

文章编号 1004-924X(2012)10-2260-08

解决大幅面 CCD 相机三色分离的方法

刘霖, 王平*, 刘娟秀, 叶玉堂, 贾宏宇
(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要:针对大幅面彩色电荷耦合器件(CCD)相机三通道色彩彼此分离的问题,深入研究了 CCD 的内部结构,分析了多线阵彩色 CCD 三色分离的原因,提出了一种将三通道数据分开缓存的修正方法,并制作了国内第一台高速多线阵 CCD 大幅面扫描仪。该修正方法根据多线阵彩色 CCD 内部工艺结构,将三通道数据在硬件上进行分开缓存、重组,实现真实色彩的还原。理论分析与实际应用效果表明:经过处理后的图像 R、G、B 三色分离现象得到极大改善,在 1 200 DPI 的分辨率下,三通道色彩未见分离。制作的大幅面扫描仪在 600 DPI 的分辨率下,扫描速度可达 5.08 cm/s,扫描处理一张 A0 的图纸只需 30 s 的时间,图像拼接处像素误差在 ± 2 以内。

关键词:三线阵 CCD 相机;彩色 CCD;大幅面扫描仪;三色分离

中图分类号: TN386.5; V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2260

Improved method to solve color separation for large format CCD camera

LIU Lin, WANG Ping*, LIU Juan-xiu, YE Yu-tang, JIA Hong-yu

(School of Opto-electronic Information, University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 610054, China)

* Corresponding author, E-mail: 309026813@qq.com

Abstract: To correct the color separation of a large format CCD camera, this paper researches the internal structure of the CCD, analyzes the reasons of three color separation of multi-linear-array CCDs and proposes a new correction method to cache three-channel data separately. Then, it establishes the first high-speed tri-CCD large format scanner domestically. On the basis of the internal process structures of the tri-CCD, this correction method caches and restructures the three-channel data in hardware separately, and restores the true color. The theoretical analysis and practical application results show that three-color separation phenomenon has been greatly reformed after treated, and three-channel color is not separation in 1 200 DPI. In 600 DPI, the scan speed of the scanner produced by our team has been up to 5.08 cm/s, and it only takes 30 s to scan a A0 size drawing. Furthermore, the splicing error of the image after scanning will be superior to ± 2 pixels.

Key words: tri-CCD camera; color CCD; large format scanner; three color separation

收稿日期: 2012-05-11; 修订日期: 2012-07-03.

基金项目: 粤港招标关键领域重点突破项目(No. w0511159); 国家兵器集团资助项目(No. w0511142)

1 引 言

在数字信息时代,基于多线阵彩色 CCD 的大幅面扫描仪一直是国内外研究的重点,但因其跨多个学科,涉及光学设计、机械加工、电路制作、软件编写、算法等多方面的知识,因此国内在这方面基本处于空白状态^[1-2]。

扫描仪最重要的特点是真实的反应物体本来面貌,因此 CCD 采集的数据准确与否、数据处理是否得当是研制 CCD 扫描仪的难点。多线阵彩色 CCD 的基本结构使得物体同一物理位置的 R、G、B 3 通道数据并不是在同一时刻输出,而是有一定的时间差,如果不对数据进行任何处理,得到的图像将是 R、G、B 三色彼此分离的^[3-4]。CCD 三色分离严重影响了图像的效果,必须进行修正。常用的修正方法有以下 3 种^[5-6]。

1) 棱镜分光法

棱镜分光法是通过分光棱镜将同一束光根据 R、G、B 不同波段进行分离,然后让 CCD 3 条感光线阵列分别感应不同波段的光,这样得到的图像就没有三色分离的问题。该方法原理简单,但对加工精度要求极高,成本将大幅提高,且很容易受如震动等环境因素的影响,不适合实验室之外的工程应用。

