

文章编号 1004-924X(2013)01-0181-08

# 鞋楦定制中非均匀有理 B 样条特征 曲线的自适应变形

任怀艺, 王伯雄\*, 刘 辉, 罗秀芝

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:**为实现无实体楦基础的数字化量足制鞋,提出了基于非均匀有理 B 样条(NURBS)特征曲线自适应变形的个性化鞋楦定制系统,将足部 NURBS 特征曲线依据一定的舒适度规则变形成相应的鞋楦特征曲线来实现鞋楦定制。该系统采用切平面法获取足部的特征点、特征曲线和特征尺寸,重建出足部 NURBS 特征曲线。建立了足楦舒适度匹配规则,并根据变形方式及次序不同将特征曲线分为四种类型。以特征点、特征结点和特征尺寸作为约束,结合足楦舒适度规律驱动足部特征曲线自适应变形,生成相应的鞋楦特征曲线。最后,构建出鞋楦特征框架,通过特征曲线增添操作和曲面细分造型完成定制鞋楦的设计。给出了男士皮鞋鞋楦的设计实例和定制结果,定制时间在 480 s 内,定制的鞋楦美观大方。该系统具有实用性,且定制鞋楦的再设计利用率显著提高。

**关键词:**足部特征信息;非均匀有理 B 样条特征曲线;鞋楦定制;自适应变形;舒适度匹配规则

**中图分类号:**TP391.7;TS943.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132101.0181

## Adaptive deformation of characteristic NURBS curves for customized shoe-last

REN Huai-yi, WANG Bo-xiong\*, LIU Hui, LUO Xiu-zhi

(*Department of Precision Instruments and Mechanology,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: wangbx@tsinghua.edu.cn*

**Abstract:** To make customized shoes without standard shoe-lasts, a customized shoe-last system is established based on the adaptive deformation of Non-uniform Rational B Spline (NURBS) curves for foot characteristics. The system uses the deformation from foot characteristic curves to make shoe-lasts based on comfortable matching rules. First, the cutting plane method is used to acquire the characteristic information, including characteristic points, characteristic curves and characteristic sizes, following that, the characteristic curves are reconstructed in NURBS. Then, the comfortable matching rules between feet and shoe-lasts are established, and characteristic curves are divided into four different types according to different deformation ways and orders. Furthermore, the foot characteristic curves are deformed to shoe-last's characteristic curves driven by the comfortable match rules in the constraints of the characteristic points, characteristic nodes and the characteristic sizes. Finally, it structures the shoe-last's characteristic frame, and finishes the design of customized shoe-last through adding characteristic curves and subdividing the surface mesh of shoe-last. With this system, a men's

收稿日期:2012-09-28;修订日期:2012-10-17.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA042207)

leather shoe with comfort and beauty can be customized in less than 480 s. This system is practical, and can increase greatly the utilization of redesign for customized shoe-lasts.

**Key words:** foot characteristic information; Non-uniform Rational B-spline (NURBS) characteristic curve; shoe-last customizing; adaptive deformation; comfortable matching rule

## 1 引言

鞋楦是制鞋过程中的模具,随着人们对鞋子舒适性和美观性的要求不断提高,量脚定制的、外表独特、款式新颖的鞋子成为消费者的首选。要实现量足制鞋,个性化的鞋楦定制是技术核心和关键。传统的个性化鞋楦定制需要楦型设计人员具备完善的理论知识、一定的艺术修养和丰富的制楦经验,尤其要求准确掌握脚型的测量、足部结构的分析、脚型和楦型的匹配规律等。如此高的技术门槛很大程度上制约了制鞋的工业化推广<sup>[1-2]</sup>。

随着 CAD/CAM 的不断提高,用人机交互智能设计逐步代替手工楦型设计的技术日趋成熟和完善<sup>[3-4]</sup>。目前,国内外已经有很多鞋楦鞋样设计软件问世,如英国的 Delcam 公司研制开发的 CRISPIN 制鞋 CAD/CAM 系统,能够自如地进行鞋楦和鞋款设计与加工制作,功能完善齐全。意大利的 New Last 公司研制的 Easylast 3D 软件能够扫描各类鞋楦,形成鞋楦数据库,然后基于数据库进行新鞋楦的设计制作。英国的 CSM3D 公司的 Shoemaster Custom 软件通过对比顾客脚型三维数据和鞋楦数据库中鞋楦的大小和形状来为每个顾客生成定制的鞋楦。上述鞋楦 CAD/CAM 软件皆需标准鞋楦数据库或通过扫描现有鞋楦进行新鞋楦设计,即有实体楦造型。这类方法极大制约了鞋楦设计的弹性和定制鞋楦再设计的发展。

浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室在无实体楦造型方面进行了研究,主要通过 2 种方式实现:一是通过足楦关键参数转换模块<sup>[5]</sup>得到鞋楦的主要参数来进行定制鞋楦造型,这种设计不能体现全部足部特征,尤其是一些局部特征;二是利用足部三维扫描数据建立足部特征模型<sup>[6]</sup>,确定鞋楦特征模板顶点和相应的拓扑关系,从而组合建立鞋楦轮廓曲线,之后进行曲面细分造型得到定制的鞋楦。但是这种方法也会缺失很多局部特

征信息,尤其是一些非轮廓的特征曲线和曲线上的特征点,且设计过程较为繁琐。

基于上述分析,本文提出了一种基于足部非均匀有理 B 样条(NURBS)特征曲线自适应变形的个性化鞋楦定制系统,通过足部特征曲线变形形成相应的鞋楦特征曲线来实现鞋楦定制。鞋楦定制过程中,足部的特征点和特征尺寸作为约束影响曲线变形,足楦舒适度匹配规则驱动 NURBS 特征曲线变形。算法最大程度地保留了足部所有的特征信息,且设计出的新鞋楦能够快速变形成不同款式的定制鞋楦,提高了定制鞋楦的再设计利用率。

## 2 个性化鞋楦定制系统

个性化鞋楦定制流程如图 1 所示。

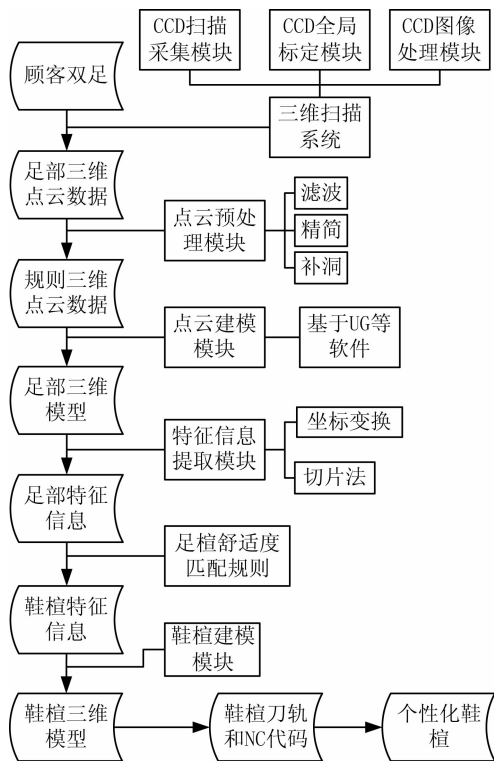


图 1 个性化鞋楦定制流程图

Fig. 1 Flow chart of customizing shoe-last

采用清华大学研制的足部三维形貌自动测量平台<sup>[7]</sup>获取顾客足部的三维点云数据;通过点云预处理模块对点云数据进行滤波去噪、精简和补洞操作,规则化点云数据;在系统中嵌入 UG NX8.0 等软件平台进行建模,建立足部三维模型。

利用足部特征信息提取模块得到顾客足部的特征点、特征曲线、特征尺寸等信息,特征曲线采用 NURBS 形式重建,特征点和特征尺寸可转换为约束优化条件。通过人机交互接口获取足楦舒适度匹配规则和经验公式,驱动足部特征曲线自适应平移或变形,形成鞋楦特征曲线。这是个性化鞋楦定制流程中的关键环节,也是本文讨论的重点。

基于鞋楦特征数据进行鞋楦三维建模,生成鞋楦刀轨和 NC 代码,加工定制出顾客所需的个性化鞋楦。在鞋楦三维建模过程中,可基于特征信息对鞋楦进行变形,形成不同款式的定制鞋楦,以满足顾客的多样化需求。

