

文章编号 1004-924X(2007)07-1124-06

足部三维测量系统中 CCD 传感器的全局标定

刘国忠, 王伯雄, 史 辉, 罗秀芝, 张明照, 王 瑞
(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要:介绍了足部三维形貌测量系统的原理以及利用测量系统已有的一维运动机构和专用标定组件对测量系统所有 CCD 进行全局标定的实用方法。建立了基于光平面坐标系、标定坐标系、一维运动机构坐标系和 CCD 图像坐标系的测量系统模型;在测量系统一维运动机构的控制下,光平面分别对标定组件中两个斜面进行扫描,求取两个斜面上扫描线在光平面坐标系中的交点坐标,并根据光平面坐标系中交点坐标和 CCD 图像坐标系中交点坐标的对应关系,采用坐标映射方法建立光平面与 CCD 图像坐标系之间的坐标转换关系;确定了基于坐标系之间转换参数的优化目标函数,并根据标定块的标称值和实际测量结果,利用 POWEL 直接优化方法对坐标系之间的转换参数进行了优化。测量结果表明,单个 CCD 重复测量误差 $<0.0625\%$;4 个 CCD 测量值相对误差 $<0.365\%$ 。实验结果表明,所述全局标定方法减小了一维运动机构、光平面和足支撑玻璃平板之间安装调节误差以及 CCD 等器件非线性带来的影响,且简便、实用、不需要其它精密标定仪器,可以对测量系统进行现场标定。

关键词:三维测量;足型;全局标定;坐标映射;非线性优化

中图分类号: TN386.5; TP212.12 **文献标识码:** A

Global calibration of CCD cameras in measurement system for 3-D foot shapes

LIU Guo-zhong, WANG Bo-xiong, SHI Hui, LUO Xiu-zhi, Zhang Ming-zhao, WANG Rui

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

Abstract: A measurement system for 3-D foot shapes under different loads and the practical global calibration principle of CCD cameras based on coordinate mapping and POWEL optimization method were described. The model of the measurement system was constructed based on four coordinate systems, the visual point-net grid in light plane and in CCD camera image planes was formed through the scanning of two inclined planes and the mapping relations were constructed. Finally, the objective function based on transform coefficients between different coordinate systems was defined and the transform parameters were optimized by POWEL method. Measurement results show that the repetitive error of single CCD camera is 0.0625% and the relative measuring error of four CCDs is 0.365% . Experimental results prove that the simple and practical global calibration method can be used in the spot calibration of the measurement system, and installation errors and nonlinearity of CCD cameras can be reduced.

Key words: 3-D measurement; foot shape; global calibration; coordinate mapping; nonlinear optimization

收稿日期:2007-01-24;修订日期:2007-03-21.

基金项目:科技部中德科技合作重点项目(No. 2003DFB00028)

1 引 言

到目前为止,几乎所有的运动鞋以及其它各种鞋类都是按照足型的大体分类进行设计,必然造成很多不同足型的用户选择同一尺码的鞋。当用户的足型偏离标准尺码较大时很难找到合适的鞋,在这种情况下解决的最好办法是量脚定鞋。制鞋业非常需要能够快速、精确和非接触式测量足型三维尺寸的仪器设备。在参加不同的体育项目时足部产生的压力大小和模式变化很大^[1],需要根据运动员的足型随足部的载荷而变化的特性进行运动鞋设计。因此,测量足部载荷以及在不同载荷下足部三维形貌的非接触式测量仪器将会在各种专用运动鞋、特种鞋、高档鞋和足部畸形矫正鞋的设计,制鞋业尺码标准的制定,普通消费者和运动员足型数据库的建立等领域得到广泛应用。

足部三维形貌测量仪器在国内^[2-3]国外^[4-5]已有研究或产品销售,但目前的产品主要是测量足部在零载荷、半人体体重载荷和全人体体重载荷情况下的足部尺寸,而不能用于足部在任意载荷下的尺寸测量。能够测量任意载荷下足部三维形貌的测量仪器的应用范围将扩大,但测量仪器在不同测量场所的搬运过程中可能受到较强的振动,需要对测量系统重新进行标定,要求测量系统具有一种可以在工作现场使用的、简单、实用的标定方法。目前已有的用于 360° 三维测量仪器的全局标定方法比较困难,需要经纬仪或其它精密运动机构等贵重精密设备,或需要采集大量样本点^[6-10]。本文介绍了一种可以测量足部载荷以及在不同载荷下足部三维形貌的非接触式激光扫描测量系统,并且提出了一种利用测量系统已有的一维运动机构和专用标定组件可以在测量现场对测量系统中所有 CCD 进行全局标定的实用方法。

