

文章编号 1004-924X(2009)10-2561-08

应用彩色图像的结构光重构三维表面颜色渲染

于晓洋, 赫佳峦, 黄 明, 吴海滨, 魏正宜

(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)

摘要: 为了满足许多行业已不仅需要获取物体的三维形貌信息, 还需要获取物体颜色信息的现状, 建立了三维表面颜色渲染系统, 对直接赋色过程中存在的因被测表面几何特性不同而带来的误差问题进行了研究。为了反映被测表面的几何特性变化, 将被测表面分解为若干子单元, 由此将被测表面几何特性的变化视为各子单元与投影仪以及摄像机之间相对位置的变化。在此基础上建立了上述位置关系的数学模型, 分析了各子单元的斜率变化与其入射、反射光强的关系。结合这种关系对颜色的影响, 考虑消除入射光、反射光对颜色渲染误差的作用, 给出了子单元选取准则, 从而提出一种不受入射、反射光强影响的颜色渲染方法。利用结构光三维测量系统得到的三维测量数据, 进行了颜色渲染仿真实验和物理实验, 结果表明: 被测表面各局部位置的入射、反射光强得到了统一的修正, 渲染后颜色分量 R 、 G 、 B 的误差均 < 0.02 (颜色分量 R 、 G 、 B 的取值范围限定在 0 到 1 之间)。经过渲染后的被测表面颜色信息与其真实颜色基本吻合, 变换测量角度仍能获得良好的视觉效果。

关键词: 颜色渲染; 子单元; 彩色图像; 结构光重构; 光强修正

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Colouring of 3D-reconstructed surfaces of structure light based on coloured images

YU Xiao-yang, HE Jia-luan, HUANG Ming, WU Hai-bin, WEI Zheng-yi

(College of Measurement-control Technology & Communication Engineering,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To meet the requirements of many industries for not only the profile information but also the colour information of subjects, a system of colouring is established. Errors caused by the difference of the geometrical properties of the measured surface in the process of assigning colour directly are researched. In order to account for the change in the geometrical properties of the measured surface, it is divided into several sub-units, so the change of the geometrical properties of the measured surface can be considered as the change in the relative position among the sub-units and the projector, as well as the camera. The mathematical model is then established based on the positional relation. The relation between the slope change of the sub-units and their incident intensity and scattered intensity is analyzed. Finally, by combining with the impact of the relation on the colour information, the selection principle for the sub-units is determined to eliminate the errors of the colouring brought by the impact

收稿日期: 2008-10-28; 修订日期: 2008-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60572030)

of the incident and the scattered intensities. Further, a colouring procedure that is not affected by the incident and scattered intensities is given. The simulation and experimental application of the colouring are executed by making use of the 3D measured data given by the 3D measurement system. The results show that the incident and scattered intensities of the different parts of the measured surface is corrected uniformly, and the errors in R , G , B colour weights are less than 0.02 (the values of R , G , B range between 0 and 1). Colouring information of the measured surface is almost uniform compared with its real colour, and even by changing the measuring angle, there is still a good visual effect.

Key words: colouring; sub-units; color image; reconstruction of structure light; light intensity correction

1 引言

许多行业不仅要求获取被测表面的三维形貌数据,还需要获取其颜色信息,如动画设计、文物鉴赏、逆向工程等。彩色三维模型不但可以真实地再现物体形状,而且能细致地展示物体的颜色信息。颜色渲染技术有利于三维测量技术的广泛应用^[1]。

颜色渲染就是将空间采样点的颜色信息与三维信息进行整合后赋给空间被测表面的过程。目前的图像传感器常用 R , G , B 模型来表示像素的颜色信息,因此,颜色渲染也就是获取彩色图像上每个像素的 R , G , B 值,结合对应的三维坐标最终输出彩色点云的过程^[2]。

传统的颜色渲染方法是将在某一环境下摄取的彩色图像上的颜色信息直接赋给对应的空间点。但由于颜色信息其实反映的是物体表面对入射光线的反射特性。而入射光的波长,被测表面粗糙度,入射、反射光强等都对表面反射的颜色信息具有一定的影响。因此,利用传统的颜色渲染方法得到的颜色信息含有较大的误差^[3]。

