

文章编号: 1001-9081(2008)08-2040-03

# 一种改进的基于形状特征保持的 QEM 简化算法

董方敏<sup>1</sup>, 刘 勇<sup>1</sup>, 肖人彬<sup>2</sup>

(1 三峡大学 电气信息学院, 湖北 宜昌 443002    2 华中科技大学 CAD 中心, 武汉 430074)  
(fmdong@ctgu.edu.cn)

**摘 要:** 针对二次误差测度 (QEM) 简化算法对机械、建筑等 CAD 模型简化时存在的形状特征容易丢失的不足, 提出了一种改进算法。该算法在检测出模型表面的分界轮廓曲线后, 将各组成边分成四种类型, 并按照尽量避免轮廓曲线上的边被折叠的原则, 对各类边采用不同简化策略进行简化。实验结果表明, 算法在形状特征保持方面具有较好的效果。

**关键词:** 二次误差; 简化算法; 特征保持  
**中图分类号:** TP391.41    **文献标志码:** A

## Improved QEM simplification algorithm based on features preserved

DONG Fangmin, LIU Yong, XIAO Renbin

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;  
2. CAD Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** When the mechanical or architectural CAD models are simplified by using the QEM-based mesh simplification algorithm, the features of the simplification models can not be preserved very well. An improved algorithm based on features preserved was proposed. Firstly, the boundary curves were detected by using a hybrid approach to surface segmentation of the models. And the edges of the models were labeled as four types. Then different simplification strategies for each type of edges were used in the simplifying process on principle of avoiding the edges and vertex on the boundary curves to be collapsed during the simplification process. The experimental results show that the improved algorithm is effective.

**Key words:** Quadric Error Metric (QEM); simplification algorithm; feature preservation

## 0 引言

模型简化是解决复杂三维模型存储、传输和实时绘制的有效性与硬件处理能力的局限性之间矛盾的主要方法。自从 James Clark 提出模型简化的基本思想<sup>[1]</sup>后, 国内外学者对模型简化算法及其相关技术进行了深入研究, 近十多年来, 出现了许多有效的简化算法<sup>[2-3]</sup>。其中, 二次误差测度 (Quadric Error Metrics, QEM) 简化算法<sup>[4]</sup>将简化误差测度化简为计算简单的递推表达式, 具有算法实现简单、运算速度快、占用存储空间少、简化效率高和简化模型质量较好等特点, 在近年来得到了较深入的研究和应用。

当将 QEM 算法直接应用于如机械、建筑等具有明显轮廓特征的人造 CAD 模型的简化时, 在形状特征保持有方面效果往往不是太理想。为此, 一些学者在其基础上提出了一些改进算法<sup>[5-7]</sup>。这些改进算法的共同点是在检测出各表面的分界轮廓曲线后, 对其赋予较大折叠代价以减小其折叠可能性, 从而达到较好保持形状特征的目的。但现有算法没有对分界轮廓曲线相关的边和顶点进行进一步分类并采取不同的简化策略, 因此在简化过程中常常会出现无法优先折叠非特征边上顶点和形状特征结构丢失或改变等现象。

本文在现有算法的基础上, 提出了一种基于形状特征保持的改进算法: 通过将各边进一步分类, 并按照尽量避免轮廓曲线上的边被折叠的原则, 根据边的类型采取不同的简化策

略进行简化, 从而较好地解决了简化过程中的形状特征保持等问题。

## 1 算法主要思想

本文提出的算法主要思想是: 通过对边进行分类来尽量避免折叠轮廓曲线上的边和顶点, 以达到形状特征保持的目的。首先通过表面分割提取各网格模型表面各分界轮廓线, 然后根据分界轮廓线对模型中的各边进行分类, 最后采用改进的 QEM 简化算法对不同类型的边采用不同的简化策略来实现模型简化。

### 1.1 模型表面分界轮廓线的提取

大多数形状特征比较明显的人造模型 (如建筑、机械 CAD 模型等) 表面往往存在三角面片疏密分布不均、各三角面片面积差异较大等特点。本文在进行表面分界轮廓曲线的提取时, 采用了一种针对这类 CAD 模型特点的混和算法<sup>[8]</sup>。