2 测量系统概述

测量系统组成原理如图 1 所示。其中硬件部分包括运动平台及其伺服电机驱动单元、足部载荷测量单元和 CCD 多路图像同步采集单元。软件部分由图像处理软件、标定软件以及足部参数自动提取软件等组成。

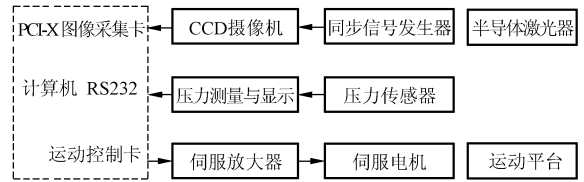


图 1 测量系统组成原理框图

Fig. 1 Block diagram of measurement system

测量系统基于激光线扫描工作原理,半导体线激光器发出的激光束光平面在足表面形成闭合的激光条纹,根据光平面和 CCD 图像平面之间的相互关系确定足表面激光条纹在光平面上的空间坐标,通过分布在足部周围的多个 CCD 图像中激光条纹在光平面上的拼接,获得光平面上闭合的激光条纹,实现足型轮廓切面 360° 的无盲区测量;同步信号发生器产生的复合同步信号连接到所有 CCD 摄像机的同步信号输入端,通过 PCI-X 总线图像采集卡将所有 CCD 图像以 25 frame/s 的速度同步采集到计算机内存;通过运动控制卡和伺服放大器控制伺服电机的旋转,运动平台在伺服电机的驱动下带动所有激光器和 CCD 对足部进行快速扫描,得到足部各个切面轮廓的二维图像,从而获得足部三维点云数据;通过对扫描数据的处理和重构提取足的立体特征尺寸、建立足的三维模型;由多个压力传感器组成的足部载荷测量单元,可以实时测量与显示被测足在测量过程中的载荷大小,并通过 RS232 串行口输入计算机。



图 2 测量系统实物照片

Fig. 2 Photo of measurement system

图像处理软件完成图像的去噪与二值化,激光条纹的提取、拼接和获取三维点云数据等功能。

标定软件通过对标定物体的扫描建立图像坐标系和空间光平面之间的映射关系。足部参数计算软件自动提取足长、足宽、足后跟宽、足围、足面长、足趾高、足弓高、内踝高、外踝高、足背高等足部参数,通过不同载荷下足型的测量得到足部参数随载荷变化的规律。

测量系统实物照片如图 2 所示。

3 测量系统模型建立

足部三维形貌测量系统坐标系如图 3 所示,标定组件放置在足支撑玻璃上,选取标定组件底面上某顶点作为标定组件坐标系和运动平台坐标系的坐标原点 $O_G(O_M)$ 。其中 $O_G-X_G Y_G Z_G$ 是标定组件坐标系; $O_M-X_M Y_M Z_M$ 是运动平台坐标系, Z_M 轴为运动平台运动方向, ΔZ 是运动平台沿 Z_M 轴位移; $O_L-X_L Y_L Z_L$ 是光平面坐标系,其中 $X_L Y_L$ 平面为光平面,其原点 O_L 是光平面和 Z_M 轴的交点, Z_{O_L} 是光平面坐标系原点 O_L 和运动平台坐标系原点 $O_G(O_M)$ 之间距离初值,光平面坐标系原点 O_L 沿 Z_M 轴作平移运动; $O_{C1}-X_{C1} Y_{C1}$ 以及 $O_{Cn}-X_{Cn} Y_{Cn}$ 为各个 CCD 像平面所对应的坐标系。

