

文章编号 1004-924X(2016)增-0607-06

## 足型扫描仪内应用非线性映射方法的相机自动标定

陈 硕,张慧萌,楚圣辉,孟 浩,刘国忠\*  
(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100192)

**摘要:**为解决三维足型测量系统中相机标定步骤繁琐的问题,提出了一种基于该系统的简便稳定的标定方式。基于三维足型测量系统的系统构成与工作原理设计了基于标定块的相机标定方法,并在过程中对传统标定块进行了改良。采用自动检测角点技术,利用 Harris 检测算法与模板角点匹配算法进行检测,无需人工干预。利用图像几何校正技术提高了系统的提取精度。标定时将标定块置于光平面,左右两个相机各取一幅图像,过程简单,标定速度快。最终将像平面与光平面进行坐标映射得到两组非线性方程,解出两幅图像的映射关系。实验结果显示,该方法的标定误差基本保持在 $0\sim 1.2$  mm,平均误差为 $0.44$  mm。通过最终的足部三维重建图形可以看出,足部形貌得到了良好的还原。

**关键词:**相机标定;标定板;角点检测;几何校正;图像映射

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0607

### Application of the nonlinear mapping method in the foot scanner's automatic camera calibration

CHEN Shuo, ZHANG Hui-meng, CHU Sheng-hui, MENG Hao, Liu Guo-zhong\*

(School of Instrument Science and Opto Electronics Engineering,  
Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

\* Corresponding author, E-mail: liuguozhong@bistu.edu.cn

**Abstract:** To solve the problem of cumbersome steps of camera calibration in the three-dimensional (3D) foot type in measurement system, this article proposes a calibration method based on Double-camera system. On the basis of the structure and working principle of 3-dimensional foot type measuring system, it designs the camera calibration method based on the calibration target, and improves the traditional calibration target in the process. The automatic corner detection technology and Harris corner detection algorithm and template matching algorithm are adopted for testing, without manual intervention. The image geometric correction technique is used to realize more accurate extraction in the process. At the beginning of the calibration, the calibration block are put on the light plane and a picture is captured by each camera. It is convenient and quick. Finally, two nonlinear equations are got through coordinate mapping from the image plane to light plane, then the mapping relationship between images can be solved by using above equations. The experimental results show that calibration error basically maintained in  $0\sim 1.2$  mm, and the average error is  $0.44$  mm. Through the foot 3 D reconstruction graphics, it can be seen that foot shape gets good reconstruction.

**Key words:** corner detection; calibration target; corner detection; geometric correction; image maps

收稿日期:2016-05-29;修订日期:2016-06-12.

基金项目:国家自然科学基金专项项目(No. 61240057)

## 1 引言

足型三维测量技术告别了传统人工手动测量的方式<sup>[1]</sup>,提高了工作效率且受环境限制较小,并能够对整体足部形态进行准确描述。许多制鞋企业已逐步将三维测量技术应用到足型测量中,以根据精确足型数据设计制造出舒适的鞋楦。随着虚拟穿戴技术的发展,三维足型测量也将应用到虚拟试鞋系统中<sup>[2]</sup>,为人们的日常生活带来便利。

该技术利用光电原理及电子扫描,在测量仪器与脚不发生直接接触的情况下,通过相机拍摄达到测量目的<sup>[1]</sup>。在此系统中相机标定结果的精度及算法的稳定性直接影响结果的准确性。因此,高精度的相机标定是做好后续工作的前提。

目前的相机标定方法主要集中于以下几种,主动视觉相机标定方法、相机自标定法、传统相机标定法。

基于主动视觉的相机标定法是指在已知相机的某些运动信息的情况下对相机进行标定,该方法需要控制相机做某些特殊运动,成本高、实验设备昂贵、实验条件要求高,且不适合于运动参数未知或无法控制的场合。

