

金属漆颗粒效果测量装置和评价方法的研究

袁琨^{1,2*}, 贡双虎^{1,2}, 张阳^{1,2}, 秦梦丹^{1,2}, 王坚², 汤尚²¹ 中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;² 杭州彩谱科技有限公司, 浙江 杭州 310034

摘要 为了测量金属漆颗粒效果,开发了一种测量装置,构建了应用于该测量装置的金屬漆颗粒效果评价模型。根据不同的色彩分布和颗粒大小选取了 56 个金属漆色卡构建测试样本库。用 BYKMac 采集样本的颗粒参数,进行视觉实验,验证了 BYKMac 数据的准确性。设计测量装置来获取样本图像信息,使用现有的纹理评价方法处理图像信息并将数据和视觉实验数据进行相关性比较,同时设计适用于该装置的评价方法,得到样本图像的颗粒值。该装置的测量结果与视觉数据和 BYKMac 数据拟合的相关系数分别为 0.8770 和 0.9329。结果表明,该测量装置和评价方法能有效测量并得到符合人眼感知的金属漆颗粒参数。

关键词 视觉; 光谱学; 颗粒效果; 图像处理; 相关性分析

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0633001

Measuring Device and Evaluation Method for
Metallic Paints GraininessYuan Kun^{1,2*}, Gong Shuanghu^{1,2}, Zhang Yang^{1,2}, Qin Mengdan^{1,2},
Wang Jian², Tang Shang²¹ College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;² Hangzhou CHNSpec Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310034, China

Abstract In order to measure the graininess of metallic paints, a measuring device and evaluation method were developed, the evaluation model of metallic paint graininess effect applied to the measuring device was established. According to different color distributions and particle sizes, 56 metallic paints were selected to construct the sample database. The particle parameters of samples were collected by BYKMac, and visual experiments were performed to verify the accuracy of BYKMac data. The measuring device was designed to obtain sample image information, the existing texture evaluation methods were used to process the image information and the data is compared with the visual experiment data. At the same time, an evaluation method suitable for the device was designed to get the graininess value of the samples. The correlation coefficients between the measurement results and the visual values and BYKMac values were 0.8770 and 0.9329, respectively. Experimental results show that the measuring device and evaluation method can effectively measure and obtain the graininess of metallic paints that meet the perception of human eyes.

Key words vision; spectroscopy; graininess; image processing; correlation analysis

OCIS codes 330.1720; 220.2740; 240.6490

收稿日期: 2020-09-11; 修回日期: 2020-09-29; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0210802)

* E-mail: yuankun@cjlu.edu.cn

1 引言

金属漆中掺杂的金属薄片使得金属漆比传统颜料更能展现出更丰富的视觉效果,因而备受人们欢迎。目前已有文章对金属漆的外貌特征进行研究, McCamy^[1]在研究金属漆外观特性时提出金属漆的外观可分为远处观察到的宏观特性和近处观察到的微观特性,而微观特性由视觉纹理决定。Kirchner 等^[2]将视觉纹理细分为闪光和颗粒,在漫射光照明下观察到的金属漆视觉效果为颗粒。Huang 等^[3]介绍了如何进行视觉实验得到具有不同颜色、颗粒和闪光的金属漆样本对的视觉差异参数,研究了色差、颗粒度差异和闪光差异对总体视觉差异的影响。Ferrero 等^[4]根据金属漆视觉效果的产生原理,综合考虑点扩展函数、入瞳直径、漫射照明等级、观测角度等因素建立闪光和颗粒的预测模型。吴梦婷^[5]综合闪光和颗粒效果进行了视觉纹理的预测模型,但没有对单一的颗粒效果进行评价。丰恒^[6]建立了特定实验条件下的表面颗粒评价模型,训练样本中的预测结果和视觉评价结果的相关系数达到 0.91,但难以应用于仪器设计尤其是便携式仪器设计中。目前商用产品中,仅有德国 BYK 公司的仪器产品 BYKMac 可以测量金属漆的颗粒参数^[6],但并没有

