

文章编号 1004-924X(2009)04-0880-06

# 定制鞋楦的分段自适应修改

史 辉<sup>1,2</sup>, 王伯雄<sup>1</sup>, 贾倩倩<sup>1</sup>, 罗秀芝<sup>1</sup>

(1. 清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084 ;  
2. 装甲兵装备技术研究所, 北京 100072 )

**摘要:**采用光切扫描法提出了一种基于规则化点云数据的鞋楦定制算法。将规则化点云拟合为 NURBS 曲线后,在划分的各特征段内分别根据脚型对标准鞋楦进行整体缩放实现局部修改;然后,用基于能量优化原则同时修改控制点和权因子的方法,对标准鞋楦进行自适应修改来实现鞋楦的数字化定制。利用该算法对特定脚型进行自动化鞋楦定制,由脚型扫描至生成定制鞋楦模型的时间在 120 s 之内。根据此算法完成的定制鞋楦能够满足鞋楦美观性和舒适性的需求,并且缩短了常规手工定制鞋楦的时间。

**关键词:**鞋楦定制;标准鞋楦模型数据库;NURBS 曲线;特征段;能量优化

**中图分类号:**TP301.6;TS943.2 **文献标识码:**A

## Segment-based adaptive modification for customized shoe last

SHI Hui<sup>1,2</sup>, WANG Bo-xiong<sup>1</sup>, JIA Qian-qian<sup>1</sup>, LUO Xiu-zhi<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*  
2. *The Institute of Armed Forced Equipment Technolgy, Beijing 100072, China*)

**Abstract:** In order to realize the automatic customizing for shoe lasts, a segment-based adaptive algorithm is proposed. After fitting the regular data clouds to NURBS curves, the standard shoe lasts are contracted or enlarged in each feature segment according to foot shapes to perform local modification. Then, an energy optimization-based method to modify the control points and the weight factors is proposed to fit the standard shoe lasts adaptively and to realize digital customizing the shoe lasts. The automatic customizing shoe lasts are performed by the presented method, and the procedure from scanning the foot shape to establish a last 3D model takes time less than 120 s. The results show that the algorithm can meet the requirements of comfort and aesthetics, and can shorten the customizing time.

**Key words:** shoe last customizing; standard shoe last model database; NURBS curve; feature segment; energy optimization

## 1 引言

目前,为用户各自的脚型进行数字化定制鞋楦的方案主要有两种。一是建立脚参数转换模块<sup>[1]</sup>,根据制鞋行业通用的脚参数与鞋楦参数之间的关系规则,建立一套转换模型,从而得到所有的脚特征及相应的鞋楦参数。利用这种方法建立的鞋楦能大体上满足脚部的尺寸要求,但是通过这种造型方法完成的鞋楦模型往往不能充分反应人体脚型的一些局部特征。二是结合脚部三维扫描模型和自定义鞋楦轮廓的鞋楦曲面造型方法<sup>[2]</sup>。该方法通过对脚部进行三维扫描处理,建立脚部特征模型,然后用交互式的方法,利用初始网格和鞋楦轮廓,用带有边界条件的曲面细分方法,实现定制鞋楦造型。但这种方法需要操作的技术人员进行二维的手工输入,对操作人员要求较高。这种无楦的设计方法还需要在此基础上进行后续的鞋样设计,延长了定制的周期。

本文提出了基于光切法扫描的规则化点云数据的鞋楦定制算法。首先将测量所得脚型和标准鞋楦模型的规则化点云数据拟合为 NURBS 曲线,然后在划分的各特征段内分别根据脚型对标准鞋楦进行整体缩放进行局部修改,并基于能量优化原则同时修改控制点和权因子,对标准鞋楦进行自适应修改,以实现鞋楦的数字化定制。利用该算法,由脚型扫描至生成定制鞋楦模型的时间在 120 s 之内,加工完成后的定制鞋楦能够满足用户的舒适性需求,并保持了定制鞋楦的美观性。