### 3 足部特征信息提取

采用切平面法获取足部的特征信息,如图 2 所示。

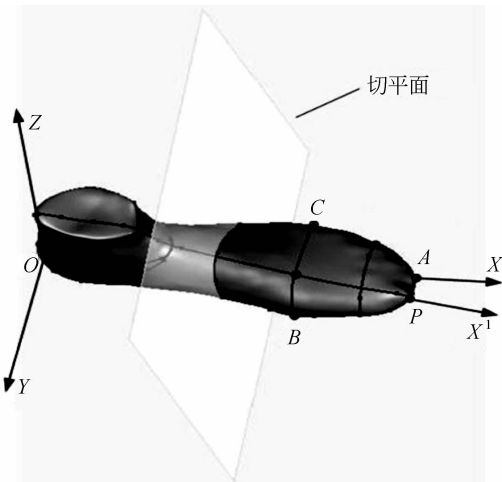


图 2 切平面法获取足部特征信息示意图

Fig.2 Schematic view of acquiring foot's characteristic information by the cutting plane method

在提取特征信息前,首先用向量平移和矩阵旋转完成标定坐标系到足部坐标系的转换<sup>[5]</sup>,建

立如图 2 中所示的坐标系  $O-XYZ$ 。设定距离三维形貌自动测量平台中平板玻璃高度<sup>[7]</sup>为 1.5 mm 的切片曲线为足底轮廓,如图 3 所示。轮廓线上后跟点为坐标原点  $O$ ,足底轴线方向为  $OX$  方向,顶端即为特征点  $A$ 。

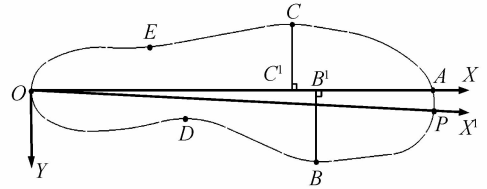


图 3 足底轮廓图

Fig.3 Profile diagram of foot sole

根据图 3 可得到足底轮廓上的特征点,包含足后跟点  $O$ 、拇指突点  $P$ 、脚趾端点  $A$ 、第一跖趾关节突点  $B$ 、第五跖趾关节突点  $C$ 、腰窝内点  $D$  和腰窝外点  $E$ 。

同时可求得足长和足宽。若特征点  $P$ 、 $B$ 、 $C$  在  $OX$  轴上的投影点分别为  $P'$ 、 $B'$ 、 $C'$ ,则足长 =  $OP' \approx OA$ ,足宽 =  $BB' + CC'$ 。

采用同样的切平面法可得到跖趾围、跗骨围、兜跟围、脚腕围、侧围主轮廓线等 5 条特征曲线,进而求得相应的特征点、特征结点和特征尺寸,完成足部特征信息的提取。建立足部拓扑关系,形成足部特征框架。

### 4 足部特征曲线 NURBS 重建

利用 Geomagic 软件将  $l$  条足部特征曲线离散成若干数据点,然后基于 NURBS 曲线逼近算法进行重建,拟合成 NURBS 特征曲线<sup>[8-11]</sup>。NURBS 曲线可表示为

$$p(u) = \sum_{i=1}^n d_i R_{i,k}(u), u_k \leq u \leq u_{n+1}, \quad (1)$$

式中: $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$  为节点矢量, $d_i (i = 0, 1, \dots, n)$  为控制顶点,且

$$R_{i,k}(u) = \frac{\omega_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}$$

是定义在节点矢量  $U$  上的  $k$  次有理基函数,由权因子  $\omega_i$  和 B 样条基函数  $N_{i,k}(u)$  所确定。

假定足部第  $l$  条特征曲线被离散成  $m+1$  个数据点  $q_j, j = 0, 1, \dots, m$ ,构建一条  $k$  次 NURBS

曲线,满足

$$\begin{cases} \mathbf{q}_0 = \mathbf{p}(0), \mathbf{q}_m = \mathbf{p}(1) \\ h = \sum_{j=0}^m \left[ \mathbf{q}_j - \sum_{i=1}^n \mathbf{d}_i R_{i,k}(t_j) \right]^2 = \min \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $t_j$  为数据点  $\mathbf{q}_j$  对应的参数值,可由规范累加弦长法确定。由  $\frac{\partial h}{\partial \mathbf{d}_i} = 0, i=1, 2, \dots, n-1$  可得