公布算法,也没有研究成果评价其测量结果与人眼感知结果的相符程度。

本文根据不同的色彩分布和颗粒大小构建金属漆样本。设计了人眼视觉实验装置,使用积分球构建漫反射光照条件,在漫反射条件下进行视觉实验。开发了测量金属漆表面颗粒效果的仪器实验装置,在漫射光照明条件下获取样本图像信息。设计了颗粒效果评价模型,对图像进行处理,获得被测图像的颗粒值。并将通过测量装置和评价模型得到的表面颗粒值与人眼视觉实验和 BYKMac 测量结果进行比对。

2 金属漆颗粒效果评价视觉实验

已有的研究成果认为金属漆的颜色会对人眼感知的颗粒效果造成影响^[4],为了使实验结果具有代表性,实验样本的颜色应覆盖较为全面。同时颗粒值应分布较广且相对均匀,使人眼对颗粒的感知有精确的判定,本实验从某汽车漆品牌制作的金属漆色卡中选取具有不同颜色和颗粒大小的样本作为实验样本,共准备了 56 张金属漆色卡。所有样本均由 BYKMac 测量出颜色及颗粒大小,样本的颜色在中性灰、红、橙、黄、绿 5 个色区分布,颗粒等级在 3~12 之间。样品的颜色分布如图 1(a)所示,颗粒等级的分布如图 1(b)所示。

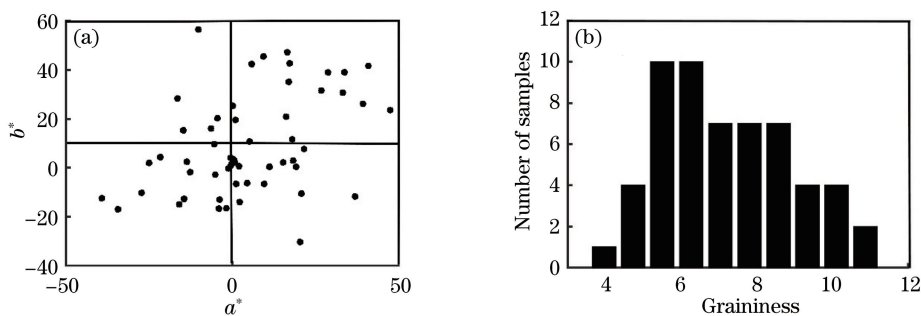


图 1 样本参数分布。(a)样本的颜色分布;(b)样本颗粒等级分布

Fig. 1 Distribution of sample parameters. (a) Color distribution of samples; (b) graininess distribution of samples

为了验证 BYKMac 测量的颗粒数据与人眼视觉评价结果的相符程度,设计了照明观测条件为 $d/8^\circ$ 的视觉实验装置。根据 GB/T 3978—2008 的规定制作了积分球^[7],模拟漫反射光的照明条件,如图 2(a)所示。积分球内径为 152 mm;测量孔直径为 38 mm;观测孔直径为 24 mm;进光孔为长方形,尺寸为 24 mm×66 mm,开口总面积约占球内反射面积的 4.57%。为防止直射光成分照射在样本表面和直接进入人眼,积分球内安装了两个挡板。在实

际观测时,如果人眼离观测孔太近,则积分球内壁的反射光会进入人眼,影响观测结果;如果人眼离观测孔太远,则分辨不清样本的细节且会受到外界环境光影响。为了消除积分球内的漫射光对人眼的影响和固定观测距离,需要在积分球观测孔上添加套筒来限制视野,套筒的筒长为 82 mm,底部开孔直径为 12 mm,筒内贴黑色吸光绒布。图 2(b)为视觉实验示意图。

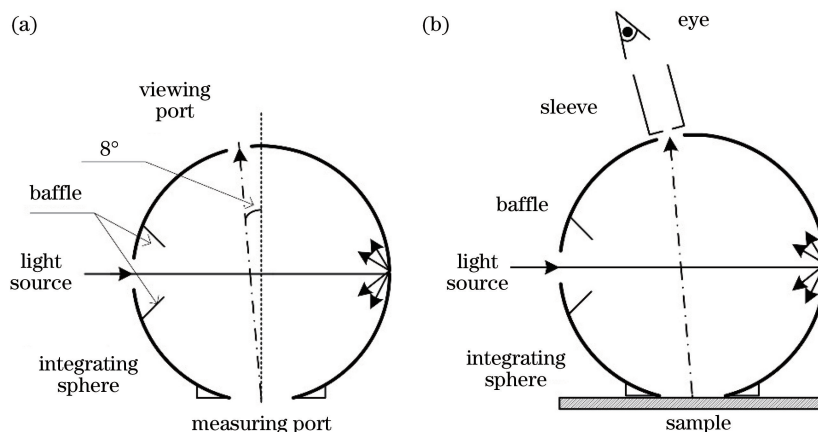


图 2 结构图。(a)积分球;(b)视觉实验示意图

Fig. 2 Structure diagram. (a) Integrating sphere; (b) schematic diagram of visual experiment