### 1.2 网格模型中边的分类及其简化策略

为了使简化模型能较好地保持轮廓形状特征, 本文在对 QEM 算法进行改进时, 将模型中各边定义成四类, 并采用不同的简化策略进行简化。

#### 1.2.1 网格模型中边的分类

设  $C_i = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  是由  $n$  个有序顶点  $v_j$  构成的某三角网格模型第  $i$  条边界轮廓曲线, 其中  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  为第  $i$  条边界轮廓曲线的顶点数量,  $m$  为该三角

网格模型的边界轮廓曲线数量；边  $e_k = \{v_i, v_j\}$  为三角网格模型上第  $k$  条边， $v_i, v_j$  为该边的两个端点，其中  $k=1, 2, \dots, q$  为三角网格模型上边的总数。模型中四类边的定义如下：

**轮廓边** 当某边  $e_k$  的两个顶点  $v_i$  和  $v_j$  同时属于某条边界轮廓曲线  $C_i$  时，即满足  $v_i \in C_i$  且  $v_j \in C_i$  时（其中  $i=1, 2, \dots, m$  为该网格模型的边界轮廓曲线数量），称该边  $e_k$  为轮廓边。

**过渡边** 当某边  $e_k$  的两个顶点  $v_i$  和  $v_j$  只有一个属于某条边界轮廓曲线  $C_i$  时，即满足  $v_i \in C_i$  且  $v_j \notin C_i$  或  $v_j \in C_i$  且  $v_i \notin C_i$  时（其中  $i=1, 2, \dots, m$  为该网格模型的边界轮廓曲线数量），称该边  $e_k$  为过渡边。

**跨界边** 当某边  $e_k$  的两个顶点  $v_i$  和  $v_j$  分别属于两条不同的边界轮廓曲线  $C_i, C_j$  时，即满足  $v_i \in C_i$  且  $v_j \in C_j, i \neq j$  时（其中  $i, j=1, 2, \dots, m$  为该网格模型的边界轮廓曲线数量），称该边  $e_k$  为跨界边。跨界边被折叠通常将导致原相离的边界轮廓曲线出现相连的现象。

**一般边** 当某边  $e_k$  的两个顶点  $v_i$  和  $v_j$  不属于边界轮廓曲线时，即满足  $v_i \notin C_i$  且  $v_j \notin C_j$  时（其中  $i, j=1, 2, \dots, m$  为该网格模型的边界轮廓曲线数量），称该边  $e_k$  为一般边。

1.2.2 四类边的简化策略

1) 轮廓边：将计算出的两端点的二次误差折叠代价较小值作为边的折叠代价，并乘以大于 1 的权重因子  $w_{lp}$ 。折叠操作时，采取半边折叠方法，轮廓边的端点直接参与折叠代价的排序和折叠，即取折叠代价小的顶点为新顶点。

2) 过渡边：为了降低边界轮廓顶点变动的可能性，将计算出的边界轮廓曲线上的顶点的折叠代价作为边的折叠代价，并乘以大于 1 的权重因子  $w_{tp}$ 。边折叠操作时，采取半边折叠方法，选择该边两端点中处于边界轮廓曲线上的端点为新顶点，以尽量保留轮廓曲线上的顶点。

3) 跨界边：为了避免简化后两边界轮廓线粘连，将计算出的两端点的折叠代价较小值作为边的折叠代价后，将其乘以一个大于 1 的较大权重因子  $w_{cp}$ ，以减小其在进行边折叠操作时被折叠的可能。

4) 一般边：直接将计算出的两端点的二次误差折叠代价较小值作为边的折叠代价进行处理。

1.3 二次误差测度的计算

本文采用文献[4]中定义的二次误差测度的计算方法进行误差测度的计算。

已知组成三角面片的三个顶点分别为  $v_1, v_2$  和  $v_3$ ，设该三角面片的平面方程为  $ax+by+cz+d=0$ ，其单位法向量为  $n=[a \ b \ c]^T$ 。

该三角面片的二次误差  $Q$  被定义为：  
$$Q = (A_1 \ b_1 \ c_1) = (nn^T \ d \ n \ d) \tag{1}$$
其中， $A_1 = nn^T$  为  $3 \times 3$  对称矩阵， $b_1 = dn$  为  $3 \times 1$  向量， $c_1 = d$  为标量。

