

文章编号 1004-924X(2011)08-1903-08

CCD 视觉检测系统的整体标定

唐启敬, 田行斌, 耿明超, 周游, 赵铁石*

(燕山大学机械工程学院, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 为了实现粒度分析仪对复合肥粒度分布的准确检测, 提出了 CCD 视觉检测系统的整体标定方法。首先, 分析了检测系统的检测精度; 对光源进行了伺服控制, 以减小光源的不稳定性、不均匀性对视觉检测系统检测精度的影响。然后, 确定 CCD 合适的扫描速度, 还原了被检测物体的真实形状。最后, 基于直纹曲面理论, 通过对不同直径的钢球进行多次标定, 获得其像素直径和像素坐标, 并借助 Excel、Matrox Imaging Library (MIL) 等工具建立了直纹曲面的数学模型, 实现了对 CCD 视觉检测系统的整体标定。实验结果表明, 整体标定以后, CCD 视觉检测系统响应的非均匀性得到了明显改善, 检测误差在 $\pm 3\%$ 以内, 达到了粒度分析仪的设计精度要求。

关键词: 视觉检测; 直纹曲面; CCD; 整体标定; 粒度分析仪

中图分类号: TP391, TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1903

Global calibration method for CCD based visual inspective system

TANG Qi-jing, TIAN Xing-bin, GENG Ming-chao, ZHOU You, ZHAO Tie-shi*

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

* Corresponding author, E-mail: tszhao@ysu.edu.cn

Abstract: To detect the size distribution of compound fertilizers accurately, an overall calibration method was proposed for the CCD based visual detective system of a particle size analyzer. Firstly, the detection accuracy of the inspective system was analyzed and the light source was controlled in servo to reduce the effect of instability and asymmetry of the light source on the detection accuracy of the visual detective system. Then, an appropriate scanning speed of CCD was determined to insure the real shape of the object to be detected. Finally, based on the theory of the ruled surface, the pixel diameters and pixel coordinates were obtained through measuring the balls with different diameters for several times. The overall calibration of the whole detective system was implemented by using Excel, MIL and other tools to establish mathematical model of ruled surfaces. Experiment results show that the non-uniformity response of the CCD vision inspection system has been significantly improved, and the detection error is within $\pm 3\%$. It is simple, intuitive, feasible, and can meet accuracy demand of the particle size analyzer.

Key words: visual detection; ruled surface; CCD; global calibration; particle size analyzer

收稿日期: 2010-10-29; 修订日期: 2010-12-31.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2009AA04Z205)

1 引言

视觉检测技术是精密测试技术领域中最具有发展潜力的新技术,它综合运用了电子学、光电探测、图像处理和计算机技术,将机器视觉引入到工业检测来实现对物体三维尺寸或位置的快速测量,具有非接触、速度快、柔性好等突出优点。近年来,视觉检测技术在国内外发展很快,已广泛应用于各个行业。粒度分析仪正是一套利用视觉检测技术实时获得复合肥的颗粒图像,并通过工控机对颗粒信息进行处理,得到颗粒的粒度分布、粒形特征的设备。它的视觉检测系统由两个 CCD 图像传感器、两个光学镜头、一个条形光源、一个图像采集卡及一个工控机组成。由于 CCD 响应的非均匀性、光学镜头的制造误差及光源的不稳定性等原因造成了视觉检测系统响应的不均匀性。因此,必须对 CCD 视觉检测系统进行标定。

目前,国内外许多学者在 CCD 校正方面做了大量工作。文献[1]分析了 CCD 暗电流和光电响应不均匀性产生的原因,在忽略暗电流等因素的条件下提出了量子效率和变波长输入光的校正方法,减小了 CCD 像素光电响应不均匀性带来的图像噪声;文献[2]分析了造成 CCD 像素灰度不均匀的原因,用最小二乘法估计出辐照度和期望灰度值的对应值,并有效地校正了 CCD 响应的非均匀性;文献[3]研究了对比度对 CCD 测量精度的影响并通过与亮度计结果做对比,校正了实验结果;文献[4]通过分析色选机成像系统中使用的大视场、大相对孔径光学系统的光能量衰减,提出了一种应用于色选机的图像灰度分布校正方法,该方法能快速有效地提高图像质量。文献[5]研究了一种基于分档电子快门控制和增益控制相结合的复合控制方法,通过对 CCD 相机实时自动调光,获得了更高质量图像。文献[6]实现了多相机测量系统的局部标定和全局标定;另外还有很多学者开展了 CCD 相机的标定研究^[7-11],但是提出的标定、校正方法算法大多比较复杂,亦或标定模型建立的比较理想,都不适合工程应用。

