

文章编号: 0253-2239(2009)03-0712-06

# 基于光切法形貌测量的鞋楦定制专家系统

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

(<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072

**摘要** 为满足运动鞋制造业中个性化的需求, 建立了基于光切法进行三维形貌测量的鞋楦定制专家系统。提出了参数化的标准鞋楦模型数据库, 采用最小二乘拟合逼近方法将鞋楦点云数据表示为 NURBS 曲线从而建立该数据库。提出了根据脚型特征端点对脚型分段的方法。以制鞋经验公式与国家标准为依据, 在足印点轮廓区规定出初始分段, 然后以产生式的表达规则建立分段鞋楦舒适度经验知识库。将标准鞋楦模型数据库、经验知识库结合推理机制, 建立起运动鞋楦定制的专家系统概念, 并利用该概念建立起针对运动鞋楦的专家系统, 对特定脚型进行了运动鞋楦的定制, 此类专家系统可推广至各类鞋楦。

**关键词** 专家系统; 非均匀有理 B 样条曲线; 标准鞋楦模型数据库; 鞋楦舒适度经验知识库; 产生式知识表达规则  
中图分类号 TG659 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0712

## Establishment of Customized Shoe Last Expert System Based on Light Sectioning Method

Shi Hui<sup>1,2</sup> Wang Boxiong<sup>1</sup> Jia Qianqian<sup>1</sup> Luo Xiuzhi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, the Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China

**Abstract** To make customised sports shoes, a customized shoe last expert system is established based on the light sectioning method for 3D profile measurement. A least square fitting method is proposed to approximate the scanned cloud data, to establish the parameterized standard shoe last database in form of NURBS curves. A foot shape subsectioning method based on the shape feature points is used to establish the segmental empirical repository of shoe last conformability by using the generative formula. The expert system is therefore formed with the standard shoe last database and the segmental empirical repository. With the expert system, special shoe last is customizod, and the system can spread to other kinds of shoes.

**Key words** expert system; Non-Uniform Rational B-Spline; standard shoe last database; segmental empirical repository of shoe last conformability; generative formula

## 1 引 言

鞋楦在制鞋业中具有关键作用, 根据个性足型生产出相应的鞋楦, 是未来制鞋业发展的方向<sup>[1~3]</sup>。众所周之, 为个人定制一双舒适的鞋楦, 需要鞋楦技师长期而丰富的经验。如何更科学有效地

为特定脚型定制出符合其脚型特征的鞋楦, 是定制鞋楦的技术难点与重点。利用计算机智能技术模仿制鞋业专家对鞋楦制造的经验、知识和各种不同鞋楦的楦舒适度经验公式, 从而自动实现鞋楦定制, 是上述技术的发展趋势。

收稿日期: 2008-06-10; 收到修改稿日期: 2008-08-20

基金项目: 科技部中德科技合作重点项目(2003DFB00028)资助课题。

作者简介: 史 辉(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事三维形貌测量及逆向工程研究。E-mail: shih@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 王伯雄(1947—), 男, 教授, 主要从事精密仪器与测试技术, MEMS 技术, 光学测量技术, 生物医学技术方面的研究。E-mail: wangbx@tsinghua.edu.cn

目前,国内外有各种鞋楦及鞋样设计软件问世,如意大利 New last 公司的 Easylast3D 软件,台湾理星鞋楦缩放系统<sup>[4]</sup>等,这类软件可以实现对已有的鞋楦进行鞋楦拼接、底板编辑等功能,但均是对已有楦样进行修改,不能实现针对特定脚型的鞋楦计算机辅助设计。浙江大学 CAD&CG 研究中心所研制的量脚制鞋系统<sup>[5~6]</sup>利用立体视觉进行脚型测量,该系统在测量时需要测试者穿着特殊制作的袜子,并仅能针对皮鞋鞋楦进行定制。定制鞋楦生成方法是从三维脚型数据中抽取某些特征点后,再根据特征点建立鞋楦三角网格并进行细分后获得楦型,并不能完全满足定制鞋楦的美观性与舒适性需求。