自标定算法对相机的运动约束条件太强,在实际中并不实用,且其算法鲁棒性差。

传统相机标定法,使用尺寸已知的标定物,通过将标定物上坐标已知的点与其图像点之间建立对应关系,利用算法获得实测数值与标准数值之间的对应关系。这种方法效果稳定,简便易行且无高额花费,是一种较为理想的标定方法。目前比较常见的是鼠标点击式的人机交互方式<sup>[3]</sup>,但该方法需人工手动取点,耗费人力,且误差受标定者经验影响,不易量化。本文提出一种在足型测量系统中方便易行的基于标定物的自动相机标定方法,过程中不需要人工干预。减少了工人的工作量。另外,该方法主要通过自动提取角点及特殊点的坐标,并利用非线性映射变换建立光平面与像平面两组坐标系之间对应关系。

## 2 三维足型测量系统组成

本文所采用的测量系统结构如图 1 所示,主要包括运动导轨、CCD 双路图像同步采集单元。

相机分别从不同角度拍摄脚部多帧图像,提取脚部各点的三维坐标,用于脚部尺寸测量<sup>[4]</sup>。

足型在电机驱动下保持匀速前进,线结构光平面在导轨带动下扫描整个足背表面,两侧的相机全过程拍摄获取足部轮廓信息,用于足型重构以及相关参数的测量<sup>[5-6]</sup>。

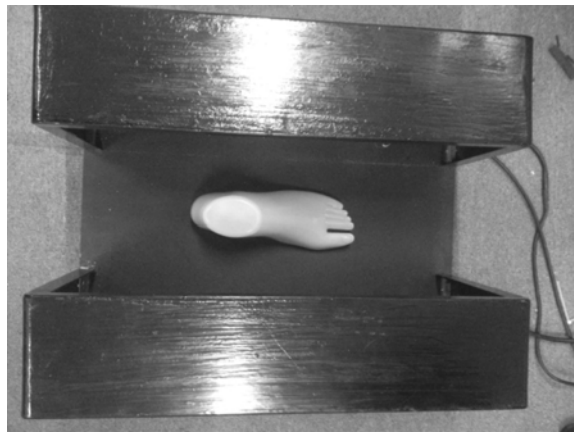


图 1 三维足型测量仪

Fig. 1 Three-dimensional foot type measuring instrument

## 3 标定块设计与标定流程

常见的标定板为黑白棋盘格模板,带有固定间距图案阵列,如图 2(a)所示。

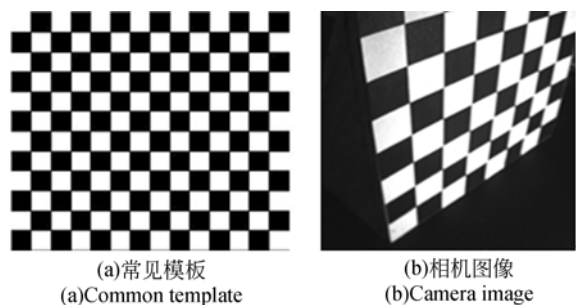


图 2 常见标定模板与相机采集图像

Fig. 2 Common calibration template and camera image

将模板安装在辅助标定底座上制作成标定块,在实际相机中采集到的图像如图 3(b)所示。由于相机分布在系统两侧,而标定块在系统中间并与光平面重合,故采集出的图像倾斜且不全。为保证角点自动识别及提取的准确性,考虑在采集图像角点之前应用几何校正将图像尽可能还原。本文对标定板进行了改进。改进后的标定板

