

# 基于形状分布式模型检索的农机装备快速设计方法

刘洪豪<sup>1</sup> 张开兴<sup>1,2</sup> 卢山<sup>1</sup> 刘贤喜<sup>1,3</sup>

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

**摘要:**为促进农机装备设计重用,提出一种基于形状分布式模型检索的农机装备快速设计方法。首先,对三维模型进行归一化处理,并依次计算模型表面各三角网格面积,根据网格面积将每个模型的三角网格分为 Max、Mid、Min 3类,采用 Sobol 准随机序列对分类后网格交叉组合取点,以采样点数 3 为基本采样单位对三维模型进行组合式特征点采样;然后,对提取的距离 D2、面积 D3、曲率 C1、角度 A3 形状特征进行融合,分别计算 4 种特征值变异系数,以变异系数所占比例作为各形状特征权重,将加权后的不同特征变量值拼接成具有多特征的形状分布直方图,采用  $\chi^2$  距离度量直方图间的相似性;最后,以 VS2010 与 Matlab 2016b 为开发环境,以 Open Cascade 为几何造型平台,使用自行构建的农机装备关键零部件模型库进行实验。结果表明,在农机三维模型库中,特征查准率由大到小依次为距离 D2、曲率 C1、角度 A3、面积 D3 特征,本文提出的自适应加权融合特征(AWSD)算法在查全率 0~0.5 区间内显著优于 D2 检索算法,在 0.5~1.0 区间内检索效果与 D2 特征近似;AWSD 算法检索效率符合基本要求,综合检索精度较 D2 形状分布算法提高了 8.5%;拖拉机轮毂与收获机摘穗板检索实例表明,AWSD 算法在检索主观满意度方面优于距离 D2 与曲率 C1 算法。

**关键词:** 农业机械; 模型特征提取; 设计重用; 形状分布; 快速设计

中图分类号: TP391; S220.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)05-0395-09

OSID:



## Rapid Design Method for Agricultural Machinery Based on Shape-distribution Model Retrieval

LIU Honghao<sup>1</sup> ZHANG Kaixing<sup>1,2</sup> LU Shan<sup>1</sup> LIU Xianxi<sup>1,3</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China  
2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Tai'an 271018, China  
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** A new rapid design method for agricultural machinery was proposed to promote agricultural design reuse technology. The method was implemented based on shape distribution model retrieval. Firstly, the CAD models in agricultural database were normalized. According to mesh area, all the triangular meshes that belong to each model were divided into Max, Mid and Min groups. The Sobol quasi-random sequence was used to sample feature point from each group. Then three points were defined as the basic sample unit, which was used to fuse the D2, D3, C1 and A3 features together. The variation coefficient of each feature was calculated and the proportion was regarded as sub-feature weight of fusion feature. Thereafter, the multi-feature histogram of shape distribution was formed by connecting different weighted features. The  $\chi^2$  distance was selected to measure the similarity between feature histograms. Finally, the effectiveness of the proposed method was proved with self-built agricultural model database using VS2010, Matlab 2016b and Open Cascade. The results showed that the retrieval precision of distance D2 feature was higher than that of curvature C1, angle A3 and area D3 features in agricultural model database. The proposed method of adaptive weighted shape distribution (AWSD) performed better

收稿日期: 2019-09-24 修回日期: 2019-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)、山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ011)和山东省重点研发计划项目(2019GNC106120)

作者简介: 刘洪豪(1992—),男,博士生,主要从事农业机械 CAD/CAM 和虚拟现实技术研究,E-mail: mobeikehan@126.com

通信作者: 张开兴(1984—),男,副教授,博士,主要从事农业机械 CAD 和农业信息化研究,E-mail: kaixingzhang@139.com

than D2 when retrieval recall was ranged from 0 to 0.5, and as effective as D2 in the range of 0.5 ~ 1.0. Compared with D2 retrieval method, the comprehensive retrieval precision of AWSO method was increased by 8.5%. The retrieval cases of tractor wheel hub and harvester picking board demonstrated AWSO outperformance in the aspect of objective retrieval satisfaction. The new model retrieval method that could fuse multi-shape distribution features injected fresh energy to agricultural machinery rapid design.

