

覆盖件模面设计的三维零件轮廓曲线匹配算法*

刘玉琳^{1,2} 陈文亮¹ 鲍益东¹ 王小平¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 安徽工业大学数理学院, 马鞍山 243032)

【摘要】 三维零件轮廓曲线匹配算法是基于模板的覆盖件模面设计的重要研究内容。在研究已有的三维曲线匹配算法基础上,根据复杂零件轮廓曲线特点,提出了基于多尺度滤波、特征提取、Hausdorff 距离划分等价类、ISODATA 聚类分析方法计算最佳匹配变换矩阵等技术的三维零件轮廓曲线匹配算法,开发了相应程序模块,并通过完全相同、大小不同、形状略有变化 3 种典型情况实际零件匹配实验验证了该算法的有效性、鲁棒性和容错性。

关键词: 覆盖件 模面设计 曲线匹配 模板 聚类分析

中图分类号: TG302 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)07-0212-05

3D Part Contour Curves Matching Algorithm in Panel Die-face Design

Liu Yulin^{1, 2} Chen Wenliang¹ Bao Yidong¹ Wang Xiaoping¹

(1. College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. School of Mathematics and Physics, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract

3D part contour curves matching algorithm is an important content in panel die-face design based on template. By researching on the existed 3D curves matching algorithm, according to the feature of complex part contour curve, 3D part contour curves matching algorithm was advanced. This algorithm was based on the skills of multiscale filter, feature calculation, partition equivalent class by Hausdorff distance, and the ISODATA cluster analysis method of calculating the best matching switch matrix was put forward. The corresponding programs were developed. The algorithm was demonstrated to be efficient, robust and fault tolerant by three typical examples of actual parts which are the selfsame, different in size and little change in shape.

Key words Panel, Die-face design, Curve matching, Template, Cluster analysis

引言

零件轮廓曲线是典型的复杂三维曲线,在基于模板的覆盖件模面设计中,三维零件轮廓曲线匹配算法是一项重要的研究内容。覆盖件模具工艺设计主要围绕着模具型面设计展开^[1],模具型面数字化设计简称为模面设计。模面设计难度大,技术含量高,由于缺乏完善的设计理论和定量分析方法,长期依赖于设计人员的经验,根据有限元模拟的结果反

复调试、修改,耗费大量人力、物力。前人制定的相似零件成形工艺的经验有着极大价值^[2~3]。因此,提出基于模板的覆盖件模面设计方法,对已设计好模面的典型类型零件轮廓曲线构建模板,形成模板库,将待设计模面的零件轮廓曲线同模板库中的零件轮廓曲线进行相似判定并匹配。匹配完成后,待设计模面的零件的冲压方向、工艺补充面截面线类型以及工艺补充面生成方法,可根据模板库中的相似零件稍做修改即可。无需设计人员太多的设计经

收稿日期: 2011-06-22 修回日期: 2011-08-08

* 国家自然科学基金资助项目(51075206)

作者简介: 刘玉琳,博士生,安徽工业大学讲师,主要从事 CAD/CAE 研究,E-mail: liuyulin@nuaa.edu.cn

通讯作者: 陈文亮,教授,博士生导师,主要从事 CAD/CAE 研究,E-mail: cwlme@nuaa.edu.cn

验,就能够实现复杂形状零件的自适应工艺设计,提高了覆盖件模面设计的自动化、智能化程度,大大缩短了模面设计的周期。因此,基于轮廓曲线特征的复杂零件匹配算法研究具有重要意义。

关于三维曲线匹配,Zhang 等^[4]使用傅里叶变换进行曲线匹配,但是轮廓曲线的局部变化会使傅里叶描述符产生较大的变化,难以使匹配算法具有鲁棒性和一定的容错性;Rodriguez 等^[5]将三维曲线投影到二维平面,使用串匹配的方法实现曲线匹配,但投影的过程会损失零件轮廓曲线信息,且计算复杂;林增刚等^[6]提出了基于不变特征量的曲线匹配方法,该算法提取的不变特征量很难应用于复杂的零件轮廓曲线;Kong 等^[7]采用了二次匹配的方法来处理三维曲线匹配,在两次处理中有许多步骤重复,运算量大。周术诚等^[8]基于多尺度分析进行三维曲线匹配,但对复杂的三维零件误匹配率较高。曲线匹配问题必须根据不同的应用场合具体分析。