如图 3(a)所示。首先将标定板面积缩小,使所有点均可被相机拍摄到。在四角增加了 4 个特殊标记点,方便定位。

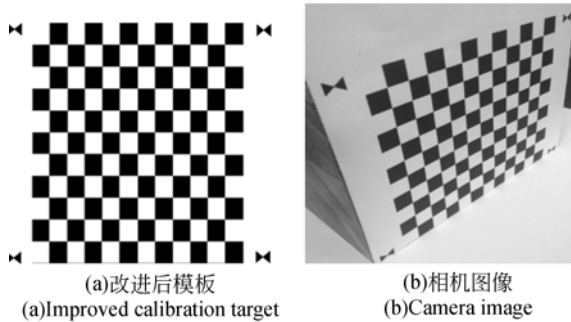


图 3 改进后的标定模板和相机拍摄图像

Fig. 3 Improved calibration template and camera image

标定时首先对系统进行初始化,包括相机复位,光路检测等,还要检查相机是否归位,运作是否正常等。随后将标定块放置于光平面上并由相机拍摄图像。提取被拍摄图像四角的特征点,对其进行几何校正。之后进行角点检测,提取出角点坐标,进行像平面与光平面的映射,得到对应关系与系数,用于对测量的矫正,标定结束。

## 4 标定算法

### 4.1 角点与特殊点检测

顺利获取图像特征是摄像机标定和立体视觉研究的前提和基础,其可以为图像边界、边缘点、角点、拐点和纹理等。其中应用最为广泛的当属角点检测<sup>[7]</sup>。

#### 4.1.1 基于灰度方法的 Harris 角点检测

利用图像灰度变化检测角点的方法主要利用角点附近的图像灰度变化较为明显这一特点。此方法需定义阈值,将各像素点邻域内自相关矩阵值大于给定阈值的点定义为角点。

Harris 算法是此类提取方法中应用最为广泛的一种方法,而且其原理简单易于理解。

其利用一阶微分的数学思想计算图像像素点邻域之间的灰度变化<sup>[8]</sup>。

如上图 4 所示,设计一个检测窗口,令该窗口沿图片各方向移动时,计算窗口内灰度值的变化,角点处图像的灰度值变化大于平滑区域与一般边缘区域。据此,通过计算矩阵来完成 Harris 角点

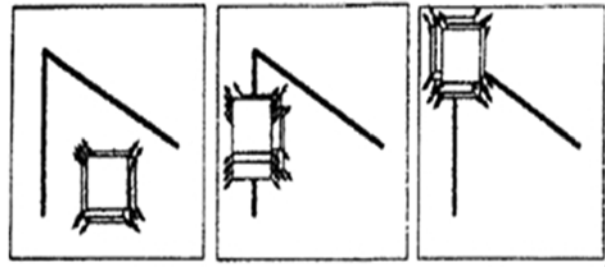


图 4 Harris 角点提取示意图

Fig. 4 Schematic of Harris corner extraction

检测。

Harris 角点计算简单,原因是采用了差分求导的方法,计算公式如下:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x+1, y) - f(x, y), \quad (1)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = f(x, y+1) - f(x, y). \quad (2)$$

通过该算法进行检测时由模板窗口对输入图像进行扫描,根据设计的阈值进行非极大值抑制,需要几次试验才能找到最佳阈值<sup>[9]</sup>,达到理想效果。

这种算法具有较高的稳定性和鲁棒性,能够在图像灰度变化以及噪声干扰等情况下准确检测特征点,具有较高的点重复度和较低的误检率。

#### 4.1.2 基于模板方法的特殊点检测

基于模板的点检测算法的基本思想是:设计模板对原有图像进行全局扫描,每次扫描都做一次匹配计算,如图 4 所示。

通过比较图像上所有与模板具有一致大小的矩形窗口与模板之间的相似性来判断其是否为特殊点。此方法可以准确探测到符合形状要求的点,定位精度可达一个像素。

匹配过程用公式表达如下:

$$R(x, y) = w_1 \& z_1 + w_2 \& z_2 + \dots + w_{mn} \& z_{mn} = \sum_{i=1}^{mn} w_i \& z_i, \quad (3)$$

其中  $w$  为模板系数,  $z$  为与该系数对应的的原图像的灰度值,  $mn$  为模板中包含的像素点总数,当  $w$  与  $z$  值相同时,计算结果为 1,反之则为 0。

输入图像后,模板从图像像素原点开始扫描,根据公式(3)进行计算,当完全匹配时,  $R(x, y)$  等于  $mn$ 。此时可人为规定一点为所需特征点,一般取中心点。

