doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.045

# 基于三维小波变换的农机 CAD 模型特征提取与评价方法

刘洪豪[1]　赵秀艳[1]　张开兴[1]　宋正河[2]　刘贤喜[1,3]

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

**摘要**: 为提高三维 CAD 模型特征提取准确度,满足农业机械制造领域 CAD 模型智能化检索需求,提出一种三维 CAD 模型的特征提取与评价方法。首先对农业机械模型库中三维模型进行平移归一化、旋转归一化、尺度归一化处理,规范化后的 CAD 模型进行三维离散小波变换,CAD 模型经过单层三维小波变换后被表示为 8 个维度的频域系数子空间;然后对低频子空间 $L^xL^yL^z$ 进行二次小波变换,二层级小波变换后单个 CAD 模型被分解为 15 个特征量,采用 AHP 层次分析法确定不同频域空间特征量权重,以距离度量法定义含有权重系数的相似性度量值,完成不同模型间特征提取及相似性比较,计算并建立三维 CAD 模型频域特征索引表;最后以 VS2010 与 Matlab 2016b 为开发环境,以 Open Cascade 为几何造型平台,使用 ESB 通用模型库及农业机械零部件参数化模型库验证算法有效性。在 ESB 模型库中 T 型零件检索结果表明,在保持相同查准率条件下,本文小波变换算法排序误差更小。拨禾轮 CAD 模型检索结果显示,相似性评价度量方法不仅考虑模型的形态相似性,同时兼顾了应用领域语义相似性,算法实用性高。农机装配体检索实例应用结果表明,借助本文检索算法,可从海量模型库中检索出所需模型,根据实际设计要求对检索出的相似模型进行编辑和修改,可快速完成零部件模块化设计。三维小波变换检索算法查准率受小波函数性质影响,coif 类小波函数具有较强的检索适用性,层次分析法能有效区分不同分解层权重,二层级小波变换能够达到现阶段机械零件模型检索精度要求。小波变换设计重用检索算法可满足模型检索设计需求,拓宽设计者设计思路,促进智能化设计。

**关键词**: 农业机械; 三维 CAD 模型; 特征提取; 评价方法; 小波变换

**中图分类号**: TP391　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)S0-0338-09

# Feature Extraction and Evaluation for Agricultural CAD Model Based on 3D Wavelet Transformation

LIU Honghao[1]　ZHAO Xiuyan[1]　ZHANG Kaixing[1]　SONG Zhenghe[2]　LIU Xianxi[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments*, *Taian* 271018, *China*)

**Abstract**: A new 3D model retrieval method was proposed to improve feature extraction accuracy, which could further satisfy the needs of agricultural intelligence retrieval. Firstly, the CAD models in agricultural database were normalized. Then CAD models were transformed into eight subband partitions by 3D discrete wavelet. The two-level wavelet transform was made for $L^xL^yL^z$, which were the lowest frequency parts. After that a single CAD model could be represented by 15 frequency functions. The AHP method was used to calculate the weight of different functions, with which the similarity value was defined for similarity comparison. Finally, the effectiveness of the proposed method was proved with ESB and agricultural model database by using VS2010, Matlab 2016b and Open Cascade. The retrieval results in ESB database showed that the ranking deviation of wavelet algorithm was lower than those of others under the same retrieval condition. The harvester reel retrieval results presented that the similar

收稿日期: 2018-07-10　修回日期: 2018-08-20

**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700500、2017YFD0700100)、山东省“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTTD14)、山东省重点研发计划项目(2017NC212008)和山东省现代农业产业技术体系水稻创新团队项目

**作者简介**: 刘洪豪(1992—),男,博士生,主要从事农业 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 CAD 和农业信息化研究,E-mail: kaixingzhang@139.com

evaluation considered the geometry morphology as well as functional request. The applied instance demonstrated that once the similar models were selected, designer only needed to make a small re-edit and modification to finish the total design work. The precision of wavelet transform retrieval algorithm varied with different wavelet functions and coif wavelet showed high applicability. APH method could sufficiently distinguish the weight of various decomposed parts. At present, two-level wavelet transform was quite enough to meet model retrieval requirement. The wavelet transform method aiming at design retrieval could satisfy design needs and broaden design ideas, which can promote intelligent design.

**Key words**: agricultural machine; 3D CAD model; feature extraction; evaluation method; wavelet transformation

## 0　引言

在农业机械主要零部件产品设计过程中，由于三维 CAD 模型具有数字化、可视化等特点，基于三维 CAD 模型的产品设计已成为我国制造业标准模式。农业机械三维 CAD 模型数量呈现指数型增长趋势[1]，据研究和统计分析表明，在新产品开发设计过程中，约 30% 零件可以重用已有的部件设计，另有约 50% 部分只需对源模型稍加修改，最终只有大约 20% 需要完全重新设计[2]。三维模型检索重用技术是指在新产品设计制造过程中，直接借鉴或部分借鉴已存在模型的技术，具有降低设计成本，缩短设计周期优势。随着模型数量日益丰富，通用或专业模型库不断完善，颠覆性设计理念减少，模型重用技术优势日趋明显[3-4]。目前，二维图像检索及相似性匹配技术已趋于成熟，三维模型尤其是三维 CAD 模型不同二维图像，如何寻找既能简单快速进行特征提取及比较，又可高精度辨别相似性的三维模型特征描述方法，是三维模型检索及重用技术的关键和难点[5]。

OSADA 等[6]较早提出基于形状分布的模型重用算法，该方法以模型表面连接点之间属性为统计量，构建相应的形状分布直方图作为三维模型的特征描述。后续出现以曲率面积、内二面角[7]及距离夹角[8]为特征的形状研究，基于形状特征检索方法计算简单但精度不高，无法实现局部检索。LAVOUE[9]提出以词袋库为描述特征的检索匹配方法，通过统计模型的拓扑属性，将不同拓扑特性编入属性组构成拓扑属性词袋库，皇甫中民等[10]提出一种基于图谱及空间词袋库为表征的检索方法，依据图谱理论对其进行局部描述，这类方法存在检索准确度不稳定的不足，基于拓扑结构的特征提取方法更适合表征具有关节或分支的模型。