目前,光学测量方法广泛用于对脚型和鞋楦数据的获取<sup>[7~9]</sup>。本文基于光切法原理对鞋楦进行三维扫描获取 360°鞋楦轮廓点云数据,并提出依靠获取的点数据建立鞋楦定制专家系统。本文的鞋楦定制专家系统的数据库及知识库均针对运动鞋楦设计,实际应用时通过人机接口获取知识,可以推广至各类民用及特种鞋楦。

## 2 鞋楦定制专家系统

通过三维扫描系统获取标准运动鞋楦以及脚型数据,利用获取的标准运动鞋楦数据建立参数化的标准运动鞋楦模型数据库。通过人机接口进行知识获取,建立以产生式表达规则所表示的分段鞋楦舒适度经验知识库,然后运用推理机制得出实现根据脚型对标准鞋楦模型的整体缩放和局部变形的参数点以及参数点对应的变形量。系统的结构模块如图 1 所示。

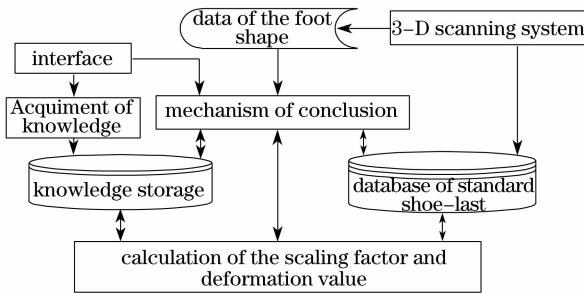


图 1 鞋楦定制专家系统模块图

ig. 1 Block diagram of customized shoe-last expert system

## 3 基于光切法的标准鞋楦及脚型数据获取

本系统中的数据采集设备采用自主研发的基于激光线扫描原理的光切法测量系统,如图 2 中示出。

以图中示出的激光平面与单元运动方向确定世界坐标系  $W_{XYZ}$ 。该系统由运动平台及其伺服电机驱动单元、和 CCD 多路图像同步采集单元构成。采用光切法进行非接触式三维扫描,激光器和 CCD 沿  $Z$  轴方向平移,CCD 每隔 0.5 mm 取一组图像。经坐标转换与光条拼接后,沿  $Z$  坐标平行于  $XY$  平面方向得到  $l_f$  条剖面轮廓线的形为  $(x, y, z)$  的点云数据。

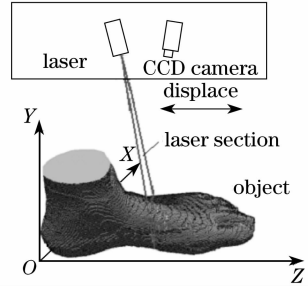


图 2 测量系统原理图

Fig. 2 Principle diagram of measurement system

## 4 参数化的标准鞋楦数据库建立

国家制鞋标准中,分别按照男 255 号,女 230 号进行等差扩缩。因此,在建立标准运动鞋楦数据库时,将标准运动鞋楦选定为与国家标准型一致。例如,选用鞋号为 255 号的男慢跑鞋作为慢跑鞋标准鞋楦模型。

如图 3 所示,采用光切法三维扫描仪获取标准运动鞋楦的数据,将标准鞋楦置入定制的摆放架中,该摆放架的纵轴方向垂直于光平面。求取测量所得标准鞋楦轮廓点云中, $Z$  轴坐标最大和最小点云圈中  $Y$  轴坐标最小的两点,分别定位楦后跟  $P$  点和楦尖  $A$  点。由它们所定义的直线来确定标准楦的中心轴,由鞋楦的测量原理可知  $PA$  与  $Z$  轴重合。

