

文章编号 1004-924X(2009)03-0655-07

单条纹截面轮廓传感器的设计与标定

于晓洋¹, 卢丙辉¹, 李琦¹, 刘浩²

(1. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为实现单条纹截面轮廓传感器的设计与标定,建立了单条纹截面轮廓传感器测量物体表面点空间坐标的数学模型,基于此模型分析了单条纹截面轮廓传感器的测量误差,得出了传感器各结构参数与测量误差之间的关系。在综合分析各结构参数对测量误差的影响的基础上,得出了传感器结构参数设计的依据,并给出了结构参数设计及标定的实例。最后,通过实验的方法对传感器的测量精度进行了验证。实验结果表明:深度测量相对误差 $<0.3\%$,重构的复杂表面具有良好的视觉效果。

关键词:单条纹;轮廓传感器;设计;标定

中图分类号:TP391;TP212.12 **文献标识码:**A

Design and calibration of single stria section contour sensor

YU Xiao-yang¹, LU Bing-hui¹, LI Qi¹, LIU Hao²

(1. *College of Measurement-control Technology & Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;*

2. *School of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150040, China*)

Abstract: In order to optimize the design and calibration of the structural parameters of single stria section contour sensor, a mathematic model that the single stria section contour sensor measures the coordinates of the spatial points is established. The measurement errors of the single stria section contour sensor are analyzed based on the mathematic model and the relationship between the structural parameters of the sensor and the measurement errors is obtained. Based on the comprehensive consideration of the effect of the structural parameters on the measurement accuracy, the criterion for designing the structural parameters of the sensor is given. A practical example of the design and calibration of the structural parameters is introduced to demonstrate its implementation, and the measurement accuracy of the sensor is proved by an experiment. The results indicate that relative depth measurement error of real system is less than 0.3% , and the complex surface reconstructed by real system has a good visual effect.

Key words: single stria; contour sensor; design; calibration

收稿日期:2008-06-13;修订日期:2008-07-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60572030);黑龙江省教育厅海外学人科研基金资助项目(No. 1055HZ027)

1 引言

单条纹视觉检测技术是目前商业上最实用的视觉三维测量技术。它弥补了接触式测量过程中损伤物体表面和不能测量柔性表面物体的缺陷^[1],并以其原理简单、高效率、易于实现测试过程自动化和较高的测量精度等优点,在产品质量检测、机器人导航、逆向工程、物体识别、虚拟现实、文物修复等方面应用广泛^[2]。

在单条纹视觉检测系统中,激光器与摄像机的几何关系,以及摄像机的内部参数直接影响检测系统的测量误差。因此,分析其测量误差与各结构参数之间的关系,实现其结构参数的优化设计,并进行准确的标定,是减小其测量误差必要而有效的措施^[3-4]。

2 系统模型

图 1 所示为单条纹截面轮廓传感器的系统模型。 M 为摄像机镜头中心,以激光器发出的扇形平面狭缝光的顶点为原点,建立物坐标系 $XYZO$,

镜头中心到光平面的距离为 B ,摄像机主光轴与 X 轴夹角为 β_0 , $X_0O_0Y_0$ 为成像平面。摄像机水平方向视场角为 $2\beta_1$,垂直方向的视场角是 $2\beta_2$,摄像机像面水平方向 X_0 上的像素序号记为 n 、总像素数为 $(2N+1)$,摄像机像素在垂直方向 Y_0 上的像素序号记为 m ,总像素数为 $(2M+1)$ 。