2) 异步时钟控制曝光法

异步时钟控制曝光法是根据三色分离的行数和物体相对相机的运动方向,调整 CCD 3 条感光线阵列曝光的先后次序和延迟时间,使同一位置

的图像分别被 CCD 3 条感光线阵列感光,然后再合成清晰的图像。该方法成本较低,减少了数据处理时间,但是以牺牲曝光速度为代价来达到修正目的,只有当速度要求不太高时才适用。

3) 软件算法修正

软件算法修正是根据 R、G、B 三通道数据的分离是固定的来修正的。通过在 PC 机内存区对数据重新定位,实现对三色分离图像进行修正。该方法不需对硬件设计进行改进,节约了成本。但需要粗略知道物体与相机的直接距离,以及相对的运动速度;另外,由于大幅面扫描仪数据量大,后端的数据拼接、颜色校正等操作占用了大量的时间,而数据前端的处理时间又要求尽量短,故此方法亦不适用。

由上述分析可知,现有的修正方法虽然可以在一定程度上消除或减小多线阵 CCD 三色分离的问题,但应用在大幅面扫描仪上都存在很大的局限和不可操作性。

针对这个问题,笔者深入研究了 CCD 的内部结构,通过多次试验验证,提出了一种新的处理多线阵彩色 CCD 三色分离的新方法——三通道数据分开缓存法。

2 基本理论

2.1 CCD 三色分离现象

图 1(a)为 CCD 输出数据未作处理所得的图像,图 1(b)为物体真实图像。



(a) CCD 输出数据未作处理所得图像 (b) 物体真实图像
(a) Image of unprocessed CCD output data (b) Real image of object

图 1 CCD 输出的未处理图像和真实图像对比

Fig. 1 Comparison of unprocessed image and real image

2.2 三色分离的原因

图 2 为多线阵彩色 CCD 3 条感光线阵列的分布情况, R、G、B 3 条感光线阵列平行排列, 相邻 2 列之间间隔若干个像素的距离^[7-8]。

由于 3 条感光线阵列不在焦平面上的同一位置, 所以在某一时刻成像时, R、G、B 3 行信息并不代表物平面上同一位置的信息, 即同一时刻记录的 3 个彩色分量对应不同的物点, 因此输出图像的 3 个彩色分量存在位置偏移, 这是由于传感器本身的恒定几何畸变, 即系统几何畸变而形成的。图 3 为多线阵彩色 CCD 几何失真示意图。理想的情况下, 3 条线阵应处在焦平面的同一位置, 可使图像像素的 3 个彩色分量对应同一物点, 颜色校正的一个目的就是将平行排列三线阵的图像转化成相同位置三线阵的图像^[9-10]。

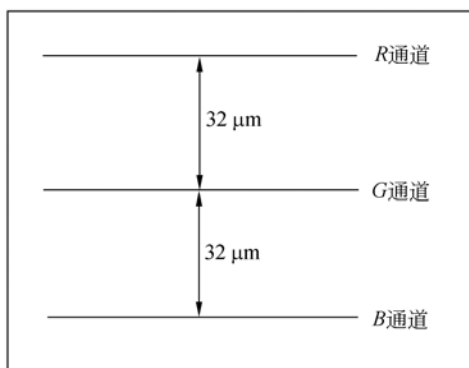


图 2 多线阵 CCD 3 条感光线阵列分布情况

Fig. 2 3 sense light array distribution for multi-line array CCD

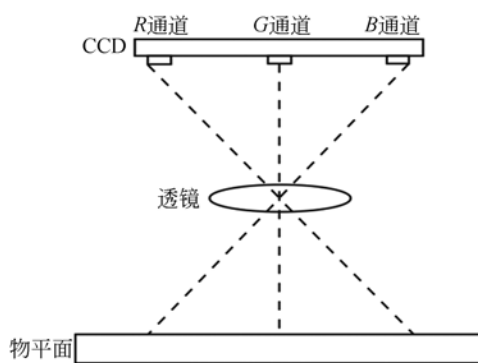


图 3 多线阵 CCD 几何失真示意图

Fig. 3 Geometric distortion schematic for tri-CCD

由多线阵彩色 CCD 的结构带来的这种彩色图像的三色分离, 严重影响了图像的可读性和原始数据的真实性, 如不加修正, 无论后期处理算法

有多优越, 大幅面扫描仪的整体性都会受很大的影响。为此, 根据问题产生的原因, 考虑到大幅面扫描仪数据量大, 软件操作时间紧等问题, 笔者提出了在硬件上对 3 个通道数据分开缓存拼接的修正方法。