## 2 定制鞋楦流程

定制鞋楦的流程如图 1 所示。

首先通过三维扫描系统<sup>[3,4]</sup>获取标准鞋楦以及脚型数据,然后由标准鞋楦以及脚型的轮廓数据点反求得到两组  $U$  向 NURBS 参数曲线,然后对每条参数曲线插值得到若干型值点。根据分段脚楦舒适度的经验公式,计算得出标准鞋楦曲线整体缩放因子以及各节点发生局部变形的变形量,将变形量作为点约束,结合分段自适应的曲线变形算法对标准鞋楦进行变形。对变形后的鞋楦数据进行  $V$  向光顺,再用蒙面法建模处理得到新

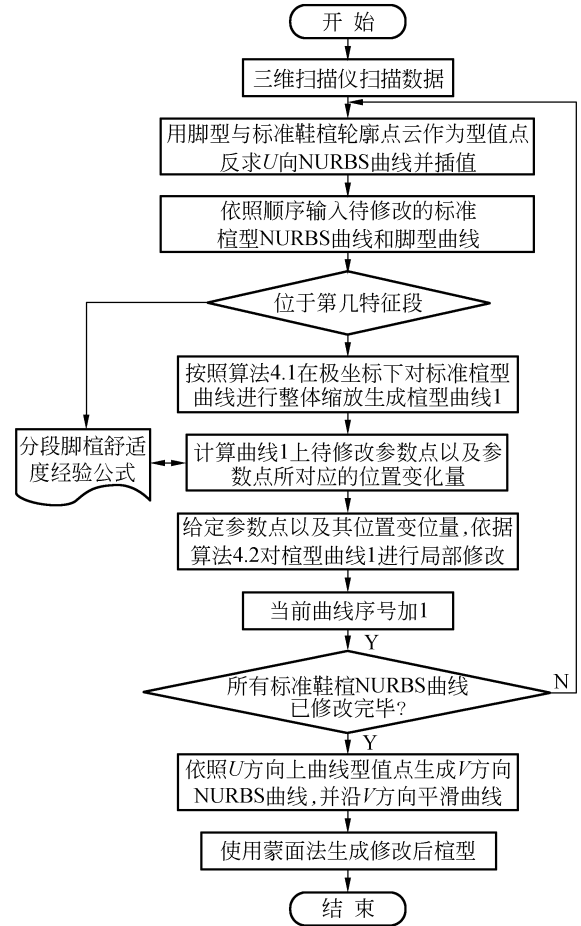


图 1 定制鞋楦的流程图

Fig. 1 Flowchart of customizing shoe last

鞋楦模型。这些模型可用于后续转换为 NC 数据进行加工。

## 3 数据预处理与脚型分段

### 3.1 数据获取与预处理

在鞋楦定制系统中,原始数据的测量获取包括两个部分:(1)脚型数据的获取;(2)标准鞋楦数据的获取。

设对脚型和标准鞋楦测量所得的轮廓点云数据分别为  $n_f, n_l$  条剖面线,首先对轮廓点云排序平滑去噪,然后使用最小二乘逼近的方法反算出  $U$  向的  $n_f, n_l$  条 NURBS 曲线,其中  $U$  方向按图 2 中所示的方向确定。

NURBS 曲线可以表示为:

$$p(u) = \sum_{i=0}^n d_i R_{i,k}(u), u_k \leq u \leq u_{n+1}, \quad (1)$$

其中,  $d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$  为控制顶点; 顺序连成的折线称为  $p(u)$  的控制多边形。而

$$R_k(u) = \frac{\omega_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}, \quad (2)$$

是定义在节点矢量  $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$  上的由权因子  $\omega_i$  和  $k$  次 B 样条基函数  $N_{i,k}(u)$  ( $i=0, 1, \dots, n$ ) 定义的  $k$  次有理基函数。

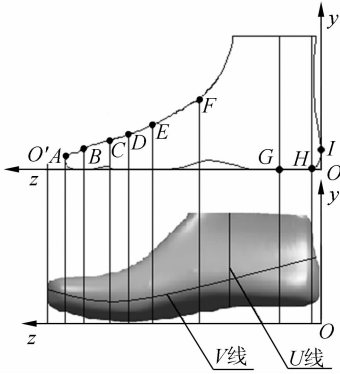


图 2 脚型和标准鞋楦的各特征段分界面示意

Fig. 2 Schematic view of feature sections of foot shape and standard last

根据扫描点云轮廓线每圈数据点数以及经验、考虑节省数据存储空间的需求, 选择拟合曲线控制点数。设获取了  $m+1$  个数据点  $q_0, q_1, \dots, q_m, m > n$ , 作为一条 NURBS 轮廓曲线的节点, 则根据最小二乘拟合原理得:

$$(N^T N) D = R, \quad (3)$$

其中,  $N$  是  $(m-1) \times (n-1)$  的标量矩阵。

$$N = \begin{bmatrix} N_{1,k}(\tilde{u}_1) & \cdots & N_{n-1,k}(\tilde{u}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{1,k}(\tilde{u}_{m-1}) & \cdots & N_{n-1,k}(\tilde{u}_{m-1}) \end{bmatrix},$$