本文从实际工作中 CCD 视觉检测系统响应的非均匀性出发,首先分析了 CCD 视觉检测系统响应非均匀性产生的原因,然后针对粒度分析仪中的 CCD 视觉检测系统的特点,基于直纹曲面的性质^[12],提出了 CCD 视觉检测系统的整体标定方法,最后给出了该方法的实验验证及结论。

2 CCD 视觉检测系统及其响应的非均匀性分析

2.1 视觉检测系统的硬件构成

图 1 为粒度分析仪中的视觉检测系统原理图,是典型的背光式视觉检测系统。由于粒度分析仪机械尺寸的限制,CCD 的光学系统的物距不能太大(小于 260 mm),并要求 CCD 有尽量大的检测视角(大于 15°);同时由于采用高速线阵 CCD,扫描速度快,曝光时间短,所以粒度分析仪的 CCD 视觉检测系统配置了高亮度单色光源和大孔径、大视场的光学成像系统。

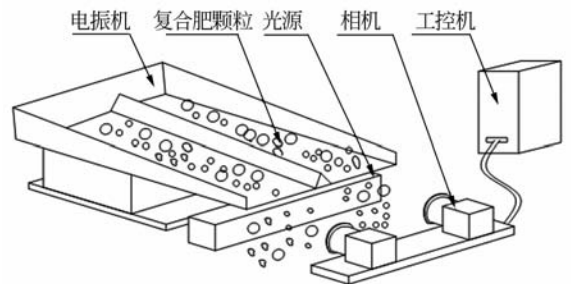


图 1 粒度分析仪检测系统

Fig. 1 Inspective system of particle size analyzer

2.2 检测精度分析

粒度分析仪检测的对象是直径为 0.5~20 mm 的近似球状颗粒。选用镜头焦距为 28 mm; CCD 图像传感器为 2 048 pixel,单个像素尺寸为 14 μm \times 14 μm 。镜头与被检测对象之间的距离是 250 mm,在该位置 CCD 传感器每个像素对应被检测物体宽度为 $\frac{0.014}{28} \times 250 = 0.125$ mm,即理论分辨率为 0.125 mm;1 mm 宽的物体在 CCD 传感器上对应 8 pixel,所以完全能满足粒度分析仪的检测精度。

2.3 CCD 视觉检测系统响应的非均匀性分析

由于 CCD 制造工艺过程及材料的非均匀性,如沟道掺杂浓度不均匀、表面密度分布不均匀以及栅氧化物厚度不同所造成的开启电压不同、感光单元有效面积不同等都会引起 CCD 光敏元件响应的非均匀性,而且越是大规模的器件,非均匀性问题越突出,同时由此造成的暗电流的分布也是不均匀的,这直接引起 CCD 的固定图像噪声,导致 CCD 在实际测量中存在所测得结果与实际值不符的问题。

光学镜头采用多种镜片结构主要是为了纠正单块镜片所造成的失真,但是由于光线在镜片中的折射率不一样,透过镜片后会因为镜片的干扰而产生像差,例如球面像差,晕光和失光。目前使用的镜头也只能尽量减少失真,不能避免失真现象。

高亮度单色光源中 LED 亮度随着自身温度的升高而产生一定程度的衰减,同时光源在发光面上的不均匀性也会造成 CCD 响应的非均匀性,此外环境光的照度也会影响到 CCD 成像面的照度值并直接影响检测结果。

3 CCD 视觉检测系统整体标定方法

考虑到上述影响因素,本文提出了 CCD 视觉检测系统的整体标定方法。因为线阵 CCD 和面阵 CCD 的视觉检测系统整体标定原理相似,所以本文仅对广泛应用于工业环境的黑白线阵 CCD 视觉检测系统整体标定原理进行阐述,标定过程中把不同直径的钢球作为检测对象。