测量将得到  $l_1$  条剖面轮廓线的点云数据( $l_1 \neq l_1$ )。先对获取的数据进行预处理,即进行平滑去噪。针对节点采用平均值过滤方法,进行平滑滤波并利用最小二乘拟合方法剔除误差数据点。

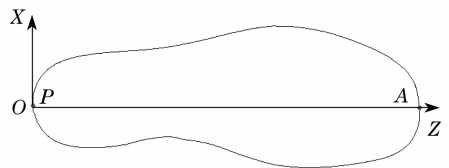


图 3 楦后跟  $P$  点和楦尖  $A$  点

Fig. 3 Heel point  $P$  and top point  $A$

随后将预处理后的规则化轮廓点云拟合为  $l_1$  条如图 4 中示出的  $U$  向 NURBS 曲线。以参数曲线的数据结构将标准运动鞋楦数据存储于数据库中

便于实现后续根据脚型对标准鞋楦模型的自适应缩放及局部修改。分别将  $l_1$  条剖面轮廓线上的点云数据作为节点拟合成为 U 向的  $l_1$  条 NURBS 曲线。NURBS 曲线可表示为<sup>[10]</sup>

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

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

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

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。

设第  $l_1$  圈鞋楦轮廓数据经平均滤波后, 有  $m+1$  个数据点  $q_0, q_1, \dots, q_m, m > n$ 。逼近曲线的次数  $k \geq 1$ , 寻找一条  $k$  次 NURBS 样条曲线满足  $q_0 = p(0), q_m = p(1)$ ; 其余数据点  $q_i (i=1, 2, \dots, m-1)$  在最小二乘意义上被逼近, 即目标函数

$$f = \sum_{i=1}^{m-1} [q_i - p(\tilde{u}_i)]^2 \quad (3)$$

是关于  $n-1$  个控制顶点  $d_j (j=1, 2, \dots, n-1)$  的一个最小值。这给出了一个以控制顶点  $d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$  为未知量的线性方程。让  $l=1, 2, \dots, m-1$ , 则得到含该  $n-1$  个未知量的  $n-1$  维方程组:

$$(N^T N) D = R, \quad (4)$$

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  $(N^T N)$  正定, 可由高斯消元法求解。数据点到拟合曲线的最大距离可以定义为

$$\max_{0 \leq i \leq m} [\min_{0 \leq u \leq 1} |q_i - p(u)|]. \quad (5)$$

在拟合的过程中可根据经验给定控制点的数目, 使用整体拟合的方法将数据点拟合成一条逼近曲线, 然后检查逼近曲线对数据点的偏差。当偏差小于给定的误差  $E$  时输出结果, 反之则可以插入节点的方

法增加控制顶点的数量, 继续进行拟合。这样即可构成所需的  $l_1$  条 U 向 NURBS 曲线  $p(u)$ , 此  $l_1$  条 U 向 NURBS 曲线  $p(u)$  将作为标准鞋楦的原始表达参数曲线存入标准鞋楦数据库。

## 5 分段脚楦舒适度经验知识库

以扫描的三维脚型为基础进行鞋楦的设计可以增加鞋的和脚性, 首先必须了解解剖学上的脚骨分布形态以及生物力学上脚行进时的状态变化, 才能在几何外形与功能量方面决定哪些是重要的脚型特征。在建立定制鞋楦专家系统时, 按照这些特征, 在脚长方向上对脚型进行特征段划分, 并将各特征段的脚楦舒适度关系经验公式以基于产生式系统原理<sup>[11]</sup>的知识表示方法加入知识库中, 最后应用推理机制计算出标准鞋楦模型的整体缩放和局部变形的参数点以及参数点对应的需变形量。

### 5.1 脚型特征段的选取

在脚型坐标系中, 按图 4 所示对脚型进行分段, 并与标准鞋楦的分段相对应。O' 为鞋楦端面, A 为脚趾端点, 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。将高度在 1.5 mm 以下的表面点取为足印点, 从而取得足印轮廓线, 可以借助足印轮廓线, 以及处于 XOY 平面内的鞋楦轮廓线获取各特征段分界面 O', A, B, C, D, E, F, G, H, I 的 Z 坐标。