**Key words:** agricultural machine; model feature extraction; design reuse; shape distribution; rapid design

## 0 引言

模型检索是一种重要的设计重用方法<sup>[1]</sup>,可有效促进机械装备实现快速化设计。现阶段基于三维模型的产品设计与制造已成为我国制造业主流模式<sup>[2]</sup>,研究表明,包括农业机械领域在内的三维模型数量每年以指数方式增长<sup>[3]</sup>。面对数量与日俱增、种类日新月异的三维模型,快速有效提取模型特征、并实现三维模型相似性检索已成为制约设计重用技术<sup>[4]</sup>的关键。三维模型检索方法可分为:形态特征统计法、视图投影法以及函数变换法,3类方法侧重点不同,但均不同程度提高了三维模型检索效果。面向工程应用的模型检索方法需尽可能稳定、高效,其中形状分布法能够集鲁棒性、简单易用性于一体,是一种通用、高效的模型检索算法。

形状分布算法本质上是一种概率统计方法<sup>[5]</sup>,该方法以特征点之间距离、角度、面积等特征为样本,经过概率统计分析,最终以特征频率分布直方图作为模型的特征表示形式。ANKERST等<sup>[6]</sup>提出了一种基于形状直方图特征的空间模型分类方法;OSADA等<sup>[7]</sup>成功将5种形状分布函数应用于三维模型特征提取;LIN等<sup>[8]</sup>对D1、D2、D3等形状分布函数的分辨率、不变性、鲁棒性进行了多元化测试评估;模型表面采样点的均匀性影响三维模型特征提取效果,基于此SHIH等<sup>[9]</sup>提出一种GD2形状分布算法,该方法将三维模型体素化分解,使用体素单元替代随机采样点,提高了分布函数的分辨能力;张开兴等<sup>[10]</sup>提出了一种基于距离-夹角的形状分布算法,实验证明该方法的特征代表性优于传统形状分布算法。形状分布算法无需对三维模型进行旋转归一化处理,具有刚体变换与反射变换不变性<sup>[11]</sup>。

三维CAD模型形态结构逐渐复杂多样,单一形式的形状特征无法综合反映三维模型主要特征。此外,传统的形状分布法生成特征点概率与模型表面网格面积存在不对称性,即网格面积越大,生成特征点概率越高,但三维模型结构形态变化主要由小面积网格表示,因此传统特征点采样无法反映模型细节特征。本文对形状分布算法的特征点采样规则以

及多特征融合方式进行改进,提出一种自适应动态加权的形状分布模型检索算法,以促进机械装备三维模型检索与设计重用。

## 1 形状分布特征提取原理

形状分布函数本质上是一个概率分布函数,以形状特征分布作为三维模型的特征描述符,可以将复杂的三维模型间相似性度量问题转换为概率分布匹配。理论上,任何有关三维模型的特征函数均可通过样本采样形成特征描述符,例如:模型表面纹理特征、表面随机点间距离、颜色特征、材质属性等。在三维模型特征函数中,通过形状特征函数提取的模型特征描述符最为有效,图1为常用的6种形状分布函数,表1为对应形状分布函数的属性特征。

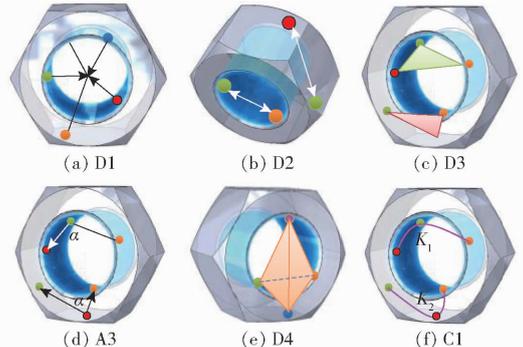


图1 常用形状分布函数特征示意图

Fig. 1 Illustrations of frequently used shape distribution feature

表1 形状分布函数属性

Tab. 1 Property of shape distribution function

名称	特点	所需采样点数
距离 D1	以模型表面特征随机点与模型重心间距离为样本	2
距离 D2	以模型表面特征随机点间距离为样本	2
面积 D3	以模型表面特征随机点组成的三角形面积为样本	3
角度 A3	以模型表面特征随机点间夹角为样本	3
体积 D4	以模型表面特征随机点组成的四面体体积为样本	4
曲率 C1	以模型表面特征随机点组成圆的曲率为样本	3

对于三维模型,位置方向变动引起的特征提取偏差是影响三维模型相似性匹配的主要因素,且在三维模型归一化变换过程中,旋转归一化处理最为复杂。

图 1 所示 6 种形状分布均通过采样点间特征函数计算获得,6 种形状特征提取描述符均具有旋转不变性,其中角度 A3 形状分布函数不仅具有旋转不变性,而且尺度不变,特征提取效果不受三维模型缩放、旋转的影响。此外,形状分布法是一种通用模型特征提取方法,适用于任何由三角网格表示的三维模型,非三角网格模型经过转换后同样适用。

## 2 动态加权融合形状分布特征

### 2.1 组合式特征点采样

现阶段模型表面特征点采样概率多与网格面积相关,而三维模型的特征细节主要是由一系列微小网格表示,模型特征与特征采样概率间不对称性降低了特征提取的区分度,因此使用组合分类排序法对特征点采样方式进行改进。