本文针对基于模板的覆盖件模面设计中对零件轮廓曲线匹配的需求,提出三维零件轮廓曲线的匹配算法。

1 多尺度空间曲线离散点的特征计算

1.1 轮廓曲线多尺度滤波及重采样

滤波主要是对轮廓曲线进行处理,得到更加光滑的曲线,如过滤掉零件轮廓线上一些细小的锯齿形状等。其次,曲线滤波可以减少曲线的复杂度,使得能快速计算两条特征曲线的相似度,实现匹配处理。噪声或曲线突变较大的部分主要反映在信号的高频分量上,因此,采用低通滤波器对曲线进行滤波处理,减少信号的高频分量,保留信号的低频分量。在对轮廓曲线进行滤波处理时,为了满足实际应用的不同需要,可以使用多尺度的滤波方法,常用的低通滤波器有 Gauss 滤波器。Gauss 函数 $G(t, \sigma)$ 表示为

$$G(t, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

高斯函数的分布参数 σ 反映了函数的宽度, σ 越大,函数越宽,滤波后信号包含的高频成分越少。 t 为函数自变量。

原始曲线表示为 $L(x(t), y(t), z(t))$, 滤波后的曲线表示为 $L'(t, \sigma)$, 则

$$L'(t, \sigma) = L(x(t), y(t), z(t)) \otimes G(t, \sigma) = (X(t, \sigma), Y(t, \sigma), Z(t, \sigma)) \quad (2)$$

其中 $\otimes$ 是卷积运算,曲线在 3 个坐标分量的卷积运算表示为

$$\begin{cases} X(t, \sigma) = x(t) \otimes G(t, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-u)^2}{2\sigma^2}\right) du \\ Y(t, \sigma) = y(t) \otimes G(t, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(u) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-u)^2}{2\sigma^2}\right) du \\ Z(t, \sigma) = z(t) \otimes G(t, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(u) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-u)^2}{2\sigma^2}\right) du \end{cases} \quad (3)$$

由于卷积运算的本质是一种加权和运算,式(3)又可表述为

$$\begin{cases} X(t, \sigma) = x(t) \otimes G(t, \sigma) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(u) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-u)^2}{2\sigma^2}\right) \Delta u \\ Y(t, \sigma) = y(t) \otimes G(t, \sigma) = \sum_{-\infty}^{+\infty} y(u) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-u)^2}{2\sigma^2}\right) \Delta u \\ Z(t, \sigma) = z(t) \otimes G(t, \sigma) = \sum_{-\infty}^{+\infty} z(u) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-u)^2}{2\sigma^2}\right) \Delta u \end{cases} \quad (4)$$

式中 Δu ——步长

轮廓曲线与高斯函数卷积运算后,相当于对轮廓曲线进行滤波平滑处理,当 σ 由小到大变化时,可以滤除更多的噪声,但轮廓上保留的细节信息逐渐减少。因此, σ 取不同值,可以在多尺度下描述轮廓曲线。在实际应用中, σ 的最佳值为:在能够去除噪声的同时保留较多的细节信息。

轮廓曲线滤波后,由于离散轮廓曲线上的各点间距不一,需要对轮廓曲线进行重采样,用采样点来描述该曲线。首先选用周期参数三次样条曲线作为插值拟合曲线,使之顺序通过离散轮廓曲线上的有序数据点。接着采用等间隔采样,因为参数曲线是累计弦长参数化的,所以也是等参数间隔采样。这样可以在后续的匹配中容易将不同曲线上的数据点等间隔对应起来,保证后续操作的顺利进行。