$$(\mathbf{N}^T \mathbf{N}) \mathbf{D} = \mathbf{Q}, \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{N}$  是  $(m-1) \times (n-1)$  的矩阵,  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{Q}$  是元素为矢量的  $(n-1) \times 1$  矩阵:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_{1,k}(t_1) & \cdots & N_{n-1,k}(t_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{1,k}(t_{m-1}) & \cdots & N_{n-1,k}(t_{m-1}) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}^T = [\mathbf{d}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{d}_{n-1}],$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} N_{1,k}(t_1)\mathbf{r}_1 + \cdots + N_{n-1,k}(t_1)\mathbf{r}_{m-1} \\ \vdots \\ N_{n-1,k}(t_1)\mathbf{r}_1 + \cdots + N_{n-1,k}(t_1)\mathbf{r}_{m-1} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{r}_j = \mathbf{q}_j - \mathbf{q}_0 R_{0,k}(t_j) - \mathbf{q}_m R_{m,k}(t_j),$$

$$j = 0, 1, \dots, m-1$$

$(\mathbf{N}^T \mathbf{N})$  为正定矩阵,可采用高斯消元法求解  $\mathbf{D}$ 。将计算出的  $\mathbf{D}$  重新代入式(2),求解  $h$ 。若  $h$  大于阈值,则可增加节点重新计算,直至重新构建的 NURBS 特征曲线能够满足要求。

本文中假定权因子  $\omega_i = 1, i=0, 1, \dots, n$ ,若权因子不固定,则需要补充约束条件

$$\frac{\partial h}{\partial \omega_i} = 0, i = 0, 1, \dots, n, \quad (4)$$

并给定初值权因子,与式(3)联立求解。

足部特征曲线用 NURBS 形式重建后,需重新标定出特征点,即可得到包含特征点的特征曲线,便于后续特征曲线变形。

算法 I:重建足部 NURBS 特征曲线

STEP1:利用切平面法获得足部的第  $l$  条特征曲线;

STEP2:利用 Geomagic 软件将第  $l$  条足部特征曲线离散成  $m+1$  个数据点  $\mathbf{q}_j, j=0, 1, \dots, m$ ;

STEP3:根据式(3),利用高斯消元法,求解  $\mathbf{D}$ ;

STEP4:计算出的  $\mathbf{D}$  重新代入式(2),求解  $h$ ;

STEP5:若  $h$  大于阈值,则可增加节点,回到 STEP3 重新计算;若  $h$  小于阈值,则可构建出 NURBS 特征曲线;

STEP6:在重建的 NURBS 足部特征曲线上

标定出特征点。

## 5 足楦舒适度匹配规则

个性化定制鞋楦基于顾客双足的特征信息进行构建,需完成足部特征信息到鞋楦特征信息的转换,形成鞋楦特征框架。首先需掌握足楦舒适度匹配的基本规律以及鞋楦设计的理论知识,以此来约束和驱动 NURBS 特征曲线自适应变形<sup>[2]</sup>。

### 5.1 特征曲线的分类

特征信息转换的关键是特征曲线的转换,将求得的 NURBS 特征曲线依据所在足部位置、意义及变形次序分为 4 种类型:

I 型:底面轮廓线

II 型:跖趾围、跗骨围及兜跟围轮廓线

III 型:侧围主轮廓线

IV 型:腕围轮廓线

其中:I 型曲线需依据足楦舒适度规律和款式要求进行初始放缩变形和翘曲变形;II 型曲线需基于 I 型曲线变形后的特征结点约束和特征尺寸约束进行放缩变形;III 型曲线需基于 I、II 型曲线变形后的特征结点约束和特征尺寸约束进行放缩变形;IV 型轮廓线相对独立,可根据足部围长和鞋款式要求进行变形。

### 5.2 舒适度基本规律

I 型:足楦底面轮廓线匹配准则主要由底长舒适度规则、跖趾宽度舒适度规则、腰窝宽度舒适度规则和踵心宽度舒适度规则组成,如图 4 所示。

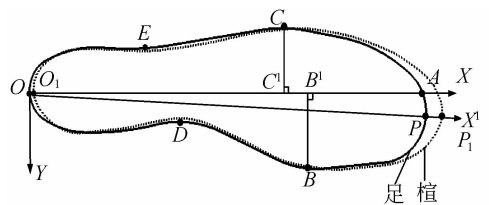


图 4 足楦底面轮廓图

Fig. 4 Profile diagram of foot sole and shoe-last sole

I-A:足楦底长舒适度规则:特征点  $P, P_1$  在楦底长  $OX$  轴上的投影点分别为  $P^1, P_1^1$ ,则有楦底长  $O_1 P_1^1 =$  脚长  $OP^1 +$  放余量  $P^1 P_1^1 -$  后容差  $OO_1$ 。