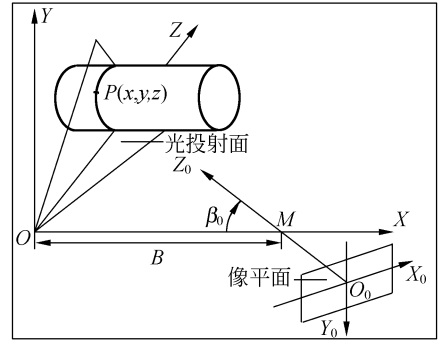


图 1 单条纹截面轮廓传感器系统模型

Fig. 1 Model of single stria section contour sensor

平面狭缝光在被测物表面上形成一光条纹,可以计算得到光条上任意一点 $P(X,Y,Z)$ 在物坐标系内的坐标值:

$$\begin{cases} X=0 \\ Y=B \cdot \frac{m}{M} \cdot \tan \beta_2 \left(\cos \beta_0 + \frac{1-n/N \cdot \tan \beta_1 \cdot \cot \beta_0}{\cot \beta_0 + n/N \cdot \tan \beta_1} \cdot \sin \beta_0 \right) \\ Z=B \cdot \frac{1-n/N \cdot \tan \beta_1 \cdot \cot \beta_0}{\cot \beta_0 + n/N \cdot \tan \beta_1} \end{cases} \quad (1)$$

3 误差分析与结构参数设计

3.1 误差分析

根据公式(1),将坐标计算归结为以下两个函数关系式:

$$\begin{cases} Y=F_Y(B, \beta_0, \beta_1, \beta_2, n, m) \\ Z=F_Z(B, \beta_0, \beta_1, \beta_2, n, m) \end{cases} \quad (2)$$

利用误差分析理论得到坐标 Y 和 Z 的测量误差为:

$$\begin{cases} \Delta_Y = \sqrt{\left(\frac{\partial F_Y}{\partial B}\right)^2 \cdot \Delta_B^2 + \left(\frac{\partial F_Y}{\partial \beta_0}\right)^2 \cdot \Delta_{\beta_0}^2 + \left(\frac{\partial F_Y}{\partial \beta_1}\right)^2 \cdot \Delta_{\beta_1}^2 + \left(\frac{\partial F_Y}{\partial \beta_2}\right)^2 \cdot \Delta_{\beta_2}^2 + \left(\frac{\partial F_Y}{\partial n}\right)^2 \cdot \Delta_n^2 + \left(\frac{\partial F_Y}{\partial m}\right)^2 \cdot \Delta_m^2} \\ \Delta_Z = \sqrt{\left(\frac{\partial F_Z}{\partial B}\right)^2 \cdot \Delta_B^2 + \left(\frac{\partial F_Z}{\partial \beta_0}\right)^2 \cdot \Delta_{\beta_0}^2 + \left(\frac{\partial F_Z}{\partial \beta_1}\right)^2 \cdot \Delta_{\beta_1}^2 + \left(\frac{\partial F_Z}{\partial \beta_2}\right)^2 \cdot \Delta_{\beta_2}^2 + \left(\frac{\partial F_Z}{\partial n}\right)^2 \cdot \Delta_n^2 + \left(\frac{\partial F_Z}{\partial m}\right)^2 \cdot \Delta_m^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\Delta_B, \Delta_{\beta_0}, \Delta_{\beta_1}, \Delta_{\beta_2}$ 分别为结构参数 $B, \beta_0, \beta_1, \beta_2$

的标定误差, Δ_n, Δ_m 为像点坐标 n, m 的提取误

差。定义综合误差 Δ_{YZ} 为 Δ_Y 和 Δ_Z 的均方根^[5], 即

$$\Delta_{YZ} = \sqrt{\Delta_Y^2 + \Delta_Z^2}. \quad (4)$$

通过式(2)~(4)可以看出,被测点综合误差的影响因素可分为两方面:

(1)传感器结构参数 $B, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ 及其标定误差 $\Delta_B, \Delta_{\beta_0}, \Delta_{\beta_1}, \Delta_{\beta_2}$;

$$\begin{cases} \Delta_Y = \sqrt{\left(\frac{\partial F_Y}{\partial n}\right)^2 + \left(\frac{\partial F_Y}{\partial m}\right)^2} \cdot \Delta = \frac{BN \csc \beta_0 \tan \beta_2 \sqrt{(m^2 + n^2) \tan^2 \beta_1 + N^2 \cot^2 \beta_0 + 2nN \tan \beta_1 \cot \beta_0}}{M(N \cot \beta_0 + n \tan \beta_1)^2} \cdot \Delta \\ \Delta_Z = \sqrt{\left(\frac{\partial F_Z}{\partial n}\right)^2 + \left(\frac{\partial F_Z}{\partial m}\right)^2} \cdot \Delta = \frac{B \tan \beta_1 N \csc^2 \beta_0}{(N \cot \beta_1 + n \tan \beta_1)^2} \cdot \Delta \end{cases}, \quad (5)$$