本文系统以投影仪为光源,由于投影仪投射的光强分布均匀,入射光的波长一定,若选取表面粗糙度较均匀的被测物体,则反射的颜色信息,即 R , G , B 值,其实是一个随被测表面入射、反射光强变化而变化的值。其中,影响被测表面入射、反射光强的主要因素为被测表面斜率变化。因此,本文在采用结构光测量方法得到的三维数据基础上,研究如何进行颜色渲染并消除由入射、反射光强引起的颜色误差。

2 基于彩色图像的颜色渲染

为了研究颜色渲染过程中光强的影响问题,必须在三维数据获取原理的基础上进行分析。所以,应用适当的三维测量系统模型是本文的理论基础。

本文搭建的结构光系统由投影仪、摄像机、计算机组成。系统模型中,摄像机镜头中心与投影仪镜头中心的间距 B ,投影仪投射角 α ,摄像机视角 β 等参数都可以通过实验标定。利用该系统模型可计算被测表面上采样点的空间坐标 (x, y, z) ,从而完成对被测表面的结构光三维重构^[4-5]。

由于物体表面的斜率随着物体形貌的变化而变化,从而直接影响物体表面各局部的入射、反射光强,进而影响被测表面的颜色信息。所以,传统的直接赋颜色的渲染方法存在较大误差^[6]。

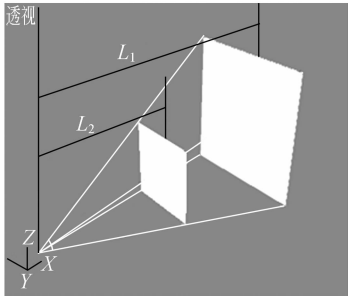
为了反映被测表面的斜率变化,本文将被测表面分解为若干子单元,其划分方法是将物体表面的三维点云投影到 $x-y$ 平面上,用一个矩形包含投影区域,并将该矩形根据需要划分为 $m \times n$ 个方格, (m, n 的选取可根据物体形状和表面颜色的复杂程度以及给出的三维数据人为控制,但方格的面积不得小于投影平面中各点的最大间隙);然后将每一个方格内的投影点拟合成一个平面并以它们三维坐标的均值作为相应拟合平面的中心,每个拟合平面可视为一个子单元。因此,被测表面斜率的变化即可视为各子单元与投影仪以及摄像机之间相对位置的变化,而这种变化直接影响到各子单元的入射、反射光强,从而对其颜色造成影响。

2.1 被测表面的光强分析

通过分析,在本文系统中,入射距离(被测表面到投影仪光心的距离),入射角和反射角都会影响被测表面的入射、反射光强^[7]。

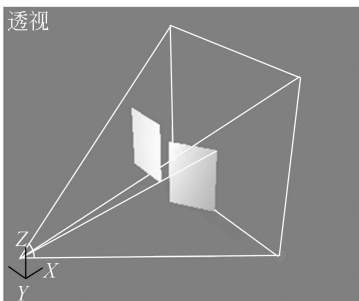
2.1.1 入射光强与入射距离的关系

如图 1(a)所示,在投影仪的投射范围内分别截取入射角相等但入射距离 L_i 不同的两个平面。



(a) 不同入射距离的平面

(a) Flats with different incident distances



(b) 不同入射角的平面

(b) Flats with different incident angles

图 1 平面入射模型

Fig. 1 Incidence models of the flat

由于投影仪投射的光能总量一定,因此平面上单位面积的入射光强与该平面的面积成反比,又因为平面面积与入射距离的平方成反比,所以两平面入射光强中由入射距离决定的部分 I_1' 和 I_2' 的比为:

$$\frac{I_1'}{I_2'} = \frac{L_1^2}{L_2^2} \quad (1)$$

2.1.2 入射光强与入射角的关系

如图 1(b)所示,在投影仪的投射范围内,分别取两个入射距离相等但入射角不同的平面。由于两平面单位面积的入射光强比为面积的反比,由几何关系得该比值为平面边长平方的反比。平面的入射模型如图 2 所示。

