D model; similarity assessment; design reuse; distance - area algorithm

引言

现阶段,我国农业装备产品多以跟踪和仿造国外产品为主,核心技术自主知识产权水平较低,农机产品的设计普遍采用传统设计方法,产品开发周期长、重复性设计多、设计资源难以重用,在产品型号、标准化程度和产品质量上与国外存在较大差距。中国北方地区,尤其东北地区,需要众多大中型农业机械,而南方多丘陵盆地,中小型农机将成为主流;同时,草原所需的畜牧机械、果园菜园所需的蔬菜水果机械、各类经济作物需要的作业机械以及中草药机械都是迫切需要解决的。因此,在农机装备设计领域通过数字化^[1]设计技术改造传统农业机械设计手段,对于提高我国农业装备的设计水平、提升农业装备^[2]制造企业竞争力具有重要的意义^[3]。统计分析表明,尽管产品一直在不断地更新换代,但全新的功能、结构和工艺设计只有约 20%,其余 80% 的设计则可以通过直接重用或局部修改已有设计来完成,产品在功能、结构和工艺等方面具有很强的相似性和继承性。因此,在新产品研制过程中,快速有效地查找出需要的设计模型并对其加以重用已成为产品开发各环节的一个迫切需求,是提高农机产品研制质量,缩短生产准备周期、实现快速^[4]响应制造的重要途径之一。迄今为止,已有多种设计重用技术^[5]在农机产品设计中逐步得到应用:基于模块化^[6-7]的产品快速设计;零部件检索^[8]重用设计;基于实例推理^[9]与设计重用;基于知识模板^[10]设计重用;基于本体^[11]方法设计重用。总体而言,现有设计重用技术主要针对农机产品零部件级,其相似性判定以定性和文本属性匹配为主,且可重用设计信息的确定也非常依赖人的经验和知识,农机产品设计重用的粒度粗、精度差、智能化水平低。近年来的三维模型检索技术已经成为研究热点,它直接从三维模型中提取表征模型本质属性的特征信息来建立索引和实现重用。在特征提取方面,利用统计学思想,寻找有区分能力的统计特征成为模型检索的重要思路。经典形状分布算法对模型表面随机取点后统计任意两点的距离作为衡量尺度,形成分布曲线,通过对曲线的区分匹配实现模型检索。

王洪申等^[12]针对形状分布算法,提出距离-曲率检索算法,算法将曲率分布和点对距离分布结合,

但采用的 CAD 模型通常存在噪声,求解曲率时往往会出现错误,影响最终求解结果。张汝珍等^[13]提出一种改进形状分布相似性算法,该改进分为两个层次。首先,将点对依据其连线在模型中的位置分为 IN 和 UNIN 两类,以表征模型的凸凹性;其次,引入样本点所在邻域的法向量及其夹角信息,以区分多面体盒形件、回转类零件或自由曲面信息,进一步提高了算法分辨力。张开兴等^[14]将点所在面的法矢与点之间连线夹角考虑其中,形成距离-夹角检索算法,但是算法性能受点数量影响的程度较大,当提高精度而增加采样点数量时,时间代价难以接受。同距离特征相比,面积作为形状描述子在模型的比较评价中同样占有重要地位。作为表征模型特征的一种信号,模型面积特征除了能较准确地描述模型外,也具有鲁棒性、对噪声干扰不敏感、便于统计等优点。若两个模型相似,归一化之后,两个模型所含面的数量以及各个面的面积也应该是相似的,若不归一化,模型所有面面积之间的相互比值以及比值的数量应是相似的。蒋立军等^[15]提出一种基于面积分布算子的三维模型检索算法,该算法采用模型中顶点关联的三角形面积总和及平均面积构成的面积序列,然后对面积分布序列进行归一化操作和傅里叶变换等处理,得到最终的面积分布算子,实现了将三维模型的相似度计算映射为面积分布序列的比较,但是为得到最终的特征向量所进行的操作比较繁杂,特征向量维数过高,匹配困难。基于此,本文在经典形状分布^[16-17]算法的基础上,进一步提取统计特征:模型面面积之间相互比值,并且对其中重要步骤之一的随机取点方法进行改进和优化,最终形成距离-面积相似性评价算法,实现农业机械 CAD 模型的快速评价、匹配重用。

1 算法原理

经典形状分布算法的基本原理是将 CAD 模型的几何形状信息转化为概率图来表示。图 1 是本文算法的技术路线图,距离-面积算法主要实现步骤如下:

- (1) 利用蒙特卡洛方法对网格化三维模型进行处理,以模型三角面片的面积为依据随机生成样本点。
- (2) 计算形状特征值:随机点对之间距离以及

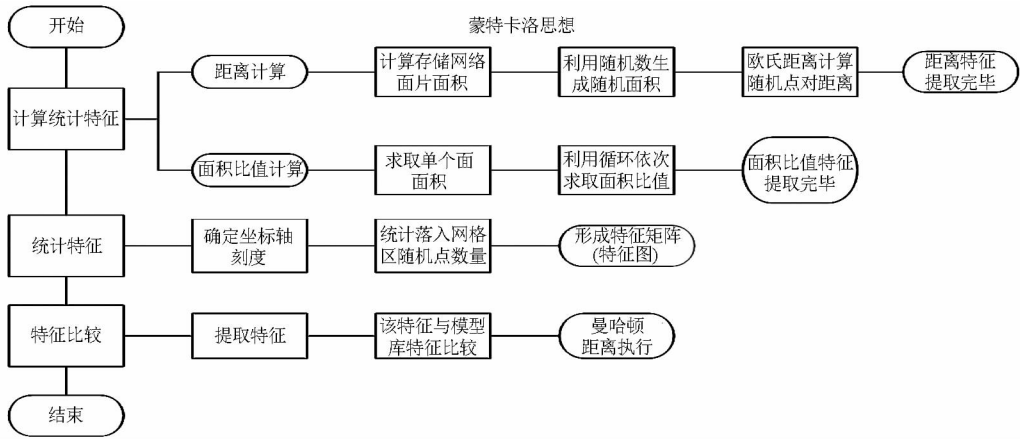


图 1 算法技术路线图
Fig. 1 Flow chart of algorithm technical

模型面之间的相互面积比值。

(3) 以距离、面积比值分别作为 X 、 Y 轴,以落入坐标网格内随机点的数量作为 Z 轴,统计相应特征点的频次,最终生成三维形状分布曲线图。

(4) 采用图匹配的方法比较形状分布曲线图相似性,本文采取曼哈顿距离评估模型之间相似性。

图 2 展示的是两种常见农业机械零件变速箱、收割机壳体的 3 类曲线图,分别是距离形状分布曲线、试验测试的面积比曲线以及本文算法提出的距离-面积三维曲线,其中综合算法曲线是两类零件曲

线的直观比较。根据两类零件的三维 CAD 模型图,两类零件几何形状差异较大,但对于第 1 类曲线,尽管曲线局部略有差异,但总体重合度较高,仅依靠形状分布曲线不能将两者区分开;对于第 2 类曲线,由面积比分布图可以发现,两类零件的面积比特征有较明显差异,曲线增长走势分别是抛物线、直线,并且具体数量差别也较大,因此可进一步作为模型区分的依据;综合可知,如果将两类曲线进行融合,既可保留距离算法的优良特性,又可增加区分特征,提高检索性能,最终便形成本文的距离-面积算法。

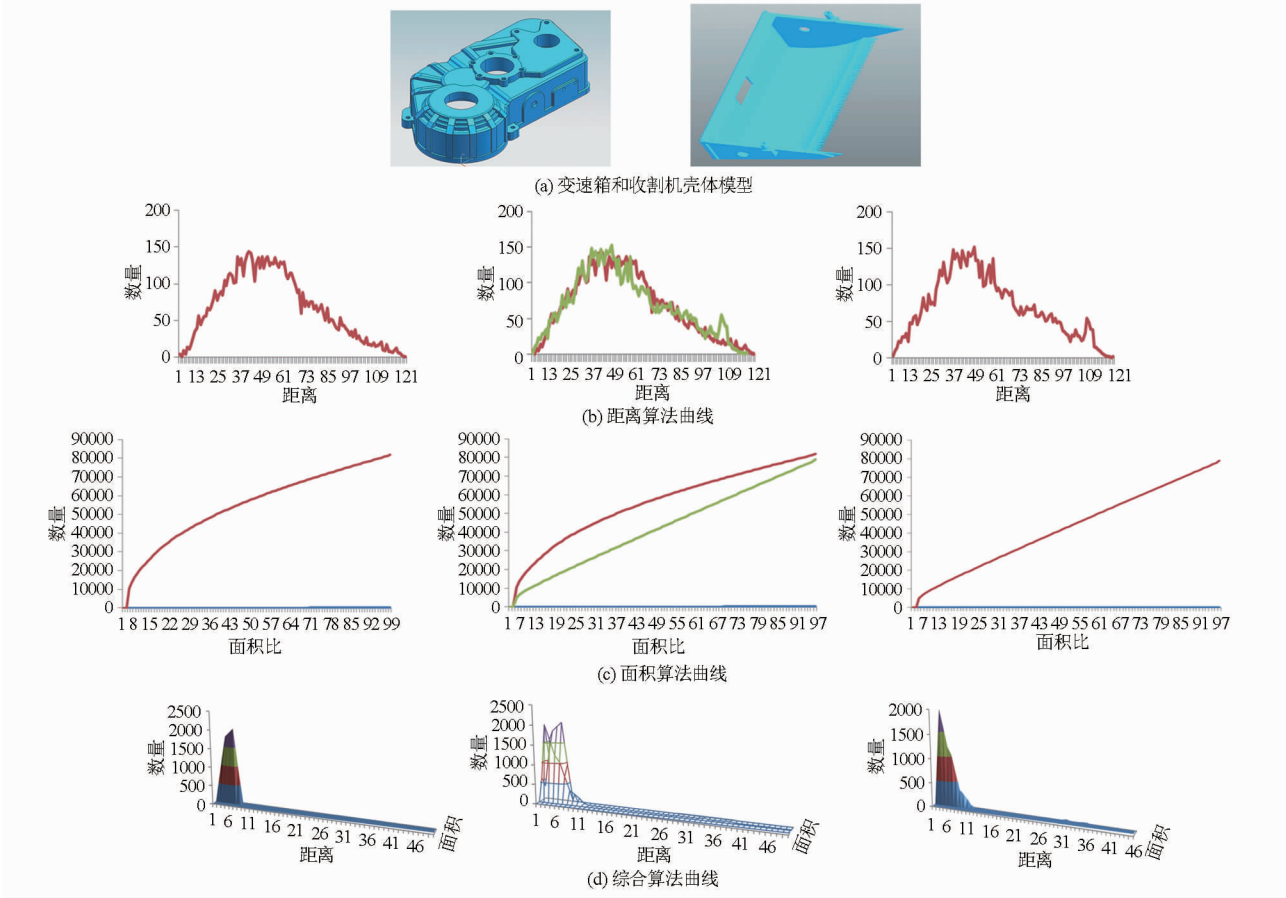


图 2 典型零件以及 3 类曲线图

Fig. 2 Typical parts and three kinds of graphs

2 基于距离-面积方式模型相似性评价实现

2.1 随机生成样本点

本文采用文献[18]提到的蒙特卡洛方法,该方法主要根据等面积原则在模型表面生成一定数量的随机点。随机取点过程中的重要步骤之一是随机数的生成,真正意义上的随机数是按实验过程中表现出分布概率之后随机产生的,其结果是不可预测的,是不可见的。计算机中的随机数是按照一定算法模拟产生的,其结果是确定可见的。传统的伪随机数发生器(PRNG)生成的随机数均匀性较差,局部的团簇性较高。为此,本文采用准随机数发生器(QRNG)中的 Halton - Sequence^[18]产生随机数,图 3、4 所示是两者的比较,在取相同数量点的情况下,采取这种方法时点的均匀性较好。