1.2 轮廓曲线离散点特征计算

曲率和挠率具有旋转、平移和缩放不变性,因此,选择曲率和挠率作为轮廓曲线的特征。对处理后的新的数据点,采用差分方法计算曲率、挠率^[9]。

设空间曲线 $r=r(t)$, 则曲率 k 、挠率 τ 计算公式为

$$\begin{cases} k = \frac{|r' \times r''|}{|r'|^3} \\ \tau = \frac{(r', r'', r''')}{(r' \times r'')^2} \end{cases} \quad (5)$$

在离散化处理中,用差分替代微分计算出轮廓

曲线上每个点的曲率 k_i 和挠率 τ_i , 并计算出特征参数

$$G_i = \sqrt{k_i^2 + \tau_i^2} \tag{6}$$

作为后续特征点选取的依据。

2 轮廓曲线相似性判定

轮廓曲线匹配过程中, 先选出轮廓曲线上的特征点, 再根据特征点来对轮廓曲线进行分段, 然后将零件轮廓曲线之间的比较转换为特征段的比较, 以减小轮廓曲线匹配时的搜索空间, 从而加快匹配速度。

2.1 选取轮廓曲线的特征点和特征段

因为特征参数 G 既记录了曲线的曲率变化, 又记录了曲线的挠率变化, 所以可以根据特征参数的大小来对轮廓进行特征检测, 以特征参数的局部极值点作为轮廓曲线的特征点。特征点和特征段的选择步骤如下:

- (1) 搜索曲线上特征参数最大的点作为起始点。
- (2) 从起始点开始, 依次将后续点的特征参数与之比较, 如果后续点的特征参数小于起始点的特征参数, 这时将后续点作为当前点, 并将当前点的特征参数与后续点的特征参数比较, 如果后续点的特征参数仍小于当前点, 则继续将后续点作为当前点, 直到后续点的特征参数大于当前点的特征参数。这时搜索到的点即为特征参数的局部极大点, 该点即为一个特征点。
- (3) 如果没有遍历完整条轮廓曲线, 则将刚搜索到的特征参数局部极大点作为新的起始点, 转步骤(2)。
- (4) 特征点搜索结束。

如果用特征点间的子线段做相似性判定, 时间复杂度很大, 因此, 选择每个特征点左右若干点构成一条特征段, 特征段中各点的值是该点的曲率和挠率组成的特征向量。

2.2 基于 Hausdorff 距离划分等价类

匹配的特征段对应点的曲率、挠率特征值应相等或相近。采用 Hausdorff 距离计算两特征段的相似性。设两零件轮廓曲线 L_1 、 L_2 中某一特征段为 P_i 和 Q_j , $P_i = \{p_{i-k}, \dots, p_i, \dots, p_{i+k}\}$, $Q_j = \{q_{j-k}, \dots, q_j, \dots, q_{j+k}\}$, 其中 $p_s (s = i - k, \dots, i + k)$ 和 $q_t (t = j - k, \dots, j + k)$ 是两零件轮廓曲线上某一点的特征向量, 则 P_i 和 Q_j 之间的 Hausdorff 距离为

$$H(P_i, Q_j) = \max(h(P_i, Q_j), h(Q_j, P_i)) \tag{7}$$

其中

$$\begin{cases} h(P_i, Q_j) = \max_{p_s \in P_i} \min_{q_t \in Q_j} \|p_s - q_t\| \\ h(Q_j, P_i) = \max_{q_t \in Q_j} \min_{p_s \in P_i} \|q_t - p_s\| \end{cases} \tag{8}$$

式中 $\|\cdot\|$ 表示某种距离范数, 本文使用欧式距离。

实际应用中, 设定容许误差 ε , 若 $H(P_i, Q_j) < \varepsilon$, 则将这一特征段对划分为同一等价类。同理, 将两待匹配的零件轮廓曲线上的所有特征段对划分为一定数量的等价类。