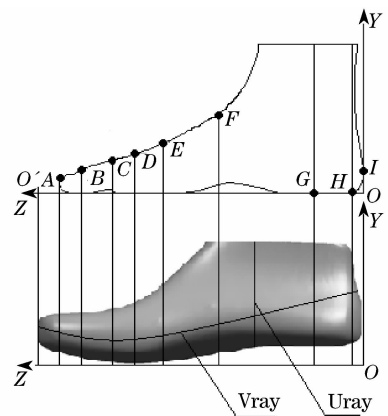


图 4 脚-楦特征分段

Fig. 4 Feature segment of foot and shoe-last

首先以制鞋经验公式与国家标准为依据, 在足印点轮廓区规定出初始分段, 分别为第一足趾部足印轮廓区(1区)、脚掌部足印轮廓区(2区)、腰窝部足印轮廓区(3区)、踵心部足印轮廓区(4区)、后跟部足印轮廓区(5区)。

然后,在各初步分区定出各特征段端点:

O': 数据库中标标准慢跑鞋楦的首条 U 向闭合 NURBS 曲线构成的面为鞋楦端面。

A: 用户脚型数据中首条 U 向闭合 NURBS 曲线构成的面为脚趾端面。

B: 1 区中点云数据的 X 坐标取最大值时所对应 U 向 NURBS 曲线为拇趾最突点面。

C: 逐渐增加 Z 坐标值,当 2 区中点云数据的 X 坐标取第一个最小值时所对应 U 向 NURBS 曲线为小趾最突点面。

D: 2 区中点云数据的 X 坐标取最大值时对应 U 向 NURBS 曲线为第一跖趾关节突出点面。

E: 逐渐增加 Z 坐标值,当 2 区中点云数据的 X 坐标取第二个最小值时所对应 U 向 NURBS 曲线为第五跖趾关节突出点面。

G: 4 区中 X 坐标取最大值时所对应 U 向 NURBS 曲线为踵心面。

以上的特征分段均在图 5(a)中的足印轮廓线中寻找。

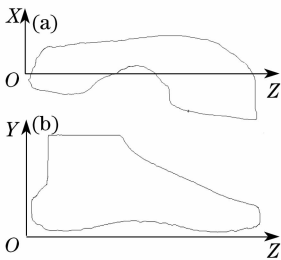


图 5 轮廓线示意图。(a) 足印轮廓;(b) 足弓轮廓

Fig. 5 Diagram of contour line. (a) Footprint; (b) arch

F: 利用图 4(a)的足印轮廓线上的 4 区中 X 坐标取最大值时所对应的点与在足印轮廓线上的 2 区中 X 坐标取最大值时所对应的点连线确定如图 4(b)所示的足弓剖面线,逐渐增加 Z 坐标值,求取平行于 XOY 平面的若干平面与足够剖面线的一对交点,Y 值较小的为下交点,在所有下交点中取 Y 值最大时所对应的 U 向 NURBS 曲线为腰窝面。

H: 足弓剖面线上 Z 坐标取最大值时所对应的 U 向闭合 NURBS 曲线构成的面为后跟部位起点面。

I: 用户脚型数据中最末条 U 向闭合 NURBS 曲线构成的面为脚后跟点面。

通过编程,将上述选取脚型特征端点的方法编写为自动化程序,即可实现常规脚长方向的特征段自动划分。

计算各特征段长度与脚长的比例后可按照相同

比例在 PA 的长度内划分标准鞋楦与脚型对应的各特征段。

### 5.2 运动鞋的分段脚楦舒适度经验

慢跑鞋各特征段脚型与运动鞋楦型舒适度基本对应关系以及经验公式依据一定的原则来确定,对于不同的特征分段,脚楦之间有不同的对应关系以及设计经验。例如:

1) 鞋楦端点至脚趾端点段(O'A):此处涉及慢跑鞋的前翘高度以及头型设计,参照标准运动鞋楦数据库中的慢跑鞋前翘高指标确定。圆头式大多用于跑步训练鞋、网球训练鞋、足球鞋的楦型设计。

2) 脚趾端点至拇趾最突点段(AB):该段鞋楦全宽不可以小于足轮廓线的宽度,高度方向依据脚趾部位的厚度外加鞋垫厚度而定。

3) 第一跖趾关节突出点至第五跖趾关节突出点段(DE):该段鞋楦全宽不可以小于足轮廓线的宽度,前掌凸度不可超过 5 mm,其底样宽度尺寸需控制在足轮廓线和足印轮廓线间。

此外,在拇趾最突点至小趾最突点段(BC)、小趾最突点至第一跖趾关节突出点段(CD)、第五跖趾关节突出点至腰窝段(EF)、腰窝至踵心段(FG)、踵心至后身部位起点段(GH)、后跟部位起点至脚后跟点段(HI)也分别有其特定对应关系。

### 5.3 产生式的经验知识库表达规则

将由扫描仪测量所得的脚型数据按照第三节所述的方法转换为与 U 向 NURBS 曲线  $U_F$ 。在人机接口下用户选择自己需要定制的鞋种类。若用户输入定制慢跑鞋指令,则专家系统从前述标准鞋楦库中调入标准慢跑鞋楦曲线  $U_L$ ,进入推理过程。以第五跖趾关节突出点至腰窝段 EF 的一段 U 方向脚型和与它对应的标准楦型曲线  $U_{F1}, U_{L1}$  为例介绍经验知识库的表示规则,如图 6 所示。

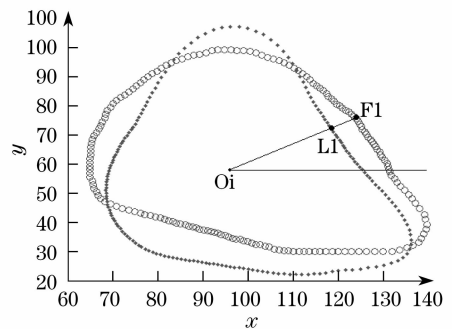


图 6  $U_{F1}, U_{L1}$  曲线

Fig. 6  $U_{F1}, U_{L1}$  curves

**IF**  $Z(U_{F1}) \subset Z(EF)$  **THEN**

**IF**  
 $\text{dist\_aero} = | \text{aero}(U_{F1}) - \text{aero}(U_{L1}) | \geq \text{aeroerror}_{\max}$

**THEN**  $\Delta\rho_i = f(\text{dist\_aero})$

**IF**  $\text{dist\_}\rho(i) = | \rho(F_i) - \rho(L_i) | \geq \rho\_error_{\max}(i)$

**THEN**  $u_i = L_i(x, y)$

$\Delta P(u_i) = f[u_i, \text{dist\_}\rho(i)]$ ,

其中  $Z(U_{F1})$  表示  $U_{F1}$  曲线的  $Z$  坐标,  $\text{aero}(U_{F1})$  表示  $U_{F1}$  曲线围成的面积,  $\Delta\rho_i$  为标准鞋楦曲线  $U_{L1}$  的总体缩放半径,  $\rho(F_i)$  为曲线  $U_{F1}$  上的点  $F_i$  的极半径,  $\Delta P(u_i)$  为推理出的曲线  $U_{L1}$  的局部修改变化量。

通过推理机制,依据知识库中的表达规则进行判断与计算,从而得出标准鞋楦模型的整体缩放和局部变形的参数点以及参数点对应的变形量,可用于后续算法,以生成以及建立个性化鞋楦的模型。

