

DOI: 10.3901/JME.2008.08.085

鞋底曲面数据提取与喷胶轨迹的自动生成方法*

武传宇 贺磊盈 李秦川 胡旭东

(浙江理工大学浙江省现代纺织装备技术重点实验室 杭州 310018)

摘要: 为快速有效地提取鞋底曲面信息和生成喷胶轨迹,提出一种基于线结构光扫描鞋底曲面的方法。利用线结构光三维测量原理,扫描套在鞋楦上的鞋帮底面,获得表示鞋底曲面信息的点云数据。用 B 样条曲线拟合出一系列的三维扫描线,生成封闭的鞋底轮廓线,计算鞋底轮廓线在鞋底曲面的偏置曲线得到喷胶轨迹。构建线结构光扫描鞋帮底面的试验装置,计算其在 x 、 y 和 z 轴方向上的测量误差分别为 0.094、0、0.015 mm,满足系统精度要求。最后将生成的喷胶轨迹通过坐标变换应用于 Stäubli 机器人自动喷胶系统,验证了方法的有效性和可行性。

关键词: 线结构光 轨迹 B 样条 插值

中图分类号: TP391

Method for Extraction of Information of Shoe Upper and for Automatic Generation of Spraying Trajectory

WU Chuanyu HE Leiying LI Qinchuan HU Xudong

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Modern Textile Machinery,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018)

Abstract: To rapidly and effectively extract the information of shoe upper and generate the spraying trajectory, a method for scanning shoe upper based on linear structured light is proposed. On the principle of the 3D measurement with linear structured light, after scanning a lasted shoe upper, the information of shoe sole is rendered by point clouds data. 3D scan curves are fitted as B-spline curves, and a closed contour line of shoe sole is interpolated. By calculating the offset curve of shoe upper contour on the shoe upper, the spraying trajectory is obtained. The experimental facility for scanning shoe upper with linear structured light is constructed, and its measurement errors in x , y and z directions are calculated to be 0.094, 0 and 0.015 mm respectively, which satisfies the requirement of system precision. Finally, the generated trajectory after coordinate transformation is applied in shoe upper spraying system with Stäubli industrial robot. The results prove that the proposed method is effective and feasible.

Key words: Linear structured light Trajectory B-spline Interpolation

0 前言

鞋底喷胶工序在整个制鞋过程中是一个非常重要的环节,它决定了鞋子的耐用性。然而目前鞋底喷胶工序多数采用手工或手工半自动化操作,生产效率低,另外喷胶过程中黏胶剂挥发出来的有毒气体严重威胁工人的身体健康,在很大程度上制约了制鞋行业的健康发展。

实现喷胶工序的自动化关键在于鞋底曲面数据的提取及喷胶轨迹的自动生成。针对这个问题,国内外许多学者做了很多富有成效的研究。左力等^[1]发明一种鞋大底自动点胶机, KWON 等^[2]提出一种基于鞋底平面轮廓线生成喷胶轨迹的方法。上述方法生成的喷胶轨迹是平面曲线,不能准确地反映鞋底的形状。KIM^[3]提出一种基于鞋底三视图和鞋帮的三维扫描数据自动提取喷胶轨迹的方法,该方法操作复杂,很难有效地控制精度。HU 等^[4]提出一种应用机器视觉扫描鞋帮底面自动生成轨迹的方法。该方法新颖,具备很强的通用性,但是提取的轨迹不能保证落在鞋帮底面,且无法计算轨迹上目标点

* 国家自然科学基金(50705089)、浙江省自然科学基金(Z104608)和浙江省重大科技攻关(2004C14002)资助项目。20070918 收到初稿,20080214 收到修改稿

在鞋帮底面的法线方向。针对上述问题, 本文提出了一种新的基于线结构光提取鞋底喷胶轨迹的方法。

1 线结构光测量模型及坐标系变换

如图 1 所示, 采用线结构光提取鞋底曲面数据的基本原理为: 摄像机和线激光指示器均安装于线性轨道的滑块上, 二者无相对运动, 鞋帮固定不动。滑块运动时, 线激光连续扫描鞋帮底面, 同时由摄像机采集激光扫描线, 计算图像光条中心得到鞋帮底面的三维点云数据, 并拟合成一组三维扫描线表示鞋底曲面。进而可以提取鞋底轮廓线, 根据喷胶参数计算喷胶的轨迹曲线。