综合测量误差为:

$$\Delta_Z = \sqrt{\Delta_Y^2 + \Delta_Z^2} = \frac{BN \sqrt{(m \tan \beta_1 \tan \beta_2 \csc \beta_0)^2 + (M \tan \beta_1 \csc^2 \beta_0)^2 + \tan^2 \beta_2 \csc^2 \beta_0 (N \cot \beta_0 + n \tan \beta_1)^2}}{M(N \cot \beta_0 + n \tan \beta_1)^2} \cdot \Delta. \quad (6)$$

由式(6)可以看出:

(1) Δ_{YZ} 随被测点位置不同而变化;

(2) Δ_{YZ} 与 Δ 成正比,像点坐标提取精度越高,测量精度就越高;

(3) Δ_{YZ} 与 B 成正比,在其取值范围内, B 越小,测量精度越高;

(4) β_0 对 Δ_{YZ} 的影响是单调非线性的,在其取值范围内, β_0 越小,测量精度越高;

(5) β_1 对 Δ_{YZ} 的影响是单调非线性的, β_1 越小,测量精度越高;

(6) β_2 对 Δ_{YZ} 的影响是单调非线性的, β_2 越小,测量精度越高;

上述关系只是理论上的分析关系,在实际传

(2)像点坐标 n, m 及其提取误差 Δ_n, Δ_m ;

对于一个既定的传感器,其机构参数固定不变,且在使用之前都要进行精确的标定。因此,只有像点坐标的提取误差随提取算法的不同而改变^[6-7],假设像点坐标提取误差为一定值,不妨令 $\Delta_n = \Delta_m = \Delta$,则坐标 Y 和 Z 的测量误差为:

感器设计时,结构参数的取值要受测量条件与空间结构的限制,不能随便选取,要满足具体的设计要求。

3.2 结构参数设计

单条纹截面轮廓传感器结构参数包括 $B, \beta_0, \beta_1, \beta_2$, 由于受测量条件与空间结构的限制,其各参数之间有条件约束,是相互关联的。在选择传感器结构参数时,希望能使得测量精度达到最佳。为了不失一般性,可以考察像面上 Δ_{YZ} 最大值点,使其达到最小^[8]。在像面上 $n = -N, m = \pm M$ 两边缘对应的被测物点的 Δ_{YZ} 值最大,以 Δ_{\max} 表示,即有:

$$\Delta_{\max} = \frac{B \csc \beta_0 \sqrt{M^2 \tan^2 \beta_1 (\tan^2 \beta_2 + \csc^2 \beta_0) + N^2 \tan^2 \beta_2 (\cot \beta_0 - \tan \beta_1)^2}}{MN (\cot \beta_0 - \tan \beta_1)^2} \cdot \Delta. \quad (7)$$

由上式可以看出, Δ_{\max} 是参数 $B, \beta_0, \beta_1, \beta_2, M, N, \Delta$ 的函数,当选定了摄像机及镜头且像点坐标提取算法确定时, $\beta_1, \beta_2, M, N, \Delta$ 即为已知, Δ_{\max} 仅为 B, β_0 的函数,分析比较这两参数对 Δ_{\max} 值的影响,可以得出参数 β_0 为主要影响因素,应该首先给予考虑,使得 Δ_{\max} 达到最小的参数为最佳结构参数。

单条纹截面轮廓传感器选用的 CCD 摄像机

像面像素个数为 768×576 , 水平方向视场角为 26° , 竖直方向视场角为 34.2° 。即 $\beta_1 = 13^\circ, \beta_2 = 17.1^\circ, M = 384, N = 288$, 则可绘制出 Δ_{\max} 随 B, β_0 变化的函数关系图如图 2 所示。