#### 5.4 特殊脚型分段以及舒适度公式确定

在上述三个小节中所述的脚型之外,还需对各种类型的特殊脚型进行特征段划分。对于特殊脚型的划分和舒适度公式的确定是一个长期积累的过程。最常见的特殊脚型为足弓塌陷、拇指内外翻、脚趾残缺等,此外还有很多其它的特殊形态。

对特殊脚型的特征段端点的标准较之上述常规脚型有适当修改。首先应判断用户的脚型为何种特殊脚类型,随后利用程序进行特征段求取,当程序求出的脚型特征分段偏离该种特殊脚型群体的统计规律超出一定误差限时,则将足型的初始分段(1区、2区等)定为当前特征段。

对于每一种特殊脚形态,还需在上述的舒适度经验基础上进行一定调整,进而修改后序的经验知识库表达规则。例如,对足弓塌陷的患者需调整第五跖趾关节突出点至腰窝段(EF)、腰窝至踵心段(FG)的舒适度关系及知识库表达规则,而对拇指外翻患者需调整第一跖趾关节突出点至第五跖趾关节突出点段(DE)的舒适度关系,从而实现舒适度和矫形功能的最优配置。本系统对于这样的脚型建立了初步的专家系统,如第五节中所述。但建立完备的特殊脚型专家系统需要长期的工作过程:利用扫描仪获取各种特殊脚型的三维模型,并搜集各种特殊脚型的着鞋习惯,反复为患者制作定制鞋样并获取反馈意见从而得出最优脚楦舒适度的对应关系。

### 6 特定脚型的运动鞋楦定制实例

根据本文提出的专家系统概念开发出了运动鞋中的慢跑鞋楦的专家系统原型,并针对某些脚型进

行了定制,本文给出针对一例典型的畸形脚——拇外翻畸形进行的慢跑鞋楦定制过程。图7(a)为对扫描所得的拇外翻畸形脚型建模的结果。图7(b)是根据脚长参数判断出的标准鞋楦模型数据库中与图7(a)中脚型相对应的标准慢跑鞋鞋楦型。图7(c)是得出的定制鞋楦,其定制步骤如下:

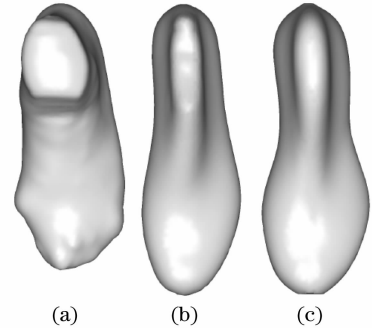


图7 特定脚型的运动鞋楦定制实例

Fig. 7 An example of customized sports shoe last

- 1) 将测量脚型数据拟合成为  $l_f$  条 NURBS 曲线;
- 2) 根据脚长参数选取相应的标准慢跑鞋鞋楦型(标准鞋楦包含  $l_f$  条 NURBS 曲线);
- 3) 将  $l_f$  条标准 NURBS 曲线进行插值等的整体缩放,转换为  $l_f$  条 NURBS 曲线。并对脚型和标准鞋楦型按照 4.1 小节的原理进行特征段分段;
- 4) 判断脚型为常规脚型或畸形脚型,根据脚型在系统中特征选取慢跑鞋的各特征段脚楦舒适度经验公式;
- 5) 计算标准鞋楦模型进行局部变形的参数点以及参数点对应的变形量,从而对标准鞋楦变形的  $l_f$  条 NURBS 曲线进行变形,得出由  $l_f$  条变形后的 NURBS 曲线表示的定制鞋楦模型。

由图中可以看出,如果拇外翻畸形患者穿着图7(b)中楦型的慢跑鞋运动,将会由于跖趾部位过窄而导致脚骨及脚面受伤。而由图7(c)根据脚楦舒适度得出的楦型图7(c)在第一五跖趾关节、腰窝以及后跟部位都更接近脚型,经实际受试者反映穿着更具舒适性,如图中所示。定制鞋楦的美观性也没有受到影响。