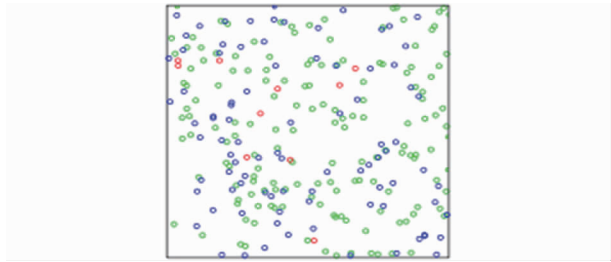


图 3 伪随机数生成器
Fig. 3 Pseudo-random number generator

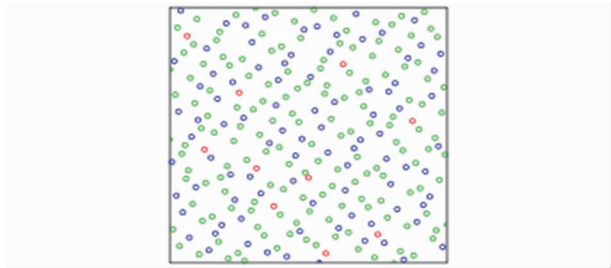


图 4 准随机数发生器
Fig. 4 Quasi-random number generator

文献[18]中较为详细地介绍了 Halton 序列的产生原理以及该序列的随机性、均匀性特点,以在二维空间内生成一个随机点为例,此时生成 Halton 序列的基本思想是给定两个质数 a 和 b ,分别对应于 X 轴和 Y 轴的基数,假定 a 和 b 分别取 2 和 3,为了产生 2 对应的序列,首先将 $(0,1)$ 之间的空间进行 2 等分,之后 4 等分、8 等分,等等,则 x 的取值顺序是:1/2、1/4、3/4、1/8、5/8、3/8、7/8、1/16;同理为了产生 3 对应的序列,将 $(0,1)$ 之间的空间进行 3 等分,之后 9 等分、27 等分,等等,则 y 的取值顺序是:1/3、2/3、1/9、4/9、7/9、2/9、5/9、8/9;此时空间中的 8 个随机点可以确定为 $(1/2, 1/3)$ 、 $(1/4, 2/3)$ 、 $(3/4, 1/9)$ 、 $(1/8, 4/9)$ 、 $(5/8, 7/9)$ 、 $(3/8, 2/9)$ 、 $(7/8, 5/9)$ 、 $(1/16, 8/9)$ 。总结得到计算步骤:假

定要取第 n 个数,第 1 步把 n 转化为 b 进制数,其中 b 就是指定的基数,第 2 步把转化后的数反转到小数点后,转化为小数,第 3 步把这个 b 进制数转回成十进制数,如图 5 所示是取 8 个二维点的过程。

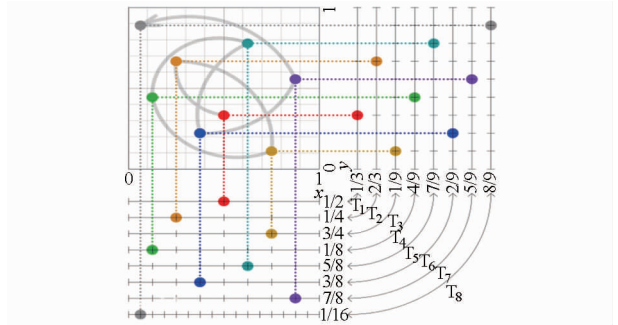


图 5 Halton 取点方式示意图
Fig. 5 Determining points of Halton

2.2 形状特征值计算

2.2.1 点对距离计算

这里采取的距离函数是 D2 距离(随机两点之间的距离)的欧氏距离公式,假定两个采样点为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$,则相应的距离平方求解公式为

$$d^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 \tag{1}$$

2.2.2 面积比计算

模型单个面面积的求法:将模型某个面 S_i 进行三角网格化,如图 6 所示,一个面被分解成 S_{i1} 、 S_{i2} 、 $\cdots$ 、 S_{in} ,共 n 个小三角形,假定 S_{i1} 的 3 个顶点分别是 P_1 、 P_2 、 P_3 ,可以求出这个小三角形面积为

$$A(S_{i1}) = \frac{\| (P_2 - P_1) (P_3 - P_1) \|}{2} \tag{2}$$

累加得到模型单个面的总面积为

$$S_i = \sum_{j=1}^n A(S_{ij}) \tag{3}$$

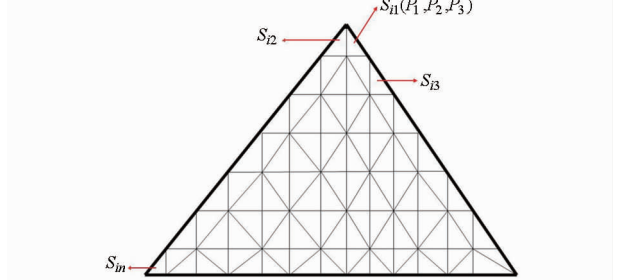


图 6 模型单个网格面
Fig. 6 Single grid surface of model

同理将模型所有面的面积求出,按照面积由小到大的顺序存入容器,利用循环,依次求出比值,假定一个模型的所有零件面可以表示为 $S = \{S_1, S_2, \cdots, S_j, \cdots, S_n\}$, S_j 表示模型的任意一个面,这里将面 S_j 对应的面积表示为 $A(S_j)$,则求取比值 R 的公式是 $R =$