视觉实验参与者为视觉正常且对金属漆外貌特征有一定了解的 5 名男性和 1 名女性,共 6 名观察者。使用 D65 光源作为照明光源,实验开始前光源点亮 15 min,等待发光稳定,测量孔接收的光照度为 1650 lx。

根据 BYKMac 的测量结果,从 56 个样本中选取四个颗粒值分别为 3、6、9 和 12 的样本作为参考样本,剩余的 52 个样本作为待评估样本。每次评价时,随机从 52 个待评估样本抽取一个,放置在四个参考样本中间。四个参考样本交叠,中间留出正方形空隙,待评价样本置于最下方,样本再放置在积分

球测量孔下方,如图 3(a)所示。整个视觉实验在暗室中进行,观察者先进行 2 min 暗适应,接着是 1 min 亮适应。观察者事先未被告知待评估样本的测量值在 3~12 之间,仅告知他们四个参考样本的值从最上方开始,按顺时针次序分别为 3、6、9 和 12,他们依据这四个参考样本评定颗粒值,且精确到 0.1,如果他们认为中间样本的颗粒值在 3~12 之外也可以依据感知结果自由给出颗粒值^[6],视觉实验如图 3(b)所示。视觉实验中,共收集了 6(观察者)×52(金属漆样本)×3(重复实验)=936 个视觉数据。

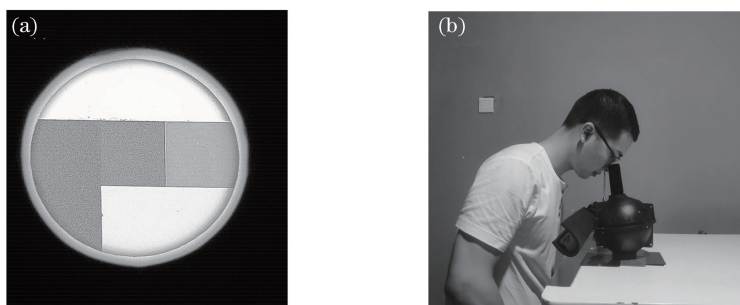


图 3 视觉实验条件。(a)样本摆放;(b)视觉实验

Fig. 3 Visual experimental conditions. (a) Sample placement; (b) visual experiment

对于获取的视觉实验数据需要评定数据的有效性,本文使用变异系数(CV)值进行评价。观察者内的 CV 值为 10.84,观察者间的 CV 值为 27.16,表明视觉实验的结果精度较高,视觉实验的数据准确可靠^[5]。

将 BYKMac 测量数据和视觉实验数据进行二次拟合,相关系数为 0.8895,如图 4 所示。表明 BYKMac 测量的颗粒值与人眼评价结果有较好的相关性^[8]。

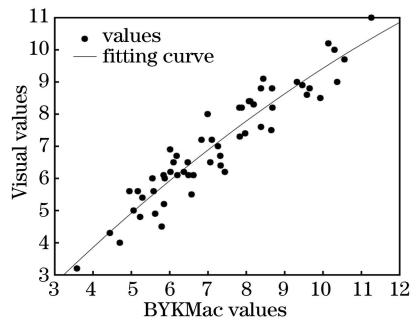


图 4 视觉实验结果与 BYKMac 结果对比

Fig. 4 Comparison of BYKMac and visual experiment results

3 仪器测量装置的设计

金属漆表面颗粒效果测量需要在漫射光照条件下进行^[2],测量装置需要对被测物体表面提供漫射光照条件。考虑到仪器的便携性,整体结构需要尽可能的小,但是积分球的测量口径需要保持一定的大小来采集信息,因此测量装置使用积分球半球作为匀光器件。为达到较好的匀光效果以及提供