#### (1) 模型预处理

设三维模型经过三角网格化后顶点集合为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 其中  $v_i = (x_i, y_i, z_i)$  为网格顶点, 则三维模型中心点为

$$V_m = E\{V\} = \frac{1}{n} \sum_{v \in V} v \quad (1)$$

式中  $n$ ——模型顶点总数量

将模型中心点平移至坐标原点,完成平移归一化,计算模型中各顶点到中心点的最大距离,采用最大半径缩放法<sup>[12]</sup>,对三维模型进行尺度归一化处理

$$M_s = \frac{M}{\max(\text{dis}(v_i, V_m))} \quad (2)$$

式中  $M$ ——归一化前模型

$M_s$ ——归一化后模型

$\text{dis}(v_i, V_m)$ ——顶点  $v_i$  与中心点  $V_m$  之间的欧氏距离

由于形状分布算法具有旋转不变性,三维模型无需复杂的旋转变换处理,在预处理过程中三维模型顶点集合均以矩阵形式存储。

#### (2) 网格分类组合

图 2 为驱动桥万向节模型网格分类组合过程,首先遍历模型全部网格顶点,根据 Heron 公式计算网格面积,设三角网格顶点为  $(v_i, v_j, v_k)$ , 则其面积计算公式为

$$S_{\Delta_{ijk}} = \sqrt{L(L - \text{dis}(v_i, v_j))(L - \text{dis}(v_i, v_k))(L - \text{dis}(v_j, v_k))} \quad (3)$$

其中  $L = \frac{1}{2}(\text{dis}(v_i, v_j) + \text{dis}(v_i, v_k) + \text{dis}(v_j, v_k))$

式中  $L$ ——三角网格周长一半

$S_{\Delta_{ijk}}$ ——三角网格面积

然后存储网格面积及位置信息,根据面积对全部三角网格排序,对于排序后的网格有两种分类方法:网格数量分类与面积分类。模型典型细节特征由一系列面积较小的三角网格表示,数量分类法无法体现网格面积区分度,因此根据面积分类法将三角网格分为 Max( I 类)、Mid( II 类)、Min( III 类)。



图 2 模型三角网格分类与组合

Fig. 2 Classification and combination of model triangular mesh

网格分类后,不同类别依次交叉组合取点,计算网格表面采样点间形状特征。由于不同类别间网格位置及面积差异性增大,从而提高了模型提取特征

的分辨力与区分度。

#### (3) 准随机序列

生成随机点是完成网格采样的关键步骤,计算

机无法产生绝对均匀分布的随机数,传统的伪随机数序列均匀性较差,而准随机序列分布更加均匀,常用的准随机性序列包括 Halton 序列、Sobol 序列、Latin 超立方序列等<sup>[13]</sup>,其中 Sobol 序列具有较好的计算精度与计算效率<sup>[14]</sup>,因此采用 Sobol 准随机序列对分类后的三角网格采样。

Sobol 序列主要由一组方向数  $v_i$  构成,其中  $v_i = m_i/2^i$ ,构造步骤如下<sup>[15]</sup>:首先,生成系数  $c$  为 0 或 1 的原始多项式

$$f(z) = z^p + c_1 z^{p-1} + \dots + c_{p-1} z + c_p \quad (4)$$

然后根据递推公式计算

$$\begin{cases} v_t = c_1 v_{t-1} \oplus c_2 v_{t-2} \oplus \dots \oplus c_p v_{t-p} \oplus (v_{t-p}/2^p) \\ m_t = 2c_1 m_{t-1} \oplus 2^2 c_2 m_{t-2} \oplus \dots \oplus 2^p c_p m_{t-p} \oplus m_{t-p} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $t > p$ ,  $m_t$  为小于  $2^t$  的正奇数,  $\oplus$  表示二进制按位异或运算。

对于任何一个十进制整数  $y$ ,能够唯一表示为与数基  $b = 2$  有关的表达式

$$y = \sum_{j=1}^k a_j 2^{j-1} \quad (6)$$

式中,  $a_j$  系数为 0 或 1,  $k$  为大于等于  $\lg y$  的最小整数。

Sobol 序列的第  $z$  个元素可表示为

$$\phi_z = a_1 v_1 \oplus a_2 v_2 \oplus \dots \oplus a_k v_k \quad (7)$$

图 3 为 Matlab 中伪随机序列与 Sobol 准随机序列二维分布,准随机序列分布更加均匀。

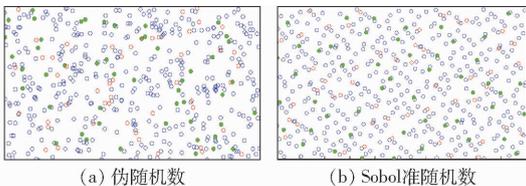


图 3 随机序列数二维分布

Fig. 3 Distributions of random sequences

根据准随机序列选定不同类别集合中三角网格,以三角网格重心为采样点,完成模型特征点采样。

## 2.2 自适应特征融合

特征融合可有效弥补单一特征代表性不足的缺点,现阶段的形状分布算法种类多样、功能专一、效率不同,对典型形状分布特征进行有机融合,不同形状分布特征优势互补,从而提高模型特征代表性与区分度。