可以看出,参数 β_0 为主要影响因素,应首先给予考虑。当 $\beta_0 < 50^\circ$ 时,传感器的综合误码率变化并不十分剧烈,所以一般说来,在 $\beta_0 < 50^\circ$ 基本上可以得到较好的效果。

理论上 β_0 越小越理想,但通常情况下,传感器设计都有测量范围的要求,减小 β_0 会导致测量范围减小,为满足要求,必须增大 B 来增大测量,但增大 B 的同时 Δ_{\max} 也会相应增大。由此可见, B 和 β_0 之间存在由测量范围引出的相互制约关系。

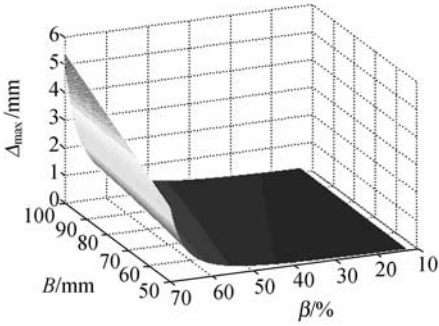


图 2 Δ_{\max} 随 B, β_0 变化的函数关系图像

Fig. 2 Functional relationship between Δ_{\max} and change of B and β_0

传感器深度测量范围以 L 表示,由图 1 可知, L 确定时, B 和 β_0 之间存在如下关系式:

$$B = \frac{L}{\tan(\beta_0 + \beta_1) - \tan(\beta_0 - \beta_1)} \quad (8)$$

将上式带入式(7)中,在 $L, \beta_1, \beta_2, M, N, \Delta$ 都为已知的情况下, Δ_{\max} 仅与 β_0 有关,其函数关系图

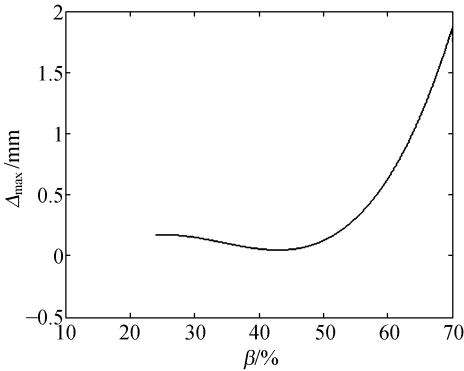


图 3 Δ_{\max} 与 β_0 的函数关系图像

Fig. 3 Functional relationship between Δ_{\max} and β_0

如图 3 所示:

由图 3 可以看出,当 β_0 取 45° 左右时 Δ_{\max} 最小,此时参数最优。

4 结构参数标定

4.1 实验装置

如图 4 所示,将激光器与 CCD 摄像机按照优化设计后的结构参数进行安装,组建测量系统,结构参数分别为: $\beta_0 = 45^\circ, B = 102.5 \text{ mm}$ 。摄像机水平方向视场角为 26° , 竖直方向视场角为 34.2° 。预计测量深度为 100 mm 。

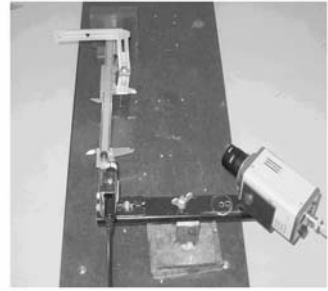


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental facility

4.2 结构参数标定

理论上 β_0 和 B 都应该是确定的,但在实际安装中存在误差,因此要进行标定。对于 β_0 及 B 的标定,采用反向求解法。

如图 4 所示,游标卡尺沿 Z 轴方向固定,再将一平面固定于游标卡尺可移动端,使其可以前后移动,即将一个平行于 XOY 面的平面沿着 Z 轴方向移动,提取移动前后条纹中心坐标,分别记作 n_1, n_2 ,则可由公式(1)得到移动前后在 Z 轴方向的坐标值,分别记作 Z_1, Z_2 ,将沿 Z 轴方向移动的距离记作 D_1 ,则 $D_1 = Z_1 - Z_2$,从新设置起点和终点后再次移动的距离 $D_2 = Z_3 - Z_4$,将两次移动距离相除:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{n_2 - n_1}{n_4 - n_3} \cdot \frac{(N \cdot \cot \beta_0 + n_3 \cdot \tan \beta_1)(N \cdot \cot \beta_0 + n_4 \cdot \tan \beta_1)}{(N \cdot \cot \beta_0 + n_1 \cdot \tan \beta_1)(N \cdot \cot \beta_0 + n_2 \cdot \tan \beta_1)} \quad (9)$$