足够的光照强度,在积分球半球的底部对称安装两个 LED,并加挡板防止直射光照射到样本表面和进入摄像头中。其中,积分球内径 Φ_i 为 30 mm;底部开孔作为测量口,开口直径 Φ_{d1} 为 12 mm;顶部开孔直径 Φ_{d2} 为 9 mm,作为图像传感器采样孔。开口总面积约占球内反射面积的 8.91%,小于 10%,符合 GB/T 3978-2008 的规定。仪器结构示意图如图 5(a)所示,图 5(b)为测量装置实物图。

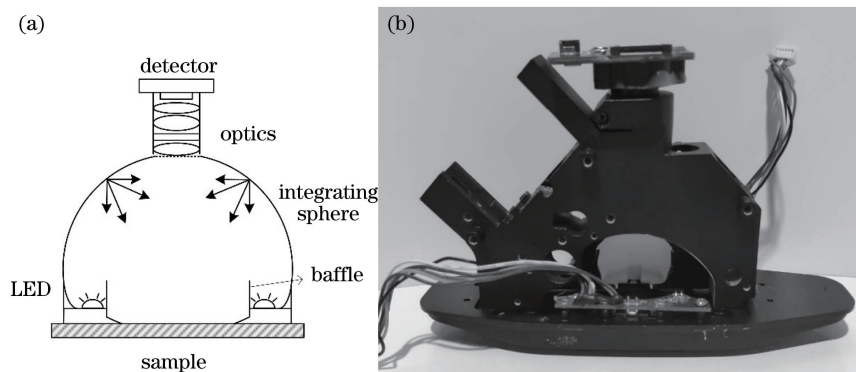


图 5 装置图。(a)测量装置示意图;(b)测量装置实物图

Fig. 5 Device diagram. (a) Schematic diagram of measuring device; (b) physical map of measuring device

图像传感器为黑白 CMOS 器件,型号是 MT9V034,感光面为 1/3 inch(1 inch=2.54 cm),像素尺寸为 $6.0 \mu\text{m} \times 6.0 \mu\text{m}$,帧频为 60 frame/s,光谱响应范围为可见光全光谱,可自动/手动调节曝光时间。

本文在光学成像透镜组中添加了滤光片,通过滤光片、LED 和 CMOS 的共同作用使实验装置在可见光范围内的光谱响应符合人眼的光谱光视效率 $V(\lambda)$,图 6 为实验装置的光谱响应与光谱光视效率匹配的结果。

该装置进行图像采集时需要拍摄 LED 未点亮的暗场图像和 LED 点亮时的样本图像,两个图像相减消除相机的固有噪声,同时装置加金属屏蔽外壳以屏蔽外界电磁干扰。图 7(a)~(c)为测量装置在