$\frac{A(S_i)}{A(S_j)} (1 \leq i < j \leq n)$, 若一个零件共有 m 面, 则求解面积比的个数是 $N = \frac{(1+m)m}{2}$ 。

2.3 生成形状分布矩阵

为将得到的统计特征映射到网格坐标系中, 以便形成特征矩阵进行比较, 有必要对坐标刻度进行确定。理论上讲, 刻度划分越精细, 模型区分度会越好, 但过于精细, 耗费的计算代价会上升, 故实际程序实现中进行了折衷。图 7 所示网格坐标系中, X 轴表示面积比, 因为所有面积比都在 0、1 之间, 同时考虑到模型面数量可能不够充足, 形成的比值数量同距离统计特征相比较差别较大, 将 X 轴 0、1 区间划分为 500 份, 单位刻度为 0.002; Y 轴表示距离, 经过实际程序测定, 目前采取零件模型最大距离, 是为在最终比较时生成规模相同的矩阵, 以便于进行比较, 将 Y 轴根据最大距离之间划分为 100 份, 生成相应单位刻度如图 7 所示。

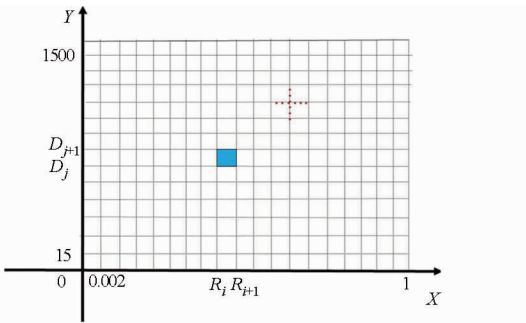


图 7 二维网格图
Fig. 7 2-D grid map

当距离和夹角满足 $D_j \leq D_x < D_{j+1}$ 、 $R_i \leq R_y < R_{i+1}$ 时, 网格平面所对应小方格加 1, 通过这种方式可以在二维网格平面中统计距离和面积比的分布情况, 则三维模型最终可以用一个 $M[500][100]$ 矩阵来表示。

2.4 模型矩阵相似性度量

曼哈顿距离: 设模型 A 与模型 B 的距离、夹角分布矩阵分别为 M_A 和 M_B , 则模型 A 与模型 B 的相似性度量函数为

$$\text{Dis}(M_A, M_B) = \sum_{i=1}^{500} \sum_{j=1}^{100} |m_{ij(A)} - m_{ij(B)}| \quad (4)$$

该公式能够客观反映出矩阵所表示 CAD 模型的形状差异情况, 计算结果数值越大, 表明两个矩阵差异越大, 也就间接表明两个模型之间的差异越大。度量方法具有如下特点: ① $\text{Dis}(A, A) = 0$ 。② $\text{Dis}(A, B) = \text{Dis}(B, A)$ 。③ 算法计算复杂度属于线性, 对分布矩阵刻度重新规划时, 算法消耗时间平稳变化。

3 界面展示与结果分析

图 8 是检索结果主要显示界面。系统以 Microsoft Visual Studio 2008 为集成开发环境, 以 Open Cascade^[19] 为几何内核开发平台。原型系统主要功能有新建模型库、模型入库以及模型检索。针对不同领域模型分别建立专门领域模型库, 入库操作主要是对模型进行特征提取, 然后以文本文件的方式进行特征保存, 模型检索又分为整体检索和局部检索, 本文对整体检索进行演示。

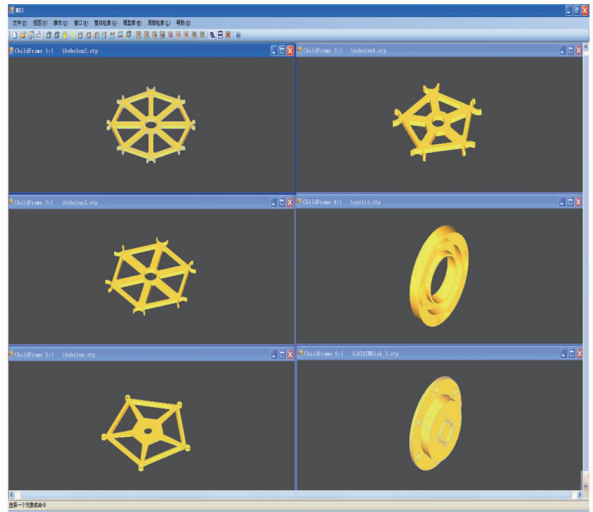


图 8 软件检索结果界面
Fig. 8 Interface of software results

试验测试中的模型部分取自于普渡大学 ESB 模型库, 部分来自于联合收获机的收获装置、传动装置、行走装置以及存粮装置的一系列相应零件库, 总共将近 300 个零件模型。

为便于演示本文算法性能, 与文献[16]中提出的形状分布算法、文献[14]中的距离-夹角算法进行比较, 最终结果如图 9、图 10、表 1 所示。

比较过程分别采用传动系的泵体、变速箱, 以及收割零件系中的拨禾轮、收获部分的倾斜输送装置。在结果演示的 6 个零件中, 图 9 所示的传动系两类零件中, 本文算法能够分别精确找到 5 个和 5 个与检索模型相似零件, 形状分布算法能够找到 3 个和 3 个, 距离-夹角算法能够匹配到 4 个和 5 个; 对传动零件中变速箱的检索能够突出本文相较于形状分布算法的精确性, 因为试验检索的变速箱体总体较复杂, 零件中面数量较多, 面积差距较大; 本文算法面积特征提取部分能够充分考虑这种差异, 因而检索结果较为满意。收获系拨禾轮和倾斜输送装置两类零件中, 形状分布算法分别查找到 3 个和 3 个, 本文算法找到 4 个和 4 个, 距离-夹角算法确定 3 个和 3 个。从返回结果精度值来讲, 本文算法最优。3 种