如图 1, 建立系统世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$, $O_w z_w$ 轴竖直向上, $O_w y_w$ 轴指向线激光的正运动方向, 根据右手法则确定 $O_w x_w$ 轴方向, 选取一个特征点作为原点 O_w 。

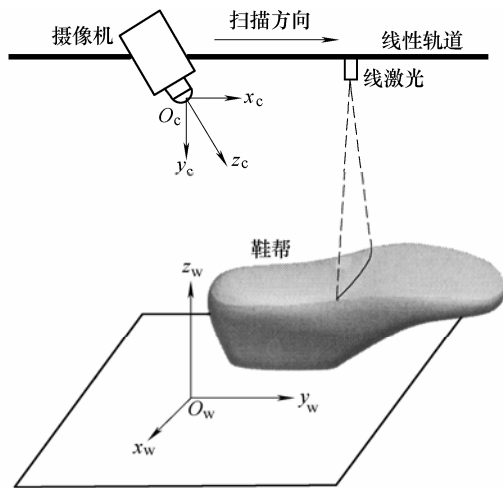


图 1 线结构光测量模型

摄像机模型的建立如图 2 所示, $O_c x_c y_c z_c$ 为摄像机坐标系, Oxy 表示摄像机像面坐标系, 而 $O_f x_f y_f$ 则表示计算机图像像素坐标系。

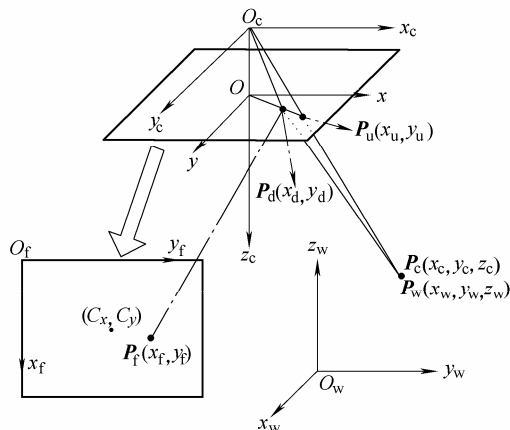


图 2 摄像机模型

世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ 到摄像机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 的变换关系为

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $r_1 \sim r_9$ 为旋转正交矩阵 R 的分量, $(t_x \ t_y \ t_z)^T$ 为平移矢量 T 。

摄像机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 与像面坐标系 Oxy 的关系为

$$z_c \begin{pmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, f 为摄像机的有效焦距, 考虑到图像的一阶径向畸变, 有

$$\begin{cases} x_u = (1 + k\rho^2)x_d \\ y_u = (1 + k\rho^2)y_d \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\rho^2 = x_d^2 + y_d^2$, k 为一阶径向畸变系数, 下标 u 表示理想的像面坐标, 下标 d 表示畸变后实际的像面坐标。

根据式(4)计算实际的像面坐标

$$\begin{cases} x_d = s_x d_x (x_f - C_x) \\ y_d = d_y (y_f - C_y) \end{cases} \quad (4)$$

式中, d_x 、 d_y 分别表示 CCD 像面中 x 、 y 方向相邻两个单元之间的距离, s_x 是未知的水平缩放因子, C_x 、 C_y 表示计算机图像的径向畸变中心, 下标 f 表示计算机图像的像素坐标。

为了获得摄像机内部几何和光学特性等内部参数, 以及摄像机在世界坐标系中的位置和方向, 即外部参数, 采用 TSAI^[5] 的两步法, 并结合赵小松等^[6] 的方法标定摄像机的内外参数。首先用径向准直径约束求解模型参数的大部分, 然后再用非线性搜索求解畸变系数和有效焦距等参数。

2 鞋底曲面数据提取

鞋底曲面可以由摄像机采集得到的一组激光扫描线近似表示。本文计算提取图像光条中心得到鞋帮底面的三维点云数据, 并拟合成一组三维扫描线表示鞋底曲面。由于获得的图像中激光光条具有一定的宽度, 必须提取亚像素级的激光条纹中心, 具体分为 3 个步骤^[7]。