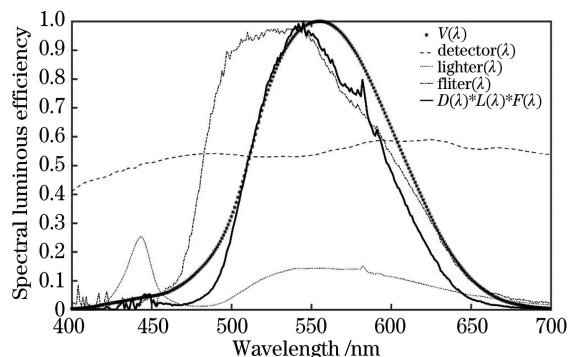


图 6 实验装置与光谱光视效率匹配结果

Fig. 6 Matching results of experimental device and spectral luminous efficiency

自动曝光条件下采集到的具有不同颗粒值的样本图像,颗粒值由 BYKMac 测出,分别为 $G=3, G=6,$

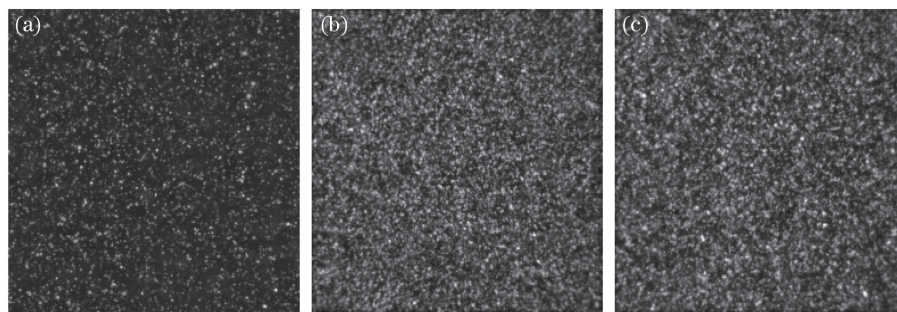


图 7 颗粒图像。(a) $G=3$;(b) $G=6$;(c) $G=9$

Fig. 7 Graininess pictures. (a) $G=3$; (b) $G=6$; (c) $G=9$

$G=9$,由图 7 可以看出,该装置采集到的图像信息能分辨出具有不同颗粒效果的图像的差别,所获取的数据可以进行下一步处理。

4 颗粒效果评价模型

纹理是在空间中具有一定规则周期性变化的图形,目前已有一些方法对纹理进行量化处理^[9-20]。颗粒效果是纹理效果的一种,因此本文先分析纹理的评价方法与颗粒效果之间的对应关系,方法分别有:距离为 1 的灰度共生矩阵 (GLCM) 的熵

(ENT)、能量 (ASM)、同质性 (HOM) 和相关性 (COR) 分别在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 方向的标准差;灰度差分统计 (GLDS) 的熵 (ENT)、平均值 (MEAN)、对比度 (CON)、方向二阶矩 (ASM);分形维数 (FD)。颗粒效果图像由测量装置在自动曝光时间下获取,再截取图像中心 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 区域的信息进行处理^[21]。用上述处理方法得到相关数值并与视觉实验数据进行相关性比较。本文所有的拟合均使用二次拟合,相关性用 R^2 表征^[22],拟合结果如表 1 所示,拟合曲线如图 8 所示。

表 1 评价方法与拟合结果

Table 1 Evaluation method and fitting results

Method	GLCM: ENT	GLCM: ASM	GLCM: HOM	GLCM: COR	GLDS: ENT	GLDS: MEAN	GLDS: CON	GLDS: ASM	FD
R^2	0.6912	0.2126	0.3701	0.5123	0.1268	0.0767	0.0866	0.0801	0.0305