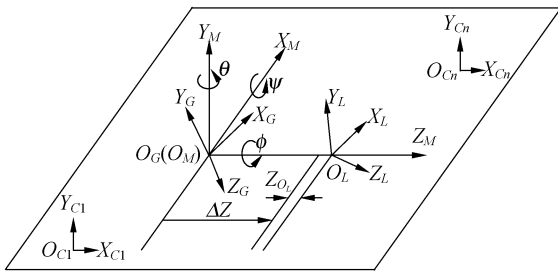


图 3 足部三维形貌测量系统坐标系

Fig. 3 Coordinates of 3-D foot shape measurement system

假设空间有一点 p , 其在运动平台坐标系中的坐标 $p_M = (x_M, y_M, z_M)^T$ 和标定组件坐标系的坐标 $p_G = (x_G, y_G, z_G)^T$ 之间的转换关系可以用旋转矩阵 R_1 表示为

$$p_G = R_1 p_M, \quad (1)$$

其中旋转矩阵 R_1 为

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi - \sin \phi \sin \psi \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

绕 X_M 的旋转角度为 ψ , 绕 Y_M 的旋转角度为 θ , 绕 Z_M 的旋转角度为 ϕ 。

空间点 p 在光平面坐标系中的坐标 $p_L = (x_L, y_L, z_L)^T$ 和运动平台坐标系中的坐标 $p_M = (x_M, y_M, z_M)^T$ 之间的转换关系可以用旋转矩阵 R_2 和平移矩阵 t 表示为

$$p_M = R_2 p_L + t, \quad (3)$$

其中旋转矩阵 R_2 为

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha - \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha + \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (4)$$

绕 X_L 的旋转角度为 α , 绕 Y_L 的旋转角度为 β , 绕 Z_L 的旋转角度为 γ 。平移矩阵 $t = (0, 0, (Z_{O_L} + \Delta Z))^T$ 。

4 测量系统中 CCD 图像传感器全局标定方法

CCD 图像传感器全局标定过程也就是要确定各个 CCD 像平面 $X_{Cn} Y_{Cn}$ 和光平面之间的坐标转换关系。设计制作的标定组件及其坐标系设置如图 4 所示。

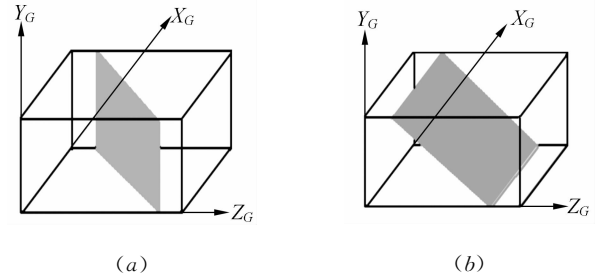


图 4 标定组件及其坐标系设置

Fig. 4 Calibration discreteness and coordinate setting

通过运动平台沿 Z_M 轴平移运动, 带动光平面对图 4(a) 中标定组件的斜面进行扫描, 可以产生一组近似与 Y_G 方向平行的直线, 对图 4(b) 中标定组件的斜面进行扫描可以产生一组近似与 X_G 方向平行的直线。运动平台的重复定位精度为 $5 \mu\text{m}$, 标定时运动平台沿 Z_M 轴以间隔 10 mm 平移 160 mm , 在 X_G 和 Y_G 两个方向分别形成 17 条扫描线, 满足系统在 X_G 和 Y_G 两个方向测量范围(宽 160 mm , 高 160 mm)要求。扫描线在光平

面 $X_L Y_L$ 上的位置与旋转矩阵 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 和平移矩阵 \mathbf{t} 中参数 ψ 、 θ 、 ϕ 、 α 、 β 、 γ 、 Z_{O_L} 和 ΔZ 有关,其中 ΔZ 为平移距离,需通过标定过程确定 ψ 、 θ 、 ϕ 、 α 、 β 、 γ 和 Z_{O_L} 这些参数,从而确定各个像平面 $X_{C_i} Y_{C_i}$ 和光平面 $X_L Y_L$ 之间坐标转换关系。

4.1 光平面上直线方程的求取

根据斜面在标定组件中的位置确定斜面在标定组件坐标系中的方程

$$A_G x_G + B_G y_G + C_G z_G = 1, \quad (5)$$

其中 $K_G = (A_G, B_G, C_G)$ 为斜面方程系数。将公式(1)代入公式(5)得到斜面在 $O_M - X_M Y_M Z_M$ 运动平台坐标系中的方程

$$K_G \mathbf{R}_1 p_M = 1, \quad (6)$$

将公式(3)代入公式(6)得到斜面在 $O_L - X_L Y_L Z_L$ 光平面坐标系中的方程

$$K_G \mathbf{R}_1 (\mathbf{R}_2 p_L + \mathbf{t}) = 1, \quad (7)$$

化简公式(7)得到

$$K_L p_L = 1, \quad (8)$$

$$K_L = (1 - K_G \mathbf{R}_1 \mathbf{t})^{-1} K_G \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2, \quad (9)$$