小波函数具有良好的频域分解及局部表征能力，小波变换被广泛应用在模型特征提取领域，王朝阳等[11]提出一种利用 haar 小波变换的三维模型特征提取方法；JAKOVLJEVIC 等[12]提出一种面向机械零件的小波变换点云分割识别算法，此外还有基于投影小波[13]、三维不变矩[14]、球面小波变换[15-16]的检索重用方法。目前基于小波变换的三维模型特征提取算法多数采用降低维度方式，将三维模型检索问题转换为二维图像从而实现检索重用，此过程会伴随有效信息损失，影响模型检索重用准确度。三维小波变换技术不需要对三维模型进行信息转换，最大限度保留三维模型的有效表征信息，可实现对三维模型多方向、多分辨和多层次的特征提取，因此本文基于三维离散小波变换技术，首先对 CAD 模型进行三维离散小波变换，利用层次分析法确定三维模型小波变换后不同分解频域子空间权重系数，然后构建结合权重的模型相似性度量，提出一种多分辨三维 CAD 模型检索重用方法，实现农机 CAD 模型的高效检索重用，促进农业机械制造领域智能化设计水平。

## 1　基于三维小波变换三维模型特征提取

三维 CAD 模型具有多种表示形式，三角网格模型具有形式简洁、可读性强等特点[17]，因此本文采用三角网格表示的 CAD 模型实现小波变换特征提取。三维 CAD 模型多分辨频域特征提取步骤包括：确定频域变换基函数、模型归一化处理和构建小波频域特征描述子。

### 1.1　频域变换基函数选择

基函数是进行频域变换的基础条件，小波函数是一种常用的频域变换基函数，小波函数有多种类别，每种类别下包含不同参数形式，其中尺度函数决定小波函数的类别及属性，选用二进制尺度函数生成小波函数，二进制尺度函数集合 $\phi(x)$ 为

$$\phi_{j,k}(x) = 2^{j/2}\phi(2^j x - k) \tag{1}$$

其中参数 $k$ 决定了 $\phi_{j,k}(x)$ 在 $x$ 轴的位置，$j$ 决定了尺度函数的宽度，$2^{j/2}$ 控制尺度函数幅度大小。

表 1 为二进制尺度函数生成的小波基函数属性表，由于小波函数的消失矩及正交性较为重要，本文选取具有正交性且消失矩较低的 haar、db 等 4 种小波函数作为频域变换的基函数。

表 1 小波基函数属性

Tab. 1 Property of common wavelet function

| 小波族 | 简写 | 表示形式 | 个数 | 举例 | 滤波器长度 | 波形 | 数学性质 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | 紧支撑性 | 对称性 | 消失矩 | 正交性 | 双正交性 |
| Haar | haar | haar | 1 | haar | 2 | | + | + | 1 | + | + |
| Daubechies | db | db$N$ | 9 | db8 | $2N$ | | + | − | $N$ | + | + |
| Biorthogonal | bior | bior$N_r$,$N_d$ | 15 | bior1.5 | $\mathrm{Max}(2N_r,2N_d)+2$ | | + | + | $N_r$ | − | + |
| Coiflets | coif | coif$N$ | 5 | coif3 | $6N$ | | + | +* | $2N$ | + | + |
| Symlets | sym | sym$N$ | 7 | sym4 | $2N$ | | + | +* | $N$ | + | + |
| Meyer | meyr | meyr | 1 | meyr | [−8,8] | | − | + | / | + | + |
| Dmeyer | dmey | dmey | 1 | dmey | / | | + | + | / | + | + |

注:“+”表示具有此性质;“+*”表示近似具有此性质;“−”表示不具有此性质;“/”表示无需考虑此性质。

### 1.2 CAD 模型归一化处理

三维 CAD 模型库中模型是由不同设计者使用不同 CAD 软件制作的,不同软件之间存在数据信息转换壁垒,且同一模型被多次使用后尺寸、位置及方向等会发生改变,为保证模型特征提取不变性,在特征提取前需要对模型进行平移归一化、旋转归一化、尺度归一化处理。

(1)平移归一化

根据模型表面三角网格顶点坐标数据集,计算每个三角形面积,确定三维模型质心,将 CAD 模型质心平移至坐标原点。数据集 $V_o$ 及质心计算公式为

$$\begin{cases} V_o = \{v \mid v = (v_1, v_2, \cdots, v_n) \in \mathbf{R}^n, n \in \mathbf{N}\} \\ Q = \sum_{i=1}^{n} S_i \boldsymbol{q}_i \end{cases} \tag{2}$$

式中 $v_i$——三角形顶点集合

$S_i$——三角形面积

$\boldsymbol{q}_i$——第 $i$ 个三角形质心向量

(2)旋转归一化

将三维模型平移至标准坐标中,按照主元分析方法,确定新的三角形顶点集合,保证三维模型旋转无关性,主要步骤为:

步骤 1:构建三角形顶点数据集 $d$,其中三角形顶点表示为 $p_i=(x,y,z)$。

步骤 2:计算顶点坐标平均值 $\bar{p}=(\bar{x},\bar{y},\bar{z})$,将三角形顶点与平均值做差处理后得到标准化顶点集合 $D$

$$\begin{cases} d_i = p_i - \bar{p} = (x_i - \bar{x}, y_i - \bar{y}, y_i - \bar{y}) \\ D = \{d_1, d_2, \cdots, d_n, n \in \mathbf{N}\} \end{cases} \tag{3}$$

步骤 3:求得顶点集合 $D$ 协方差矩阵,计算协方差矩阵特征值、特征向量,根据特征向量计算得到旋转性无关顶点集合。

(3)尺度归一化

采用最大半径缩放法,计算模型中三角形顶点到坐标原点的最大半径,对最大半径进行单位距离归一化计算

$$M_s = \frac{M}{\max_i(\mathrm{dis}(p_i, o))} \tag{4}$$

式中 $M$——归一化前模型

$M_s$——归一化后模型

$\mathrm{dis}(p_i,o)$——顶点 $p_i$ 与原点 $o$ 之间的距离

### 1.3 小波频域特征描述子构建

小波变换具有良好局部时域频域聚焦性[18],图 1 为农机 CAD 模型小波变换频域特征提取流程,获取模型截面图,将截面图轮廓信息转换为一维信号,经过一维小波变换后,得到多分辨频域特征表述子(图 1a);对模型进行多角度投影,将三维模型特征提取转换为二维图像特征提取,利用二维小波变换计算不同分解水平频域特征(图 1b);三维小波变换无需对 CAD 模型进行降维转换处理,减少转换过程中信息损失,因此本文使用三维离散小波变换构建 CAD 模型频域特征描述子(图 1c)。