$R$  和  $D$  为含  $n-1$  个矢量元素的列阵。

$$R = \begin{bmatrix} N_{1,k}(\tilde{u}_1)r_1 + \cdots + N_{1,k}(\tilde{u}_{m-1})r_{m-1} \\ \vdots \\ N_{n-1,k}(\tilde{u}_1)r_1 + \cdots + N_{n-1,k}(\tilde{u}_{m-1})r_{m-1} \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_{n-1} \end{bmatrix}.$$

矩阵  $N^T N$  是正定的, 可由高斯消元法求解。而节点矢量  $U$  可按里森费尔德 (Riesenfeld) 方法确定, B 样条基  $N_{i,k}(u)$  由节点矢量  $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$  按德布尔-考克斯公式确定<sup>[5]</sup>。

若拟合出的曲线不满足设定的拟合误差限,

则插入控制点后继续进行最小二乘逼近拟合, 直至得出满意的结果为止。最后将每一条 NURBS 轮廓曲线的控制点列  $d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$  和有理基函数  $R_k(u)$  记录下来。

最后通过统一脚型与标准楦型中心轴坐标系, 将脚型与标准鞋楦的 NURBS 曲线在极坐标下插值, 得到曲线上若干型值点。

### 3.2 脚型特征分段

在定制鞋楦时, 需按照脚型特征在脚长方向上对脚型进行特征段划分, 分段对标准鞋楦自适应变形。可借助足印轮廓线上的特征点获取如图 2 所示的脚型和标准鞋楦的各特征段分界面  $O', A, B, C, D, E, F, G, H, I$ , 确定各分界面  $Z$  轴坐标值。

其中,  $O'$  为鞋楦端面,  $A$  为脚趾端面,  $B$  为拇趾最突点,  $C$  为小趾最突点,  $D$  为第一跖趾关节突出点,  $E$  为第五跖趾关节突出点,  $F$  为腰窝,  $G$  为踵心,  $H$  为后跟部位起点,  $I$  为脚后跟点。

## 4 定制鞋楦分段自适应算法

几何形体变形的数学本质是对其逐点进行映射, 生成满足某种要求的新的几何形状。本鞋楦定制系统是基于已知的一组曲线去构造曲面。因此, 在定制鞋楦过程中, 将曲面的变形转换为  $U$  方向上的 NURBS 曲线变形处理, 然后在  $V$  方向对 NURBS 曲线进行光滑处理, 在此基础上用蒙皮方法重构定制鞋楦的三维模型用于后续的 NC 加工。对单条 NURBS 曲线的修改主要分为整体缩放与局部修改。

### 4.1 定制鞋楦的整体缩放

以慢跑运动鞋为例, 如图 3 所示, 由第 3.1 节中的方法反算的脚型第五跖趾与腰窝部位特征段内的一段  $U$  向轮廓曲线为  $p_{\text{foot}}(u)$ , 其所对应的特征慢跑鞋楦的  $U$  向轮廓曲线为  $p_{\text{last}}(u)$ 。根据慢跑鞋的设计原理, 对标准鞋楦轮廓曲线的整体修改应满足轮廓曲线面积、楦型跗背高度与脚型跗背高度、楦底样宽度与脚底印宽度的关系约束。

算法 4.1:

(1) 输入待修改的楦型 NURBS 原型曲线和脚型原型曲线;