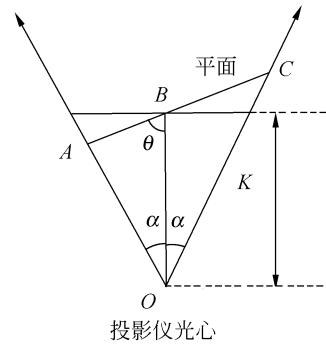


图 2 平面的入射几何模型

Fig. 2 Incidence geometrical model of the flat

平面的入射角为 θ , 投影仪的投射角为 α , 当平面面积趋近于 0 时, α 趋近于 0, 则两平面入射光强中由入射角决定的部分 I_1'' 和 I_2'' 的比可近似为:

$$\frac{I_1''}{I_2''} = \frac{AC_2^2}{AC_1^2} = \frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta_2} \quad (2)$$

由(1)和(2)两式可得入射光强比:

$$\frac{I_{in1}}{I_{in2}} = \frac{I_1' \times I_1''}{I_2' \times I_2''} = \frac{L_2^2 \times \sin^2 \theta_1}{L_1^2 \times \sin^2 \theta_2} \quad (3)$$

2.1.3 反射光强与反射角的关系

对于常见的表面粗糙度,反射光强可用朗伯(Lambert)模型表示:

$$I_{out} = K_d \times I_{in} \times \sin \gamma \quad (4)$$

式中: K_d 为反射率, I_{in} 为入射光强, γ 为反射光线与被测表面夹角,即反射角。

由(3)和(4)两式可得两平面的反射光强比:

$$\frac{I_{out1}}{I_{out2}} = \frac{L_2^2 \times \sin^2 \theta_1 \times \sin \gamma_1}{L_1^2 \times \sin^2 \theta_2 \times \sin \gamma_2} \quad (5)$$

若以其中一个平面的反射光强作为标准,则可将另一个平面的反射光强修正到标准光强。

2.2 颜色渲染

通过对影响平面入射、反射光强因素的分析,可以对被测表面的不同位置进行统一的光强修正。由于颜色信息直接受到光强的影响,所以本文提出一种不受入射、反射光强影响的颜色渲染方法。

颜色信息的提取是颜色渲染的第一步,其方法是在得到被测表面的三维数据后,摄取被测表面的彩色图像并从三维空间内坐标为 (x_i, y_i, z_i) 的一点出发,对应计算该点位于彩色图像上的坐标 (u_i, v_i) , 提取该像素的颜色信息 (R_i, G_i, B_i) , 整合即得到彩色三维数据 $(x_i, y_i, z_i - R_i, G_i, B_i)$ ^[7-9]。

得到彩色三维数据后,应修正物体表面不同位置由于入射、反射光强不同引起的颜色误差。其方法是分别过每个子单元的中心做一个垂直于投影仪主光轴的平面,计算所做各平面到投影仪镜头光心的距离,并以此作为相应的入射距离;计算每个子单元的入射角和反射角;任意取出各子单元中的一个,利用式(5)计算其他子单元与其反射光强比,选取各比值中最大的一个,即为光照条件最好的子单元,以该反射光强为标准,计算该子单元与其他子单元的反射光强比,并以此作为相应的光强修正系数,结合线性拉伸的思想,用各子单元的 R, G, B 值分别乘以相应的光强修正系数即可得到被测物体的整个表面在同一光照条件下的真实颜色信息。

得到经过修正的颜色信息后,需要将颜色填充到物体三维表面的对应位置。其方法是分别收集每一个划分方格内的投影点,以各方格内投影点的 z 坐标的平均值作为该方格平面的 z 坐标,将这些点的颜色信息 R, G, B 的平均值作为该方格平面的颜色值,当方格平面的面积趋近于 0 时,理论上可将其近似为点,从而完成利用彩色图像上的颜色信息对空间点云进行的颜色填充。由于修正后颜色信息排除了光强的干扰,因此,此方法不受入射、反射光强的影响。