顶点  $v$  到该三角面片距离的平方公式可以用二次误差的形式表示为：

$$Q(v) = v^T A_1 v + 2b_1^T v + c_1 \tag{2}$$

二次误差的加法运算被定义为：

$$Q_i(v) + Q_j(v) = (Q_i + Q_j)(v) \tag{3}$$

其中， $Q_i + Q_j = (A_i + A_j \ b_i + b_j \ c_i + c_j)$ 。

2 算法描述及实现步骤

基于形状保持的改进 QEM 简化算法的具体实现步骤如下。

1) 读入三角网格模型数据，构造顶点表、边表和面表及各顶点关联面片等数据结构。

2) 采用文献[8]提出的模型表面分割及边界提取混和算法对三角网格模型表面进行分割，并根据得到的边界轮廓曲线结果，按照边的分类方法，将各边分别标记为轮廓边、过渡边、跨界边和一般边。

3) 对组成三角网格模型的每个三角面片  $T_j$  分别根据式(1)计算其二次误差  $Q_{T_j}$  其中  $j=1, 2, \dots, m$  为三角网格模型上的三角面片数。

4) 求每个顶点  $v_i$  的二次误差  $Q_i$ ，其值为该顶点的所有关联三角面片的二次误差之和，即  $Q_i = \sum_{j=1}^{k_i} Q_{T_j}$  其中， $k_i$  为顶点  $v_i$  关联的三角面片总数量， $Q_{T_j}$  为顶点  $v_i$  关联的第  $j$  个三角面片  $T_j$  的二次误差。

5) 采取半边折叠方法对该待处理边进行折叠，按照下述步骤计算每条待处理边的折叠代价，并根据边的类别，按照相应的折叠策略进行处理。

① 计算折叠后新顶点的二次误差。新顶点的二次误差  $Q$  为原两顶点  $v_i$  和  $v_j$  的二次误差  $Q_i$  与  $Q_j$  之和，根据式(3)计算  $Q = Q_i + Q_j$ 。

② 根据式(2)分别计算两顶点  $v_i$  或  $v_j$  的折叠代价  $Q(v_i)$  和  $Q(v_j)$ 。

③ 根据该边  $e_k(v_i, v_j)$  的类型，采取如下对应折叠策略进行处理：

a) 当边为过渡边时，标记两顶点中处于边界轮廓曲线上的顶点为折叠后新顶点，即：当  $v_i$  处于边界轮廓曲线上时，折叠后新顶点  $v = v_i, v_j$  为被替换顶点，且边的折叠代价为  $w_0 Q(v_i)$ ；反之，折叠后新顶点  $v = v_j, v_i$  为被替换顶点，该边的折叠代价为  $w_0 Q(v_j)$  其中  $w_0$  为权重因子，且  $w_0 \geq 1$ 。

b) 当边为轮廓边时，标记两顶点中折叠代价  $Q(v_i)$  和  $Q(v_j)$  较小者所对应顶点为折叠后新顶点，即：当  $Q(v_i) > Q(v_j)$  时，新顶点  $v = v_j$  且该边的折叠代价为  $w_0 Q(v_j)$ ；反之，折叠后新顶点  $v = v_i$  且边的折叠代价为  $w_0 Q(v_i)$  其中  $w_0$  为权重因子，且  $w_0 \geq 1$ 。

c) 当边为跨界边时，标记两顶点中折叠代价  $Q(v_i)$  和  $Q(v_j)$  较小者所对应顶点为折叠后新顶点，即：当  $Q(v_i) > Q(v_j)$  时，新顶点  $v = v_j, v_i$  为被替换顶点，且该边的折叠代价为  $w_1 Q(v_j)$ ；反之，折叠后新顶点  $v = v_i, v_j$  为被替换顶点，且边的折叠代价为  $w_1 Q(v_i)$ ；其中  $w_1$  为权重因子，且  $w_1 > 1$ 。

d) 当边为一般边时，标记两顶点中折叠代价  $Q(v_i)$  和  $Q(v_j)$  较小者所对应顶点为折叠后新顶点，即：当  $Q(v_i) > Q(v_j)$  时，新顶点  $v = v_j, v_i$  为被替换顶点，且该边的折叠代价为  $Q(v_j)$ ；反之，折叠后新顶点  $v = v_i, v_j$  为被替换顶点，且边的折叠代价为  $Q(v_i)$ 。

6) 将各边按折叠代价大小从小到大进行排序，构造尚未折叠边的有序堆栈，栈顶元素为折叠代价最小的边。当出现多个折叠代价相同的边时，这些折叠代价相同的边的排序次序分别为一般边、过渡边、轮廓边和跨界边。