人行走时,足弓韧带拉长;季节(温度)变化

时,引起足部涨缩,因而需在足部前端留下活动空间,即放余量。鞋楦后跟的突出部分即为后容差,可使鞋跟脚。

I-B:足楦跖趾宽度舒适度规则:跖趾围是行走时弯曲部位,肉体圆滑,为保证鞋穿着舒适跟脚,应保证足楦跖趾宽度基本接近。

I-C:足楦腰窝宽度舒适度规则:鞋楦腰窝宽度一般要与足底腰窝宽度基本相等或略小。

I-D:足楦踵心宽度舒适度规则:人站立负重时,重力作用使得踵心宽度增大,因此楦底踵心宽度应略大于足底踵心宽度。

I-E:足楦底面轮廓线匹配准则因鞋型不同而有所变化。如足球鞋、田径鞋因运动量大,为保证穿着灵活,着力方便,楦底宽度要适当减小;登山鞋、旅游鞋则要适当增大楦底宽度,避免磨脚;平时穿的皮鞋、休闲鞋则更要加大楦底宽度,保证穿着舒适。

II型:足楦三条II型特征曲线(跖趾围、跗骨围及兜跟围轮廓线)的舒适度匹配规则相似,需在I型特征曲线变形后鞋楦特征结点和特征尺寸的约束下进行放缩变形。

II-F:足楦跖趾围轮廓线的匹配规则可参考规则I-B,跖趾围部位肉体可涨可缩,有一定“感差性”,为保证穿着跟脚舒适,需在保证足楦跖趾围宽度基本接近的条件下适当减小鞋楦跖趾围。一般,男性减少6 mm;女性减少2.08 mm;儿童由于跖趾围正在生长,应适当增大。

不同款式的鞋楦跖趾围放缩不同,系带鞋跖趾围要略大,浅口鞋、船鞋跖趾围要略小。同时,鞋跟高度增高,跖趾围随之增大。

II-G:足楦跗骨围轮廓线对成鞋设计非常关键,尤其是楦跗背,一般设计为“高瘦型”。由于鞋楦很难贴近足部腰窝部位,故鞋楦跗骨围应适当增大。

II-H:足楦兜跟围轮廓线舒适度规则较复杂,首先鞋楦兜跟围大于足部兜跟围,增大量要合适,防止不跟脚或穿鞋困难;其次,考虑到楦背的

“高瘦”特征,需在保证鞋楦兜跟围的脚跟部分和足部基本相似的前提下,增长后脚跟到楦背的距离。

III型:鞋楦侧围主轮廓线的设计重要且难度大,应在I、II型鞋楦特征曲线上特征结点的约束下进行光滑变形操作。在变形过程中,应适当增减特征点的数目;在翘曲变形时,应基于足部侧围的特征尺寸进行变形,保证鞋楦侧围脚掌区的特征尺寸与足部基本相同,而鞋楦侧围脚底中后部的特征尺寸大于足部。

IV型:鞋楦腕围长应大于脚腕围长,并进行圆弧光滑变形,使得生成的鞋楦曲面更加光滑,尤其注重保持楦背的“高瘦”特征。

### 5.3 足楦特征曲线匹配变形算法

足楦特征曲线舒适度匹配变形过程中,常见的是特征点约束、特征曲线长度约束等,本文中主要考虑特征点约束下的NURBS特征曲线变形,可较好地解决I、II型足部特征曲线到鞋楦特征曲线的变形问题。NURBS特征曲线修改的方法<sup>[12-14]</sup>很多,主要有控制顶点修改法、权因子修改法和节点矢量修改法。

本文采用NURBS特征曲线的齐次坐标形式进行处理,应用控制顶点修改法,使得足部第*l*条特征曲线 $p_l(u)$ 上*m*+1个特征(结)点 $q_j = p(t_j), j=0, 1, \dots, m$ 移动到鞋楦特征曲线 $p_l(u)$ 的相应位置,并带动足部特征曲线变形。

由式(1)可得:

$$p_l^{(k)}(t_j) = \sum_{i=1}^n (d_i + \delta_i) R_i^{(k)}(t_j) = p_l^{(k)}(t_j) + \Delta p_l^{(k)}(t_j), \quad (5)$$

其中: $\Delta p_l^{(k)}(t_j) = \sum_{i=0}^n \delta_i R_i^{(k)}(t_j)$ 为鞋楦特征曲线与足部特征曲线在特征点 $q_j (j=0, 1, \dots, m)$ 的*k*阶导矢改变量, $k \geq 0$ ,且一般情况 $k \leq 2$ ;  $\delta_i$ 为控制顶点的改变量。