综上可得基于彩色图像的颜色渲染过程的流程如图 3 所示。

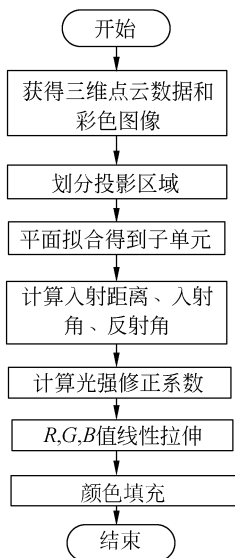


图 3 基于二维彩色图像的颜色渲染方法流程图

Fig. 3 Process chart of colouring method based on planar color image

3 颜色渲染实验

3.1 仿真实验

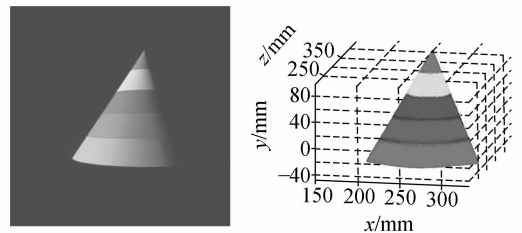
本文采用 3dsmax 软件仿真了投影仪、数码相机、被测物等,组建了结构光系统。通过仿真实验,从理论上验证系统数学模型、颜色渲染方法的可行性。仿真系统参数如表 1 所示,系统的参数可精确设定。

表 1 仿真系统参数

Tab. 1 Simulation system parameters

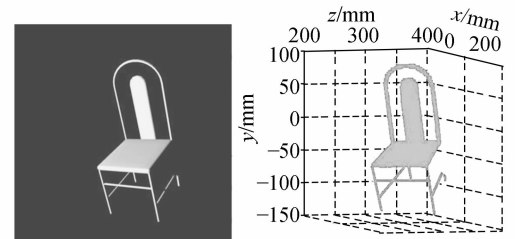
	α	30°
Projector	B	450 mm
	$N \times M$	1 024 \times 768
	β	20°
Camera	$N \times M$	1 024 \times 768

利用本文方法对一个彩色圆锥和一把彩色椅子进行颜色渲染,结果如图 4 所示。实验结果表明:经过颜色渲染后,仿真物体表面不同位置的颜色没有受到入射、反射光强的影响,被测表面具有较好的视觉效果。



(a) 彩色圆锥

(a) Colorized taper



(b) 彩色椅子

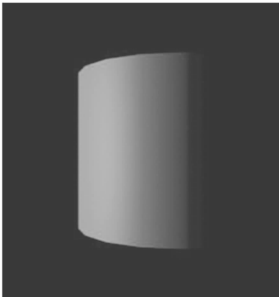
(b) Colorized chair

图 4 仿真彩色模型及其颜色渲染效果图

Fig. 4 Colorized simulation models and their colouring drawings

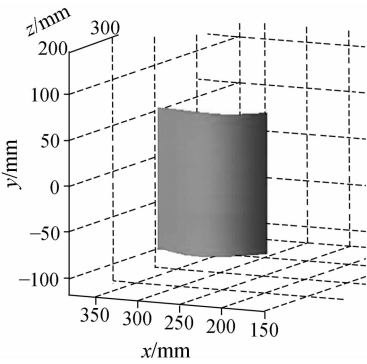
与上述过程一样,设计不同尺寸、不同形状的物体,选取不同的角度进行了大量的仿真测量实验。实验结果表明:渲染后的各被测表面颜色均不受入射、反射光强的影响,且均具有较好的视觉效果,基于彩色图像的颜色渲染方法在仿真实验中得到了初步验证。

为了评定仿真条件下颜色渲染的效果,需要进行定量的实验。如图 5(a)所示为一个仿真红色圆柱体,圆柱体的颜色值中的 R 值被精确的设定为 0.86(颜色值范围被限定在 0 到 1 之间), G 值和 B 值被设为 0。则该圆柱体可认为是一个绝