提取如图 3(a)所示四角的特殊点,可设置如图 6 所示模板。

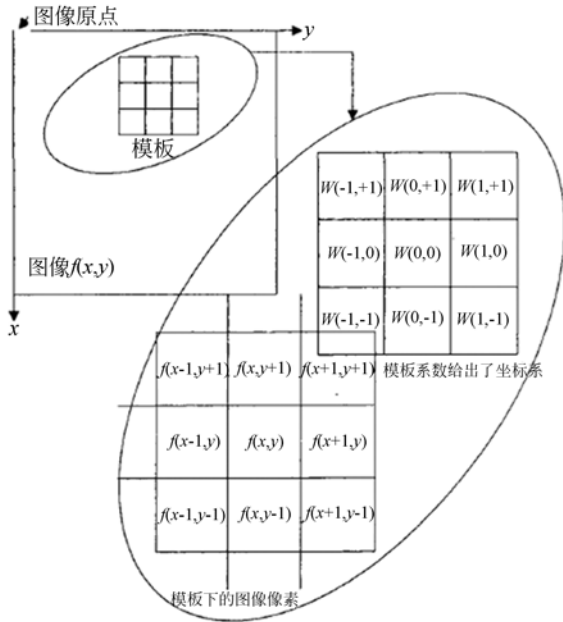


图 5 特殊点模板匹配示意图

Fig. 5 Schematic of template matching for special points



图 6 模板示意图

Fig. 6 Template schematic

### 4.2 图像几何校正

由图 2(b)和图 3(b)可以看出相机采集的图片出现倾斜现象,为了自动识别各个角点位置,需要对图像进行几何失真校正。其主要思想是根据畸变图像中 4 个像素与实际 4 个对应点的函数关系作为控制点进行校正<sup>[10]</sup>,用一种数学模型来近似图像的几何畸变过程,并利用畸变图像与标准图之间的一些对应点来构建目标矩形,由 4 个顶点对构建方程,通过解方程得到变换系数。最后逐个像素点实现校正<sup>[10]</sup>。

在 MATLAB 中有可调用的函数,设图像中的 4 个特殊点坐标分别为  $(x_i, y_i)$ , 实际坐标分别

为  $(X_i, Y_i)$ ,  $a_i, b_i$  为系数  $(i=1, 2, 3, 4)$ 。公式如下,在此不做赘述。

$$\begin{cases} X_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i y_i \\ Y_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i y_i \end{cases}, \quad (4)$$

通过校正,可以知道标准图像角点与被检测出的实际拍摄图像的角点对应关系,在之后的计算中起到辅助定位的作用。

此处可使用模板特殊点匹配方法找出特殊点坐标。

### 4.3 像平面与光平面坐标映射

利用图 7(a)所示光平面上交点坐标与图 7(b)所示各个 CCD 像平面上相应点的对应关系,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如下<sup>[6]</sup>:

$$x_L = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-1} A_{ij} u^i v^j, \quad (5)$$

$$y_L = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-1} B_{ij} u^i v^j, \quad (6)$$

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:

$$e_x = \sum_{p=0}^q (x_p - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-1} A_{ij} u^i v^j)^2, \quad (7)$$

$$e_y = \sum_{p=0}^q (y_p - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-1} B_{ij} u^i v^j)^2, \quad (8)$$

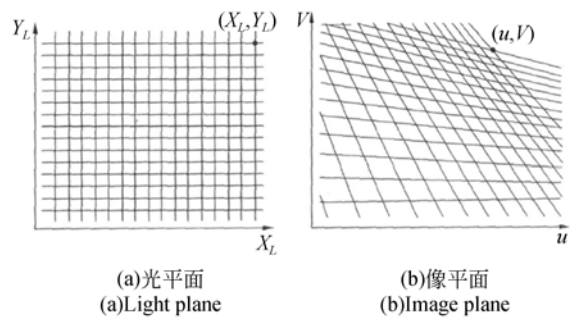


图 7 光平面与 CCD 像平面坐标映射  
Fig. 7 Coordinate mapping of light plane and CCD image plane