2.3 三通道数据分开缓存法

由上述对三色分离产生机理的分析可知, 三色分离产生的本质原因是多线阵彩色 CCD 3 条感光线阵列有一定间隔, 在同一时刻三阵列采集的不是同一物理位置上的数据, 即同一物理位置的图像分别在不同时刻被三通道感光, 而在还原图像时将之当成同一位置进行处理, 导致输出的 R、G、B 三通道是有一定间隔的。因此只要在还原图像时将同一时刻三通道的数据分开处理就可以避免三色的分离。考虑到软件上做处理时间的紧迫性, 故采用在硬件上进行三通道数据的分开缓存拼接。

三通道数据分开缓存法根据 R、G、B 三色固定的分离距离, 将三通道的输出数据分开缓存不同的行数, 进行相应的处理。与上述的软件修正不同, 这种数据缓存是在外部硬件上处理的, 有效减少了数据处理时间。

缓存 3 个通道数据之前, 需要知道每个通道需要缓存的行数。设计选用的是像元尺寸为 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$, 相邻 2 个感光阵列间距为 $32 \mu\text{m}$ 的 CCD。即物平面上相邻 2 列感光阵列所感光位置的间隔始终是 8 pixel, 但由于实际检测时, 扫描仪工作的方式为: 相机固定, 待扫描物体以一定速度沿垂直于扫描方向匀速运动。故扫描的图像 3 个通道数据的偏移量还和相机的曝光时间 t_{exp} 以及物体相对相机的运动速度 v 有关。

当相机扫描 n 行所需的时间 t 恰好等于物体运动 n 行的时间时, 相机的曝光时间 t_{exp} 和物体的运动速度 v 处于正确的匹配关系。此时, 相机扫描的图像刚好能准确地反应物体的真实面貌, 称此时物体的运动速度为匹配速度。设 CCD 像元尺寸为 ΔX , 相机镜头放大率为 ρ , 焦距为 l , 物距为 u , 相同时间内相机扫描和物体运动距离分别为 x 和 S , 则有:

$$nt_{\text{exp}} = S/v, \quad (1)$$

$$x/S = l/u, \quad (2)$$

$$l/u = \rho, \quad (3)$$

$$x = n\Delta X, \quad (4)$$

联立式(1)、式(2)、式(3)、式(4)可得匹配速度:

$$v_0 = v = \Delta X / (\rho T), \quad (5)$$

设相邻 2 个感光阵列间距为 X , 物体运动 s 位移所需的时间为 t , 则有:

$$X/s = l/u, \quad (6)$$

$$s = vt, \quad (7)$$

$$\Delta n = t / t_{exp}, \quad (8)$$

联立式(3)、式(6)、式(7)、式(8)可得三色错位像素个数:

$$\Delta n = X / (\rho t_{exp} v), \quad (9)$$

当物体运动速度大于相机扫描速度时,得到的图像是在物体运动方向上被压缩了的抽样图像,即间隔地摄取了物体某些部分的图像信息,丢失了一部分反应物体真实面貌的数据,且速度越大丢失的数据越多。反之,当物体运动速度小于相机扫描速度时,得到的图像是在物体运动方向上因为数据重叠而被拉伸了的图像;同样,速度越小重复的数据越多。不排除在某些特殊情况下,相机工作于这 2 种状态的可能性,但由于扫描仪是为了真实地反应物体面貌,因此相机需要工作在曝光时间和物体运动速度处于正确匹配关系的情况下,即待扫描物体需要在匹配速度下运动^[11-12]。