2.3 基于聚类分析计算最佳匹配变换矩阵

2.3.1 计算匹配特征段对间的变换矩阵

在每一个等价类中, 计算匹配的特征段间旋转、平移变换矩阵。对于旋转变换, 如果直接使用传统的三维齐次坐标的方法, 计算量大, 且不利于进行后续的聚类算法。因此, 采用四元数法描述旋转变换。旋转矩阵 R 可由四维向量 $q = (q_0, q_1, q_2, q_3)$ 唯一确定^[10~11]

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_1 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_2q_1 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

其中 q_0, q_1, q_2, q_3 定义如下: 设旋转轴的单位向量 $v = (v_x, v_y, v_z)$, 旋转角 θ , 则 $q_0 = \cos(\theta/2)$, $q_1 = \sin(\theta/2)v_x$, $q_2 = \sin(\theta/2)v_y$, $q_3 = \sin(\theta/2)v_z$ 。

平移矩阵 T 可由三维向量 $t = (t_x, t_y, t_z)$ 唯一确定, 其中 t_x, t_y, t_z 分别为沿 x, y, z 方向的平移量。

2.3.2 计算最佳匹配变换矩阵

将每个等价类中旋转矩阵和平移矩阵分量构成 7 维向量 $V = (q_0, q_1, q_2, q_3, t_x, t_y, t_z)$, 采用 ISODATA 算法对所有 V 进行聚类分析, 求得最大聚类的聚类中心向量 $V_{ISODATA}$, 其对应的矩阵 R, T 即为两零件轮廓曲线间的最佳匹配旋转、平移矩阵。

ISODATA 算法称为迭代自组织数据分析算法, 是统计模式识别中非监督动态聚类算法中的一种。首先设定初始聚类中心和聚类数, 定义聚类准则函数; 在将全部样本调整完毕之后, 重新计算样本均值, 作为新的聚类中心; 在调整样本过程中完成聚类分析, 动态地进行类的合并和分裂, 从而得到类数比较合理的各个聚类。ISODATA 算法流程如图 1 所示。

- (1) 设置聚类分析控制参数, 主要包括: 期望得到的聚类数 K ; 一个聚类域中样本标准差阈值 θ_s ; 两聚类中心之间的距离阈值 θ_c ; 允许迭代的最多次数 I 。
- (2) 初始分类, 将准备分类的 N 个样本读入, 预选 N_c 个初始聚类中心, 按照与聚类中心距离最小的原则将各样本分类。
- (3) 按控制参数给定的要求, 将前一次获得的聚类集进行分裂和合并处理, 以获得新类中心和分类集。判断分裂、合并的条件为: 对每一个聚类 S_i , 找出标准偏差最大的分量 δ_{imax} , 若 $\delta_{imax} > \theta_s$, 则执行分裂操作; 检查聚类中心间的最小距离 D_{ij} , 若 $D_{ij} <$

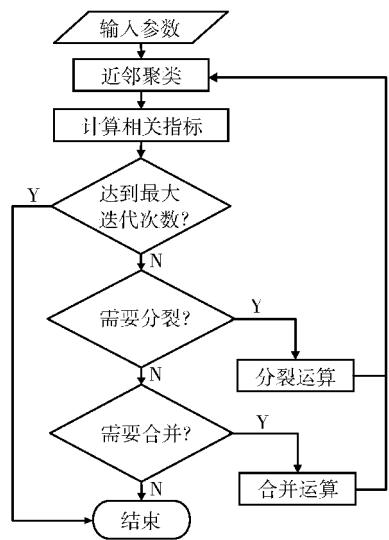


图 1 ISODATA 算法流程图
Fig. 1 Flowchart of ISODATA algorithm

θ_c , 则执行合并操作。
(4) 经多次迭代后, 若结果收敛或达到最大迭代次数, 则运算结束。

设曲线 L_1 中特征段的数量为 m , 曲线 L_2 中特征段的数量为 n , 最大聚类中样本点的数量为 s , 则相似度为

$$S_{im} = \frac{s}{\min(m, n)}$$

(10)