首先,对归一化后的三维模型进行 $x$ 轴方向一维小波变换,得到低频子空间 $W_L$ 及高频子空间 $W_H$,一维小波变换公式为[19]

$$\begin{cases} W_\phi(j_0,k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x) \phi_{j_0,k}(x) \\ W_\psi(j_0,k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_x f(x) \psi_{j_0,k}(x) \end{cases} \tag{5}$$

然后分别对变换后的低频子空间和高频子空间进行 $y$ 轴方向小波变换,同理完成 $z$ 轴方向变换,经过 3 个坐标轴方向的变换后完成单层级的三维小波变换,因此三维离散小波变换是 $x$、$y$、$z$ 轴方向一维小波变换的并集,变换总公式为

$$\begin{aligned} V^3 &= (L^x \oplus H^x) \otimes (L^y \oplus H^y) \otimes (L^z \oplus H^z) = \\ &(L^x L^y \oplus L^x H^y \oplus H^x L^y \oplus H^x H^y) \otimes (L^z \oplus H^z) = \\ &L^x L^y L^z \oplus L^x H^y L^z \oplus H^x L^y L^z \oplus H^x H^y L^z \oplus \\ &L^x L^y H^z \oplus L^x H^y H^z \oplus H^x L^y H^z \oplus H^x H^y H^z \end{aligned} \tag{6}$$

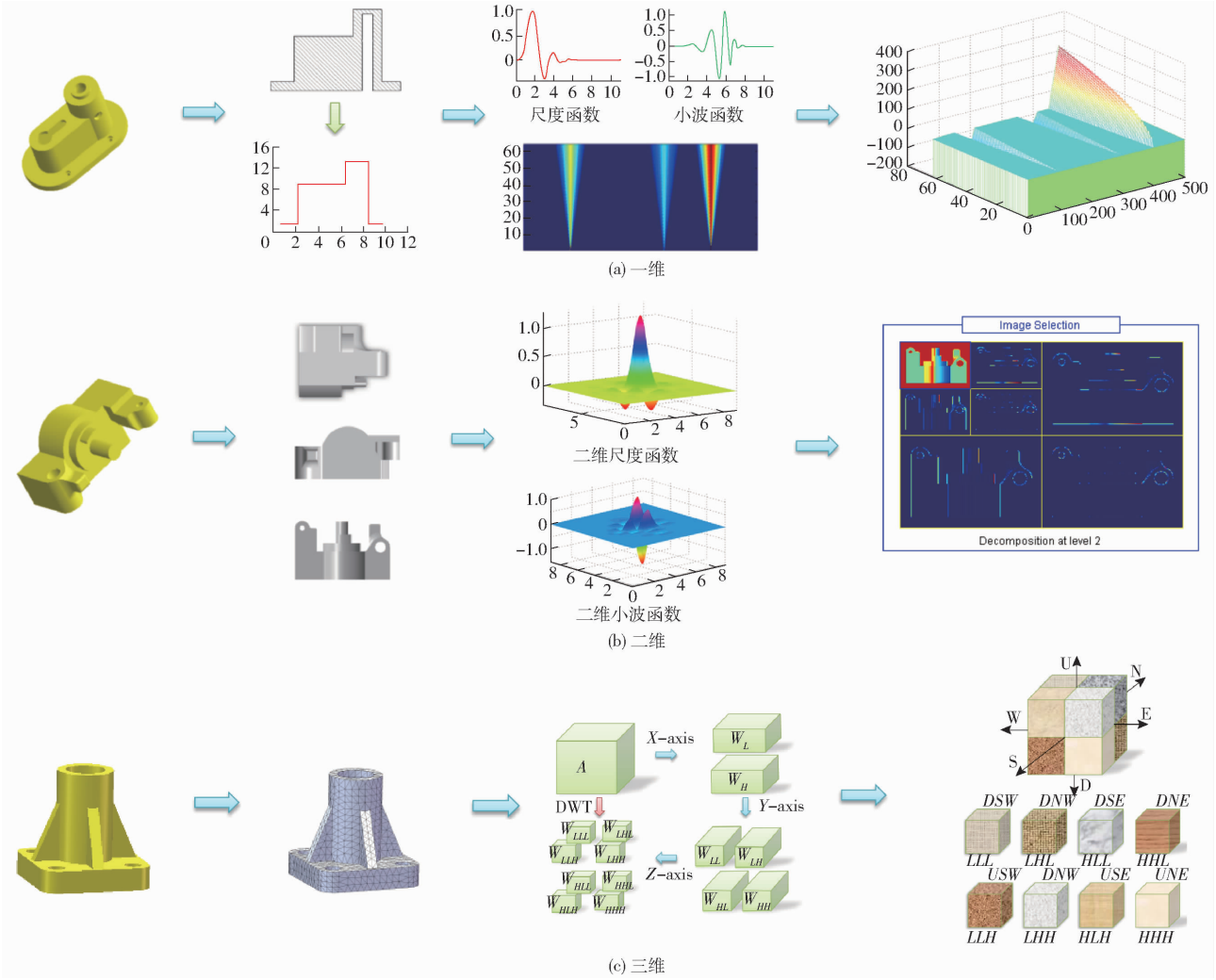


图 1　CAD 模型不同维小波变换频域特征提取流程

Fig. 1　Different dimensions feature extraction of wavelet transform for CAD model

式中　⊕——空间并集　　$V$——三维模型

$L$——低频分解系数

$H$——高频分解系数

经过单层小波变换后三维模型被分解为 6 个方向 8 个维度的小波系数子空间，8 个子空间命名及逻辑关系为[20]

$$\begin{cases} V_{j-1}^3 = V_j^3 \bigoplus_{i=1}^{7} {}^iW_j \\ V_j^3 = [L^x L^y L^z]_j \\ {}^1W_j = [L^x H^y L^z]_j \\ {}^2W_j = [H^x L^y L^z]_j \\ {}^3W_j = [H^x H^y L^z]_j \\ {}^4W_j = [L^x L^y H^z]_j \\ {}^5W_j = [L^x H^y H^z]_j \\ {}^6W_j = [H^x L^y H^z]_j \\ {}^7W_j = [H^x H^y H^z]_j \end{cases} \tag{7}$$