构造Lagrange函数:

$$L = \sum_{i=0}^n \|\delta_i\|^2 + \sum_{j=0}^m \left\{ \left[ \Delta p_l(t_j) - \sum_{i=0}^n \delta_i R_i(t_j) \right] \cdot \alpha_j \right\} + \sum_{j=0}^m \left\{ \left[ \Delta p_l^{(1)}(t_j) - \sum_{i=0}^n \delta_i R_i^{(1)}(t_j) \right] \cdot \beta_j \right\} + \sum_{j=0}^m \left\{ \left[ \Delta p_l^{(2)}(t_j) - \sum_{i=0}^n \delta_i R_i^{(2)}(t_j) \right] \cdot \gamma_j \right\}, \quad (6)$$

为保证变形后鞋楦特征曲线  $\bar{p}_i(u)$  的稳定性, 有:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \delta_i} = 0, i = 0, 1, \dots, n \\ \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \alpha_j} = \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \beta_j} = \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \gamma_j} = 0, i = 0, 1, \dots, m \end{cases} \quad (7)$$

求解方程组(7), 可求得以下矩阵方程组

$$\begin{cases} \mathbf{R}\delta^T = \Delta \mathbf{P}^T \\ 2\delta^T - \mathbf{R}^T \theta^T = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_n)$ ,  $\theta_j = (\alpha_j, \beta_j, \gamma_j)$ ,

$$\Delta \mathbf{P}_j = (\Delta p(t_j), \Delta p^{(1)}(t_j), \Delta p^{(2)}(t_j)),$$

$$\mathbf{R}_j = \begin{bmatrix} R_1(t_j) & R_2(t_j) & \dots & R_n(t_j) \\ R_1^{(1)}(t_j) & R_2^{(1)}(t_j) & \dots & R_n^{(1)}(t_j) \\ R_1^{(2)}(t_j) & R_2^{(2)}(t_j) & \dots & R_n^{(2)}(t_j) \end{bmatrix},$$

$$\theta = (\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_m),$$

$$\Delta \mathbf{P} = (\Delta \mathbf{P}_0, \Delta \mathbf{P}_1, \dots, \Delta \mathbf{P}_m),$$

$$\mathbf{R} = (\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_1, \dots, \mathbf{R}_m)^T.$$

如果  $\det(\mathbf{R}\mathbf{R}^T) \neq 0$ , 则可得方程组(8)的解是:

$$\delta^T = \mathbf{R}^T (\mathbf{R}\mathbf{R}^T)^{-1} \Delta \mathbf{P}^T, \quad (9)$$

将式(9)代入式(5), 即可求得变形后的鞋楦第  $l$  条特征曲线的 NURBS 表达式。

算法 II: 足楦特征曲线匹配变形

STEP1: 根据算法 I 求解出足部第  $l$  条 NURBS 特征曲线的表达式  $\bar{p}_l(u)$ ;

STEP2: 给定足部特征曲线上  $m+1$  个特征(结)点  $q_j = p(t_j)$ ,  $j = 0, 1, \dots, m$  的导矢改变量  $\Delta p_l(t_j)$ ;

STEP3: 计算出矩阵  $\mathbf{R}$ ;

STEP4: 根据式(9), 计算出足部特征曲线上特征(结)点的控制顶点的改变量  $\delta$ ;

STEP5: 计算出鞋楦第  $l$  条 NURBS 特征曲线的表达式  $p_l(u)$ 。

6 鞋楦特征曲线生成实例

采用本文中提供的算法, 基于试验者左足(如图 2 所示)的三维形貌测量结果进行男士皮鞋鞋楦定制。首先利用切平面法获得试验者左足的特征曲线, 如图 6(a)所示, 并根据算法 I 进行重建, 然后根据算法 II, 结合足楦舒适度基本规律进行曲线变形, 生成相应的鞋楦特征曲线。图 5 为 I、II、III、IV 型足部特征曲线及生成的鞋楦特征曲线结果。