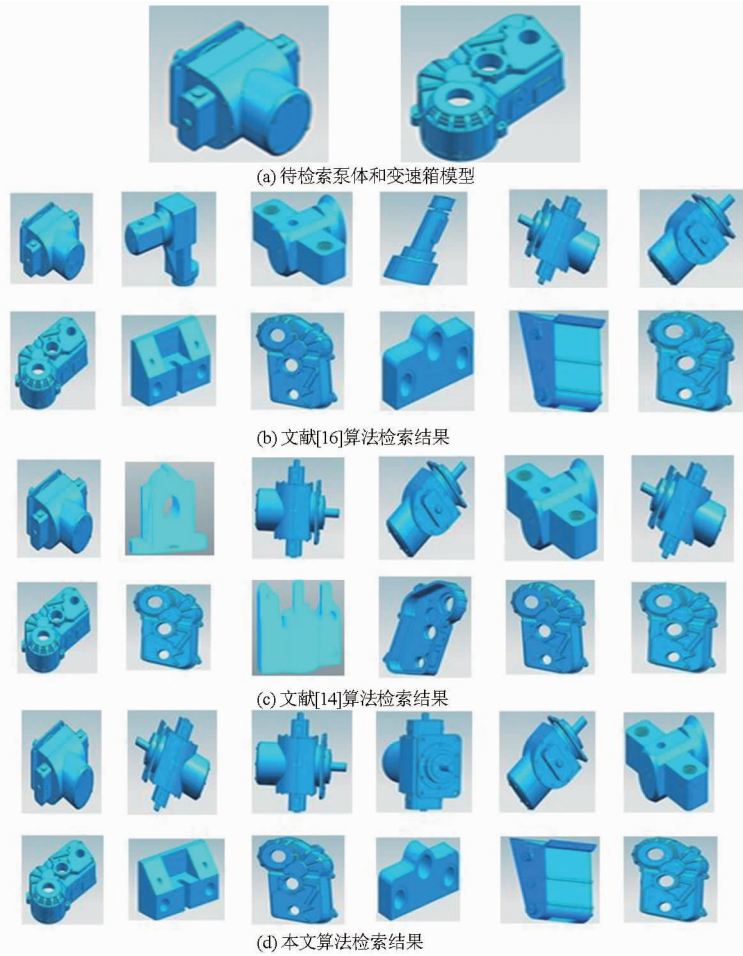


图 9 检索结果演示对比 A

Fig.9 Demonstration and comparison of results A

算法的时间性能对比分析:本文算法消耗时间低于形状分布^[16]算法,较低于距离-夹角^[14]算法。由于本文算法改进了随机取点方式,使得随机取得点的均匀性大大提高,算法只需要采用 512 个随机点,距离计算次数为 $512 \times 511/2 = 130\,816$,但经典形状分布算法的距离计算次数为 $1\,024 \times 1\,023/2 = 523\,776$,并且试验测试执行面积特征增加的时间在数量级方面与距离特征相比低很多,综合可得时间性能优于文献[16]算法。与文献[14]算法对比:在算法稳定性方面,距离-夹角算法中距离、夹角特征的复杂度都与点数量直接相关,检索结果准确性与点的数量密切相关,在算法的时间复杂度相同的情况下,为对算法进行改进而改变采样点数量时,对算法时间效率影响较大;而本文算法中,提取面积特征的时间相对比较固定,并且常规模型中面的计算次数是远低于距离或者夹角的计算次数,根据上文提到的面积比计算次数公式可知,面积特征比夹角特征耗时更少,在采样点数量仅影响距离特征情况下,从算法时间性能上比较,本文算法在相对稳定的同时时间还少于文献[14]算法;从算法设计的可靠性上讲,由于处理的都是三角网格模型,在生成原始网格模型过程中,模型噪声

问题一直无法避免,距离-夹角算法在求解夹角特征时,网格模型的噪声对它具有直接的影响,因而最终特征的准确性无法保证;相比较而言,本文算法中的面积特征受模型质量影响更小,特征的准确性、稳定性更高。

本文对农业机械模型库中部分零件进行了特征提取以及特征对比试验,平均时间如表 1 所示,同文献[16]算法相比,在距离运算次数大大减少之后,特征提取时间可以减少将近一半;本文算法与文献[14]算法采用的都是曼哈顿距离比较方式,只是由于最终特征矩阵大小差异,所以特征对比时间比较接近,但是在特征提取方面有一定优势。

综合比较以后,本文算法时间性能较为优良。

图 11 与图 12 是两类零件 4 个相似模型距离-面积图对比,同一类零件相似模型对应的曲线图总体走势是相似的,但在峰值处以及坡度变化幅度方面有一定差异,实质是模型特征的具体量化数值会有差异,这是精确计算区分相似模型的依据。总体而言,本文算法前 6 个结果中,排在前几位的与进行检索的模型相似度较高,但是出现个例情况。图 12 中的拨禾轮模型,在图 12 的 6 个结果中,理论上专