被测物体的移动距离 D_1 和 D_2 可以准确设定,条纹中心坐标可以准确提取, N, β_1 为已知,因此可以由公式(9)解出结构参数 β_0 。在获得 β_0 的值

后,将其带回 D_1 或 D_2 的计算公式,便可解得 B 的值。

依照上述标定方法,采用 MATLAB 软件提

取条纹中心并编程计算,通过多次实验,获得的标定结果如表 1 所示:

表 1 标定结果

Tab. 1 Results of calibration

	标定值					平均值
	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	
B	102.45 mm	102.62 mm	102.51 mm	102.68 mm	102.49 mm	102.55 mm
β_0	45.31°	45.55°	45.47°	45.65°	45.52°	45.5°

标定实验结果符合预期设计的参数值。

5 实验结果

采用标定实验获得的结构参数进行实际测量。首先对一平行于 XOY 面的平面进行位移测量,以此检验深度测量的准确性,实验结果如表 2 (游标卡尺精度:0.02 mm):

表 2 平面位移测量实验结果

Tab. 2 Results of measurement experiment of flat motion

实际位移 (mm)	最小测量值 (mm)	最大测量值 (mm)	最大测量误差 (mm)
10	9.97	10.05	0.05
20	19.88	20.09	0.09
30	29.89	30.12	0.12
40	39.87	40.15	0.15
50	49.80	50.21	0.21
60	59.74	60.19	0.26
70	69.76	70.30	0.3
80	79.79	80.28	0.28
90	89.71	90.26	0.29

通过平面位移测量实验结果可以看出,深度测量绝对误差 <0.3 mm。经过多次测量,结果表明测量相对误差 $<0.3\%$ 。



图 5 实物图片

Fig. 5 Natural picture

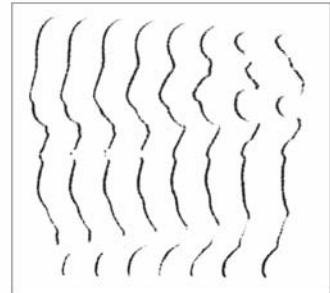


图 6 部分拍摄到的激光条纹

Fig. 6 Parts of laser stria taken by a camera

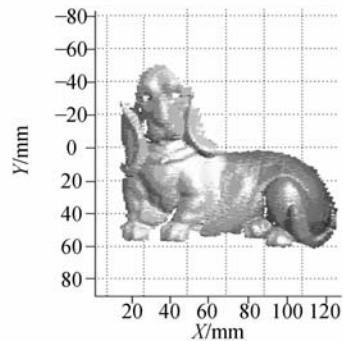


图 7 正面观察到的重构轮廓

Fig. 7 Reconfiguration outline observed in front face

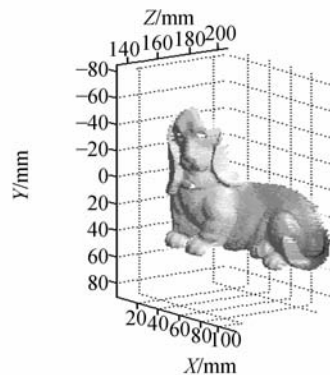


图 8 侧面观察到的重构轮廓

Fig. 8 Reconfiguration outline observed in side face

然后对一工艺品模型进行了截面轮廓测量,并将多个截面轮廓进行了拼接,重构出侧面轮廓的三维图像,实物如图 5 所示。图 6 为部分拍摄到的激光条纹,图 7、图 8 为不同角度观察到的重构图像。