三维 CAD 模型经过小波变换后，CAD 模型的主体轮廓信息主要保留在 $V_j^3$ 子空间中，高频 ${}^7W_j$ 空间只包含少量有效信息，多层级小波变换后高频子空间所含有效信息更小，且小波变换层数增加导致小波变换效率降低，因此本文选择二层级小波变换后 15 个子空间作为三维模型频域特征描述子。

## 2　基于层次分析法的模型相似性评价

### 2.1　频域层次分析法计算

层次分析法 AHP(Analytic hierarchy process)的原理是将待处理的问题分解成多个内在元素，元素之间按照一定原则分组，形成具备可比性且环环相扣的层次关系[21]，通过专家判断及一致性检验确定不同元素权重。三维 CAD 模型经过二层级三维小波变换后被分解成 15 个函数子空间，不同子空间对模型特征描述子贡献不同，本文使用层次分析法确定 15 个频域子空间权重系数，图 2 为层次分析法实现流程。

频域子空间权重计算步骤如下：

(1)确定目标层 $A$ 为小波变换相似性，准则层为 CAD 模型小波变换的一级分解层和二级分解层，

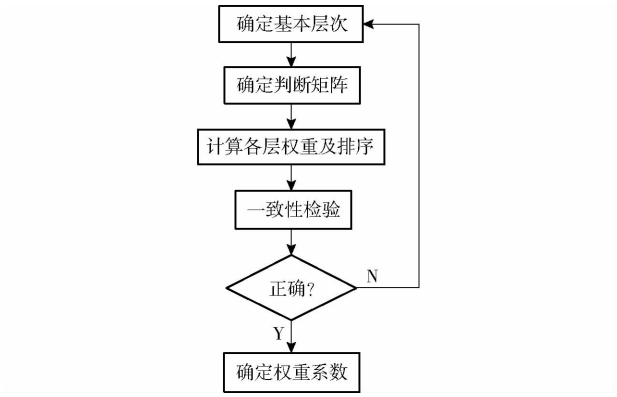


图 2 AHP 方法流程图

Fig. 2 Illustration of AHP process

每层小波变换后的 8 个子空间则构成指标层。

(2)比较同一层不同要素重要程度,确定准则层 $B_n$ 对目标层 $A$、指标层 $C_n$ 对准则层 $B_n$ 的判断矩阵,目标层相对准则层间判断矩阵如表 2 所示。

**表 2 目标层准则层间判断矩阵**

**Tab. 2 Judgment matrix between target layer and criterion layer**

| $A$(相似性) | $B_1$(一级分解) | $B_2$(二级分解) |
|---|---|---|
| $B_1$(一级分解) | $b_{11}$ | $b_{12}$ |
| $B_2$(二级分解) | $b_{21}$ | $b_{22}$ |

(3)计算各层间相对权重,单一层相邻层间相对权重计算公式为

$$\begin{cases} M_i = \prod_{j=1}^{n} b_{ij} \\ \overline{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (i = 1,2,\cdots,n) \\ W_i = \dfrac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^{n} \overline{W}_i} \end{cases} \tag{8}$$

其中,$M_i$ 为判断矩阵每行元素乘积,经归一化处理得到每一层权重 $W_i$。

(4)一致性检验,各层矩阵一致性检验公式为

$$\begin{cases} \lambda_{\max} = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \dfrac{(\boldsymbol{AW})_i}{W_i} \\ C_I = \dfrac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \\ C_R = \dfrac{C_I}{R_I} \end{cases} \tag{9}$$

式中 $n$——矩阵阶数 $\boldsymbol{A}$——判断矩阵

$\boldsymbol{W}$——权重矩阵

$W_i$——权重列向量分量

$C_I$——一致性指标

$C_R$——一致性比例

如果 $C_R < 0.1$ 则一致性检验通过,权重可被使用。

## 2.2 组合权重的欧氏距离相似性度量

距离度量法可实现高效稳定相似性比较,图 3 为距离度量相似性比较,小波变换距离度量法能够度量不同分解层的同一方向欧氏距离,综合各分解层级间距离得出相似性评价值。本文结合层次分析法确定的 15 个频域子空间权重,采用欧氏距离比较 CAD 模型相似性。

(1)定义单个分解层的单一分解方向相似性度量

$$d_j({}^nW_1, {}^nW_2) = \sqrt{\sum_z \sum_y \sum_x ({}^nW_1 - {}^nW_2)^2} \tag{10}$$

(2)定义单个分解层 8 个方向相似性度量

$$D_j(A_1, A_2) = C_0 d_j(V_1^3, V_2^3) + \sum_{n=1}^{7} C_n d_j({}^nW_1, {}^nW_2) \tag{11}$$

式中 $C_n$——各方向度量权重系数

(3)根据各层不同方向度量公式,计算 2 个分解层的总相似性

$$D(A_1, A_2) = \sum_{j=1}^{M} B_j D_j(A_1, A_2) \tag{12}$$

式中 $B_j$——各分解层权重系数

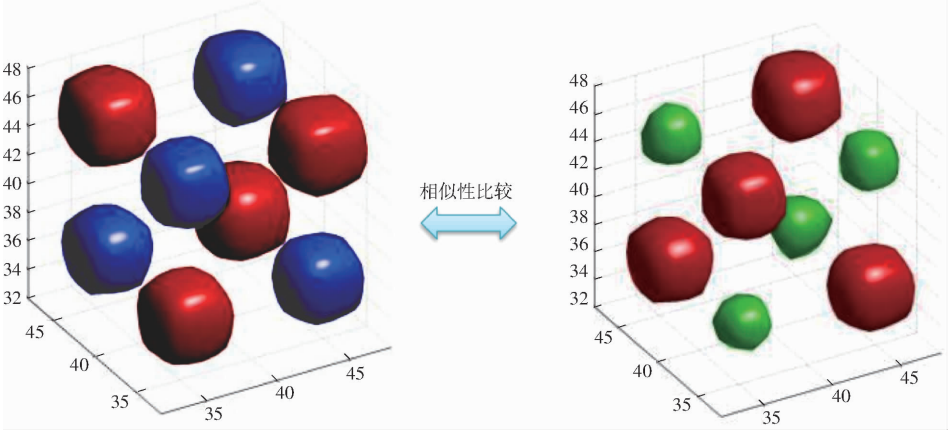


图 3 相似性比较示意图

Fig. 3 Illustration of similarity matching

## 3　实验结果与讨论

### 3.1　实验数据集

本文以 Microsoft Visual Studio 2010 为主开发环境，Matlab 2016b 为辅助开发环境，Open Cascade 为几何造型平台，实现并验证本文算法。实验所需 CAD 模型主要来自 Purdue 大学 ESB 模型库[22]和本课题组根据国家科技支撑计划项目“农机专业底盘数字化设计技术研究与示范”和国家重点研发计划项目“丘陵山地拖拉机关键技术研究与整机开发”与“农机装备智能化设计技术研究”构建的农业机械装备模型库。