3.1 系统光源的伺服控制

设 CCD 采集到光源辐照度值为 L_v ,光源期望辐照度值为 L_p , A 为设定的光源变化幅值(A 可通过实验得到,以不影响检测精度为准),当 $|L_v - L_p| > A$ 时,通过伺服控制光源的电源以使 $|L_v - L_p| \leq A$,将光源对视觉检测系统的影响减小到最小。

3.2 系统扫描速度的确定

线阵相机是行扫描相机,采集的 y 值与扫描速度相关,只有选择合适的扫描速度才能真实的反映实际物体的形状。粒度分析仪视觉检测系统的颗粒是以自由下落运动形式被检测的。图 2 为图像采集系统的物理模型。

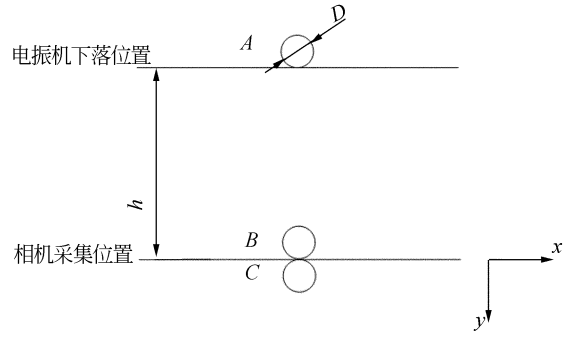


图 2 图像采集系统的物理模型

Fig. 2 Physical model of particle inspection system

如图 2 所示,颗粒从距相机采集位置高 h 的下落位置 A 处下落,到达 B 处的时间为 $t_1 = \sqrt{2h/g}$,从颗粒被相机扫描至颗粒完全通过相机扫描面线到达 C 处时的时间为 $t_2 = \sqrt{2(h+D)/g}$,则颗粒通过检测面所用的时间为:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \sqrt{2(h+D)/g} - \sqrt{2h/g} \quad (1)$$

假设,相机的行扫描速度为 v ,则颗粒 y 方向扫描的行数为

$$n = \Delta t / v = (\sqrt{2(h+D)} - \sqrt{2h}) / (v\sqrt{g}) \quad (2)$$

颗粒的 y 方向的值是由 y 方向的扫描行数 n 决定的,由式(2)得出它同颗粒的下落高度和颗粒直径大小相关,而颗粒 x 方向的值仅与颗粒本身大小相关而与扫描速度无关,所以必须标定 D_y/D_x 的关系,使检测钢球时 $D_y/D_x = 1$ 。在同一速度下,不同直径的钢球的 D_y/D_x 是不同的,即在同一扫描速度下无法避免所有的颗粒都不失真。为选择合适的扫描速度,进行标定的钢球直径必须具有代表性,调整扫描速度使检测钢球时 D_y/D_x 为 1。其他颗粒 y 方向的值,可在后期经过算法进行校正。

3.3 基于直纹曲面的整体标定方法

3.3.1 理论基础

直纹曲面:给定曲线 $\Gamma = a(u) (\alpha \leq u \leq \beta)$,在 Γ 上的每个点给定一单位向量 $l(u)$,通过 Γ 的每一个点做方向向量为 $l(u)$ 的直线,这些直线构成的曲面称为直纹曲面,其中 Γ 称为直纹曲面的导线,上述直线簇中的直线称为母线。直纹曲面的数学方程: $r = p(u) + vl(u)$,如图 3 所示^[13]。

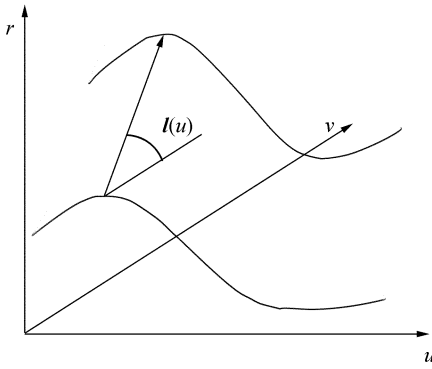


图 3 直纹曲面数学模型

Fig. 3 Mathematical model of ruled surface

3.3.2 直纹曲面数学模型的建立

粒度分析仪视觉检测系统中的光源、光学镜头及 CCD 造成的误差是系统误差,误差函数是随像素点的位置的不同而改变的,可以用标定的方法对这些误差进行校正。由于粒度分析仪的测量范围是直径为 0.5~20 mm 的近球体,所以标定采用直径为 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,15 mm 的钢球进行。