当 $v = v_0$ 时,即物体运动速度与相机扫描速度匹配时,三通道错位像素个数:

$$\Delta n = X / (\rho t_{exp} v_0) = X / \Delta X. \quad (10)$$

当速度匹配时,相邻 2 个通道像素分离个数由相机所用 CCD 本身决定。本设计选用的是 SONY 公司的彩色线阵 CCD,像元尺寸为 $4 \mu m \times 4 \mu m$,相邻 2 个感光阵列间距为 $32 \mu m$,即 $\Delta X = 4 \mu m$, $X = 32 \mu m$,即可得速度匹配时,相邻 2 个通道像素分离个数为 $\Delta n = X / \Delta X = 8$,即相邻 2 个通道需要校正的像素个数为 8。

3 实验结果与讨论

3.1 方法执行过程

三通道数据分开缓存法流程图如图 4 所示。因多线阵彩色 CCD 大幅面仪扫描的对象多为 A0 及更大幅面,数据量很大,现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)内部的缓存根本不足以存储足够多的数据,因此本设计将三通道的数据分别缓存在 3 个外部的静态随机

存储器(SRAM)内,分别定义为 SRAM_R、SRAM_G、SRAM_B,数据传输方式采用 CCD 扫描一行,数据传输一行的方式^[13]。收到上位机发送的开始采集的指令后,FPGA 开始向 CCD 发送驱动时序,CCD 开始扫描物体图像,R、G、B 三通道输出的模拟数据分别经过 3 个 A/D 转换器后成为 14 位精度的数字信号。在不影响图像精度的情况下,经过采样,提取适合精度的高 8 位有效数据进行硬件上的分开缓存^[14]。对于 CCD 三通道开始的 17 行数据,SRAM_R 存储 R 通道的前 17 行数据,SRAM_G 存储 G 通道的第 9 行到第 17 行数据,SRAM_B 存储 B 通道的第 17 行数据,3 个 SRAM 地址都从 0 开始递增。然后在开始采集 CCD 的第 18 行数据之前,同时读出 SRAM_R、SRAM_G、SRAM_B 第 1 行地址所放的数据,并将 CCD 三通道的第 18 行数据分别写入 3 个 SRAM 的第 1 行地址处,读出第 2 行地址所放的数据。循环写入读出数据,实现 R、G、B 三通道数据的缓存、重组。数据存储示意图如图 5 所示。