(1) 分析原始样本的图像直方图, 选取适当的

边缘检测阈值检测激光光条的像素级边缘点。由于激光光条在图像中基本处于水平,因此图像均采用列扫描方式检测。

(2) 为避免图像中噪声对光条的干扰,在每列扫描中,以像素级边缘点为中心,长度为激光光条宽度的区间进行中值滤波。

(3) 逐列扫描中值滤波后的光条,权衡算法的精度和效率,利用灰度重心法计算光条中心坐标 $(x, \sum G(p_i)y_i / \sum G(p_i))$, 其中 y_i 表示光条截面内一点 p_i 的 y 轴坐标, $G(p_i)$ 表示该点的图像灰度值。

从二维光条中心点的图像坐标转化成三维的坐标数据,必须添加一个约束条件。设置激光光条平面平行于世界坐标系 $x_w O_w z_w$ 平面,这就保证了每帧图像中的光条中心点在世界坐标系中的 y 轴坐标 y_w 是已知的,因此可以通过式(5)计算扫描线的另外两个坐标值 x_w 和 z_w

$$\begin{pmatrix} x_w \\ z_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_u r_7 - f r_1 & x_u r_9 - f r_3 \\ x_u r_7 - f r_4 & x_u r_9 - f r_6 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} f r_2 y_w + f t_x - x_u r_8 y_w - x_u t_z \\ f r_5 y_w + f t_y - x_u r_8 y_w - x_u t_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

根据式(5)计算得到的三维数据点,用迭代最近点的B样条曲线拟合方法^[8]生成三维扫描线。拟合的具体步骤如下。

(1) 参数化数据点集 P 得到参数 $U^q = \{u_i^q : i=0, 1, 2, \dots, r\}$, 设迭代次数 $q=0$ 。

(2) 利用最小二乘法求取控制点 $D^q = \{d_j^q : j=0, 1, 2, \dots, n\}$, 同时得到B样条曲线 $S^q(u)$ 。

(3) 计算与参数 $U^q = \{u_i^q : i=0, 1, 2, \dots, r\}$ 对应的B样条曲线点集 $X^q = \{x_i^q : i=0, 1, 2, \dots, r\}$, 并计算与数据点集 P 的均方差 e^q 。

(4) 计算数据点集在 $S^q(u)$ 曲线中的对应最近点集, 设 $q=q+1$, 并将其对应最近点集的参数作为该数据点集的新参数 U^q 。

(5) 返回至步骤(2), 进一步得到曲线 $S^q(u)$, 计算均方差 e^q , 直到 $\Delta e = |e^q - e^{q-1}| < \varepsilon$, 其中 ε 是给定的精度。

3 喷胶轨迹的生成

3.1 轮廓线的生成

假设三维扫描线的两个端点是鞋帮底面的边界点。提取所有扫描线的端点,应用三次非均匀封闭B样条的插值算法^[9]计算鞋帮底面轮廓线,算法如下。

对数据点 $q_i (i=0, 1, \dots, m)$ 规范积累弦长参数化得到节点矢量 T 。数据点集 Q 在B样条曲线 $C(t)$ 上,于是有矩阵

$$Q = ND \quad (6)$$

式中 Q 是包含 $n-2$ 个数据点的 $(n-2) \times 3$ 矩阵, N 是 $(n-2) \times (n-2)$ 的B样条基函数系数矩阵, D 是包含 $n-2$ 个未知控制顶点的 $(n-2) \times 3$ 矩阵。 $n+1$ 为控制顶点个数,对于封闭的三次B样条曲线 $n=m+2$ 。解线性方程组式(6)得到 $n-2$ 个控制顶点,由于首尾3个控制顶点重复得到另外3个控制顶点,从而确定了封闭的轮廓曲线 $C(t)$ 。

3.2 轨迹曲线的生成

文献[4]计算得到的轨迹曲线是轮廓线在其主法线方向的一条偏置曲线,它不能保证轨迹曲线落在鞋帮底面。本文提出了一种生成轨迹的新方法,它最大可能地保证了轨迹曲线落在鞋帮底面。首先,以轮廓线为脊线,作一个半径为 r 的管道曲面,计算管道曲面与扫描线的交点(称之为轨迹点);然后根据这些轨迹点反算封闭的轨迹曲线。