### (1) 形状分布函数融合

特征融合需尽可能融合多种类别形状特征,但同时兼顾效率因素。由表 1 可知,单个 D3、A3、C1 形状特征样本需要 3 个采样点, D2 特征与 D1 特征同为距离特征且均需要 2 个采样点,体积特征 D4 需要 4 个采样点。此外,形状特征采样具有向下兼

容性,即高频采样可满足低频采样特征提取需求,因此,3 采样点作为采样基本单位的特征提取效率最高。图 4 为单位采样点数为 3 的融合采样特征,本文对距离 D2、面积 D3、曲率 C1、角度 A3 形状特征进行融合,实现三维模型线与面、内部与表面、距离与曲率综合特征提取。

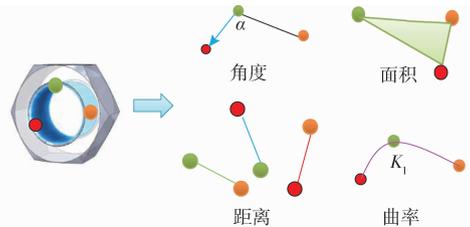


图 4 融合特征采样

Fig. 4 Fusion feature sample

### (2) 自适应动态加权

对于不同类型的三维模型,每种形状分布函数的表现能力不同,为最大限度突出模型主形状特征并体现次要特征,需计算不同形状函数权重。常用的加权方法可分为固定权值法与动态加权法<sup>[16]</sup>,动态加权法更适合数值波动较大的变量,本文基于变异系数采用动态加权法确定形状函数权重。

变异系数可以度量变量的离散程度<sup>[17]</sup>,在评价模型融合特征体系中,特征变量幅值变化范围越大,越能反映模型主特征,因此变异系数能够度量不同特征变量权重,其计算式为

$$V_j = \sqrt{\frac{1}{\bar{X}_j^2 (s-1)} \sum_{i=1}^s (x_i - \bar{X}_j)^2} \quad (8)$$

式中  $V_j$ ——第  $j$  项特征的变异系数

$x_i$ —— $j$  特征的第  $i$  个样本值

$\bar{X}_j$ —— $j$  特征的样本均值

$s$ ——样本总数

特征权重为

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j} \quad (9)$$

式中  $W_j$ ——第  $j$  项特征权重

$m$ ——融合特征总数

将各形状分布特征变量值归一化,然后根据各形状特征权重,按照 D2、D3、C1、A3 顺序将不同特征变量拼接成具有多特征的形状分布直方图,从而完成自适应加权融合特征 (Adaptive weighted shape distribution, AWS D) 提取。

### (3) 相似性度量

为实现模型库中不同模型相似性检索,需要根据形状分布直方图计算模型间相似性。距离比较是度量模型相似性的典型方法,主要包括 Euclidean 距

离、Manhattan 距离、Hausdorff 距离等<sup>[18]</sup>，本文采用  $\chi^2$  距离<sup>[19]</sup>，计算式为

$$d\chi^2(hist_A, hist_B) = \sum_{i=1}^S \frac{(hist_A(i) - hist_B(i))^2}{hist_A(i) + hist_B(i)} \quad (10)$$

式中  $hist_A, hist_B$ ——模型  $M_A$  和  $M_B$  直方图  
 $hist_A(i), hist_B(i)$ ——直方图第  $i$  个特征分量频次

$S$ ——直方图特征分量总数

三维模型相似度计算式为

$$Sim(M_A, M_B) = \frac{D_{max} - d\chi^2(hist_A, hist_B)}{D_{max} - D_{min}} \times 100\% \quad (11)$$

式中  $D_{max}, D_{min}$ ——模型  $M_A$  与所有参与比较的模型间距离最大值、最小值

### 3 实验与讨论

#### 3.1 实验数据集

选用 ESB 模型库<sup>[20]</sup>与农业机械装备 CAD 模型库作为三维模型实验数据集，其中 ESB 数据集由美国普渡大学设计开发，包括薄壁、棱柱、回转体 3 大类共计 867 个模型；农机模型库根据国家重点研发计划项目“农机装备智能化设计技术研究”构建，主要以联合收获机与拖拉机 CAD 模型为主，共包含 9 大类、23 小类共计 2 166 个模型，部分三维模型如图 5 所示。