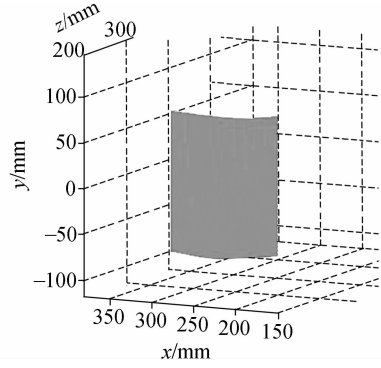
(a) 仿真彩色圆柱

(a) Emulational colored column



(b) 未校正光强的渲染表面

(b) Colouring surface before light intensity correction



(c) 光强校正后的渲染表面

(c) Colouring surface after light intensity correction

图 5 精度评价实验效果图

Fig. 5 Experimental effects of accuracy evaluation

对纯色的物体,所以,可以通过测量渲染表面各点颜色分量间的差值来评价颜色渲染精度。图 5(b)为对其进行直接赋色的颜色渲染表面,图 5(c)为对其进行光强修正后的颜色渲染表面。

分别对图 5(b)和图 5(c)的物体表面像素点进行采样,它们的颜色信息如表 2 所示。表中列出了采样像素点在图像中所处的位置(即行、列号),采样原则是选取同一行像素中光照条件差别明显的一对像素点进行比较。 R_1 、 G_1 、 B_1 和 R_2 、 G_2 、 B_2 分别表示光强修正前后同一像素的颜色信息。

由表 2 可见,彩色物体表面由于光照强度的不同,导致光强修正前,各点颜色分量 R 间的最大差值可达 0.5 以上, G 、 B 分量的变化也比较剧烈,从而使纯色被测表面各点的颜色信息有明显的差别,这与实际情况严重不符。而对被测表面的光强进行修正后,被测表面的颜色信息趋于相同,颜色分量 R 、 G 、 B 各自间的最大差值均 < 0.02 。

表 2 光强修正前后采样点的颜色信息表

Tab. 2 Table of colour information of samples before and after light intensity correction

Row number	Line number	Colour information					
		R_1	R_2	G_1	G_2	B_1	B_2
180	200	0.780 4	0.852 7	0.011 8	0.014 6	0.015 7	0.011 8
180	300	0.298 0	0.866 7	0	0.015 3	0	0.014 7
280	200	0.780 4	0.852 7	0.011 8	0.014 6	0.015 7	0.011 8
280	300	0.298 0	0.866 7	0	0.015 3	0	0.014 7
220	260	0.662 7	0.862 7	0.121 6	0.014 6	0.113 7	0.011 8

3.2 物理实验

为了进一步验证基于二维彩色图像的颜色渲染方法的正确性,本文利用 MITSUBISHI XD300U 投影仪(分辨率 768 pixel×1 024 pixel)、Canon520 数码相机(分辨率 768 pixel×1 024 pixel)和光学导轨组建了结构光系统对实际物体进行实验,实际系统结构如图 6 所示,结构参数如表 3 所示。

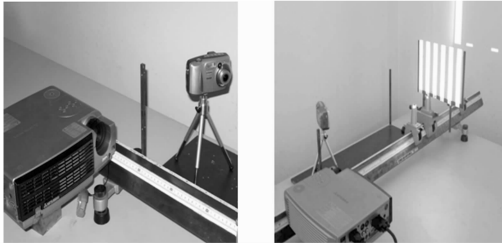


图 6 实验装置
Fig. 6 Experimental facility

表 3 实际系统参数

Tab. 3 Actual system parameters

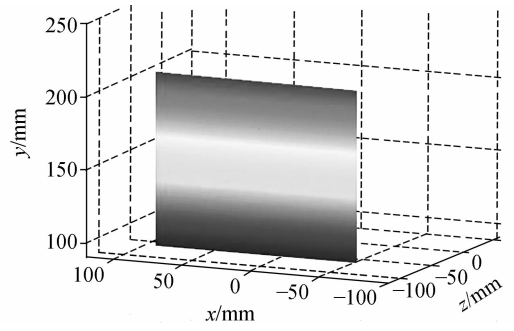
	Calibration data					average
	1	2	3	4	5	
$\alpha/(\circ)$	32.51	32.42	32.60	32.45	32.55	32.506
$\beta/(\circ)$	22.24	22.27	22.18	22.25	22.19	22.226
B/mm	105.25	105.32	104.95	105.15	105.05	105.144