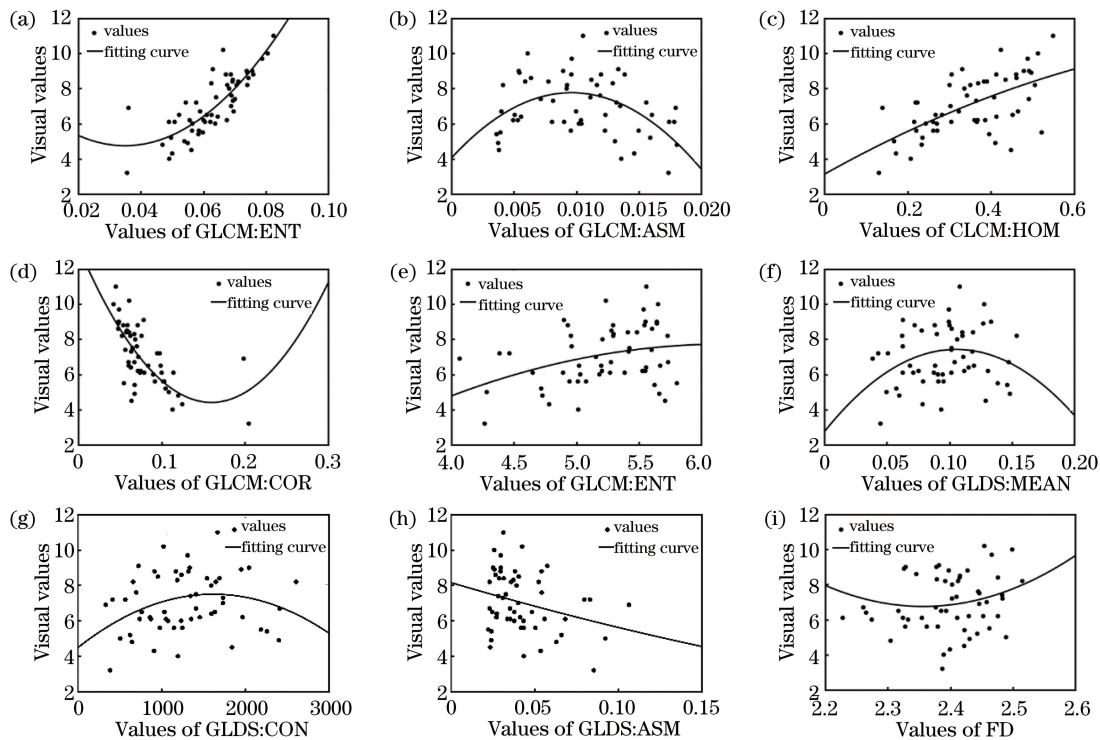


图 8 多种算法值与视觉数据对比。(a) GLCM:ENT; (b) GLCM:ASM; (c) GLCM:HOM; (d) GLCM:COR; (e) GLDS:ENT; (f) GLDS:MEAN; (g) GLDS:CON; (h) GLDS:ASM; (i) FD

Fig. 8 Comparison of various algorithm values and visual values. (a) GLCM:ENT; (b) GLCM:ASM; (c) GLCM:HOM; (d) GLCM:COR; (e) GLDS:ENT; (f) GLDS:MEAN; (g) GLDS:CON; (h) GLDS:ASM; (i) FD

从拟合结果可以看出,纹理的评价方法得到的结果与视觉数据没有较好的相关性,不适用于该装置对金属漆颗粒效果的描述。

方差是用来衡量一组数据离散程度的度量,如果将其应用在图像中,则方差中的平均值就是图像的平均灰度,而整个图像的方差可以表征出图像中各个像

素对应的灰度值偏离平均灰度的程度。一幅灰度值相同的图像,方差为 0,对应一幅没有任何颗粒效果的素色漆样本图像;如果样本有颗粒效果,则方差随颗粒效果的粗糙程度不同而变化。方差值与颗粒效果之间存在一定的对应关系,因此本文考查了方差值与颗粒效果之间的关系,方差的计算公式为

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}, \quad (1)$$

式中： S^2 为方差值； \bar{X} 为图像的平均灰度； X_i 为每个像素的灰度值； n 为总像素数。

目前没有报道提出可以使用方差衡量金属漆的颗粒效果，本文使用方差对装置获取样本的原始图像进行处理。首先将相机设置为固定曝光时间，经过测试发现积分时间为 1000 ms 时，采样图像均未出现饱和。将每幅图像中灰度最大值设定为 100，

并用下式对其他像素灰度值进行处理。

$$X_i = \frac{x_i}{X_{\max}} \times 100, \quad (2)$$

式中： x_i 为像素灰度值； X_{\max} 为每幅图像中灰度最大值； X_i 为经过处理后的像素灰度值。通过该方式对 56 个样本图像信息预处理后，再获取每幅图像的方差值，方差值与 BYKMac 数据拟合的相关性为 0.0187，与视觉数据的相关性为 0.0149，如图 9 所示，处理结果不符合预期效果。

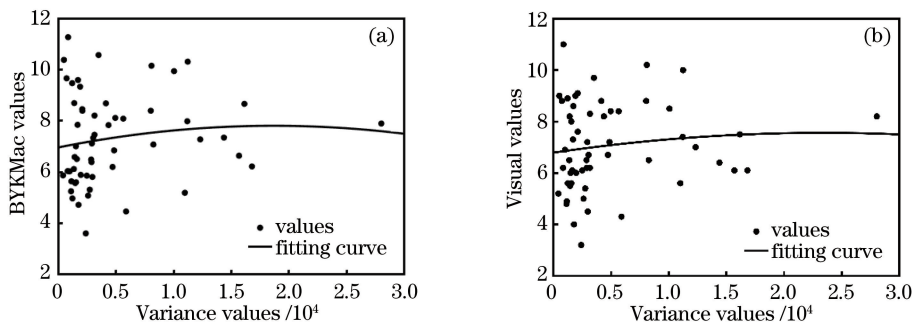


图 9 数据对比。(a) 方差计算值与 BYKMac 结果对比；(b) 方差计算值与视觉实验结果对比

Fig. 9 Data comparison. (a) Comparison of variance calculation value with BYKMac values; (b) comparison of variance calculation values with visual experiment results