图 5 三维模型库节选

Fig. 5 Part of 3D model database

#### 3.2 评价标准

采用国际通用标准对模型检索效果进行评价，主要包括 6 类指标：

(1) 查准率 (Precision) 与查全率 (Recall) 计算式为

$$P = \frac{R_A}{R_A + R_B} \quad (12)$$

$$R = \frac{R_A}{R_A + N_A} \quad (13)$$

式中  $R_A$ ——检索返回结果中与待检索模型相关的模型数量

$R_B$ ——与待检索模型无关的模型数量

$N_A$ ——整个模型库中与待检索模型相关但未检索到的模型数量

(2)  $E$  测度计算式为

$$E = \frac{(e^2 + 1)PR}{R + e^2P} \quad (14)$$

式中  $e$ ——查准率  $P$  与查全率  $R$  相关程度，通常取 0.5 或 1

(3) 平均查准率 (MAP) 计算式为

$$M_{AP} = \frac{1}{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} \left( \frac{1}{A_{r_i}} \sum_{j=1}^{A_{r_i}} \frac{j}{N_{r_{i,j}}} \right) \quad (15)$$

式中  $N_q$ ——待检索模型数量总和

$A_{r_i}$ ——第  $i$  个检索返回结果中正确相关模型数量

$N_{r_{i,j}}$ ——返回结果中截至前  $j$  个相关模型出现时模型数量

(4) 最近邻精度 (NN) 计算式为

$$N_N = \frac{R_n}{N} \quad (16)$$

式中  $N$ ——检索精度参数，即检索返回  $N$  项数量

$R_n$ ——返回前  $N$  项中正确相关模型数量，通常采用第一最近邻精度 ( $N = 1$ ) 指标

(5) FT 与 ST 测度

模型库中与待检索模型同类模型数量为  $C$ ，则 FT 与 ST 分别为前  $C - 1, 2(C - 1)$  个检索结果的查全率。

(6) 排序累积增益 (DCG) 计算式为

$$D_{CG} = r(1) + \sum_{i=2}^p \frac{r(i)}{\text{lb}i} \quad (17)$$

式中  $p$ ——检索返回模型总量

$r(i)$ ——第  $i$  个模型的相关性评分

### 3.3 结果与分析

实验设备配置环境为 Windows 10 操作系统,处理器 Intel Core i7-6500U (2.5 GHz),内存 8.0 GB,以 VS2010 与 Matlab 2016b 为开发环境,以 Open Cascade 为几何造型平台。表 2 为部分典型模型的特征提取结果,由表 2 可知,圆盘耙模型距离 D2 频率先增大后减小,拨禾轮模型距离 D2 频率增大后

保持,到达峰值后陡然减小,D2 形状特征随模型形状差异而变化,基本能够反映模型主要特征。表 2 中发动机模型与圆盘耙模型在几何形态方面显著不同,而发动机距离 D2 频率特征与圆盘耙特征相似,这主要因为发动机模型较为复杂,距离 D2 特征趋于正态分布,从而降低了特征的区分度与代表性<sup>[21]</sup>,由此表明单一形状分布特征的区分度有限。