参数说明:

j 表示任意钢球直径; i 表示 x 坐标任意位置; p 表示检测得到钢球的像素直径; p_{ji} 表示直径为 j 的钢球在任意 x 处自由下落。

(a) 2 mm 钢球从任意 x 位置扔下 n 次,由图像采集可以得到 p_{2i} 及其对应的 x 坐标值。经多

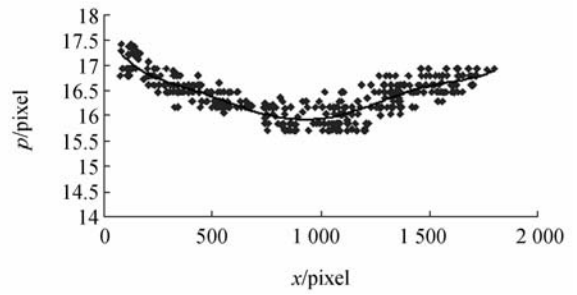


图 4 2 mm 钢球像素直径与 x 坐标关系

Fig. 4 Relationship between 2 mm ball's pixel diameter and x coordinates

次实验验证,6 次曲线准确率已经足够,利用 Excel 可以根据 n 个点拟合出一条曲线,并得出一个 6 次方曲线方程,如图 4 所示。

其拟合曲线方程为:

$$p_2(x) = a_1x^6 + a_2x^5 + a_3x^4 + a_4x^3 + a_5x^2 + a_6x + a_7. \tag{3}$$

(b) 将其他直径钢球:1,3,4,5,6,7,8,9,10,12,15 mm 分别按照(a)中的步骤做同样的实验,能得出不同直径钢球对应的像素直径与 x 坐标关系方程,即

$$p_j(x) = a_{j1}x^6 + a_{j2}x^5 + a_{j3}x^4 + a_{j4}x^3 + a_{j5}x^2 + a_{j6}x + a_{j7}. \tag{4}$$

(c) 任取一系列 x 值, $x = \{10, 30, 50, \dots, 2010, 2030\}$, 根据函数 $p_j(x)$ 可以分别求出对应 x 处的不同钢球的像素直径 $p_j(x_j)$, 如表 1 所示。

表 1 不同钢球像素直径与 x 坐标数据表

Tab. 1 Pixel diameters and x coordinates of different balls

x	D/mm						
	1	3	...	D_j	...	12	15
10	$p_1(10)$	$p_3(10)$	..	$p_j(10)$	...	$p_{12}(10)$	$p_{15}(10)$
30	$p_1(30)$	$p_3(30)$	..	$p_j(30)$	...	$p_{12}(30)$	$p_{15}(30)$
..
..	..	..	..	$p_j(x_i)$	..	..	..
..
2010	$p_1(2010)$	$p_3(2010)$	..	$p_j(2010)$	..	$p_{12}(2010)$	$p_{15}(2010)$
2030	$p_1(2030)$	$p_3(2030)$	..	$p_j(2030)$	..	$p_{12}(2030)$	$p_{15}(2030)$

(d) 根据表 1 第一行的像素直径和对应的实际直径做直线,以实际直径为横坐标,像素直径为

纵坐标,可以得到 $x=10$ 处像素直径与实际直径之间的关系,如图 5 所示。

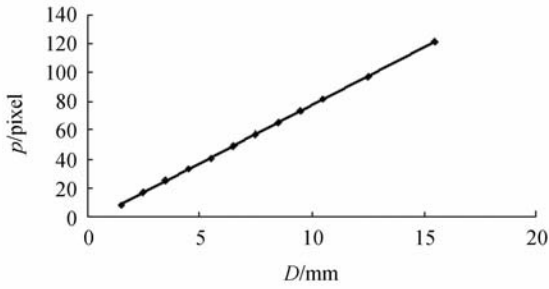


图 5 $x=10$ 处像素直径与实际直径之间关系

Fig. 5 Relationship between pixel diameters and actual diameters when $x=10$

由 Excel 绘图可以得到曲线对应的数学关系公式:

$$p_j(10) = k_{10}D_j + b_{10}. \quad (5)$$

同理,可得到 $x=30, 50, \dots, 2010, 2030$ 处的像素直径和实际直径之间的关系式:

$$p_j(x_i) = k_i D_j + b_j. \quad (6)$$

这样得到,类似与式(5)的直线方程 101 个,包含 101 个斜率 $k_{10}, k_{30}, \dots, k_j, \dots, k_{2010}, k_{2030}$,令 $k_{10}, k_{30}, \dots, k_i, \dots, k_{2010}, k_{2030}$ 为纵坐标, $x=10, 30, 50, \dots, 2010, 2030$ 为横坐标绘图,并用 Excel 拟合出斜率与 x 坐标之间的关系曲线,如图 6 所示。其拟合曲线方程为:

$$k(x) = m_1 x^6 + m_2 x^5 + m_3 x^4 + m_4 x^3 + m_5 x^2 + m_6 x + m_7.$$

(e)各个关系式确定以后可开始选择直纹曲面的母线和导线。由于在粒度分析仪的实际检测中,1~4 mm 复合肥颗粒占重要比例,而 2 mm 颗粒作为一个粒级分界,其准确性对整体检测精度有重要影响。为此将 2 mm 钢球的检测信息作为直纹曲面的基准。

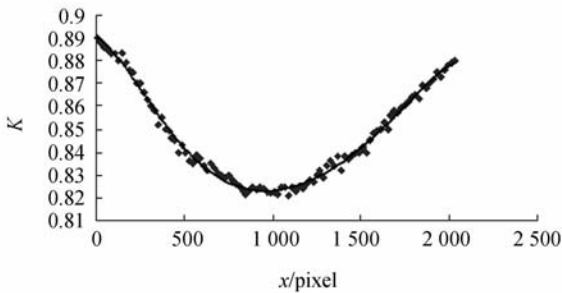


图 6 斜率与 x 坐标的关系

Fig. 6 Relationship between slopes and x coordinates

任意大小的一个钢球,在任意位置扔下,通过 MIL 软件都能得到这一点 x 坐标和像素直径,将检测到 x_i 值代入式(3)可以得到回归后的 2 mm 钢球对应的像素直径 $p(x_j)$,此曲线将作为直纹曲面导线上的一个基点,若要求得该钢球的像素直径根据直线点斜公式及式(9)可得。

$$p_j(x_i) - p_2(x_i) = k_i(D_j - D_2), \quad (9)$$

移项得

$$p_j(x_i) = p_2(x_i) + k_i(D_j - D_2), \quad (10)$$

式中的 $p_2(x_i)$ 就是直纹曲面导线上一点, k_i 为该点对应的方向向量, $(D_j - D_2)$ 为两条导线之间的截距。则直纹曲面方程可表示为:

$$p_j(x) = p_2(x) + k(x)(D_j - D_2), \quad (11)$$

式中的 $p_j(x)$ 为待检测钢球的像素直径, D_j 为待检测钢球的实际直径。以此建立的直纹曲面数学模型如图 7 所示。

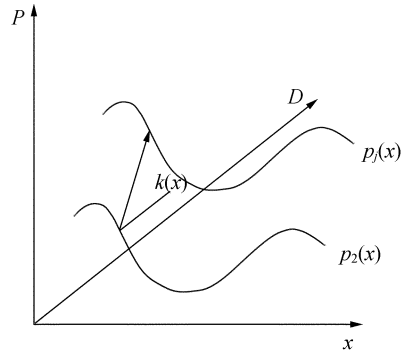


图 7 颗粒检测系统中的直纹曲面

Fig. 7 Ruled surface in particle inspective system

(f)对式(6)~(11)进行整理

$$D_j = D_2 + (p_j(x) - p_2(x))/k(x), \quad (12)$$

其中 $p_j(x)$ 为 MIL 软件求得的钢球像素直径 p , 即

$$D_j = D_2 + (p - p_2(x))/k(x). \quad (13)$$

当 CCD 图像传感器检测到颗粒时, MIL 软件可以计算其像素直径 p , 中心 x 坐标, 通过式(3)可以求得 $p_2(x)$, 通过式(7)可以求得 $k(x)$, 整个颗粒直径标定系统可以由式(13)计算完成, 标定系统不仅简洁、稳定, 而且颗粒标定程序便于编程。