其中 K_L 为斜面在 $O_L - X_L Y_L Z_L$ 光平面坐标系中的方程系数。令公式(8)中 $p_L = (x_L, y_L, z_L)^T$ 的 z_L 值为零,得到扫描线在光平面上的直线方程

$$A_L x_L + B_L y_L = 1, \quad (10)$$

公式(10)表示运动平台(或光平面坐标系原点 O_L)沿 Z_M 轴共平移 ΔZ 时扫描线在光平面上的直线方程,求取光平面上两组直线的交点,便可得到如图 5(a)所示光平面上一系列点的坐标 x_L 和 y_L 。

4.2 CCD 像平面与光平面坐标映射

利用图 5(a)所示光平面上交点坐标与图 5(b)所示各个 CCD 像平面上相应的点的对应关系,用坐标映射多项式方法建立各个 CCD 像平面和光平面之间的坐标转换关系

$$x_L = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} A_{ij} u^i v^j, \quad (11)$$

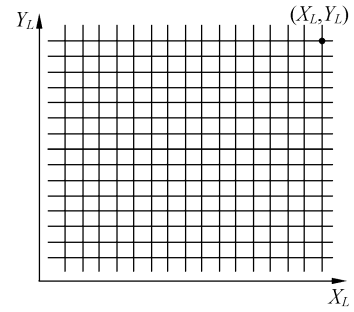
$$y_L = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} B_{ij} u^i v^j. \quad (12)$$

公式中 A_{ij} 和 B_{ij} 为多项式系数, u 和 v 为像平面坐标, x_L 和 y_L 为光平面坐标。

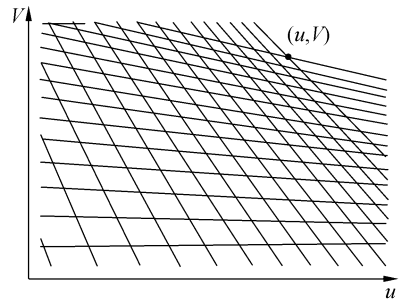
光平面中实际坐标 x_p 、 y_p 和计算值 x_L 、 y_L 误差为

$$e_x = \sum_{p=0}^q (x_p - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} A_{ij} u^i v^j)^2, \quad (13)$$

$$e_y = \sum_{p=0}^q (y_p - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} B_{ij} u^i v^j)^2. \quad (14)$$



(a)光平面
(a) Light plane



(b)CCD 像平面
(b) CCD image plane

图 5 CCD 像平面与光平面坐标映射

Fig. 5 Coordinate mapping of CCD image plane and light plane

q 为参与计算的点数,系数 A_{ij} 和 B_{ij} 计算公式为

$$\frac{\partial e_x}{\partial A_{ij}} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial e_y}{\partial B_{ij}} = 0. \quad (16)$$

4.3 非线性优化目标函数确定

确定优化目标函数解析表达式为

$$F(k) = \sum_{j=0}^m f_j(k), \quad (17)$$

$$f_j(k) = \sum_{i=0}^n ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2), \quad (18)$$

$$\text{求解约束条件为} \begin{cases} |\psi| < 0.05 \\ |\theta| < 0.05 \\ |\phi| < 0.05 \\ |\alpha| < 0.05 \\ |\beta| < 0.05 \\ |\gamma| < 0.05 \\ |Z_{O_L}| < 1 \end{cases} \quad (19)$$

$K = (\psi, \theta, \phi, \alpha, \beta, \gamma, Z_{O_L})$ 为优化参数, $f_j(k)$ 为对每一个测量点求 n 个 CCD 在标定坐标系下的测量值与标称值的坐标偏差之平方和。公式(19)中 $\psi, \theta, \phi, \alpha, \beta$ 和 γ 的单位为弧度, Z_{O_L} 的单位为 mm。约束条件主要是限定优化值不会偏离实际系统结构参数。

4.4 标定及结构参数优化过程

第一步:运动平台沿 Z_M 轴以间隔 10 mm 平移 160 mm, 带动光平面分别对图 4(a) 和 4(b) 中标定组件的斜面进行扫描, 在 X_G 和 Y_G 两个方向分别形成 17 条扫描线。