图 9 拍摄中的遮挡

Fig. 9 Blocking during the shoot

可以看出,通过对多个截面轮廓的拼接,重构出的三维图像具有较好的视觉效果,并可由此得到被测物表面绝大部分的形状特征。由于被测物个别位置的特殊形状对摄像机拍摄激光条纹产

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 薛婷,吴斌,张涛,等. 基于线结构光视觉传感器的圆孔定位误差分析[J]. 光学精密工程,2008,16(4):624-629.
XUE T, WU B, ZHANG T, *et al.*. Analysis on round-hole orientation error based on structured light stripe vision sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 624-629. (in Chinese)
- [3] 李喆,丁振良,袁峰. 基于共面点的多视觉测量系统的全局标定[J]. 光学精密工程,2008,16(3):467-472.
LI ZH, DING ZH L, YUAN F. Global calibration method for multi-vision measurement system with coplanar targets[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 467-472. (in Chinese)
- [4] 邱茂林,马颂德,李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报,2000,26(1):43-55.

生了遮挡,如图 9 所示,导致个别位置缺少数据,重构图像存在缺口,该问题可以通过改变被测物摆放角度进行多次测量,并利用多个重构图像相互弥补缺口的的方法加以解决。

6 结 论

在单条纹截面轮廓传感器的设计过程中,结构参数的优化设计至关重要。在摄像机选定和像点提取精度确定的条件下,摄像机的主光轴与 X 轴的夹角 β_0 成为影响测量精度的主要因素,应首先给予考虑。理论上 β_0 越小越好,然而在不同测量系统中,由于测量对象与环境的不同,在传感器的设计中 β_0 通常无法做到最小。但从图 3 可以清楚地看出,当 $\beta_0 < 50^\circ$ 时,传感器的测量误差曲线曲率变化不十分剧烈。所以一般来说,取 $\beta_0 < 50^\circ$ 基本上可以得到较好的效果,对于某些有特殊条件限制的情况, β_0 甚至可以在某一点达到最佳。

- QIU M L, MA S D, LI Y. Overview of camera calibration for computer vision [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 36(1): 43-55. (in Chinese)
- [5] SAITO K, MIYOSHI T. Hokkaido. Noncontact 3-D digitizing and machining system for free-form surface[J]. *Annals of the CIRP*. 2001, 40(1): 483-486.
- [6] SALVI J. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37: 827-849.
- [7] 冯俊艳,冯其波,匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. 应用光学,2004,25(3):33-36.
FENG J Y, FENG Q B, KUANG C F. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, 25(3): 33-36. (in Chinese)
- [8] 吴彰良,卢荣胜,宫能刚,等. 线结构光视觉传感器结构参数优化分析[J]. 传感技术学报,2004(12): 709-712.
WU ZH L, LU R SH, GONG N G, *et al.*. Optimization of the structural parameters of line structured light visual sensors[J]. *Chinese Journal Of Sensors and Actuators*, 2004 (12): 709-712. (in Chinese)

作者简介:



于晓洋(1962—),男,黑龙江双城人,博士,教授、博士生导师,主要研究方向为三维视觉检测、光电检测等。E-mail: yuxiaoyang@hrbust.edu.cn



卢丙辉(1982—),男,黑龙江海伦人,硕士研究生,2001年于哈尔滨工程大学获学士学位,主要研究方向为结构光三维视觉检测。E-mail: miknet0594@163.com

李琦(1962—),男,吉林长春人,硕士研究生,1983年于吉林工业大学获学士学位,主要研究方向为图像信号处理等。E-mail: liqi@163.com

刘浩(1986—),男,河北完县人,学士,主要研究方向为自动测试与控制等。E-mail: liuhao@163.com

● 下期预告

定制鞋楦的分段自适应算法

史辉^{1,2}, 王伯雄¹, 贾倩倩¹, 罗秀芝¹

(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. 装甲兵工程学院机械工程系机电工程教研室, 北京 100072)

提出了一种基于光切法扫描的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以局部修改,提出了基于能量优化原则的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,以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。