7) 取折叠代价最小的栈顶边，进行半边折叠处理。

④ 将该边标记为“已折叠”边，并从栈顶去除。

- ② 执行半边折叠 ( $v_i, v_j$ )  $\rightarrow v$  即以新顶点  $v$  替换被折叠边  $e_k(v_i, v_j)$  的某一个端点  $v_i$  或  $v_j$  并将被替换端点标记为“被折叠”顶点。
- ③ 调整面表: 从面表中删除边  $e_k(v_i, v_j)$  所关联的两个三角面片。
- ④ 调整边表: 从边表中删除边  $e_k(v_i, v_j)$  及其所关联的两个三角面片中以被替换的顶点为端点的另外两条边。
- ⑤ 更新新顶点  $v$  的二次误差  $Q, Q = Q_i + Q_j$
- 8) 将所有以新顶点为其中一个端点的边作为待处理边, 转步骤 5) 继续循环执行, 直到三角面片数小于预先给定的顶点数量时为止, 这时保留下来的顶点、边和三角面片构成的表面即为模型简化后的结果, 算法结束。

3 实例及结果分析

本文以某布料机上的铰链头零件的 CAD 网格模型的简化为实例对算法进行验证和讨论。除了采取一般简化算法的定性评价标准, 即根据简化的直观视觉效果进行分析、对比和讨论之外, 还应用通常采用的模型简化评价工具 Metro<sup>[9]</sup> 对不同的简化算法的简化结果进行定量的对比分析。

3.1 实例及说明

图 1 (a) 为铰链头零件的三角网格模型, 模型表面的三角网格面片数量为 1482 顶点数量为 741 图 1 (b) ~ (d) 分别为未改进的 QEM 简化算法简化结果, 简化后顶点数分别为 160 140 和 70

可以看出, 当简化到一定程度时, 部分结构特征出现丢失现象, 如图 1 (c)、(d) 中简化模型左边的圆柱与中间圆柱之间的台阶消失, 对应的边界轮廓特征丢失。

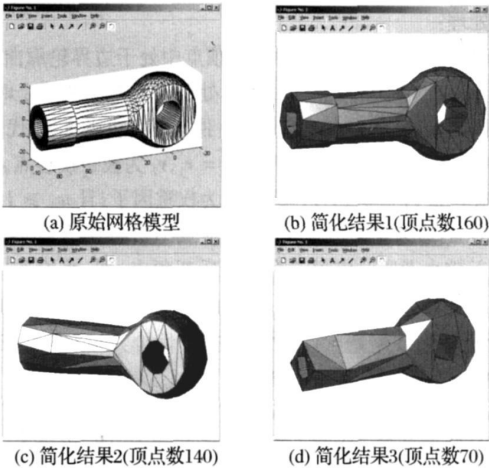


图 1 铰链头零件三角网格模型及原 QEM 算法简化结果

图 2 (a) ~ (c) 为考虑模型各面片组成边的类型, 并采用不同的简化策略进行简化的改进 QEM 算法的简化结果, 简化后顶点数分别为 140、70 和 70 其中, 图 (a) 中的轮廓边和过渡边的折叠代价的权重因子取值为  $w_{l1} = w_{l2} = 1$  图 (b) 中轮廓边和过渡边的折叠代价的权重因子取值  $w_{l1} = w_{l2} = 2$  图 (c) 权重因子取值为  $w_{l1} = w_{l2} = 1$  跨界边的折叠代价的权重因子取值均为  $w_{ls} = 10$

图 1 (c) 和图 2 (a) 均为简化后顶点数为 140 的简化结果。其中, 图 2 (a) 仅增加了跨界边的简化策略, 与图 1 (c) 相比, 其简化结果能更好地保持左端圆柱与中间圆柱间的台阶结构和轮廓特征。图 1 (d) 和图 2 (b)、(c) 简化后顶点数均为 70 图 2 (c) 在原 QEM 算法基础上增加了跨界边的简

化策略, 简化结果能保持左端圆柱与中间圆柱间的台阶结构; 图 2 (b) 为同时采取了跨界边和轮廓边简化策略后的简化结果, 与图 1 (d) 和图 2 (c) 相比较, 在小结构和边界轮廓特征形状保持方面都有较好的效果。表 1 为采用 Metro 工具对铰链头零件的三角网格模型的上述各种简化结果进行误差定量分析的结果对比。表中原始三角网格模型顶点数为 741 面片数为 1482 简化后模型的顶点数为 70 面片数为 197。