第二步:求两组扫描线在各个 CCD 像平面上所有的交点坐标。

第三步:通过运动平台的平移运动对图 6 所示系统测量范围(长 350 mm, 宽 160 mm, 高 160 mm)内在 A、B、C 三个扫描光平面 9 个不同位置放置的标准块进行测量, 其中每个位置分别有两个 20 mm 和 120 mm 不同高度的标准块, 共有 18 个测量点。由于对系统结构参数进行优化, 测量点的分布主要是考虑系统的测量范围。如果选择太多的测量点会造成标定过程的繁琐, 测量点分布太偏或太少会影响优化的结果的正确性。

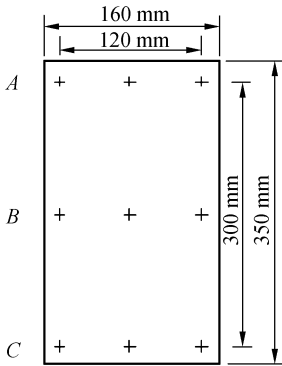


图 6 测量范围及标准块位置

Fig. 6 Measurement range and positions of calibration objects

第四步:基于目标函数的特点, 采用 POWELL 直接搜索方法求取目标函数最小值, 确定旋转矩阵 R_1 、 R_2 和平移矩阵中参数 $\psi, \theta, \phi, \alpha, \beta, \gamma, Z_{O_L}$ 。

第 1 步:根据系统结构参数实际情况, 确定优化参数 $K = (\psi, \theta, \phi, \alpha, \beta, \gamma, Z_{O_L})$ 初始值为 0。

第 2 步:根据公式(5)~(10)求光平面上两个

方向 17 条扫描线的直线方程, 并求取两组直线的交点坐标。

第 3 步:利用第二步和第 2 步的计算结果, 根据公式(13)~(16)求取公式(11)和(12)中坐标映射系数。

第 4 步:利用标准块在各个 CCD 中的坐标值, 根据公式(11)和(12)求标准块在光平面坐标系下测量值。

第 5 步:按照公式(1)和(3)将光平面坐标系下的测量值转化为标定坐标系下的测量值 (x_i, y_i) 。

第 6 步:根据公式(17)和(18)求目标函数的值。

重复第 2 步到第 6 步, 直到目标函数值最小。

第五步:根据优化结果, 利用公式(5)~(10)重新求取图 5(a)所示光平面上两组直线及其交点坐标, 并且和第二步计算结果一起代入公式(13)~(16), 得到各个 CCD 像平面 $X_{G_i} Y_{G_i}$ 和光平面 $X_L Y_L$ 之间的坐标映射关系。

由于对未知但实际存在的系统结构参数进行优化, 系统有解, 利用测量系统计算机配置(主频 2.5 G, 内存 2 G), 优化时间约 30 min。

5 标定与测量结果

$\psi, \theta, \phi, \alpha, \beta, \gamma, Z_{O_L}$ 等参数的标定结果如下:

$\psi = 0.000\ 9474\ 39, \theta = 0.008\ 517\ 98, \phi = 0.000\ 001, \alpha = -0.012\ 636\ 5, \beta = -0.010\ 299\ 7, \gamma = 0.0, Z_{O_L} = -0.270\ 604$ 。其中 $\psi, \theta, \phi, \alpha, \beta$ 和 γ 的单位为弧度, Z_{O_L} 的单位为 mm。

某一个 CCD 对高度为 80 mm 的标准块进行多次扫描测量的结果如表 1 所示。单个 CCD 重复测量误差 $< 0.062\ 5\%$ 。

表 1 高度为 80 mm 的标准块多次扫描测量结果

Tab. 1 Measurement results of 80 mm high object

测量次数	1	2	3	4	5
测量值(mm)	79.995	79.985	79.987	79.991	79.992

4 个 CCD 摄像机对高度为 83 mm 的标准块在不同位置进行测量的结果对比如表 2 所示。4 个 CCD 测量值相对误差 $< 0.365\%$ 。

表 2 4 个 CCD 摄像机对高度为 83 mm 的标准块在不同位置测量结果

Tab. 2 Measurement results of 83 mm high object by four CCD cameras in different positions