表 2 模型特征分布图

Tab.2 Model characteristic distribution

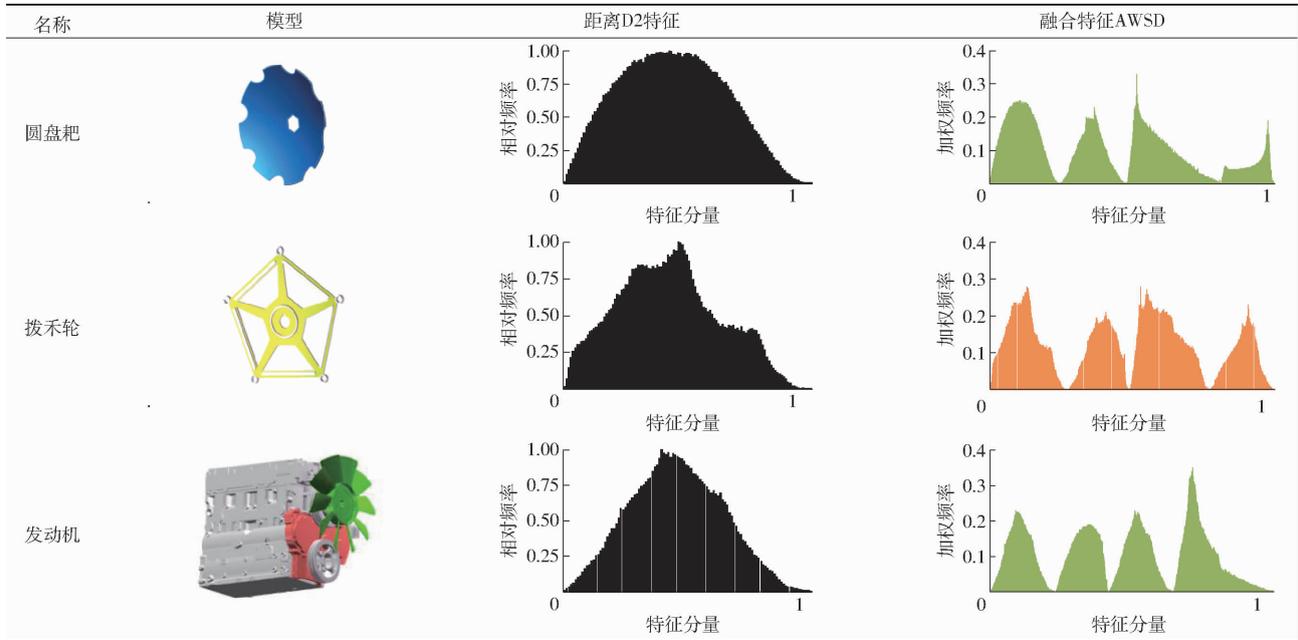


表 2 同时显示了本文提出的 AWS D 融合特征,其中圆盘耙模型融合特征权重为 0.25、0.23、0.33、0.19,拨禾轮模型权重为 0.28、0.21、0.28、0.23,发动机模型特征权重则为 0.23、0.19、0.23、0.35。圆盘耙与发动机模型的 D2 特征相似,AWS D 特征具有明显差异,其主要体现在形状特征波峰与波谷变化趋势以及峰值大小上,圆盘耙模型在第 3 个波峰时取最大值,拨禾轮模型的 4 个波峰值近似,而发动机模型特征最大值体现在第 4 个波峰上。融合特征最大峰值即各组成特征最大权重,而特征权重由模型各特征差异性决定,通过自适应加权方式,AWS D 融合特征能够有效弱化低区分度特征,突出模型特征差异性,提高模型特征分辨率。

为确定不同形状特征提取方法应用效果,选取拖拉机转向器、变速箱、轮胎 3 类,玉米联合收获机摘穗辊、押送器 2 类进行检索实验,以 5 类模型平均查全率为 X 轴、以平均查准率为 Y 轴,绘制查准率-查全率曲线如图 6 所示。理想的查准率-查全率曲线是纵坐标为 1 的水平直线,实际以查准率-查全率曲线与 X-Y 轴包围面积即查准率-查全率指数作为检索效果评价依据,查准率-查全率指数数值与检

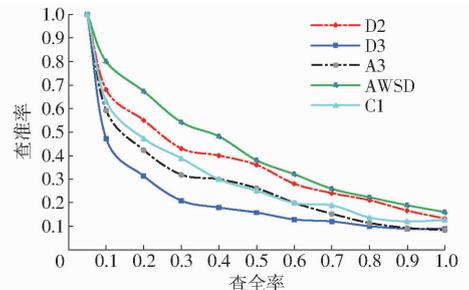


图 6 查准率-查全率曲线

Fig.6 Recall-precision curves

索效果正相关。由图 6 可知,特征检索查准率由大到小依次为 D2、C1、A3、D3 特征,本文提出的 AWS D 融合算法在查全率为 0~0.5 区间内显著优于 D2 特征,在 0.5~1.0 区间内检索效果与 D2 特征近似。表 3 进一步显示了不同方法的检索评价参数,AWS D

表 3 农机模型检索效果

Tab.3 Retrieval performance metrics

方法特征	NN	FT	ST	E 测度	标准化 DCG	MAP
A3	0.750	0.514	0.491	0.601	0.657	0.647
C1	0.611	0.439	0.537	0.544	0.734	0.634
D2	0.821	0.644	0.763	0.658	0.797	0.718
D3	0.583	0.572	0.657	0.507	0.565	0.556
AWS D	0.833	0.698	0.775	0.714	0.863	0.747

特征各项指标优于其他形状分布算法,综合检索精度较 D2 形状分布算法提高了 8.5%。

表 4 给出了不同方法检索所需时间,由表 4 可知,相对于单一特征提出方法,AWS D 特征融合方法特征提取时间、特征匹配时间不同程度增加,其平均检索时间为 6.439 2 s,模型检索效率略有降低。综上所述可知,本文提出的 AWS D 模型特征提取方法的检索精度与准确度均得到提高,检索效率符合要求。

表 4 模型检索所需时间

Tab. 4 Retrieval efficiency performance

方法特征	特征提取/s	特征匹配/s	模型检索/s	特征维度
A3	2.090 0	0.005 5	2.095 5	100
C1	2.540 0	0.005 6	2.545 6	100
D2	1.210 0	0.005 7	1.215 7	100
D3	2.630 0	0.005 5	2.835 5	100
AWS D	6.430 0	0.009 2	6.439 2	400