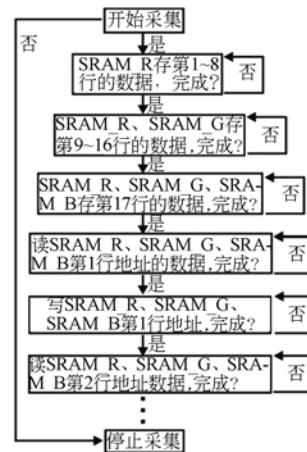


图 4 三通道数据分开缓存流程图

Fig. 4 Separated cache flow chart of three-channel data

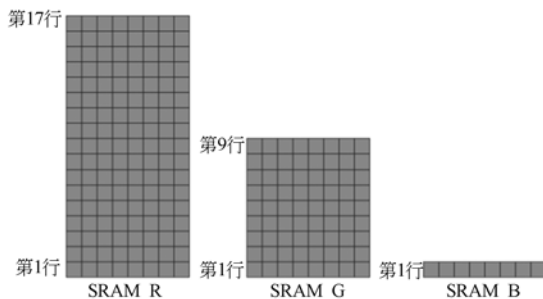


图 5 三通道数据存储示意图

Fig. 5 Diagram of three-channel data storage

3.2 方法试验结果

经过硬件上对 R、G、B 三通道数据的分开分量缓存后,三色分离现象得到了消除。在

1 200 DPI 的分辨率下,三通道色彩未见分离。图 6 (a)、6(b)分别为处理前后的对比图。

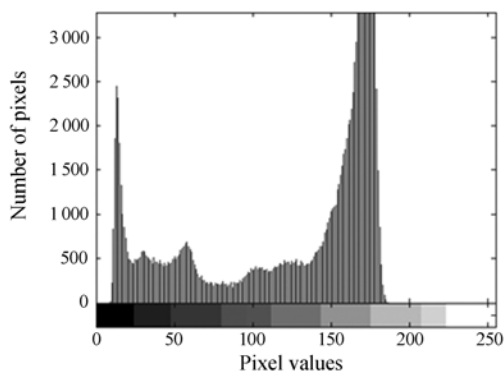


(a) 处理前的图像 (b) 处理后的图像
(a) Unprocessed image (b) Processed image

图 6 处理前后对比图

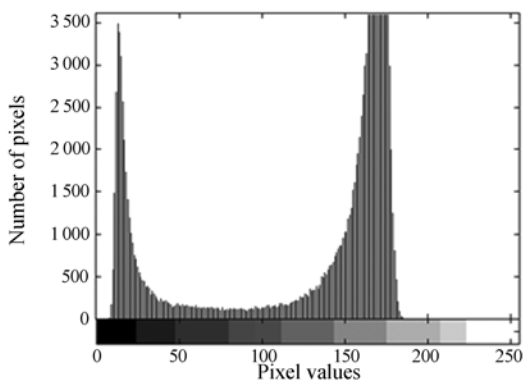
Fig. 6 Comparison of processed and unprocessed images

图 7(a)、7(b)分别为图 6(a)、6(b)对应的直方图。从图中可以看出经过处理后的图像的直方图明显平滑了很多。



(a) 处理前直方图

(a) Histogram of unprocessed image



(b) 处理后直方图

(b) Histogram of processed image

图 7 处理前后直方图对比

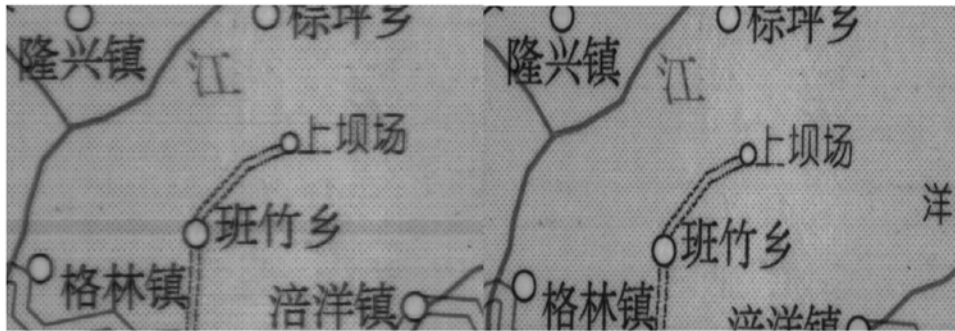
Fig. 7 Comparison of histograms of processed and unprocessed images

3.3 大幅面扫描仪上应用的实际效果

大幅面扫描仪扫描的物体一般为 A0 及更大的幅面,一般的 CCD 根本不能覆盖这么大的范围,因此大幅面扫描仪上实际用的是 3 个彩色 CCD。扫描开始时,3 个 CCD 同时开始采集,输出的数据经 AD 转换器和缓存后传给上位机,经过软件算法的数据拼接、色彩校正,最终成为一张完整的图像^[15]。

考虑到 1 200 DPI 分辨率的图像占用的内存大,处理起来耗费大量时间,实际意义不大,因此大幅面扫描仪实际分辨率为 600 DPI。大幅面扫描仪上相机的行频为 1 200 Hz,即 1 s 扫描 1200 行,在 600 DPI 的分辨率下就是 1 s 扫描 5.08 cm (2 in),因此物体的运动速度为 5.08 cm/s。扫描一张 A0(118.9 cm×84.1 cm)大小的纸需要的时间就是 $t=118.9/5.08=23.4$ s,再加上软件上的其他处理,一张 A0 大小的纸从进纸到完成扫描只需要大约 30 s 的时间,速度非常快。