### 3.2　层次分析权重结果

根据小波变换层次分析权重计算流程，对同层中元素进行比较，计算判断矩阵中元素值。定义同层下指标 $i$ 相对指标 $j$ 的重要性比例度量 $R_{ij}$，确定重要性评价标度取值范围，如果指标 $i$ 与 $j$ 同等重要则标度 $R_{ij}$ 值为 1，如果指标 $i$ 比 $j$ 明显重要则标度 $R_{ij}$ 值为 5，标度 $R_{ij}\in[1,9]$，根据模型设计人员及实验检索效果反馈分析，确定判断矩阵及权重。

表 3 给出了实验确定的相似性评价目标层 $A$ 相对于分解层 $B$ 的判断矩阵和权重，在判断矩阵中对角线方向元素为分解层元素的自身比较值，因此判断矩阵对角线元素全为 1。由表 3 可知，一级分解层 $B_1$ 的权重近似为二级分解层 $B_2$ 的 2 倍，表明三维 CAD 模型经过小波变换后主能量信息存于一级分解层中。$R_I$ 为平均随机性指标，判断矩阵的阶数小于 3 时，$R_I$ 值为 0，一致性比例 $C_R$ 小于 0.1，一致性检验通过。

**表 3　目标层判断矩阵及权重**

**Tab. 3　Judgment matrix and weight of target layer**

| $A$ | $B_1$ | $B_2$ | 权重 |
|---|---|---|---|
| $B_1$ | 1.00 | 2.16 | 0.684 |
| $B_2$ | 0.46 | 1.00 | 0.316 |
| $\lambda_{max}=2, C_I=0, R_I=0, C_R=0<0.1$，一致性通过 | | | |

表 4 与表 5 显示了指标层权重计算结果，其一致性比例 $C_R$ 均小于 0.1，一致性检验通过。通过表 4 与表 5 对比可知，一级分解层中各方向子空间权重近似，在二级分解层中，随着分解空间频率增加，权重相对减小。根据小波变换理论，一级分解层 $B_1$ 的权重应为二级分解层 $B_2$ 权重的 5 倍，实验得出的结果近似为 4 倍，二级分解层权重增加，这是因为二层级小波变换的基础是一层级小波变换的低频子空间 $L^xL^yL^z$，其表征 CAD 模型的主轮廓体态信息，实验中并未将子空间 $V_2^3$ 单独定义为准则层，而是以指标层形式归纳在二级分解层中，从而导致二级分解层权重增加。使用小波变换的模型检索技术，一

**表 4　一级分解准则层判断矩阵及权重**

**Tab. 4　Judgment matrix and weight of criterion layer for one-level decomposition**

| $B_1$ | ${}^1W_1$ | ${}^2W_1$ | ${}^3W_1$ | ${}^4W_1$ | ${}^5W_1$ | ${}^6W_1$ | ${}^7W_1$ | 权重 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ${}^1W_1$ | 1.00 | 1.20 | 1.61 | 1.17 | 1.70 | 1.65 | 2.64 | 0.205 |
| ${}^2W_1$ | 0.83 | 1.00 | 1.50 | 1.23 | 1.42 | 1.37 | 2.76 | 0.176 |
| ${}^3W_1$ | 0.62 | 0.67 | 1.00 | 0.89 | 1.04 | 1.15 | 2.31 | 0.128 |
| ${}^4W_1$ | 0.85 | 0.81 | 1.12 | 1.00 | 1.23 | 1.19 | 1.48 | 0.138 |
| ${}^5W_1$ | 0.59 | 0.70 | 0.96 | 0.81 | 1.00 | 1.08 | 1.43 | 0.114 |
| ${}^6W_1$ | 0.61 | 0.73 | 0.87 | 0.84 | 0.93 | 1.00 | 1.34 | 0.112 |
| ${}^7W_1$ | 0.38 | 0.36 | 0.43 | 0.68 | 0.70 | 0.75 | 1.00 | 0.127 |
| $\lambda_{max}=7.311, C_I=0.052, R_I=1.36, C_R=0.038<0.1$，一致性通过 | | | | | | | | |

**表 5　二级分解准则层判断矩阵及权重**

**Tab. 5　Judgment matrix and weight of criterion layer for two-level decomposition**

| $B_2$ | $V_2^3$ | ${}^1W_2$ | ${}^2W_2$ | ${}^3W_2$ | ${}^4W_2$ | ${}^5W_2$ | ${}^6W_2$ | ${}^7W_2$ | 权重 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $V_2^3$ | 1.00 | 4.90 | 4.80 | 5.60 | 4.70 | 5.80 | 5.60 | 6.40 | 0.426 |
| ${}^1W_2$ | 0.20 | 1.00 | 1.20 | 1.61 | 1.17 | 1.70 | 1.65 | 3.10 | 0.116 |
| ${}^2W_2$ | 0.21 | 0.83 | 1.00 | 1.50 | 1.23 | 1.42 | 1.37 | 2.76 | 0.105 |
| ${}^3W_2$ | 0.18 | 0.62 | 0.67 | 1.00 | 0.89 | 1.04 | 1.15 | 2.31 | 0.079 |
| ${}^4W_2$ | 0.21 | 0.85 | 0.81 | 1.12 | 1.00 | 1.23 | 1.19 | 1.48 | 0.086 |
| ${}^5W_2$ | 0.17 | 0.59 | 0.70 | 0.96 | 0.81 | 1.00 | 1.08 | 1.43 | 0.072 |
| ${}^6W_2$ | 0.18 | 0.61 | 0.73 | 0.87 | 0.84 | 0.93 | 1.00 | 1.02 | 0.068 |
| ${}^7W_2$ | 0.16 | 0.32 | 0.36 | 0.43 | 0.68 | 0.70 | 0.98 | 1.00 | 0.048 |
| $\lambda_{max}=8.09, C_I=0.012, R_I=1.41, C_R=0.009<0.1$，一致性通过 | | | | | | | | | |