图 2 考虑组成边类型后的改进 QEM 算法简化结果

表 1 中给出了各种简化后模型与原始三角网格模型表面的最大距离 (Max)、平均距离 (Mean)、距离均方差 (RMS) 和 Hausdorff 距离值的对比, 上述距离的定义见文献 [9]。其中“距离误差 1”和“距离误差 2”分别为原始模型到简化模型的距离误差和简化模型到原始模型的距离误差; QEM 表示采用原 QEM 算法的简化结果, IQEM-1 为采用本文给出的改进的 QEM 算法、轮廓边和过渡边折叠代价权重取值 1 时的简化结果, IQEM-2 为轮廓边和过渡边折叠代价权重取值 2 时的简化结果。

表 1 算法生成的简化模型误差对比

算法	距离误差 1			距离误差 2			Hausdorff 距离
	Max	Mean	RMS	Max	Mean	RMS	
QEM	4.367	0.256	0.659	3.216	0.749	1.053	4.367
IQEM-1	4.367	0.340	0.785	3.201	0.744	1.042	4.367
IQEM-2	3.385	0.232	0.501	3.201	0.681	0.925	3.385

根据表 1 中得到的误差数据, 比较原 QEM 简化算法和采用轮廓边和过渡边折叠代价权重取值为 1 的改进 QEM 算法, 两者的简化误差总体变化不大, 前者从原始模型到简化模型的计算距离误差较小, 后者从简化模型的误差到原始模型的计算距离误差较小。将原 QEM 简化算法与采用轮廓边和过渡边折叠代价权重取值为 2 的改进 QEM 算法相对比, 后者的各种误差都有一定程度的降低。

3.2 结果分析

上述实例简化结果的直观视觉效果表明: 在简化后顶点低于一定数值, 原 QEM 算法的简化结果将出现丢失小的结构和边界轮廓形状特征现象, 进一步加大简化程度后, 边界轮廓形状特征丢失, 改进后的 QEM 简化算法能较好地解决小结构及其边界轮廓形状特征丢失问题。根据 Metro 工具计算的误差定性分析表明, 与原 QEM 算法相比, 本文提出的改进简化算法得到的简化结果, 其各种简化误差都有一定程度的减小。

(下转第 2045 页)

选取  $P=9$  最后, 依照最邻近准则进行目标匹配得到最终的分类结果。图 3 给出了本文方法与 2DPCA 和 2DFLD 方法在识别结果上的比较。可以看出,  $(2D)^2$  FLD 可以得到更高的识别率, 最高为 98%, 主要是因为基于  $(2D)^2$  FLD 的计算方法能够精确的计算原始数据协方差矩阵; 其次可以明显降低特征维数, 最佳识别率所对应的维数为  $5 \times 5$  有效提高了识别率收敛速度。

表 1 分别给出了 3 种方法在训练和测试阶段的平均运算时间、所能达到的最佳识别率以及对应的特征矩阵维数。可以看出, 2DPCA 方法的最佳识别率最低仅为 93%, 并且特征维数高达  $128 \times 10$  导致测试阶段计算速度很慢。2DFLD 方法相比 2DPCA 方法在最佳识别率方面有了很大的提高, 但其缺点依然显著, 即特征维数依然保持了较高的  $128 \times 6$  所以运算时间较长。 $(2D)^2$  FLD 的最佳识别率达到 98%, 特征维数仅为 25 相比其他两种方法有较快的运算速度。 $(2D)^2$  FLD 实际上是执行了两次 2DFLD 所以在训练阶段所花费的时间高于 2DFLD 方法, 而特征维数却远远低于 2DFLD 因此对于整个训练和测试阶段来说  $(2D)^2$  FLD 运算时间更短, 效率更高。随着样本数量的增加,  $(2D)^2$  FLD 越来越体现出它的优势。

表 1 3 种方法的最佳识别率 相应的特征维数和运算时间对比

识别方法	最佳识别率 $R_{max}/\%$	特征维数 D	运算时间 /s
2DPCA	93	$128 \times 10$	70.51
2DFLD	97	$128 \times 6$	59.37
$(2D)^2$ FLD	98	$5 \times 5$	46.02

3 结语

本文将双向二维 FLD 用于掌纹识别, 相当于在水平和垂直方向两次运用二维 FLD 运用 Fisher 准则选取更适合于分类的投影方向。从实验结果看, 相对于 2DPCA 和 2DFLD 方法, 本文方法不但提高了识别率, 还可以将特征维数降到更低, 因此具有运算速度快、特征矩阵所需存储空间小、识别率高的优点。本文方法更适合用于在线掌纹的分析与识别。