经过硬件上对 R、G、B 三通道数据的分别分量缓存重组后,大幅面扫描仪扫描出来的图像清晰、色彩鲜明、轮廓锐利。图 8 (a)、8(b)分别为处理前后的图像。为了便于阅读,图片均经过了旋转,因此图(a)中色彩分离为 X 轴方向。图 9、图 10 分别为大幅面扫描仪整机和大幅面扫描仪所用的自制的多线阵彩色 CCD 相机。



(a) 处理前地图的扫描图像 (b) 处理后地图的扫描图像
(a) Unprocessed image of map (b) Processed image of map

图 8 大幅面扫描仪扫描图像处理前后对比图

Fig. 8 Comparison of processed and unprocessed images by large format scanner



图 9 多线阵 CCD 大幅面扫描仪
Fig. 9 Tri-CCD large format scanner



图 10 大幅面扫描仪上自制的 CCD 相机
Fig. 10 CCD camera on large format scanner

4 结 论

通过分析多线阵彩色 CCD 三色分离的原因并比较现有的三色分离修正方法,提出了一种在硬件上分开缓存重组三通道数据来解决大幅面 CCD 相机三色分离的新方法,制作了国内第一台多线阵彩色 CCD 大幅面扫描仪,解决了扫描图像

三色分离的问题。

实验及测试结果表明:经过三通道数据分开缓存法处理后的图像 R、G、B 三色分离现象得到极大改善,在 1 200 DPI 的分辨率下,三通道色彩未见分离。项目组制作的大幅面扫描仪在 600 DPI 的分辨率下,扫描速度可达 5.08 cm/s,扫描处理一张 A0 的图纸大概需要 30 s 的时间,图像拼接处误差在 ± 2 以内。

参考文献:

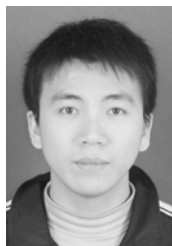
- [1] 李彤. 大幅面扫描仪光学、机械系统的研究设计与实现[D]. 北京:清华大学, 2005.
LI T. *Research, design and realization of optical system and mechanical system of large format scanner*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [2] 蒋勇. 多 CCD 大幅面扫描仪的驱动程序设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2006.
JIANG Y. *Design and realization of the driver program of multi-CCD scanner*[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [3] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2000.
WANG Q Y. *Application Technology of CCD* [M]. Tianjin: Publishing Company of Tianjin University, 2000. (in Chinese)
- [4] RAO P R, WANG X, THEUWISSEN A J P. CCD