利用基于二维彩色图像的颜色渲染方法对一个包装盒和一个茶叶桶的部分表面进行颜色渲染,渲染结果如图 7 和图 8 所示。

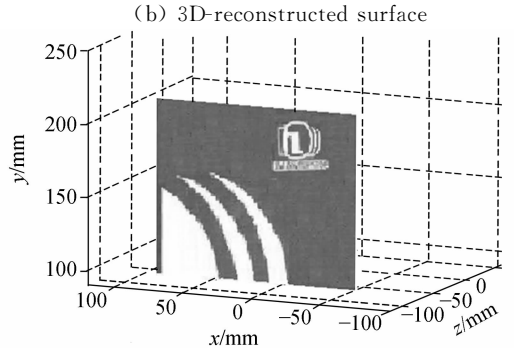
实验表明:图 7 和图 8 中包装盒和茶叶桶表面的不同位置由于物体表面斜率的变化而与投影仪和摄像机产生了不同的相对位置,从而导致其表面入射、反射光强不同,进而致使被测表面的颜



(a) 包装盒
(a) Package



(b) 三维重构表面



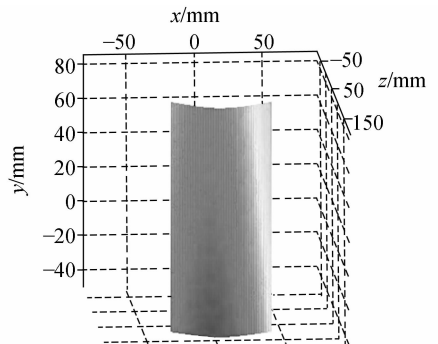
(c) 渲染表面

(c) Colouring surface

图 7 包装盒的彩色照片及其颜色渲染效果图
Fig. 7 Colorized photos of package and colouring effect

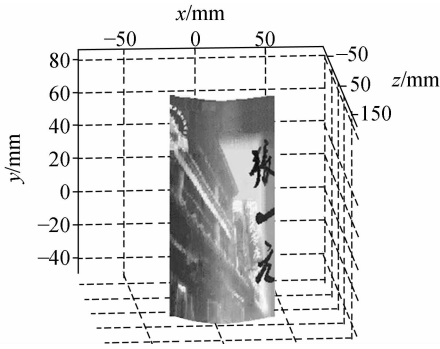


(a) 茶叶桶
(a) Tea barrel



(b) 三维渲染表面

(b) Three dimensional reconstructed surface



(c) 渲染表面

(c) Colouring surface

图8 茶叶桶的彩色照片及其颜色渲染效果图

Fig. 8 Colorized photos of tea barrel and its colouring effect

色在光强条件好的情况下显得鲜艳,反之则显得暗淡。在颜色渲染过程中,被测表面的光强得到了统一修正,排除了光强不同引起的颜色误差,使得颜色渲染方法不受入射、反射光强的影响,整个表面具有较好的视觉效果,准确地反映了物体表

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 张学习,杨宜民. 彩色图像工程中常用颜色空间及其转换[J]. 计算机工程与设计,2008,29(5):1210-1212.
ZHANG X X, YANG Y M. Common color space and its conversions in color image project[J]. *Computer Engineering and Design*, 2008,29(5):1210-1212. (in Chinese)
- [3] ARVIND N, SUBHASIS C, SHILPA. Color transfer and its applications[J]. *Studies in Computational Intelligence (SCI)*,2008,83:217-237.
- [4] 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].