$q$  为参与计算的点数。系数  $A_{ij}$  和  $B_{ij}$  计算公式为:

$$\frac{\partial e_x}{\partial A_{ij}} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial e_y}{\partial B_{ij}} = 0. \quad (10)$$

### 5 实验结果与误差分析

标定板上各点间距离已知,每个棋盘格长宽为 10 mm。故标定板内每两点相隔 10 mm,标准坐标  $(x, y)$  可取 0 至 90 间的 10 个整数,两两组合

为标准的 100 个坐标点。

对图 3(b)所示的标定板利用传统手动取点方式按照从左到右,从上到下的顺序取出 100 个点,记为  $(u, v)$ 。

利用公式(5)和公式(6)计算出所需的系数,共 30 个如表 1 所示。

表 1 公式 7 系数(保留 10 位小数)

Tab. 1 Coefficients in formula 7(keep ten decimal places)

$a_0 - a_4$	0.0000000000	-0.2013924924	0.0001593324	-0.0000000501	0.0000000000
$a_5 - a_9$	-0.1949188000	0.0001863952	-0.0000001147	0.0000000000	0.0002337739
$a_{10} - a_{14}$	-0.0000000470	0.0000000000	-0.0000001093	0.0000000000	0.0000000000
$b_0 - b_4$	75.7854380432	0.0276332668	-0.0000503675	0.0000000108	0.0000000000
$b_5 - b_9$	0.0926462112	-0.0000721714	0.0000000438	0.0000000000	-0.0000889516
$b_{10} - b_{14}$	0.0000000127	0.0000000000	0.0000000453	0.0000000000	0.0000000000

随后利用公式(11)对手动采集的 100 个点进行计算,得到拟合坐标。将两组坐标绘制成表如图 8(彩图见期刊电子版)所示,其中红色圆点表示计算出的拟合坐标  $(u, v)$ ;蓝色方点表示的标准坐标  $(x, y)$ ,两者基本吻合,没有直观的误差。

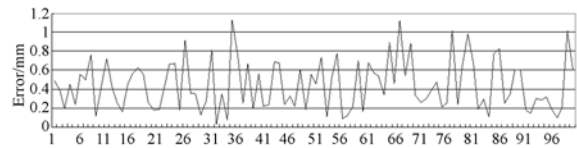


图 9 误差分布

Fig. 9 Error distribution

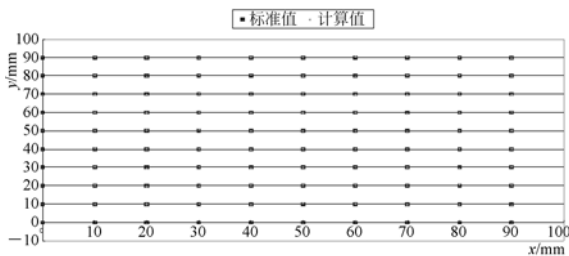


图 8 标准坐标值与计算坐标值对比图

Fig. 8 Standard coordinate values compared with calculating coordinate values

根据如下公式对坐标误差进行计算:

$$\nabla = \sqrt{((x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2)}. \quad (11)$$

将误差绘制如图 9 所示,可以看出误差基本保持在 0~1.2 mm 之间。误差分布在每个区间内较为平均,最大绝对误差为 1.12 mm(保留两位有效数字),平均误差为 0.44 mm。