级小波分解可满足检索要求,为保证检索精度,本文算法相似性度计算采用二层级分解权重。

### 3.3 算法有效性验证

为分析不同小波函数检索效果差异,确定最佳适用于 CAD 模型检索的小波函数,分别从查准率及检索效率两方面确定最适用小波函数。实验选取 4 种具有代表性小波函数,所选尺度函数及小波函数波形如图 4 所示,由图 4 中可知,不同小波的函数波形略有差异,coif1 小波顶峰相对于 db4 小波尖锐,haar 小波函数与其他 3 种小函数波形差异最大。

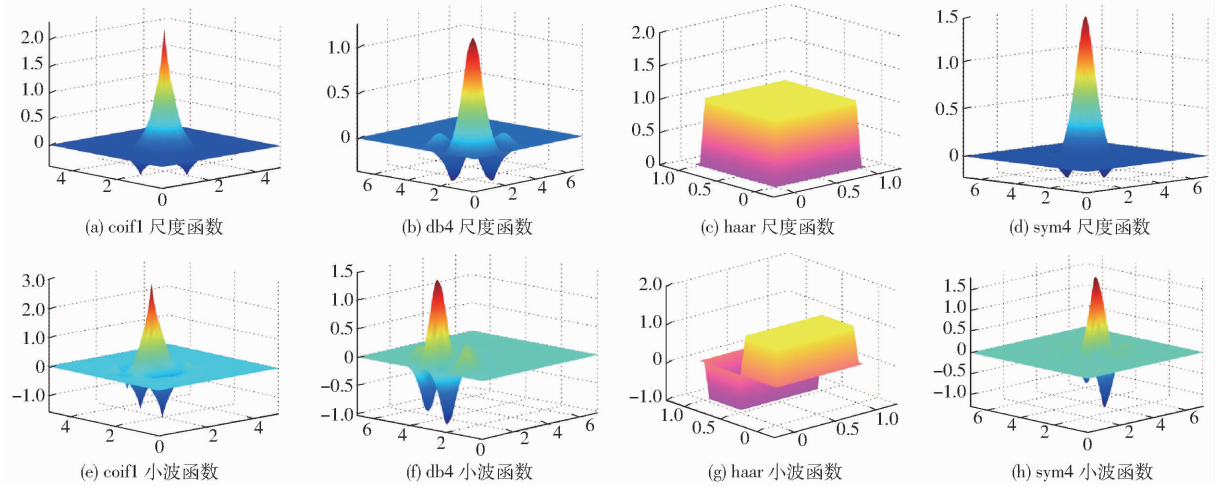


图 4 小波函数与尺度函数

Fig. 4 Scaling function and wavelet function

在模型库中选取履带式联合收获机的驱动桥、减速机及变速箱等 10 类模型,取 10 次检索查准率的平均值为统计量,以查准率为评价标准分析不同小波函数检索性能。图 5 以箱线图形式给出检索结果,其中红线表示查准率中位数。由图 5 可知,中位数近似相等,表明不同小波函数检索结果差异较小。db4 小波函数查准率波动范围最大,这是因为 db4 小波基函数不具有对称性,使得 CAD 模型描述点在跳变处分解误差偏大。使用 haar 小波检索的结果中出现一个奇异点,表示检索结果中该点数值与其他数据差异较大,haar 小波函数结构简单具有紧支集和速降性,但不是连续函数,haar 小波函数的非连续性可能导致该奇异点出现。

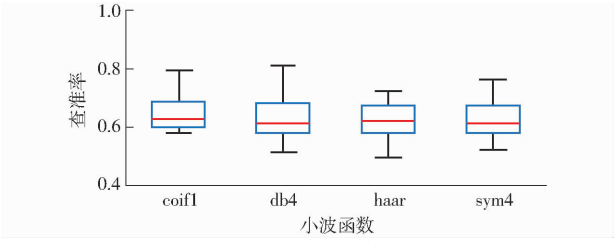


图 5 小波检索查准率统计图

Fig. 5 Precision of wavelet retrieval

图 6 显示 4 种小波函数检索所需时间,随着模型数量增加,使用 4 种小波函数检索时间均呈现线性增长趋势,通过比较发现 haar 小波函数检索所需时间最少,这是因为 haar 小波仅具有一阶消失矩,消失矩越高对 CAD 模型逼近误差越小。综合分析查准率与检索时间数据,coif1 小波在 CAD 模型检索中,查准率波动范围小且检索所需时间适中,适用于三维 CAD 模型检索。

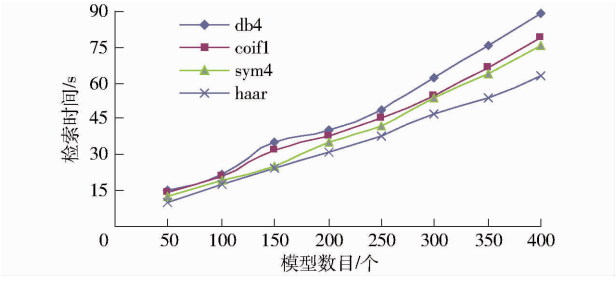


图 6 小波检索运行时间

Fig. 6 Runtime of wavelet retrieval

为对比验证本文算法的有效性,分别使用经典的 D2 形状分布算法、文献[8]中距离-夹角分布算法与本文 coif 小波算法比较。表 6 显示了在 ESB 模型库中 T 型零件检索结果,在检索输出的 6 个模型中,与输入模型相似度较高的模型共有 5 个,采用形状分布 D2 算法能够检索出 3 个,文献[8]的距离-夹角算法检索出 5 个,但有 2 个模型出现排序错误,本文小波变换算法同样检索出 5 个,仅出现 1 个排序错误。

由表 6 可知,形状分布 D2 算法查准率较低,这主要是由于 D2 算法统计的是模型表面任意两点间距离,选取模型表面点时具有随机性,且随着统计点数量的增多,D2 数据呈现正态分布特点,模型间区分度降低。文献[8]算法采用距离结合夹角的特征描述,其依据原理是在 CAD 模型表面点之间距离相等情况下,两点之间线段与端点法向量夹角会不同。