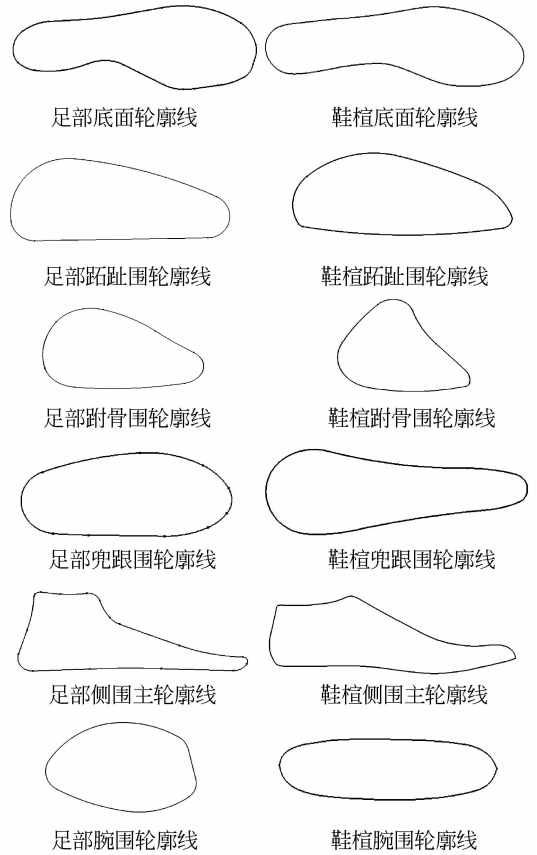


图 5 足部特征曲线和鞋楦特征曲线图  
Fig. 5 Characteristic curves of foot and corresponding characteristic curves of shoe-last

特征曲线变形要有一定的次序, 一般按照 I 型、II 型、III 型、IV 型的顺序进行。

将变形后的皮鞋鞋楦特征曲线合并, 如图 6(b)所示。建立鞋楦特征曲线框架后, 接下来进行鞋楦曲线的增添操作和曲面的细分操作, 生成所需

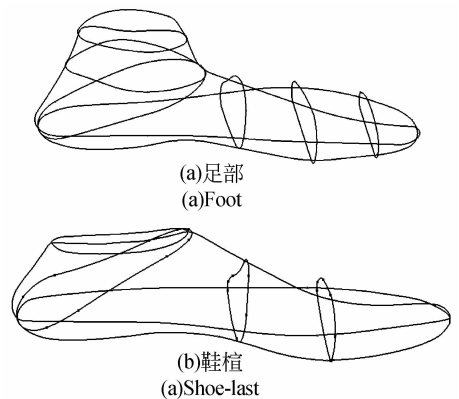


图 6 特征曲线框架  
Fig. 6 Frame diagram of characteristic curves

的个性化定制的皮鞋鞋楦,结果如图7所示,整个定制过程在480 s内完成。

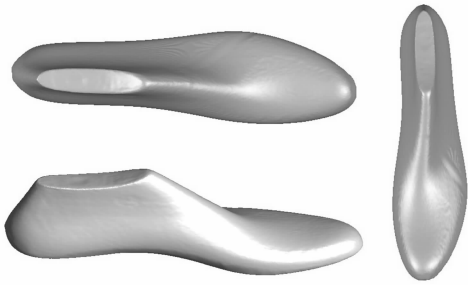


图7 个性化定制的男士皮鞋鞋楦

Fig. 7 Customized shoe-last of men's leather shoe

## 7 结 论

为实现无实体楦基础的数字化量足制鞋,本文提出了一种基于足部NURBS特征曲线自适应变

形的个性化鞋楦定制系统,并提出了特征曲线框架、足楦舒适度匹配规则等概念。该算法首先基于三维形貌扫描平台获取顾客的足部3D形貌数据,利用Geomagic、UG NX8.0等软件及切平面法获取足部的特征点、特征尺寸和特征曲线等信息,并利用算法I对足部特征曲线进行重建。根据鞋楦制作经验,建立足楦舒适度匹配规则库。依据特征曲线变形的需求,将其划分为I、II、III、IV 4种类型。在足楦舒适度规则驱动下,利用算法II进行曲线自适应变形,生成鞋楦特征曲线,建立鞋楦特征曲线框架,进而生成个性化定制鞋楦。在个性化鞋楦定制过程中,无需标准鞋楦数据库。由于新生成的鞋楦建立在鞋楦NURBS特征曲线框架基础上,可根据顾客需求调整特征曲线框架,生成不同款式的定制鞋楦,使得数字化定制的鞋楦可重复利用。实例中,男士皮鞋鞋楦造型用时在480 s内,证明该系统具有较强的可操作性,且生成的个性化鞋楦美观大方,便于进行后续大规模工业推广。