Z 方向扫描位置(mm)	CCD1	CCD2	CCD3	CCD4
0	83.106	82.822	83.014	83.371
100	83.154	82.819	83.109	83.261
200	83.145	82.742	83.059	83.234

6 结 论

标定和测量结果表明:单个 CCD 重复测量误差 $<0.0625\%$,4 个 CCD 测量值相对误差小于 0.365% ,测量系统标定和测量精度满足足部尺寸测量要求。系统全局标定过程中利用测量系统已有一维运动机构和专用标定组件,可以在测量现

场对测量系统中所有 CCD 进行全局标定;标定方法简便、实用、不需要经纬仪或其它精密运动机构等贵重精密设备;标定过程减小了一维运动机构、光平面和足支撑玻璃平板之间位置调节误差以及 CCD 等器件非线性带来的影响。此系统全局标定方法也可以用于类似测量系统的全局标定过程。

测量系统可以方便地同时测量足部载荷以及自动提取与载荷相对应的足部参数,分析运动员以及其他被测者的足部参数随载荷而变化的规律,为运动鞋或其它鞋的设计以及足部畸形矫正提供可靠依据。同时,不同载荷下足部三维形貌测量系统的推广使用,将会大大提高制鞋业的设计水平,加快普通消费者和运动员在不同载荷下足部足型数据库的建立。

参考文献:

- [1] STEPHEN M. <http://www.drribut.com/sports/spshoe.html>. [OL].
- [2] 居琰,汪同庆,刘建胜,等.基于光切法的三维脚型测量仪原理及系统设计[J].传感器技术,2002,21(4):18-21.
JU Y, WANG T Q, LIU J SH, *et al.*. Principle and system design of foot profile 3-D measuring device based on light-section method [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2002,21(4):18-21. (in Chinese)
- [3] 徐兴华.基于立体视觉的脚型测量技术及系统实现[D].浙江大学,2006.
XU X H. *Foot measuring technology and system implementation based on stereo vision* [D]. Paper of Master Degree in Zhejiang University,2006. (in Chinese)
- [4] PATIFLO A, MENESES J. Optic system for the measurement of metrological parameters of the foot [J]. *SPIE*, 2004,5622: 84-90.
- [5] GARTNER H, LAVOLE J F, VERMETTE E, *et al.*. Multiple structured light system for the 3D-measurement of feet [J]. *SPIE*,1999,3640:104-114.
- [6] 刘凤枝,段发阶,叶声华.一种新的高精度的线结构光传感器标定方法[J].天津大学学报,1999,32(5):547-550.
LIU F M, DUAN F J, YE SH H. New accurate calibration technique for the light-strip sensors [J]. *Journal of Tianjin University*, 1999,32(5):547-550. (in Chinese)
- [7] 徐园,张广军,魏振忠.线结构光传感器标定点获取方法研究[J].北京航空航天大学学报,2004,30(1):9-13.
XU Y, ZHANG G J, WEI ZH ZH. Method for acquiring characteristic points in the calibration of line structure-light sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004,30(1):9-13. (in Chinese)
- [8] 叶东,徐巧玉,车仁生.视觉测量系统的相机校准[J].光学精密工程,2006,14(5):883-890.
YE D, XU Q Y, CHE R SH. Camera calibration technique for vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5): 883-890. (in Chinese)
- [9] 叶东,刘长英,车仁生,等.基于遗传算法的像机虚拟立体校准技术研究[J].光学精密工程,2006,14(3):485-489.
YE D, LIU CH Y, CHE R SH, *et al.*. Dummy solid camera calibration technology using genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3): 485-489. (in Chinese)
- [10] 史泽林,康娇,孙锐.基于 BP 神经网络的大视场成像畸变校正方法[J].光学精密工程,2005,13(3):348-353.
SHI Z L, KANG J, SUN R. BP NN-based method for lens distortion correction of large-field imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(3):348-353. (in Chinese)

作者简介:刘国忠(1966—),男,清华大学精密仪器与机械学系博士研究生,北京机械工业学院副教授,主要从事测控技术与仪器、医疗仪器、信号与图像处理等方面的研究。E-mail: liugz03@mails.tsinghua.edu.cn
王伯雄(1947—),男,清华大学精密仪器与机械学系教授,博士生导师,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@mail.tsinghua.edu.cn