4 实验与结果

图 8 为粒度分析仪的 CCD 视觉检测系统, 由

黑白线阵 CCD 搭配光学镜头以及红色高亮光源组成。



图 8 粒度分析仪的 CCD 视觉检测系统

Fig. 8 Inspective system of particle size analyzer

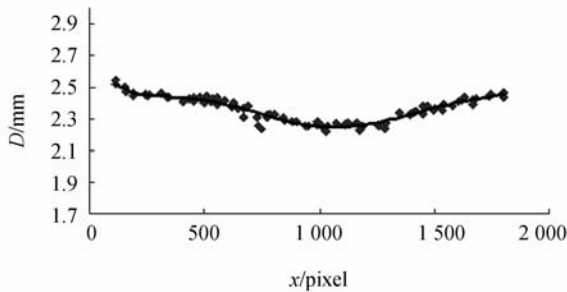


图 9 标定前的 $D-x$ 关系曲线

Fig. 9 $D-x$ curve before calibration

通过 Excel 分别拟合出标定前后检测所得直径和像素坐标 x 的关系曲线,如图 9~图 10 所示。

经实验验证,CCD 视觉检测系统在标定前最大的检测误差达到 8%,而在经过整体标定以后的检测系统检测误差最大为 2.82%,达到粒度分析仪的 $\pm 3\%$ 的精度要求。通过比较图 9 和图 10 可知,检测系统在经过整体标定以后,检测系统响应的非线性得到了比较明显的改善。

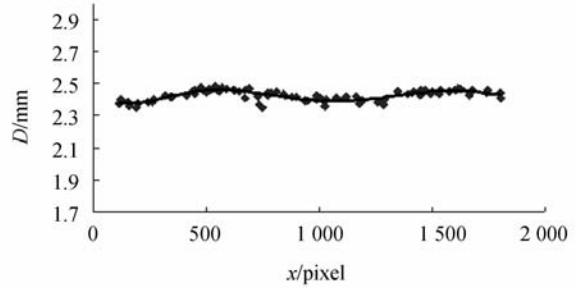


图 10 标定后的 $D-x$ 关系曲线

Fig. 10 $D-x$ curve after calibration

5 结 论

本文提出一种应用于粒度分析仪的基于直纹曲面的 CCD 视觉检测系统整体标定方法,该方法考虑了影响视觉检测系统精度的多个因素,建立了被检测物体的像素直径与实际直径之间的数学模型,通过实验验证了检测系统和标定方法的可行性。对粒度分析仪进行的标定实验表明,粒度分析仪能精确检测直径为 0.5~20 mm 的颗粒,满足复合肥生产的实际使用需求;搭建的检测系统能实现动态连续检测,实时分析并把结果返回至 DCS 控制系统,实现了复合肥生产的闭环控制。CCD 视觉检测系统的检测误差在 $\pm 3\%$ 之内,达到了粒度分析仪设计的精度要求。该标定方法简洁、稳定,非常适合工程应用。但当被测物直径 < 0.5 mm 时,视觉检测系统的检测误差 $> \pm 3\%$,不能满足粒度分析仪的精度要求,有待进一步研究。

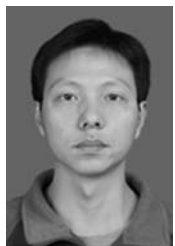
参考文献:

- [1] 陈迎娟,张之江,张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(2): 216-220.
CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel nonuniformity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 216-220. (in Chinese)
- [2] 程万圣,赵杰,蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 314-318.
CHENG W SH, ZHAO J, CAI H G. Correction

- method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 314-318. (in Chinese)
- [3] 李志宏,雷美容,周学艳,等. 基于 CCD 的目标与背景对比度测量与实验校正[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(1): 22-25.
LI ZH H, LEI M R, ZHOU X Y, et al.. Measurement and calibration of contrast base on CCD [J]. *Journal of Changchun University on Science and Technology (Natural Science)*, 2008, 31(1): 22-25. (in Chinese)