## 参考文献:

- [1] 万孝军. 基于逆向工程鞋楦参数化建模及其修改技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.  
WAN X J. *Research on parametric modeling of shoe-last and its modification based on reverse engineering* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [2] 孙毅,丘理. 鞋楦设计教程[M]. 北京:中国轻工业出版社,2011.  
SUN Y, QIU L. *The Course of Last Design* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [3] ROUT N, KHANDUAL A, ZHANG Y F, et al.. 3D foot scan to custom shoe last [J]. *Special Issue of IJCCT*, 2010, 1(2/3/4): 14-18.
- [4] XIONG SH P, ZHAO J H, JIANG Z H, et al.. A computer aided design system for foot-feature-based shoe last customization [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 46(1-4): 11-19.
- [5] 徐从富,刘勇,蒋云良. 个性化鞋楦CAD系统的设计与实现[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(10): 1437-1441.  
XU C F, LIU Y, JIANG Y L. Design and realization of customized shoe last CAD system [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(10): 1437-1441. (in Chinese)
- [6] 陆国栋,顾铭秋,王剑,等. 基于脚部三维扫描的鞋楦建模方法研究[J]. *设计与研究*, 2005, 32(4): 13-15.  
LU G D, GU M Q, WANG J, et al.. Research of shoe-last modeling algorithm based on feet range scans [J]. *Design and Research*, 2005, 32(4): 13-15. (in Chinese)
- [7] 贾倩倩,王伯雄,罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取 [D]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 390-396.  
JIA Q Q, WANG B X, LUO X Z. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method [D]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 390-396. (in Chinese)
- [8] PIEGL L, TILLER W. *The NURBS Book* [M]. Berlin: Springer, 1995.
- [9] 沈洪焱. 自适应NURBS曲线插补关键技术及实现研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.  
SHEN H Y. *Research on adaptive NURBS interpolation and implementation* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [10] POURAZADY M, XU X. Direct manipulations of

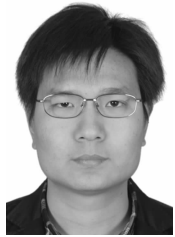
B-spline and NURBS curve [J]. *Advances in Engineering Software*, 2000, 31(2): 107-118.

- [11] 史辉,王伯雄,贾倩倩,等. 定制鞋楦的分段自适应修改[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(4): 880-885.  
SHI H, WANG B X, JIA Q Q, *et al.*. Segment-based adaptive modification for customized shoe last [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 880-885. (in Chinese)
- [12] 柳晓艳. NURBS 曲线曲面形状修改[D]. 西安:西北工业大学, 2006.  
LIU X Y. On Shape modification of NURBS

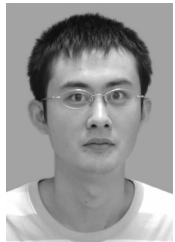
curves and surfaces [D]. Xi'an: Northwest University, 2006. (in Chinese)

- [13] AU C K, YUEN M F. Unified approach to NURBS curve shape modification [J]. *Computer Aided Design*, 1995, 27: 85-93.
- [14] LEE R S, LIANG S P. A strain energy minimization method for generating continuous NURBS-based motion curves in free-form surface machining [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 28 (11-12): 1136-1145.

#### 作者简介:



任怀艺(1986—),男,河南林州人,博士研究生,2009年于清华大学获得学士学位,现在清华大学精密仪器与机械学系攻读博士学位,主要从事精密测量及逆向工程等方面的研究。E-mail: rhy05@mails. tsinghua. edu. cn



刘辉(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2005年于燕山大学获得学士学位,2008年于燕山大学获得硕士学位,现在清华大学精密仪器与机械学系攻读博士学位,主要从事图像处理、三维形貌测量的研究。E-mail: liuhui19821104@163. com



罗秀芝(1968—),女,湖北武汉人,高级工程师,1988年于清华大学获学士学位,主要从事机械系统动态测试等方面的研究。E-mail: luoxz@tsinghua. edu. cn

#### 导师简介:



王伯雄(1947—),男,江苏海门人,教授,博士生导师,1970年于清华大学获得学士学位,1982年于清华大学获得硕士学位,主要从事精密仪器与测试技术, MEMS 技术, 光学测量技术, 生物医学技术等方面的研究。E-mail: wangbx@tsinghua. edu. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)