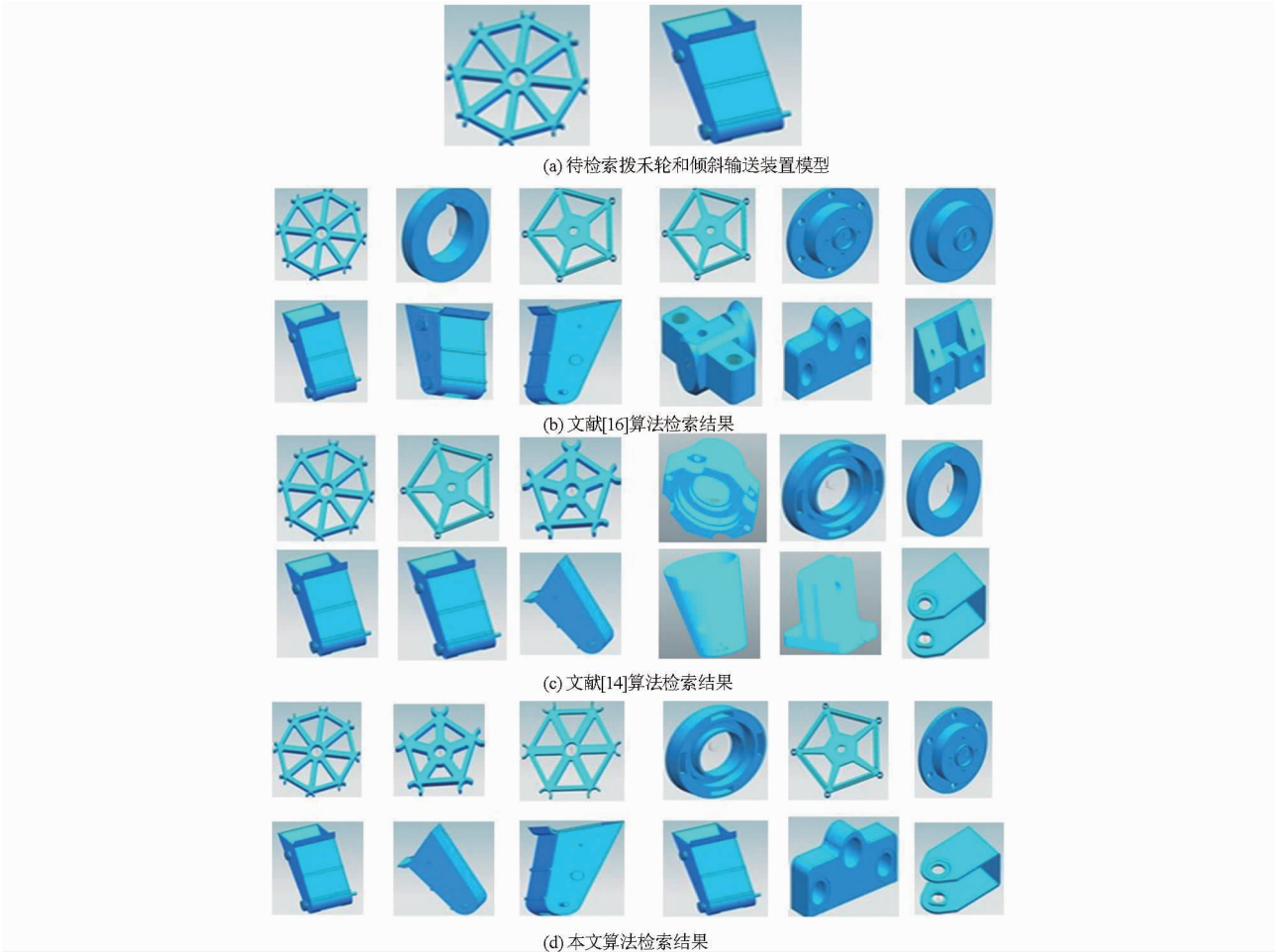


图 10 检索结果演示对比 B

Fig. 10 Demonstration and comparison of results B

表 1 模型处理时间比较
Tab.1 Processing time comparison

算法	提取特征时间/s	特征对比时间/ μ s
文献[16]算法	1.673 3	3.4
文献[14]算法	1.117 8	2.0
本文算法	0.978 3	1.6

家组判定第 5 个是要比第 4 个更接近检索模型,但是由实际算法计算出的表 5 的距离面积图能够看出,第 4 个零件图与前 3 个差别并不大,并且使用曼

哈顿距离进行数值计算时,第 5 个模型与检索原型之间的数值差距比第 4 个的大,原因很可能是前 3 个零件的边缘形状是半圆弧形,而且尺寸较大,但是第 5 个的外边缘形状很小的圆形,使得它们之间彼此差距加大,使得第 4、6 个模型的曲线与拨禾轮较为接近,使得检索结果出现图 12 的这种顺序。