根据定义,轨迹点的计算公式为

$$\begin{cases} [S_x(u) - C_x(t)]^2 + [S_y(u) - C_y(t)]^2 + \\ [S_z(u) - C_z(t)]^2 = r^2 \\ l[S_x(u) - C_x(t)] + m[S_y(u) - C_y(t)] + \\ n[S_z(u) - C_z(t)] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $(S_x(u), S_y(u), S_z(u))$ 为轨迹点在扫描线上的表示; $(C_x(t), C_y(t), C_z(t))$ 为轮廓线上相对应的一个点, (l, m, n) 为这个点在轮廓线上的切向矢量。

考虑到式(7)是个非线性方程组,求解过程复杂,且不容易找到一种快速稳定的算法,本文采用轨迹点的另外一种定义来求解。轨迹点可以理解为扫描线上的一个特殊点,它到轮廓线的最近距离等于 r 。用搜索法求解轨迹点,具体步骤如下。

(1) 在扫描线上选取一个靠近轮廓线的点,记下参数 u , 令 $u_1 = u$, 并计算该点到轮廓线的最近距离 r_1 , 必须满足 $r_1 < r$ 。

(2) 通过改变参数 u , 在扫描线上搜索一个点,满足该点到轮廓线的最近距离 $r_2 > r$, 并令 $u_2 = u$ 。

(3) 用线性插值的方法获得新参数

$$u = \frac{r_2 - r}{r_2 - r_1} u_1 + \frac{r - r_1}{r_2 - r_1} u_2 \quad (8)$$

计算对应点到轮廓线的最近距离 r_0 , 判断 $r_0 > r$ 是否成立,是,令 $r_2 = r_0$, $u_2 = u$; 否,则令 $r_1 = r_0$, $u_1 = u$, 重复执行步骤(3)直到满足关系 $|r_0 - r| < \varepsilon$, ε 为给定的精度。

4 轨迹生成方法的实现及误差分析

4.1 轨迹生成方法的实现

根据线结构光测量模型, 构建了线结构光鞋底扫描试验平台, 如图 3 所示。激光指示器输出波长 650 nm, 采用松下公司的 WV-CP460 系列摄像机。

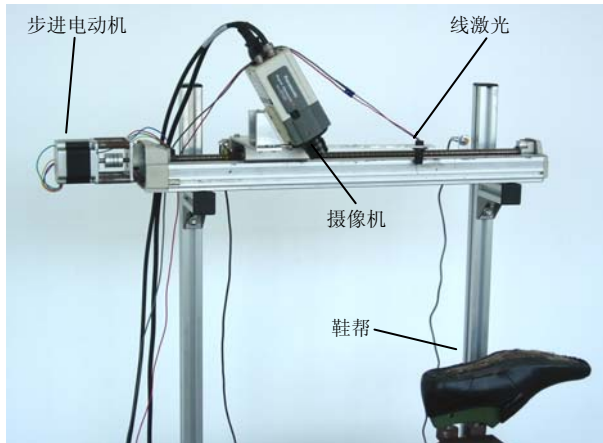


图 3 线结构光鞋底扫描试验平台

根据已知的摄像机参数计算得

$$d_x = 6.454 \mu\text{m} \quad d_y = 6.220 \mu\text{m}$$

对于精度要求不是非常高的三维测量, 图像畸变中心坐标的微小变化对测量精度影响不明显^[5], 故取图像中心坐标作为畸变中心。最后用两步法标定摄像机内外参数, 结果如下。

旋转矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0.9995 & -0.0222 & -0.0222 \\ -0.0306 & -0.8510 & -0.5243 \\ -0.0072 & 0.5247 & -0.8512 \end{pmatrix}$$