**表 6　通用 CAD 模型检索结果**

**Tab. 6　Retrieval results of general model**

| 输入模型 | 算法 | 智能化检索返回相关模型 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|  | 形状分布D2 |  |  |  |  |  |  |
| | 文献[8]算法 |  |  |  |  |  |  |
| | 本文小波3DWL |  |  |  |  |  |  |

该方法在不增加采样取点的前提下，增加模型特征描述维度，解决 D2 算法不足，提高检索的准确性。本文小波算法在相似性排序上仅出现 1 个错误，检索效果高于距离-夹角算法，这一方面是由于三维小波变换高精度特征提取，另一方面得益于相似性度量时采用层次分析法，该方法结合了主观经验及客观检索效果能够全面体现各部分权重，使得检索结果排序更加准确。

### 3.4　算法应用实例

表 7 显示了本文算法在农业机械设计模型库中拨禾轮及插秧机地轮的检索结果。首先根据功率、型号和转速等设计需求，绘制基本三维模型轮廓图，然后将三维轮廓图作为输入对象在模型库中检索，算法根据相似度返回检索结果。由表 7 中拨禾轮检索结果可知，返回的 6 个模型根据相似度大小依次排列，前 4 个模型与输入模型最相似。从几何学方面，返回的第 6 个模型不是五边形零部件而是六边形拨禾轮，表明本文相似性度量算法能够根据功能性检索需求实现检索，算法实用性高。

**表 7　农用机械 CAD 模型检索结果**

**Tab. 7　Retrieval results of agricultural CAD model**

| 搜索输入模型 | | 返回相关模型 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|  | 拨禾轮 |  |  |  |  |  |  |
| | 相似度/% | 96.51 | 94.88 | 92.15 | 91.34 | 86.31 | 85.66 |
|  | 地轮 |  |  |  |  |  |  |
| | 相似度/% | 94.13 | 92.49 | 89.21 | 88.08 | 84.62 | 79.36 |

插秧机地轮属于不规则零件，地轮上阻力挡板设计较为重要，阻力挡板的数量、角度以及尺寸均影响插秧机工作效能。阻力挡板数量过多、角度偏大时，降低插秧机动能，反之则导致插秧机易陷入泥土。由表 7 中地轮检索结果可知，使用本文模型检索重用技术，设计人员无需考虑阻力挡板空间尺寸及配置角度，首先通过绘制地轮外形轮廓图，借助本文检索算法，可快速从海量模型库中检索出满足需求的模型，然后根据实际设计要求对检索出的相似模型进行编辑和修改，可快速完成零部件模块化设计。

图 7、8 分别显示了根据表 7 中检索实例推送结果，在 SolidWorks 中完成插秧机底盘、拨禾轮割台装配体设计的实例。借助本文模型检索重用算法，不仅可简化设计步骤、缩短设计周期，还可拓宽设计者设计思路，增强设计的实用创新性。

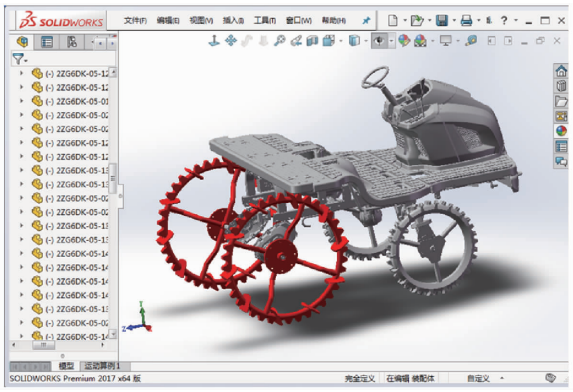

图 7 插秧机底盘

Fig. 7 Transplanter chassis

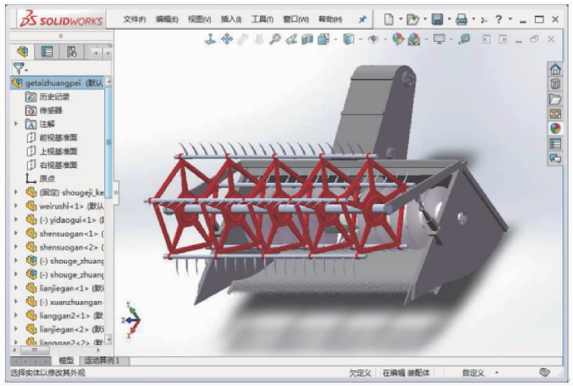

图 8 拨禾轮割台装配体

Fig. 8 Assemblies of reel header

## 4 结束语

基于离散三维小波变换理论,针对农机三维 CAD 模型特征提取精度不高问题,提出了一种多分辨的三维 CAD 模型小波变换特征提取与检索方法。首先对归一化后的三维模型进行了不同的三维小波变换,使用 AHP 层次分析法对小波变换后 6 个方向 8 个维度的子空间确定权重,然后采用结合权重的距离度量法比较了特征提取后模型相似性。在 ESB 模型库中 T 型零件检索结果表明,在保持相同查准率条件下,本文小波变换算法排序误差更小。拨禾轮 CAD 模型检索结果显示,相似性评价度量方法不仅考虑模型的形态相似性,同时兼顾了应用领域语义相似性,算法实用性高。农机装配体检索实例应用结果表明,借助本文检索算法,可从海量模型库中检索出所需模型,根据实际设计要求对检索出的相似模型进行编辑和修改,可快速完成零部件模块化设计。三维小波变换检索算法查准率受小波函数性质影响,coif 类小波函数在 CAD 模型特征提取中适用性最高,层次分析法能有效区分不同分解层次权重,二层级小波变换能够满足现阶段农业机械装备模型检索需求。高精度的三维小波变换检索算法不仅可满足设计者需求,缩短设计周期,还可拓宽设计者设计思路,促进机械制造智能化设计水平。

## 参 考 文 献


1 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130744&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.044.
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. (in Chinese)

2 IYER N, JAYANTI S, LOU K, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(5): 509 - 530.

3 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.

4 JUN Y, RAJA V, PARK S. Geometric feature recognition for reverse engineering using neural networks[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(6): 462 - 470.