通过算法检索到相似的拨禾轮零件后,将三维模型导入到专业 CAD 软件中进行装配设计,进而满

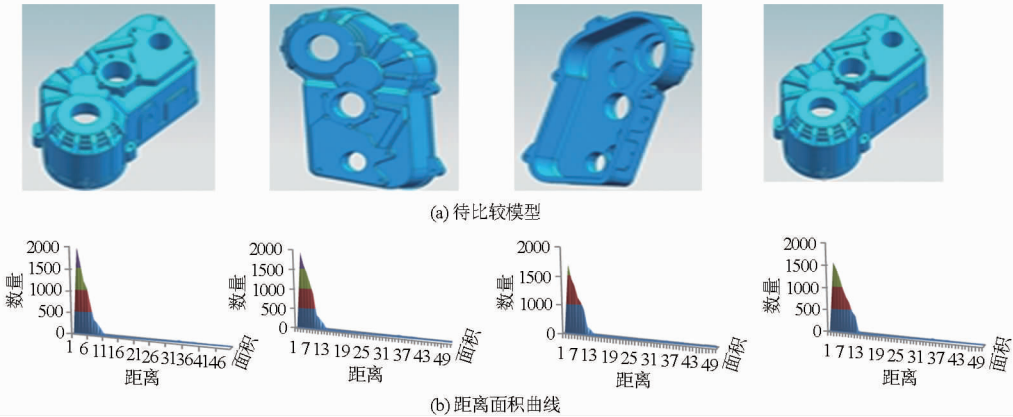


图 11 相似零件的距离-面积图比较 A

Fig. 11 Graphs of similar parts A

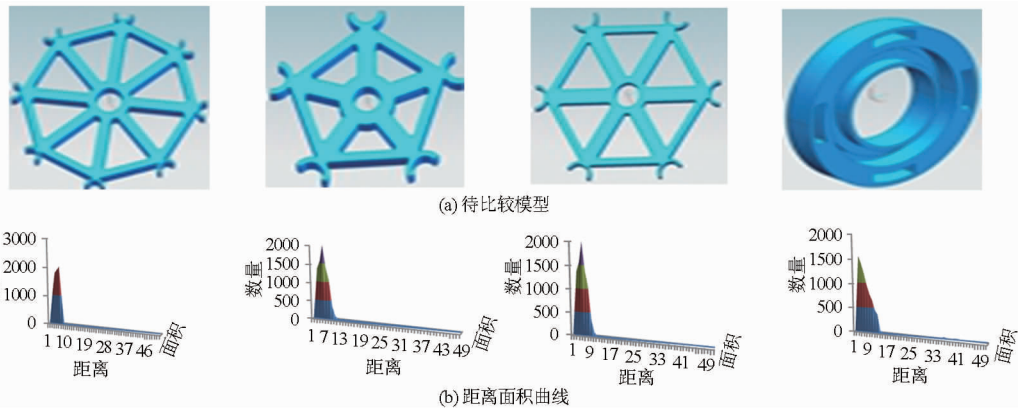


图 12 相似零件的距离-面积图比较 B
Fig. 12 Graphs of similar parts B

足快速设计的要求,如图 13 所示,采用相似方法,得到图 14 所示减速箱装配体的设计。

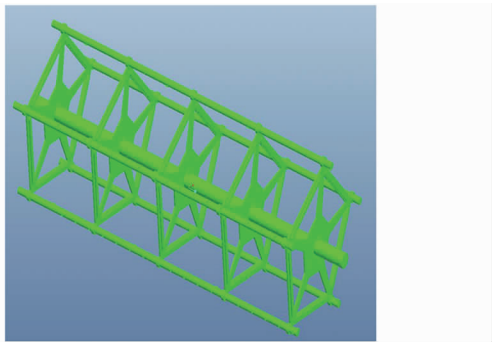


图 13 拨禾轮装配体
Fig. 13 Reel assembly

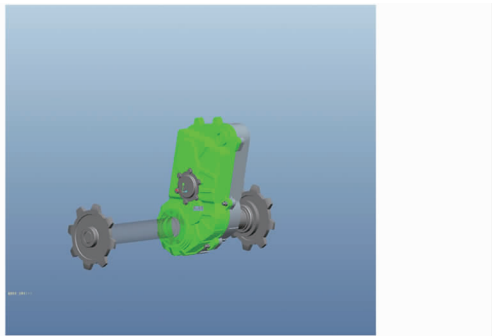


图 14 变速箱装配体
Fig. 14 Gearbox assembly

为对检索性能进行量化评价,在此引入具有相当参考价值的查准率、查全率评价体系。假设用户提交的需要查询的三维模型是 q ,而 M 是数据库中经过专家组认定的与 q 相关的三维模型的集合, R 是检索算法返回的结果集, p 表示查准率, r 表示查全率, R_q 表示 R 中与 q 相关的模型个数。 R_1 为 R 中模型总个数, M_1 为 M 中模型总个数,那么

$$p = \frac{R_q}{R_1} \tag{5}$$

$$r = \frac{R_q}{M_1} \tag{6}$$

根据公式能够得到:查全率表示返回的正确检索模型占与 q 相近、相关模型的比例,反映了系统返回正确检索结果数量方面的能力,而查准率表示返回的检索结果中,相似模型占有返回结果的比例,反映了系统返回结果的精确性能力。

假定对于检索模型 q ,专家组判定的在模型库中相似、相关模型集合 $R_q = \{d3、d5、d9、d25、d39、d44、d56、d71、d89、d123\}$,数量为 10 个,检索算法对查询 q 返回的检索结果数量为 15 个,返回模型分别是 $\{d123 *、d84、d56 *、d6、d8、d9 *、d511、d129、d187、d25 *、d38、d48、d250、d113、d3 * \}$,其中打上黑色标记的是在 R_q 中出现的 5 个模型,根据公式(5)、(6)计算得到查全率为 0.5,查准率为 0.33,得到的数据对(查全率,查准率)为(0.500,0.333)。按照相同方法,选取模型库中典型零件进行测试,分别计算每一个零件的查全率与查准率,从中选取 20 个数据对,以查全率为横坐标,查准率作为纵坐标,在坐标系中确定它们位置,连接形成曲线。

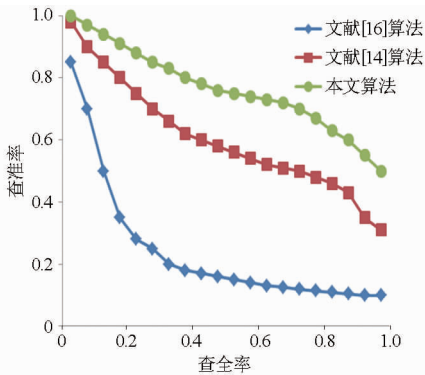


图 15 检索性能对比
Fig. 15 Retrieval performance comparison of three algorithms

理想情况下查准率应该恒定为 1,实际试验情况下,曲线越靠上,表征该算法的执行效果越好。从而可以看出,本文的算法检索效果要优于经典形状算法^[16]与距离-夹角算法^[14]。