(2)在极坐标下对各型值点添加一定量的极半径扰动,求出可同时满足上述约束的扰动因子  $k_{opt}$ 。

(3)将扰动因子  $k_{opt}$  加入原始的标准型值点中,计算新的型值点。

(4)采用第 3 节中的方法逼近新的楦型 NURBS 曲线  $p_i'(u)$ ,对曲线  $p_i(u)$  修改后的曲线如图 3 中局部修改后的楦型曲线。

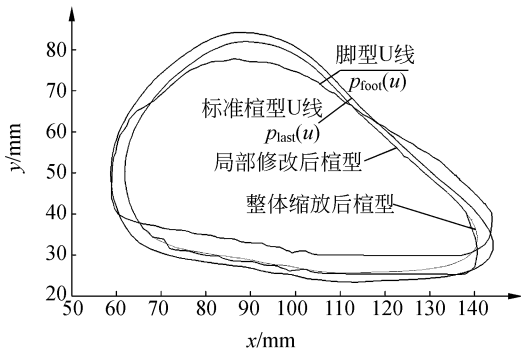


图 3 修改前后楦型曲线

Fig. 3 Curves of shoe last before and after modification

### 4.2 定制鞋楦的局部适应性修改

对于 NURBS 曲线的修改有多种方法,一般通过 3 种方法实现:修改控制顶点;调整权因子;改变节点矢量。通常对某一型值点给出的曲线几何约束条件主要有约束、切矢和曲率等<sup>[6]</sup>。本文中主要考虑点约束,即修改型值点的位置,基于能量优化的方法,通过同时改变控制顶点和权因子来实现对曲线形状的调整,这样克服了单纯采用一种修改方法的缺陷,又解决了曲线修改后的不平滑问题。

对第五趾跖与腰窝部位特征段内的鞋楦形状的局部约束应满足楦型外侧以及楦型肉体与脚型、楦型足弓位置曲率半径与足型的曲率半径、楦底部厚度等关系。

通过约束条件,计算标准鞋楦曲线  $p_{last}(u)$  上的对应参数为  $\bar{u}_l, (l=0, \dots, r)$  的若干型值点的位置,即  $\Delta p_i(\bar{u}_l)$ 。通过改变曲线  $p_{last}(u)$  上的控制顶点以及权因子或节点向量,使其修改后的曲线  $\bar{p}_{last}(u)$  在型值点处的位置变化为  $\Delta p(\bar{u}_l)$ 。NURBS 曲线的齐次坐标表示<sup>[3]</sup>为:

$$p(u) = H\{p^h(u)\}, \quad (4)$$

其中,  $p^h(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,k}(u)\epsilon_i^h$ 。

若对于型值点  $\bar{u}_l$ ,同时修改控制点  $d_{il}$  和权因子  $\omega_{il}$

$$\Delta\epsilon_{il} = \Delta(\omega_{il} \begin{bmatrix} d_{il} \\ 1 \end{bmatrix}) = \Delta\omega_{il} \begin{bmatrix} d_{il} \\ 1 \end{bmatrix} + \omega_{il} \begin{bmatrix} \Delta d_{il} \\ 0 \end{bmatrix} + \Delta\omega_{il} \begin{bmatrix} \Delta d_{il} \\ 0 \end{bmatrix},$$

经齐次方程整理后得:

$$\Delta\omega_{il}(d_{il} - \bar{p}(u_l)) + \Delta d_{il}(\Delta\omega_{il} + \omega_{il}) = \frac{\omega_{il}}{R_{il}(u)} \Delta p(u_l). \quad (5)$$

均匀细梁的应力能可表示为<sup>[7]</sup>:

$$E(p) = \int \|p^n(u)\|^2 du.$$

目标函数选取为使变化前后的应力能为最小的函数  $\int \|\bar{p}^n(u) - p^n(u)\|^2 du = \min$ 。

而

$$\int \|\bar{p}^n(u) - p^n(u)\|^2 du = \int \left\| \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\epsilon_i N_{i,k}(u) \right\|^2 du.$$

将目标函数进行 Lagrange 展开并依照约束条件变换后,可以得到矩阵形式表示的方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{N}\Delta\boldsymbol{\epsilon}^T = \Delta\mathbf{p}^T \\ 2\mathbf{L}\Delta\boldsymbol{\epsilon}^T - \mathbf{N}^T\boldsymbol{\lambda}^T = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

其中  $\boldsymbol{\lambda}_l = (\lambda_l^x, \lambda_l^y)$ ,  $\Delta\mathbf{p} = (\Delta p_0, \Delta p_1, \dots, \Delta p_r)$ 。