平移矢量

$$\mathbf{T} = (-60.4630 \quad 50.6626 \quad 490.6516)^T$$

内部参数

$$k = 8.4845 \times 10^{-3} \quad s_x = 1.0238 \quad f = 13.3028$$

在 Windows XP 平台下采用 C++ Builder 6.0 编写实现该方法的软件, 其中图形的三维显示调用了 OpenGL 的 API 函数。为了尽可能多地获得扫描线数据, 同时进行图像采集和光条中心的提取。最终采集到的鞋帮底面三维点云数据如图 4 所示, 生成的轨迹曲线如图 5 所示, 鞋帮底面长度约 280 mm, 有效采集次数 80 次。

4.2 误差分析

鞋帮底面喷胶系统的测量误差来源有: ① 系统的全局标定误差。② 线结构光传感器的布局误差。③ 激光光条中心测量的误差。前两个误差主要取决于扫描系统的硬件精度, 包括摄像机精度, 标

定模块精度, 以及鞋帮的放置位置。误差③主要由光条中心测量算法的精度引起。对于灰度重心法提取的亚像素光条中心的误差小于 0.5 个像素, x_f 和 y_f 分量均为 0.35 个像素。利用误差传递模型分析^[10] 计算得到目标点在世界坐标系 x 、 y 和 z 轴方向上的误差分别为 0.094、0、0.015 mm, 均小于喷胶系统的给定误差 0.5 mm。

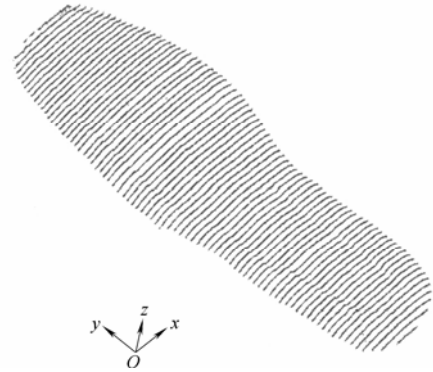


图 4 鞋帮底面三维点云数据

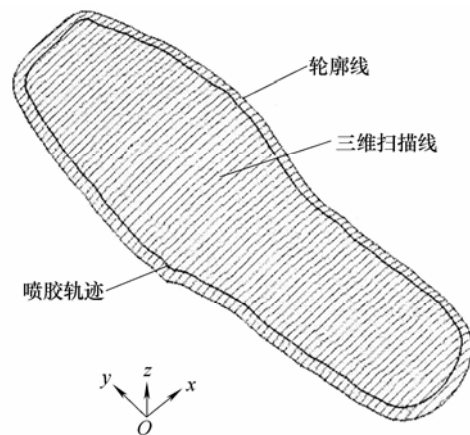


图 5 喷胶轨迹曲线

5 机器人喷胶试验

5.1 目标点数据的提取

试验借助 Stäubli RX60 系列工业机器人完成喷胶轨迹的实现。RX60 机器人的 V+ 编程语言以目标点的位置作为变量, 然后通过自动曲线插补功能实现轨迹的规划。位置变量包括目标点的坐标 (x, y, z) 及表示喷嘴姿态的欧拉角 (α, β, γ) , 欧拉角可以根据目标点的法向和切向矢量计算得到。等参数划分轨迹曲线的节点空间, 根据轨迹曲线的参数表达式计算各参数相对应的目标点的坐标及其切向矢量。理想的目标点法向矢量垂直鞋帮底面, 然而根据现有的数据无法精确地计算该值, 本文采用线性插值的方法近似计算。首先, 近似计算轨迹点在鞋帮底面

的法向量为

$$N = \frac{T_s \times T_t}{\|T_s \times T_t\|} \tag{9}$$

式中， T_s 表示轨迹点在扫描线上的切向矢量， T_t 表示轨迹点在轨迹线上的切向矢量。然后搜索目标点附近的两个轨迹点，再根据它们在轨迹曲线上的参数值线性插值得到目标点的法向矢量。

5.2 坐标匹配

系统坐标系同机器人坐标系不完全重合，因此在实际应用中必须建立一个从系统坐标系到机器人坐标系之间的坐标变换关系。选取系统坐标系中三个点 q_1 、 q_2 、 q_3 ，同时运用机器人示教的方法获得这三个点在机器人坐标系下的坐标 p_1 、 p_2 、 p_3 。

通过一个坐标变换，如果满足关系

$$\begin{pmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} q_1 & q_2 & q_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