### 3.4 应用实例

表 5 为拖拉机轮毂 CAD 模型检索结果,拖拉机轮毂的曲面特征最典型,因此选用曲率 C1 形状分布算法与本文提出的 AWS D 算法比较,距离 D2 分布算法作为对照。由表 5 可知,3 种算法均能够检索出同一类的 6 个轮毂模型,视觉主观上可以观察到曲率 C1 算法与 AWS D 算法检索效果优于距离 D2 算法,由此表明本文提出的 AWS D 算法适用性较高,在检索主观满意度方面与专一特征检索算法近似。

摘穗板是玉米收获机割台的重要零部件<sup>[22]</sup>,不同于拖拉机轮毂大类零件,常用摘穗板结构约 10 种,表 6 为模型库中摘穗板 CAD 模型检索结果,其中与输入模型同一类的模型标记为黄色,非同类模型标记为灰色。由表 6 可知,C1、D2 算法检索出 4 种同类模型,而 AWS D 算法能够检索出 6 种,数量上 AWS D 算法性能优于 C1、D2 算法;输入的摘穗板

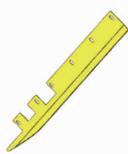
表 5 拖拉机轮毂 CAD 模型检索结果

Tab. 5 Retrieval results of tractor wheel hub model

搜索输入模型	算法	返回相关模型					
		1	2	3	4	5	6
 拖拉机轮毂	C1						
	相似度/%	94.13	89.27	86.55	85.31	81.33	80.62
	D2						
	相似度/%	94.53	93.92	90.16	87.41	84.34	83.11
	AWS D						
	相似度/%	92.45	91.48	88.56	87.67	85.21	84.94

表 6 收获机摘穗板 CAD 模型检索结果

Tab. 6 Retrieval results of harvester picking board model

搜索输入模型	算法	返回相关模型					
		1	2	3	4	5	6
 摘穗板	C1						
	相似度/%	96.51	95.88	84.15	81.34	74.31	72.66
	D2						
	相似度/%	95.64	94.32	85.76	79.26	77.43	70.91
	AWS D						
	相似度/%	94.13	93.49	89.21	88.08	84.62	79.36

模型含 2 个方形槽,与其最相似的模型同样应为方形槽,但 D2 算法首先返回 U 型槽摘穗板,这可能由采样点随机性导致,此外距离 D2 特征分辨率过低也将导致该现象发生。对检索后的模型进行简单尺寸、颜色编辑后即可设计重用,图 7、8 为使用检索出 CAD 模型进行快速设计的割台装配体。

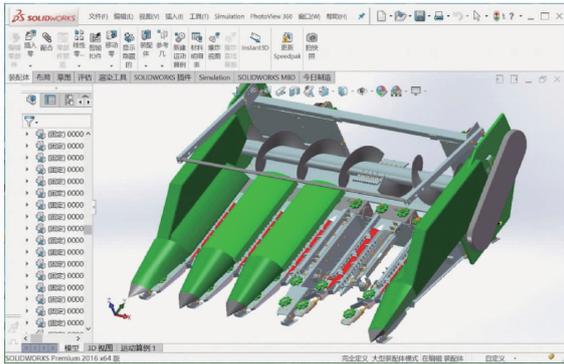


图 7 玉米收获机割台

Fig. 7 Assemblies of corn harvester header

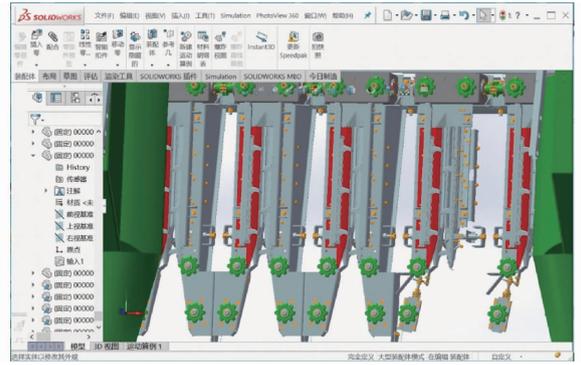


图 8 玉米收获机割台局部

Fig. 8 Partial assemblies of corn harvester header

(2)单一形式的形状分布特征提取效果有限,通过计算特征值变异系数确定多特征动态权重,从而实现距离 D2、面积 D3、曲率 C1、角度 A3 多特征有机融合,融合后的特征不仅能够体现模型线与面、内部与表面、距离与曲率综合特征,而且能够有效弱化低区分度特征,突出模型特征的差异性,提高模型特征分辨率。

(3)提出的基于形状分布的 AWSD 模型检索方法能够保持形状分布算法原有高稳定性的优点,对农机装备关键零部件模型库具有较高适用性,其综合检索精度较 D2 形状分布算法提高了 8.5%。