方程组中各矩阵分别为:

$$\mathbf{N}_l = \begin{bmatrix} N_{1,k}^{(0)}(\bar{u}_l) & N_{2,k}^{(0)}(\bar{u}_l) & \dots & N_{n-1,k}^{(0)}(\bar{u}_l) \\ N_{1,k}^{(1)}(\bar{u}_l) & N_{2,k}^{(1)}(\bar{u}_l) & \dots & N_{n-1,k}^{(1)}(\bar{u}_l) \\ N_{1,k}^{(2)}(\bar{u}_l) & N_{2,k}^{(2)}(\bar{u}_l) & \dots & N_{n-1,k}^{(2)}(\bar{u}_l) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_0 \\ N_1 \\ \vdots \\ N_r \end{bmatrix},$$

$$L_{ij} = \int N_{i,k}^n(u) N_{j,k}^n(u) du,$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1,n-1} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{n-1,1} & L_{n-1,2} & \dots & L_{n-1,n-1} \end{bmatrix}.$$

假设矩阵  $\mathbf{N}$  与  $\mathbf{L}$  的行向量线性无关,可求得方程组的解为:

$$\Delta\boldsymbol{\epsilon}^T = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{N}^T (\mathbf{N} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{N}^T)^{-1} \Delta\mathbf{p}^T. \quad (7)$$

将上式代入,则

$$p(u) = \sum_{i=0}^n (\epsilon_i + \Delta\epsilon_i) N_{i,k}(u), \quad (8)$$

即为修改后的曲线。取式(7)行向量的第  $l$  行与(5)式联立,即可得第  $l$  个变化量  $\Delta\omega_{il}$  与  $\Delta d_{il}$ 。

算法 4.2:

(1) 输入待修改的楦型 NURBS 原型曲线和脚型原型曲线;

(2) 由约束条件计算曲线  $p(u)$  上的  $q_l$ , 其参数  $\bar{u}_l (l=0, \dots, r)$ , 以及其所需改变的坐标位置  $\Delta p_l(\bar{u}_l) l=0, \dots, r-1$ .

(3) 计算矩阵方程的解  $\Delta \varepsilon$ ;

(4) 计算修改后的 NURBS 曲线  $p(u)$  以及  $\Delta \omega_{il}$  与  $\Delta d_{il}$ ;

局部修改后的楦型曲线如图 3 中所示。

### 4.3 V 向 NURBS 曲线平滑及成楦曲面造型

由前所述, 已生成  $n_1$  条定制鞋楦的 NURBS 轮廓曲线  $\bar{p}_{\text{last}}(u)$ , 对所得修改后  $U$  向曲线的型值点  $\Delta p(\bar{u}_l)$  进行  $V$  向平滑后, 可采用 3.1 节中的方法同样进行反算, 求得  $V$  方向 180 条 NURBS 曲线可表示为:

$$p_j(u) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ij} N_{i,k}(u) \quad j = 0, 1, \dots, r-1. \quad (9)$$

以这 180 条曲线的加权控制顶点  $\varepsilon_{ij}$  来定义截面曲线的控制顶点, 可得到定制鞋楦的  $(n+1) \times r$  个加权控制顶点  $\bar{\varepsilon}_{i,j} (i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, r-1)$ 。

## 5 定制鞋楦实例

由上述方法, 根据标准鞋楦为用户(典型拇指外翻畸形)所定制的鞋楦三维模型如图 4 所示。图 4(a) 为对扫描所得的拇指外翻畸形脚型建模的结果。图 4(b) 是根据脚长参数判断出的标准鞋楦模型数据库中与 4(a) 中脚型相对应的标准慢跑鞋鞋楦型。图 4(c) 是得出的定制鞋楦。从图中可见, 标准鞋楦与定制鞋楦的整体形状接近, 但图中前后两个鞋楦的围度以及鞋楦头型等处均进行了适应的修改。