根据公式 13 计算误差标准差约为 0.69,表明此数据集的离散程度较小:

$$S^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / N. \quad (12)$$

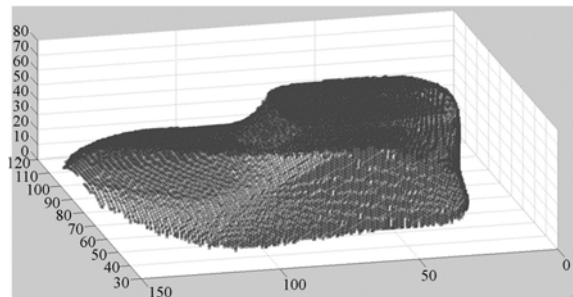


图 10 足部三维重建图形

Fig. 10 3D foot reconstruction image

图 10 为三维重建的足部模型,可见足型轮廓清晰,符合使用要求。

### 6 结 论

本文基于三维足型测量系统,提出了一种自动角点检测的相机标定方式,利用 Harris 检测算法与模板角点匹配算法进行检测,无需人工干预,操作简单,节省人力。研究过程中通过计算工具拟合光平面与像平面间对应的非线性函数,对图像进行校正,并对计算结果进行了误差分析。数

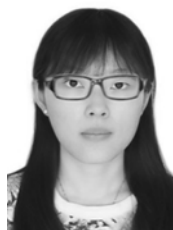
据表明,标定误差可保证不高于 1.20 mm,且平均误差为 0.44 mm。完全满足使用要求,最终的

足部三维重建图形效果良好。

#### 参考文献:

- [1] 叶晓露,施凯. 三维足型扫描技术在鞋类产品中的应用研究[J]. 中国皮革, 2015(17):48-51.  
YE X L, SHI K. Application of 3D foot scan technology in footwear products [J]. *China Leather*, 2015 (17) : 48-51. (in Chinese)
- [2] 弓太生,李姝,汤运启,等. 虚拟试鞋系统的模块构建[J]. 皮革科学与工程, 2015, 25(2):53-57.  
GONG T SH, LI SH, TANG Y Q, *et al.*. The module builds of virtual shoe fitting system [J]. *Leather Science and Engineering*, 2015, 25 (2): 53-57. (in Chinese)
- [3] 杨幸芳,黄玉美,高峰,等. 用于摄像机标定的棋盘图像角点检测新算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5):1109-1113.  
YANG X F, HUANG Y M, GAO F, *et al.*. New corner detection algorithm of chessboard image for camera calibration [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32 (5) : 1109-1113. (in Chinese)
- [4] 王修行,赖军,秦蕾,等. 三维足型测量技术及方法的研究[J]. 中国个体防护装备, 2008,5:7-10.  
WANG X X, LAI J, QIN L, *et al.*. The applications of three-dimensional foot scan technology [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2008, 5: 7-10. (in Chinese)
- [5] 袁振宇. 基于线结构光扫描的脚型重构测量研究[D]. 安徽:安徽大学, 2014.  
YUAN ZH Y. *A study on foot reconstruction measurement based on line-structured light scanning* [D]. Anhui: Anhui University, 2014. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 范翠翠. 图像角点检测方法的研究[D]. 青岛:青岛大学, 2008.  
FAN C C. *Research of image corner detection method* [D]. Qingdao: Qingdao University, 2008. (in Chinese)
- [8] 张从鹏,魏学光. 基于 Harris 角点的矩形检测[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8):2259-2266.  
ZHANG C P, WEI X G. Rectangle detection based on Harris corner [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (8) : 2259-2266. (in Chinese)
- [9] 何凯. 角点特征提取及匹配方法研究[D]. 南京:河海大学, 2005.  
HE K. *Research on corner detector and image matching based on corner* [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [10] 陈涛涛,迟道才,梁茜. 基于矩形框几何校正的多叶面积测量方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):206-213.  
CHEN T T, ZHI D C, LIANG Q. Multiple leaf area measurement based on rectangular box geometric correction method [J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (8) : 206-213. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈 硕(1993—),女,北京人,硕士研究生,2015年于北京信息科技大学获得学士学位,主要从事视觉测量,数字图像处理方面的研究。E-mail: S. Chen@bistu.com

#### 导师简介:



刘国忠(1966—),男,山西平遥人,博士,教授,2007年于清华大学精密仪器与机械学系获得博士学位,主要从事医疗器械,视觉测量,计算机系统方面研究。E-mail: liuguozhong@bistu.edu.cn