4 结束语

针对经典形状算法在检索特定零件时检索性能不够优良的特点,纳入模型面积特征这一衡量因子,形成距离-面积检索算法。通过对三角网格模型表面进行随机取样,同时改进随机取点的数

学方式,计算得到距离以及面积特征,统计形成三维矩阵图,利用曼哈顿距离对曲线图进行比较,最终实现 CAD 模型的相似性比较。试验结果表明,本文算法的检索性能有了较大提高,有助于实现农业机械 CAD 模型快速检索,以达到快速设计目标。

参 考 文 献

1 王树才,邓在京,文友先.我国农业机械 CAD 的发展思路[J].农业机械学报,2004,35(1):160-169.
Wang Shucai, Deng Zaijing, Wen Youxian. Development strategies of agricultural machinery CAD in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1):160-169. (in Chinese)

2 阎楚良,杨方飞.农业机械产品数字化设计技术及展望[J].中国工程科学,2006,8(9):14-18.
Yan Chuliang, Yang Fangfei. Digitized design technology and its application in agricultural machinery design[J]. Engineering Science, 2006, 8(9):14-18. (in Chinese)

3 阎楚良,杨方飞,张书明.数字化设计技术及其在农业机械设计中的应用[J].农业机械学报,2004,35(6):212-214.
Yan Chuliang, Yang Fangfei, Zhang Shuming. Digitized design technology and its application in agricultural machinery design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6):212-214. (in Chinese)

4 熊光楞,李伯虎,柴旭东.虚拟样机技术[J].系统仿真学报,2001,13(1):114-117.
Xiong Guangleng, Li Bohu, Chai Xudong. Virtual prototyping technology[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(1):114-117. (in Chinese)

5 李博.设计重用研究综述[J].计算机集成制造系统,2014,3(3):455-460.
Li Bo. Review on design reuse[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 3(3):455-460. (in Chinese)

6 张立彬,叶永伟,蒋建东,等.基于可重构模块化的小型农业作业机方案设计[J].农业机械学报,2005,36(4):78-81.
Zhang Libin, Ye Yongwei, Jiang Jiandong, et al. Scheme design of small agricultural machinery based on reconfigurable module method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4):78-81. (in Chinese)

7 张立彬.微小型农业机械产品可重构模块化设计方法及其应用[M].北京:科学出版社,2007.

8 杨育彬,林琿,朱庆.基于内容的三维模型检索综述[J].计算机学报,2004,10(10):1298-1307.
Yang Yubin, Lin Hui, Zhu Qing. Content-based 3D model retrieval[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 10(10):1298-1307. (in Chinese)

9 蒋建东,叶永伟,张宪,等.基于 CBR 小型农业作业机的可重构设计[J].农业机械学报,2006,37(6):33-35.
Jiang Jiandong, Ye Yongwei, Zhang Xian, et al. Study on small agricultural machinery products reconfigurable design based on CBR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6):33-35. (in Chinese)

10 屠立,张树有,陆长明.基于知识模板的复杂产品设计重用方法研究[J].计算机集成制造系统,2009,6(6):1042-1048.
Tu Li, Zhang Shuyou, Lu Changming. Design reuse method of complex product based on knowledge template[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 6(6):1042-1048. (in Chinese)

11 王英林,王卫东,王宗江,等.基于本体的可重构知识管理平台[J].计算机集成制造系统,2003,9(12):1137-1143.
Wang Yinglin, Wang Weidong, Wang Zongjiang, et al. Reconfigurable platform for knowledge management based on ontology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(12):1137-1143. (in Chinese)

12 王洪申,张树生,白晓亮,等.三维 CAD 曲面模型距离-曲率形状分布检索算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(5):763-770.
Wang Hongshen, Zhang Shusheng, Bai Xiaoliang, et al. 3D CAD surface model retrieval algorithm based on distance and curvature distributions[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(5):763-770. (in Chinese)

13 张汝珍,王婉,周雄辉.基于形状分布算法的三维模型相似性研究[J].计算机集成制造系统,2007,13(10):1929-1933.
Zhang Ruzhen, Wang Wan, Zhou Xionghui. Three-dimensional model similarity based on improved shape distribution algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(10):1929-1933. (in Chinese)

14 张开兴,黄瑞,刘贤喜.基于距离-夹角形状分布的三维 CAD 模型检索算法[J].农业机械学报,2014,45(4):317-320.
Zhang Kaixing, Huang Rui, Liu Xianxi. 3D CAD model retrieval algorithm based on distance and angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):317-320. (in Chinese)

15 蒋立军,张旭堂,张广玉.基于面积分布算子的三维模型检索算法[J].计算机工程与应用,2012,48(12):6-13,33.
Jiang Lijun, Zhang Xutang, Zhang Guangyu. 3D model retrieval method based on area distributions[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(12):6-13,33. (in Chinese)

16 Osada R, Funkhouser T, Chazelle B. et al. Shape distributions[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4):807-832.

17 Ohbuchi R, Minamitani T, Takei T. Shape-similarity search of 3D models by using enhanced shape functions[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2005, 23(3):70-85.

18 李宁.拟蒙特卡罗中 Halton 序列的去随机化[D].乌鲁木齐:新疆大学,2008.
Li Ning. The derandomization of the Halton sequences in Quasi-Monte Carlo[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2008. (in Chinese)

19 张渊.基于 Open CASCADE 的虚拟三维建模平台的开发[D].济南:山东大学,2007.
Zhang Yuan. Development of visual 3D modeling platform based on Open CASCADE[D]. Ji'nan: Shandong University, 2007. (in Chinese)