当相似度大于指定的阈值时, 判断两轮廓曲线相似, 并采用最佳匹配变换矩阵进行匹配。

3 应用实例

首先把零件轮廓曲线提取出来, 和模板库中的零件轮廓曲线进行相似判定, 如判定相似, 导入模板库中的该轮廓曲线, 并将待设计模面的零件轮廓曲线和已设计好模面的零件轮廓曲线通过旋转、平移变换进行匹配。从而为借鉴前人设计成功的零件模具型面经验做好准备。以下各实例中, a 代表判定相似的已设计好模具型面的零件轮廓曲线, b 代表待设计模具型面的零件轮廓曲线。

3.1 完全相同的零件轮廓曲线匹配

实际应用中, 少数零件轮廓曲线和模板库中的某零件轮廓曲线完全相同。对完全相同的零件轮廓曲线, 匹配算法应将两零件轮廓曲线完全对应上。后行李箱盖是汽车覆盖件的典型零件, 其外轮廓线为复杂的三维曲线, 非常适合用来测试曲线匹配算法。图 2 所示为某汽车的后行李箱盖零件, 对相同

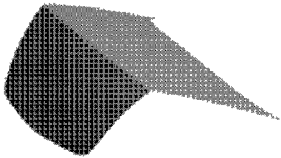


图 2 某汽车的后行李箱盖零件
Fig. 2 Trunk lid part of some automobile

的后行李箱盖零件轮廓曲线匹配前、后空间状态如图 3 所示, 匹配后两零件轮廓曲线完全重合。

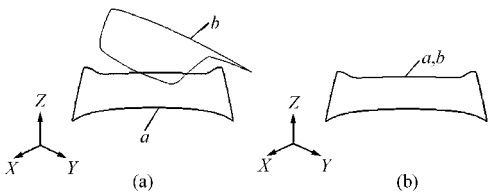


图 3 相同的后行李箱盖零件轮廓曲线匹配前、后空间状态
Fig. 3 Space state of selfsame trunk lid contour curve before and after matching
(a) 匹配前 (b) 匹配后

3.2 大小不同的零件轮廓曲线匹配

实际应用中, 有些零件轮廓曲线和模板库中的某零件轮廓曲线在尺寸方面有所变化, 因此对大小不同的零件轮廓曲线, 匹配算法应将两零件轮廓曲线完全相似对应上。图 4 所示为某汽车的车门内板零件。对有大小区别的车门内板零件轮廓曲线匹配前、后空间状态如图 5 所示。

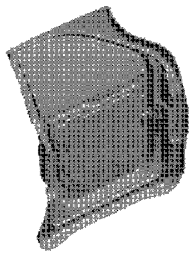


图 4 某汽车的车门内板零件
Fig. 4 Inner-door part of some automobile

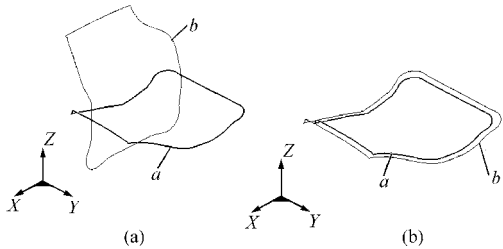


图 5 大小不同的车门内板零件轮廓曲线匹配前、后空间状态
Fig. 5 Space state of inner-door contour curve with difference in size before and after matching
(a) 匹配前 (b) 匹配后

3.3 形状略有变化的零件轮廓线匹配

实际应用中, 较多零件轮廓曲线和模板库中的某零件轮廓曲线大体相似, 但在形状上略有变化, 对形状略有变化的零件, 匹配算法应尽可能将两轮廓曲线主要相似部位对应上。翼子板是汽车覆盖件中经常形状略微发生变化的典型零件。图 6 所示为