- [4] 朱均超,刘铁根,刘德瑞,等. 一种线阵 CCD 图像灰度分布快速校正方法[J]. 光电工程,2007,34(12):108-112.
ZHU J CH, LIU T G, LIU D R, *et al.*. Linear CCD gray-scale distribution real-time calibration method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(12):108-112. (in Chinese)
- [5] 关澈,王延杰. CCD 相机实时自动调光系统[J]. 光学精密工程,2008,16(2):358-365.
GUAN CH, WAN G Y. Real-time auto light control system of CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):358-365. (in Chinese)
- [6] 艾莉莉,袁峰,丁振良. 应用线阵 CCD 的空间目标姿态测量系统[J]. 光学精密工程,2008,16(1):161-165.
AI L L, YUAN F, DING ZH L. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):161-165. (in Chinese)
- [7] 李喆,丁振良,袁峰. 基于共面点的多视觉测量系统的全球标定[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)
- [8] 贾倩倩,王伯雄,赵博华,等. 基于液晶靶标的多 CCD 线结构光测量系统全局标定[J]. 光学精密工程,2008,16(3):2990-2996.
JIA Q Q, WANG B X, ZHAO B H, *et al.*. Global calibration of multi-CCD line-structured-light measurement system based on LCD target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):2990-2996. (in Chinese)
- [9] JANESICK J R. *Scientific Charge-Coupled Device* [M]. Bellingham, WA: SPIE, 2001.
- [10] CHEN T, SHIBASAKI R, MORITA K, High precision georeference for airborne three-line scanner[TLS]imagery[C]. *3rd International Image Sensing Seminar on New Development in Digital Photogrammetry, Gifu, Japan*, 2001: 71-82.
- [11] MANN S. *Intelligent Image Processing* [M]. New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [12] 蔡国梁,李玉秀,王世环. 直纹曲面的性质及其在工程中的应用[J]. 数学的实践与认识,2008,38(8):98-102.
CAI G L, LI Y X, WANG SH H. Ruled surface properties and application in engineering [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008, 38(8):98-102. (in Chinese)
- [13] 蔡倩倩,须履瑚,梁在中,等. 实用数学手册[M]. 北京:科学出版社,2000.
CAI Q Q, XU F H, LIANG Z ZH, *et al.*. *Practical Handbook of Mathematics* [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)

作者简介:



唐启敬(1983—),男,广西桂林人,博士研究生,2007年于燕山大学获得学士学位,主要从事机器人技术的研究。E-mail: qjtang@ysu.edu.cn



田行斌(1972—),男,河北秦皇岛人,讲师,1993年、1996年、2000年于西北工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机械动、机器人技术等方面的研究。E-mail: xbtian@ysu.edu.cn



耿明超(1984—),男,河北保定人,硕士研究生,2007年于河北建筑工程学院获得学士学位,主要从事机器人技术的研究。E-mail: gmc0109@sina.com.cn



周游(1982—),男,山东淄博人,硕士研究生,2006年、2009年于燕山大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为机器人。E-mail: zhouyou@ysu.edu.cn

导师简介:



赵铁石(1963—),男,河北秦皇岛人,教授,博士生导师,1985年于合肥工业大学获得学士学位,1992年、2000年于燕山大学分别获得硕士、博士学位,2000年至2002年为英国伦敦大学 King's College 博士后研究员,主要从事并联机器人理论与应用、仿生与医疗康复机器人、微操作机器人与微机电系统、计算机图像处理与光电集成系统、新型传感器研发等方面的研究。E-mail: tszhao@ysu.edu.cn

●下期预告

Fizeau 干涉仪主机的热稳定性设计与分析

王平,王汝冬,田伟,王立朋,隋永新,杨怀江

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

为了实现对 Fizeau 干涉仪光机系统的热稳定性进行分析,建立了光-机-热耦合模型。对该系统的计算流程、环境温度和系统光学质量的随机性、系统光学质量与环境温度的关系等进行了研究。首先,根据实验室温控条件建立环境温度的随机分布模型,然后进行光-机-热耦合分析,计算不同温度下光机结构的热分布、结构变形,然后通过 Zernike 多项式拟合透镜表面面形和曲率半径,利用光学仿真软件分析变形后的光学系统。最后对系统光学质量进行概率分析,评价热稳定性。分析结果表明,温度控制在 22 ± 0.1 °C 时,在 2σ 的置信水平下,Fizeau 干涉仪的出射光波前的重复性可以达到 $0.016\% \lambda$,基本满足干涉仪主机光机系统的重复性要求。