## 4 结论

(1)基于模型检索方式的设计重用方法将模型再设计问题转换为相关模型搜索,在模型数据库完备的情况下可有效降低设计成本、缩短设计周期。

## 参考文献

- [1] 刘宏新,王登宇,郭丽峰,等.先进设计技术在农业装备研究中的应用分析[J/OL].农业机械学报,2019,50(7):1-18. LIU Hongxin, WANG Dengyu, GUO Lifeng, et al. Development of advanced design technology and its application in agricultural equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):1-18. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190701&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190701&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.001. (in Chinese)
- [2] 张开兴,张树生,刘贤喜.三维 CAD 模型检索技术研究现状与发展分析[J/OL].农业机械学报,2013,44(7):256-263. ZHANG Kaixing, ZHANG Shusheng, LIU Xianxi. Current research and future development of 3D CAD model retrieval[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):256-263. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130744&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130744&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.044. (in Chinese)
- [3] LIU A, WANG Z, NIE W, et al. Graph-based characteristic view set extraction and matching for 3D model retrieval[J]. Information Sciences, 2015, 320:429-442.
- [4] HUANGFU Z M, ZHANG S S, YAN L H. A method of 3D CAD model retrieval based on spatial bag of words[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(6):8145-8173.
- [5] 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):762-770. 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):762-770. (in Chinese)
- [6] ANKERST M, KASTENMÜLLER G, KRIEGER H P, et al. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases[C]//International Symposium on Spatial Databases. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999: 207-226.
- [7] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2002, 21(4): 807-832.
- [8] LIN X, ZHU K, WANG Q G. Three-dimensional CAD model matching with anisotropic diffusion maps[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(1): 265-274.
- [9] SHIH J L, CHEN H Y. A 3D model retrieval approach using the interior and exterior 3D shape information[J]. Multimedia Tools and Applications, 2009, 43(1): 45-62.

- [10] 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/OL].农业机械学报,2014,45(4):316-321.  
ZHANG Kaixing, HUANG Rui, LIU Xianxi. 3D CAD model retrieval algorithm based on distance and angle distributions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):316-321. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140450&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140450&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.050. (in Chinese)
- [11] 沈光平.基于局部形状分布的三维模型检索算法[D].上海:复旦大学,2010.
- [12] 刘洪豪,赵秀艳,张开兴,等.基于三维小波变换的农机CAD模型特征提取与评价方法[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):338-346.  
LIU Honghao, ZHAO Xiuyan, ZHANG Kaixing, et al. Feature extraction and evaluation for agricultural CAD model based on 3D wavelet transform[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):338-346. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2018s045&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s045&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.045. (in Chinese)
- [13] SKUBLSKA-RAFAJŁOWICZ E, RAFAJŁOWICZ E. Sampling multidimensional signals by a new class of quasi-random sequences[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2012, 23(1-2):237-253.
- [14] 衡德正,陈伟,胡轶敏,等.基于Sobol序列的装配公差分析[J].机械设计与制造,2016(12):227-230.  
HENG Dezheng, CHEN Wei, HU Yimin, et al. Assembly tolerance analysis based on the Sobol sequence[J]. Machinery Design and Manufacture,2016(12):227-230. (in Chinese)
- [15] 邓权龙,蒋仲安,韩硕,等.基于Sobol序列的防尘供水管网系统可靠性分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(9):919-926.  
DENG Quanlong, JIANG Zhongan, HAN Shuo, et al. Reliability analysis of dust-proof water supply network system based on Sobol[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2018,51(9):919-926. (in Chinese)
- [16] FENG X, XIAO Z, ZHONG B, et al. Dynamic weighted ensemble classification for credit scoring using Markov chain[J]. Applied Intelligence, 2019, 49(2):555-568.
- [17] VAN ZYL R, VAN DER MERWE A J. A Bayesian control chart for a common coefficient of variation[J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 2017, 46(12):5795-5811.
- [18] ZHANG J, PANG J, YU J, et al. An efficient assembly retrieval method based on Hausdorff distance[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 51:103-111.
- [19] 刘洞波,肖鹏,屈喜龙,等.基于自适应邻域Harris算子的三维对象检索方法[J/OL].农业机械学报,2015,46(1):373-378.  
LIU Dongbo, XIAO Peng, QU Xilong, et al. 3D object retrieval method based on adaptive neighborhood Harris operator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(1):373-378. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150152&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150152&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.052. (in Chinese)
- [20] JAYANTI S, KALYANARAMAN Y, IYER N, et al. Developing an engineering shape benchmark for CAD models[J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9):939-953.
- [21] 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(10):1928-1933.  
ZHANG Ruzhen, WANG Wan, ZHOU Xionghui. Three-dimensional model similarity based on improved shape distribution algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007(10):1928-1933. (in Chinese)
- [22] 崔涛,李克鸿,屈哲,等.玉米摘穗机构低断茎拉茎刀辊设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):222-226.  
CUI Tao, LI Kehong, QU Zhe, et al. Design and experiment of low trash snapping knife rolls for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):222-226. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s034&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s034&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.034. (in Chinese)