### 参考文献:

- [1] 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 realiza-

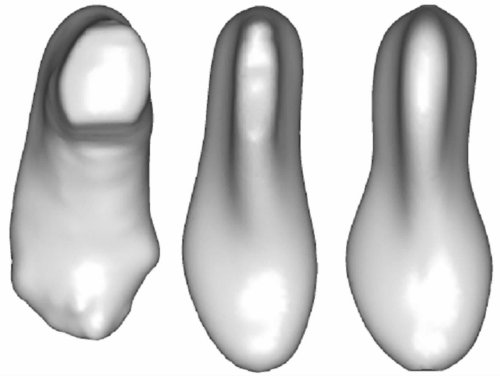


图 4 定制鞋楦三维模型

Fig. 4 3D models of customized shoe lasts

## 6 结 论

为了实现鞋楦的数字化定制, 本文提出一种基于光切法扫描的规则化脚型和鞋楦数据的定制算法, 通过划分特征段以及自适应地修改标准鞋楦模型来实现基于脚型的鞋楦造型。首先通过三维扫描系统获取标准鞋楦以及脚型数据, 并由标准鞋楦以及脚型的轮廓数据点反求得到  $U$  向 NURBS 参数曲线, 然后对每条参数曲线插值得到型值点。根据分段脚楦舒适度经验公式, 计算标准鞋楦曲线整体缩放因子以及各型值点发生局部变形的变形量, 将变形量作为点约束, 结合基于能量优化的变形算法对标准鞋楦曲线进行控制点和权因子的修改。对修改后的鞋楦数据进行  $V$  向光顺后再进行蒙面法建模处理得到新鞋楦模型。这种方法具有操作简便易行的优势, 并可针对同一脚型实现多种鞋型的定制, 同时保持鞋的舒适性与美观性。利用该算法, 由脚型扫描至生成定制鞋楦模型的时间在 120 s 之内。根据此算法完成的定制鞋楦能够在满足鞋楦美观性的基础上满足用户的舒适性需求, 并且缩短了常规手工定制鞋楦的时间, 降低了人工成本。

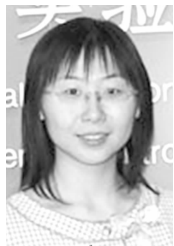
- tion of customized shoe last CAD system[J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(10): 1437-1441. (in Chinese)  
[2] 陆国栋, 顾铭秋, 王剑, 等. 基于脚部三维扫描的鞋楦建模方法研究[J]. 设计与研究, 2005, 32(4): 13-15.

- 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)
- [3] 田庆国, 葛宝臻, 杜朴, 等. 基于激光三维扫描的人体特征尺寸测量[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1): 84-88.
- TIAN Q G, GE B ZH, DU P, *et al.*. Measurement of human figure size based on laser 3D scanning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 84-88. (in Chinese)
- [4] 刘国忠, 王伯雄, 史辉, 等. 足部三维测量系统中 CCD 传感器的全局标定[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1124-1129.
- LIU G ZH, WANG B X, SHI H, *et al.*. Global calibration of CCD cameras in measurement system for 3-D foot shapes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1124-1129. (in Chinese)
- [5] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- ZHU X X. *Modeling Technology of Freeform Curve and Surface* [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [6] PIEGL L. Modifying the shape of rational B-splines, part 1: curves[J]. *Computer Aided Design*, 1989, 21(8): 509-518.
- [7] 柳晓燕. NURBS 曲线面形状修改[D]. 西安: 西北大学硕士论文, 2006.
- LIU X Y. *On shape modification of NURBS curves and surfaces* [D]. Xi'an: Northwest Univ., 2006. (in Chinese)

## 作者简介:



史辉(1984—),女,江西南昌人,博士,2005年毕业于清华大学获学士学位,2009年于清华大学获博士学位,现为中国人民解放军装甲兵装备技术研究工程师,主要从事非接触式三维轮廓测量等方向的研究。E-mail: shih@mails. tsinghua. edu. cn



贾倩倩(1982—),女,山西大同人,博士研究生,2005年于清华大学获学士学位,现在主要从事质量检测与控制方向的研究。E-mail: gqq@mails. tsinghua. edu. cn



罗秀芝(1964—),女,湖北武汉人,高级工程师,1988年毕业于清华大学获学士学位,现在清华大学精密仪器与测量技术实验室工作,主要从事机械系统动态测试方面的研究。E-mail: luoxz@pim. 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年和1982于清华大学精密仪器与机械制造系分别获学士学位和硕士学位,主要从事精密仪器与测试技术, MEMS 技术, 光学测量技术, 生物医学技术的研究。E-mail: wangbx@mail. tsinghua. edu. cn