- structures implemented in standard 0.18 μm CMOS technology[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(8): 548-549.
- [5] 陈文涛, 刘永贵, 曹晓莉. 阵列式线阵彩色 CCD 摄像机的色彩偏移与校正[J]. *半导体光电*, 2006, 27(4): 478-480.
- CHEN W T, LIU Y G, CAO X L. Color excursion and correction of parallel color linear array CCD camera[J]. *Semiconductor Optoelectronic*, 2006, 27(4): 478-480. (in Chinese)
- [6] 陈杰, 李志敏, 钟先信, 等. 高速物流图像采集与实时异物剔除的原理及实现[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(5): 454-458.
- CHEN J, LI ZH M, ZHONG X X, *et al.*. Principle and realization for data acquisition of high speed logistics images and of real time foreign material elimination[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 454-458. (in Chinese)
- [7] NICHOLSON S W, PEIFFER R, SHAW J D. Hardware in libraries: making informed choices[J]. *Library Hi Tech.*, 2011, 29(1): 73-82.
- [8] LINDÉN J, KNAPPE C, RICHTER M, *et al.*. Limitations of ICCD detectors and optimized 2D phosphor thermometry[J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, 23(3): 35201-35208.
- [9] SAWADA M, MATSUMOTO H, TSURU T G, *et al.*. Detection of neutron-induced events and neutron/ γ -ray discrimination with an imaging capability of a P-channel X-ray CCD[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, 2011, 636(1): 231-236.
- [10] PATA P. CCD noise influence on JPEG2000 compression of astronomical images[J]. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2011, 8306: 83061-83066.
- [11] 刘军, 钟先信, 李志敏, 等. 烟草在线异物剔除系统[J]. *计算机测量与控制*, 2003, 9(2): 388-391.
- LIU J, ZHONG X X, LI ZH M, *et al.*. System for removing foreign material in tobacco flows[J]. *Computer Measurement & Control*, 2003, 9(2): 388-391. (in Chinese)
- [12] 袁小聪, 徐于萍, 杨勇, 等. 基于相机阵列获取元素图像的集成成像抗串扰参数设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2050-2056.
- YUAN X C, XU Y P, YANG Y, *et al.*. Design parameters of elemental images formed by camera array for crosstalk reduction in integral imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2050-2056. (in Chinese)
- [13] 武星星, 刘金国. 三线阵立体测绘相机时间系统优化与实时监测[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1022-1030.
- WU X X, LIU J G. Optimization and real-time measurement of time system in three-line stereo mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1022-1030. (in Chinese)
- [14] 修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1365-1373.
- XIU J H, HUANG P, LI J, *et al.*. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1365-1373. (in Chinese)
- [15] 李雅倩, 付献斌, 周坤. CCD 分段测量的光学位移测量系统[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2036-2042.
- LI Y Q, FU X B, ZHOU K. Optical displacement measuring system by CCD segmental measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2036-2042. (in Chinese)

作者简介:



刘霖(1979—),男,重庆长寿人,博士,副教授,2001年、2006年、2009年于电子科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机器视觉、光电测控与仪器等方面的研究。E-mail: juanxiul@uestc.edu.cn



王平(1987—),男,四川巴中人,硕士研究生,2006年于电子科技大学获得学士学位,主要从事光学仪器、光电采集系统等方面的研究。E-mail: 309026813@qq.com



刘娟秀(1981—),女,江西信丰人,博士,讲师,2001年、2004年、2010年于电子科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机器视觉、光电测控与仪器等方面的研究。E-mail: 1009820577@qq.com



贾宏宇(1988—),男,辽宁阜新人,硕士研究生,2006年于电子科技大学获得学士学位,主要从事光学仪器,光电采集系统等方面的研究。E-mail: Cnjhy88@gmail.com



叶玉堂(1946—),男,重庆忠县人,教授,博士生导师,1970年于北京大学获得学士学位,1981年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事计算机热图象信号处理,单片光电集成电路及光电对抗等方面的研究。E-mail: ytye@uestc.edu.cn

● 下期预告

光纤 O₂ 敏感探头的制备与性能测试

赵恩铭*, 雒莘梓, 苑立波, 杨元元, 彭利荣, 杨兴华

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

通过对多孔光纤修饰 Ru 配合物掺杂的敏感膜,制备了一种 O₂ 光纤传感探头。这种探头的结构基于简单的多孔光纤实现,其内部具有贯穿的微孔道结构。这种微孔道结构可以作为敏感材料的载体以及微传感池,传感过程在微孔道内进行。敏感层的修饰通过沉积凝胶膜实现,将含有 [Ru(dpp)₃]²⁺ 的溶胶直接吸入光纤内部,可以在光纤微孔阵列中形成高分子敏感膜。传感过程通过荧光淬灭原理实现, O₂ 对敏感膜中的 [Ru(dpp)₃]²⁺ 具有强烈的荧光淬灭作用,传感探头对于不同浓度的 O₂ 表现出不同的荧光强度。结果表明:探头对于 0~100 %浓度的 O₂ 呈线性响应,灵敏度 I₀/I₁₀₀ 值为 9.4,同时探头可以在 50 ms 内做出快速的响应。