(上接第 2042 页)

4 结语

本文提出了一种基于形状特征保持的 QEM 改进简化算法, 算法通过将模型各边分类为轮廓边、跨界边、过渡边和一般边, 并对各种类型边采取不同的简化策略, 以降低轮廓上顶点被折叠的可能性, 避免相近轮廓消失和粘连现象出现, 从而解决人造模型简化时小结构及其边界轮廓形状特征丢失等问题, 通过实例验证了该算法的有效性。

参考文献:

[1] CLARK J. Hierarchical geometric models for visible surface algorithms [J]. Communications of the ACM, 1976, 19(10): 547—554.

[2] 何晖光, 田捷, 张晓鹏, 等. 网格模型化简综述 [J]. 软件学报, 2002, 13(12): 2215—2224.

[3] 潘志庚, 庞明勇. 几何网格简化研究与进展 [J]. 江苏大学学报, 2005, 26(1): 67—71.

[4] GARLAND M, HECKBERT P. Surface simplification using quadric error metrics [C]. // Proceedings of SIGGRAPH 97. New York:

参考文献:

[1] ZHANG D, KONG W, YOU J. On-line palm print identification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(9): 1041—1050.

[2] ZHANG DA-PENG, SHU WEI. Two novel characteristics in palm-print verification: datum point and line feature matching [J]. Pattern Recognition, 1999, 32(4): 691—702.

[3] LIU GUANG-MING, ZHANG D, WANG KUANG-QUAN. Palm print recognition using eigenpalm's features [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(9): 1463—1467.

[4] YOU J, LI WENXIN, ZHANG D. Hierarchical palm print identification via multiple feature extraction [J]. Pattern Recognition, 2002, 35(4): 847—859.

[5] DUTTA N, JAIN A K, MARDIA K V. Matching of palm prints [J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(4): 477—485.

[6] WU XING-QIAN, WANG KUANG-QUAN, ZHANG D. Palm print recognition using directional line energy features [C]. // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Washington: IEEE Computer Society, 2004, 4: 23—26.

[7] WU XING-QIAN, ZHANG D, WANG KUANG-QUAN. Fisher-palm prints based palm print recognition [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(15): 2829—2838.

[8] XIONG HUI-LIN, SWAMY M N S, AHMAD M Q. Two-dimensional FLD for face recognition [J]. Pattern Recognition, 2005, 38(7): 1121—1124.

[9] YANG JIAN, ZHANG D, FRANGIA E, et al. Two-dimensional PCA: a new approach to appearance based face representation and recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(1): 131—137.

[10] ZHANG DAO-QIANG, ZHOU ZHI-HUA.  $(2D)^2$ PCA: 2-directional 2-dimensional PCA for efficient face representation and recognition [EB/OL]. [2007—09—23]. <http://pamec.nuaa.edu.cn/zhang-dq/neucom05.pdf>

[11] POLU. Palm print database [EB/OL]. [2007—09—26]. <http://www.comp.polyu.edu.hk/~biometrics/>

[12] YANG JIAN, ZHANG D, YONG XU. Two-dimensional discriminant transform for face recognition [J]. Pattern Recognition, 2005, 38(7): 1125—1129.

ACM Press, 1997: 209—216.

[5] 刘晓利, 刘则毅, 高鹏东, 等. 基于尖特征度的边折叠简化算法 [J]. 软件学报, 2005, 16(5): 669—674.

[6] WU YONG, HE YUAN-JUN, CAI HONG-MIN. QEM-based mesh simplification with global geometry features preserved [C]. // Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia. New York: ACM Press, 2004: 50—57.

[7] CHEN B Y, NISHITA T. An efficient mesh simplification method with feature detection for unstructured meshes and Web graphics [C]. // Proceedings of IEEE Computer Graphics International, 2003 (CGI'03). New York: IEEE Press, 2003: 34—41.

[8] 董方敏, 肖人彬, 钟毅芳, 等. 机械 CAD 三角网格模型的特征表面分割混和算法 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(4): 382—387.

[9] CIGNON R, ROCCHICCI S, SCOPINO R. Metro: measuring error on simplified surfaces [J]. Computer Graphics Forum, 1998, 17(2): 167—174.