面的真实颜色。

4 结 论

在颜色渲染的过程中,由于物体形貌的不同,物体表面不同位置的入射、反射光强产生了差异,从而成为影响颜色信息准确获取的主要因素之一。因此,本文通过建立物体的入射、反射模型,排除了光强差异对颜色信息的干扰,从而提出一种不受入射、反射光强影响的基于彩色图像的颜色渲染方法。而且此方法中子单元的选取可以根据物体形状和颜色的复杂程度人为调节以加快程序的运行速度。实验结果表明:渲染后被测表面各像素点的颜色分量 R 、 G 、 B 的误差均 < 0.02 ,选取不同角度对物体进行颜色渲染后的表面颜色均与被测物体表面的颜色基本吻合,且均具有较好的颜色视觉效果。

Opt. Precision Eng., 2007, 15(1): 84-88. (in Chinese)

- [5] 许法强,万晓霞. 一种基于主色外观图的彩色图像分割算法[J]. 计算机应用研究,2008,25(1):314-315.
XU F Q, WAN X X. Color image segmentation algorithm based on dominant color graph[J]. *Application Research of Computers*, 2008,25(1):314-315. (in Chinese)
- [6] KIM Y D, CHOI S J. Color face tensor factorization and slicing for illumination-robust recognition lecture[J]. *Computer Science*, 2007,4642:20-28.
- [7] 陶立,孙长库,何丽,等. 基于结构光扫描的彩色三维信息测量技术[J]. 光电子·激光,2006,17(1):111-114.
TAO L, SUN CH K, HE L, *et al.*. A color 3-D acquisition method based on structured-light scanning [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006,17(1):111-114. (in Chinese)
- [8] 袁宏韬,张贵彦. 一种日夜两用光学低通滤波器的研制[J]. 光学精密工程,2006,14(4):571-574.
YUAN H T, ZHANG G Y. Design and manufacture of a day and night optical low pass filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 571-574. (in Chinese)

- [9] 任智斌, 隋永新, 杨英慧, 等. 在均匀颜色空间中实现彩色图像的颜色量化[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(4):340-345.
REN Z B, SUI Y X, YANG Y H, *et al.*. Color

quantization of color images in a homogeneous color space[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4):340-345. (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,1984年于哈尔滨电工学院获得学士学位,1989和1998年分别于哈尔滨工业大学获得硕士和博士学位,主要研究方向为三维视觉检测和光电检测。E-mail: yuxiaoyang@hrbust.edu.cn



赫佳峦(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,2002年于哈尔滨理工大学获学士学位,主要研究方向为三维视觉检测和光电检测等。E-mail: hejialuan@163.com

黄明(1982—),男,吉林长春人,硕士研究生,2001年于哈尔滨理工大学获学士学位,主要研究方向为图像信号处理等。E-mail: hejialuan@163.com

吴海滨(1977—),男,上海人,博士,讲师,2000年,2002年分别于哈尔滨工业大学获学士和硕士学位,2008年于哈尔滨理工大学获博士学位,主要研究方向为三维视觉检测和光电检测等。E-mail: woo@hrbust.edu.cn

魏正宜(1983—),女,黑龙江肇东人,硕士研究生,2002年于哈尔滨理工大学获学士学位,主要研究方向为图像信号处理和纸币识别等。E-mail: naman123@126.com

● 下期预告

分流法小孔电火花加工与试验

王续跃, 李建丽, 周彪, 梁延德, 赵福令

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

介绍一种等面积分流法小孔电火花加工方法,分析等面积电极放电的电火花加工过程,重点研究在等面积电极条件下,等面积单电极与分流多电极加工对加工速度、电极损耗、放电间隙的影响。进行了验证性试验,研究表明:小孔分流法加工与单电极加工相比,加工速度略有减小、放电间隙略有变小、电极损耗略有增加,加工效果具有一致性;分流法电火花加工有利于小孔电火花加工的尺寸控制,通过等面积分流法改变加工工艺,用电火花机床稳定加工参数,进行比机床稳定加工临界值还小尺寸的小孔加工,试验中采用单电极 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ (总面积为 1 mm^2) 的稳定加工指标,进行等面积分流为 3 个电极 $0.577\text{ mm} \times 0.577\text{ mm}$ (总面积为 1 mm^2) 的小孔加工,获得稳定电火花加工的 0.6 mm 小方孔,是一种新的小孔电火花加工方法。