5 李宗民,于广斌,刘玉杰,等. 三维极半径矩及其在三维模型检索中的应用[J]. 模式识别与人工智能,2006,19(3):362 - 367.
LI Zongmin, YU Guangbin, LIU Yujie, et al. 3D polar radius invariant moments and their application to 3D model retrieval[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2006, 19(3): 362 - 367. (in Chinese)

6 OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2002, 21(4): 807 - 832.

7 李海生,孙莉,吴晓群,等. 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,2017,29(6):1128 - 1134.
LI Haisheng, SUN Li, WU Xiaoqun, et al. Non-rigid 3D shape retrieval based on inner dihedral angle histogram[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(6): 1128 - 1134. (in Chinese)

8 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140450&FLAG=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.050.
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. (in Chinese)

9 LAVOUE G. Combination of bag-of-words descriptors for robust partial shape retrieval[J]. The Visual Computer, 2012, 28(9): 931 - 942.

10 皇甫中民,张树生,闫雒恒. 鱼群启发的三维 CAD 模型聚类与检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2016,28(8):1373 - 1382.
HUANGPU Zhongmin, ZHANG Shusheng, YAN Luoheng. 3D CAD model clustering and retrieval inspired by fish swarm [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(8): 1373 - 1382. (in Chinese)


(下转第 274 页)

FAN Guochang, QI Xin, ZHANG Huichen, et al. Experimental analysis of a double head of corn picker and straw forage cutter [J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(3):85 - 88. (in Chinese)
11 赵学林. 穗茎兼收型玉米收获机茎秆切碎回收装置设计与研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院,2014.
ZHAO Xuelin. Design and research for the stalk chopping and recovery device of corn combine reaping both stalk and spike[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2014. (in Chinese)
12 张道林,孙永进,赵洪光,等. 立辊式玉米摘穗与茎秆切碎装置的设计[J]. 农业机械学报,2005,36(7):50 - 52, 76.
ZHANG Daolin, SUN Yongjin, ZHAO Hongguang, et al. Design of avertical-roll type of corn picker and stalk chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(7):50 - 52, 76. (in Chinese)
13 宋芳. 玉米收获机秸秆切碎刀的试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学,2011.
SONG Fang. The experimental investigation of the straw chopping knife of the corn harvester[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2011. (in Chinese)
14 庞声海,王乃信. 直刀刃滚刀式切碎器的分析与设计[J]. 农业机械学报,1983,14(2):46 - 54.
15 薛志成. 9SQ - 10 型青饲料收获机常见故障及排除[J]. 农业装备技术,2003,29(5):19.
16 范国昌,王惠新,籍俊杰,等. 影响玉米摘穗过程中籽粒破碎和籽粒损失率的因素分析[J]. 农业工程学报,2002,18(4):72 - 74.
FAN Guochang, WANG Huixin, JI Junjie, et al. Analysis of influence factor on seed damage rate and loss rate during picking corn-cob[J]. Transactions of the CSAE, 2002,18(4):72 - 74. (in Chinese)
17 王宏立,王文春,杨天维,等. 青饲机平板刀式滚筒切碎器的设计研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2004,16(3):49 - 52.
WANG Hongli, WANG Wenchun, YANG Tianwei, et al. Design on plane table-knife drum cutter of the verdant forage harvester [J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2004,16(3):49 - 52. (in Chinese)
18 GB/T 10394.3—2002 饲料收获机 第 3 部分:试验方法[S]. 2002.
19 贺俊林. 低损伤玉米摘穗部件表面仿生技术和不分行喂入机构仿真[D]. 长春: 吉林大学,2007.
HE Junlin. Biomimetic surfaces of snapping rolls with lower damage action and simulation of no-row feed-in mechanism of maize harvesters[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
20 范国昌,王惠新,张辉辰,等. 影响板式玉米摘穗机籽粒破碎和损失的因素分析[J]. 河北农业科学,2003,7(增刊 1):10 - 14.
FAN Guochang, WANG Huixin, ZHANG Huichen, et al. Analysis of influence factor on seed damage rate and loss rate in harvesting corn[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2003,7(Supp. 1):10 - 14. (in Chinese)

(上接第 346 页)

11 王朝阳,达飞鹏. 基于多尺度哈尔小波变换的三维人脸识别方法[J]. 系统仿真学报,2013,25(7):1442 - 1445.
WANG Zhaoyang, DA Feipeng. 3D face recognition based on multi-scale haar transform[J]. Journal of System Simulation,2013, 25(7):1442 - 1445. (in Chinese)
12 JAKOVLJEVIC Z, PUZOVIC R, PAJIC M. Recognition of planar segments in point cloud based on wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(2): 342 - 352.
13 LIAN Z, GODIL A, SUN X, et al. CM - BOF: visual similarity-based 3D shape retrieval using clock matching and bag-of-features[J]. Machine Vision and Applications, 2013, 24(8): 1685 - 1704.
14 NOVOTNI M, KLEIN R. Shape retrieval using 3D Zernike descriptors[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(11): 1047 - 1062.
15 LAGA H, NAKAJIMA M, CHIHARA K. Discriminative spherical wavelet features for content-based 3D model retrieval[J]. International Journal of Shape Modeling, 2007, 13(1): 51 - 72.
16 PAPADAKIS P, PRATIKAKIS I, PERANTONIS S, et al. Efficient 3D shape matching and retrieval using a concrete radialized spherical projection representation[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(9): 2437 - 2452.
17 YIN Z W. Direct generation of extended STL file from unorganized point data[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(6):699 - 706.
18 SANG Y F, WANG D, WU J C, et al. Wavelet-based analysis on the complexity of hydrologic series data under multi-temporal scales[J]. Entropy, 2011, 13(1): 195 - 210.
19 WANG Y, CHE X, MA S. Nonlinear filtering based on 3D wavelet transform for MRI denoising[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012(1): 40.
20 PROCHAZKA A, GRAFOVA L, VYSATA O. Three-Dimensional wavelet transform in multi-dimensional biomedical volume processing[C]//IASTED International Conference Graphics and Virtual Reality, 2011.
21 霍星,史海滨,杨松益,等. 基于层次分析-蚁群算法的内蒙古大型灌区节水改造综合评价[J]. 农业工程学报,2014, 30(17):132 - 140.
HUO Xing, SHI Haibin, YANG Songyi, et al. Comprehensive assessment on water-saving renovation of large-scale irrigation districts in Inner Mongolia based on hierarchical analysis ant colony algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(17): 132 - 140. (in Chinese)
22 JAYANTI S, KALYANARAMAN Y, RAMANI K. Shape-based clustering for 3D CAD objects: a comparative study of effectiveness[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(12):999 - 1007.