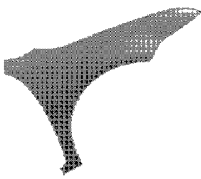


图 6 某汽车的翼子板零件
Fig. 6 Fender part of some automobile

某汽车的翼子板零件,与模板中形状略有区别的翼子板零件轮廓曲线匹配前、后空间状态如图7所示。

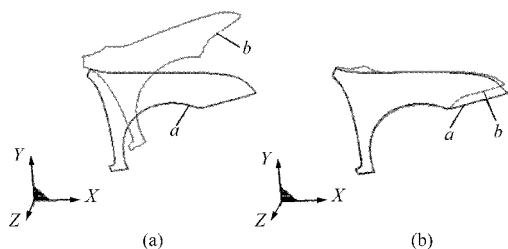


图7 略有区别的翼子板零件轮廓曲线匹配前、后空间状态

Fig.7 Space state of fender contour curve with little change in shape before and after matching

(a) 匹配前 (b) 匹配后

4 结束语

基于模板的覆盖件模面设计中需要对三维零件

轮廓曲线进行相似判定并匹配。本文采用多尺度滤波、特征提取、Hausdorff 距离划分等价类、ISODATA 聚类分析方法计算最佳匹配变换矩阵等技术,实现了三维零件轮廓曲线匹配算法,开发了相应程序模块。通过实例证明了对于完全相同的零件轮廓曲线可实现完全重合匹配,对于大小不同的零件轮廓曲线可实现完全相似匹配,对于形状略有变化的零件轮廓曲线可实现主要相似部位匹配,验证了该算法的有效性、鲁棒性和容错性,完全满足了基于模板的覆盖件模面设计对零件匹配的要求。应用该算法可以从成功设计模面的零件中得到设计经验,为新的设计提供指导或直接使用,能够实现复杂形状零件的自适应工艺设计,提高覆盖件模面设计的自动化、智能化程度。

参 考 文 献

- 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 王义林,胡贤罡,薄克红. 知识驱动的覆盖件模具型面参数化设计[J]. 现代制造工程,2010(2): 87~90.
Wang Yilin, Hu Xiangang, Bo Kehong. Knowledge-driven parameterized design of panel die-face [J]. Modern Manufacturing Designing, 2010(2): 87~90. (In Chinese)
- 郭成,史东才,王朝明,等. 基于经验知识的覆盖件成形过程数值模拟与参数优化[J]. 机械工程学报, 2004, 40(3): 191~194.
Guo Cheng, Shi Dongcai, Wang Chaoming, et al. Numerical simulation and parameter optimization based on experience knowledge on forming process of cover panel [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(3): 191~194. (in Chinese)
- Zhang Hao, Eugene Fiume. Shape matching of 3-D contours using normalized fourier descriptors [C] // Proceedings of International Conference on Shape Modeling and Application, Banff, 2002:261~270.
- Rodriguez W, Last M, Kandel Abraham, et al. 3-Dimensional curve similarity using string matching [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2004, 49(3~4): 165~172.
- 林增刚,周明全. 基于不变特征量的空间三维曲线匹配[J]. 计算机工程与应用,2003,39(32):105~107.
Lin Zenggang, Zhou Mingquan. The 3D space curve matching based on invariant feature quality [J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39(32): 105~107. (in Chinese)
- Kong Weixin. On solving 2D and 3D puzzles using curve matching [C] // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hawaii, 2001, 2(2):583~590.
- 周术诚,周明全,耿国华. 基于多尺度分析的三维曲线匹配技术研究[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(9):51~52.
Zhou Shucheng, Zhou Mingquan, Geng Guohua. Three dimensional curves matching based on multiscale analysis [J]. Computer Applications and Software, 2006, 23(9):51~52. (in Chinese)
- 郭克华. 基于微分几何的局部相似目标匹配算法研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
Guo Kehua. Partially similar object matching based on differential geometry [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2008. (in Chinese)
- Chen Guangyo, Tien D Bui. Invariant Fourier-wavelet descriptor for pattern recognition [J]. Pattern Recognition, 1999, 32(7):1 083~1 088.
- Jorge A. Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods, and algorithms [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2003:19~43.
- 狄驰,田原嫒,郑国君,等. 车身覆盖件 CAD 模型曲面缝合技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 223~226.
Di Chi, Tian Yuanyuan, Zheng Guojun, et al. Healing method of CAD geometric model for automobile panels [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 223~226. (in Chinese)