### 7 结 论

提出了包括标准鞋楦模型数据库、经验知识库、以及推理机制的运动鞋楦定制专家系统的概念。首先通过光切法三维扫描系统获取标准运动鞋楦以及脚型数据,然后提出了对三维扫描的点云数据的最

小二乘拟合逼近方法,将鞋楦点云数据表示为 NURBS 曲线从而建立了该参数化的标准鞋楦模型数据库。提出了根据脚型特征端点对脚型分段的方法,首先以制鞋经验公式与国家标准为依据,在足印点轮廓区规定出初始分段,然后以产生式的表达规则建立分段鞋楦舒适度经验知识库。最后依据知识库中的表达规则进行判断与计算,从而得出标准鞋楦模型的整体缩放和局部变形的参数点以及参数点对应的变形量,建立个性化鞋楦的模型。对特定脚型进行了实例的运动鞋楦的定制。该系统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定制,可同时保持鞋的舒适性与美观性要求,简化了定制鞋楦的流程,缩短了定制时间。该专家系统的建立与完善,对促进我国制鞋业达到世界先进水平具有深远意义。

### 参 考 文 献

- 1 Peng Xiaobo, Zheng Xianchao, Hu Lin. Web based customization system for shoe products [J]. *Control and Automation Publication Group*, 2007, **24**(05-3):128~130  
彭小波,郑先超,胡琳. 基于 WEB 的鞋产品个性化定制系统 [J]. 微计算机信息, 2007, **24**(05-3):128~130
- 2 Wang Jian. *Research & Application on the Technologies of Custom Shoe-Last Modeling and Modification* [D]. Hangzhou: Zhejiang Univ. 2004  
王剑. 鞋楦 CAD 中定制鞋楦造型和修改技术研究及应用 [D]. 杭州:浙江大学硕士论文,2004
- 3 Chen Yiwen. Last designing of leather shoes made to order [J]. *Sichuan Leather*, 2000, **22**(02):26~27  
陈益文. 定制皮鞋的鞋楦设计 [J]. 四川皮革, 2000, **22**(02):26~27
- 4 Chen Guoxue. *Shoe-Last Design* [M]. Shanghai: Light Industry Press, 2005  
陈国学. 鞋楦设计 [M]. 上海:轻工业出版社,2005
- 5 Xu Congfu, Liu Yong, Jiang Yunliang. Design and realization of customized shoe last CAD system [J]. *J. Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2004, **16**(10):1437~1441  
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
- 6 Lu Guodong, Gu Mingqiu, Wang Jian. Research of shoe-last modeling algorithm based on feet range scans [J]. *Design and Research*, 2005, **32**(4):13~15  
陆国栋,顾铭秋,王剑. 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
- 7 Liu Guozhong. *Research on 3D Foot-Shape Measurement System Under Different Loads and Key Techniques* [D]. Beijing: Tsinghua Univ, 2007  
刘国忠. 不同负荷下足型三维形貌测量系统设计 [D]. 北京:清华大学博士论文,2007
- 8 Liu Guozhong, Wang Boxiong, Shi Hui. Global calibration of CCD cameras in measurement system for 3-D foot shapes [J]. *Optics And Precision Engineering*, 2007, **07**(20):1124~1129.  
刘国忠,王伯雄,史辉. 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, **07**(20):1124~1129
- 9 Douros I, Dekker L, Buxton B F. An improved algorithm for reconstruction of the surface of the human body from 3D scanner data using local B-spline patches [A]. In: *Workshop Proce. of IEEE-ICCV99* [C]. 1999. 29~36
- 10 Chen Huacheng. *Study of Automatic Inspection System Integrated with Multiple Measurement Techniques* [M]. Beijing: Tsinghua Univ, 2007  
陈华成. 集成多测量技术自动检测系统的研究 [D]. 北京:清华大学博士论文,2006
- 11 Cheek K S, Ai K S. An approach to knowledge in database system [J]. *Application Intellect*, 1992, **5**(3):413~423