就能实现系统世界坐标系到机器人世界坐标系的变换。坐标系的匹配关系如图 6 所示，系统世界坐标系到机器人世界坐标系的变换过程如下。

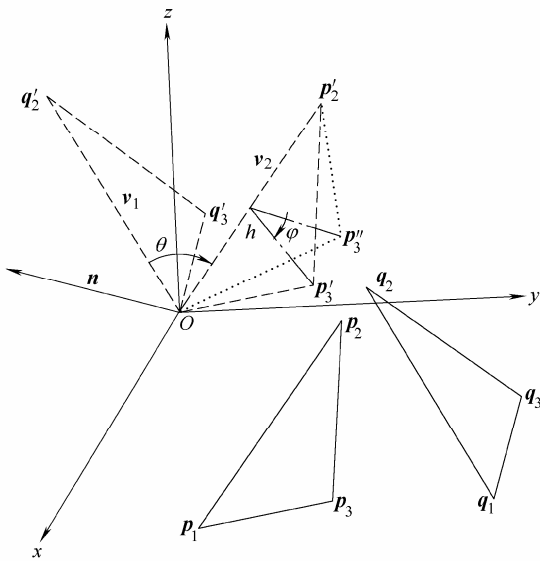


图 6 坐标系的匹配关系

(1) 平移。使点 q_1 平移至原点 O ，同时点 q_2 平移至点 q'_2 ，点 q_3 平移至点 q'_3 。

(2) 旋转。矢量 v_1 绕矢量 n 旋转 θ 至矢量 v_2 ，即点 q'_2 转至点 p'_2 ，点 q'_3 转至点 p''_3 ，其中矢量 $n = v_1 \times v_2 / \|v_1 \times v_2\|$ 。

(3) 旋转。点 p''_3 绕矢量 v_2 旋转 ϕ 至 p'_3 。

(4) 平移。使点 q_1 从点 O 平移至点 p_1 ，同时点 p'_2 平移至点 p_2 ，点 p'_3 平移至点 p_3 。由此得到坐标变换矩阵

$$T = \text{trans}(p_1) \text{rot}(v_2, \phi) \text{rot}(n, \theta) \text{trans}(-q_1) \tag{10}$$

5.3 喷胶试验

根据得到的机器人坐标系下目标点的位置，用 V+ 语言编写机器人控制程序实现自动喷胶。试验显示机器人的运动轨迹符合鞋底喷胶工序的要求，验证了方法的可行性。

6 结论

(1) 利用线结构光扫描鞋帮底面能够快速获得鞋底曲面信息，进而生成喷胶轨迹。

(2) 该方法能够保证生成的喷胶轨迹落在鞋帮底面，提高了轨迹精度，因此能很好地适应形状各异的鞋底对喷胶轨迹的要求。

(3) 通过一个坐标匹配能够实现把生成的喷胶轨迹信息应用到 Stäubli 机器人自动喷胶系统中，验证了方法的有效性和可行性。

(4) 利用误差传递模型分析计算得到目标点在 x、y 和 z 轴方向上的误差分别为 0.094、0.015 mm，均小于喷胶系统的给定误差 0.5 mm，能够满足系统要求。

参 考 文 献

[1] 左力, 江洪道, 张运梅, 等. 鞋大底自动点胶机: 中国, 15505997A[P]. 2004-06-23.
ZUO Li, JIANG Hongdao, ZHANG Yunmei, et al. Automatic dispensing machine for shoe sole: China, 15505997A[P]. 2004-06-23.

[2] KWON D S, SONG S K. A method for generating a cementing trajectory of a shoe sole: UK, 226025 [P]. 2005-10-26.

[3] KIM J Y. CAD-based automated robot programming in adhesive spray systems for shoe outsoles and uppers [J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(11): 625-634.

[4] HU Z, BICKER R, TAYLOR P, et al. Computer vision for shoe upper profile measurement via upper and sole conformal matching [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 1(45): 183-190.

[5] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.

[6] 赵小松, 张宏伟, 张国雄, 等. 摄像机标定技术的研究 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 149-151.
ZHAO Xiaosong, ZHANG Hongwei, ZHANG Guoxiong, et al. Study on camera calibration technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(3): 149-151.

(下转第 96 页)