将相机的曝光时间设置为自动曝光，自动曝光条件下获得的灰度图像符合人眼对亮度的感知，同样计算出 56 个样本图像的方差值，此时计算出的方差值引入了时间变量，各个图像的积分时间不同导致计算出的方差值之间没有可比性。为了消除时间变量的影响，将每个图像的方差值除以对应的积分时间，表示为

$$G_j = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{t_j (n - 1)}, \quad (3)$$

式中： G_j 代表第 j 个样本的颗粒值； t_j 为第 j 个样本图像的积分时间； X_i 为一个样本图像每个像素的灰度值； \bar{X} 表示该样本图像的平均灰度； n 为该样本图像总像素数。

将计算所得颗粒值再次与 BYKMac 数据和视觉数据进行相关性比较，相关性分别为 0.9329 和 0.8770，如图 10 所示。测量装置得到的颗粒值与 BYKMac 数据和视觉数据均有较好的相关性，表明该装置和方法能有效测量金属漆的颗粒效果。

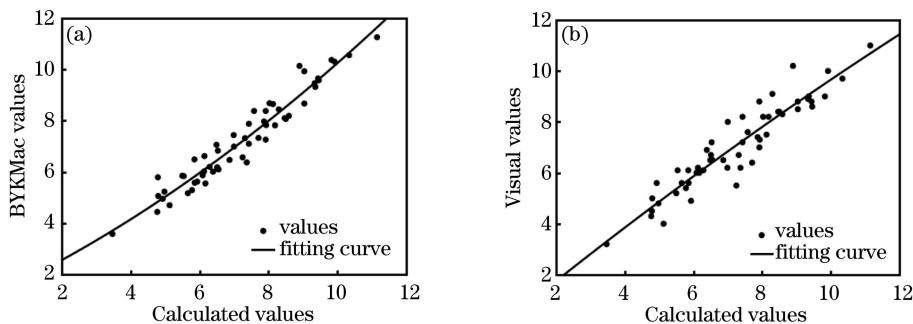


图 10 数据对比。(a) 颗粒效果评价模型计算值与 BYKMac 结果对比；(b) 颗粒效果评价模型计算值与视觉实验结果对比

Fig. 10 Data comparison. (a) Comparison of graininess evaluation model and BYKMac results; (b) comparison of graininess evaluation model and visual experiment results

5 结 论

本文研发了金属漆颗粒效果的测量装置和测量算法,实验装置得到的颗粒值与 BYKMac 颗粒值和视觉数据均有较好的相关性,分别为 0.9329 和 0.8770。与 BYKMac 的数据相关性表明,该实验装置和算法可以充分达到与 BYKMac 相似的评价效果;与视觉数据相关性表明,该实验装置和算法已经足够应用于实际使用^[8]。因此,该实验装置和算法为仪器开发提供了现实可行的参考。但是实验装置使用的照明光源是 LED,传感器采用 CMOS,通过添加滤光片使实验装置的光谱响应符合人眼视见函数,这种方式存在一定的匹配误差,装置搭载的积分球由于要跟光学成像系统、CMOS 和机器整体结构相搭配,在形状上是半球形,与规定有所差异。为此,计划下一步对滤光片在一定波长下的透过率进行调整,减小匹配误差,将积分球设计出更完整的球状结构进行实验。

参 考 文 献

- [1] McCamy C S. Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part II. Micro appearance[J]. *Color Research & Application*, 1998, 23(6): 362-373.
- [2] Kirchner E, Kieboom G J V D, Njo L, et al. Observation of visual texture of metallic and pearlescent materials [J]. *Color Research & Application*, 2007, 32(4): 256-266.
- [3] Huang Z N, Xu H S, Luo M R. Camera-based model to predict the total difference between effect coatings under directional illumination [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(9): 093301.
- [4] Ferrero A, Campos J, Rabal A M, et al. A single analytical model for sparkle and graininess patterns in texture of effect coatings[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26812-26819.
- [5] Wu M T. Total appearance assessment based on samples with metallic coatings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 24-80.
吴梦婷. 基于金属漆样本的总体外貌评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 24-80.
- [6] Feng H. Texture and multi-angle color assessment of samples with metallic coatings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 25-67.
丰恒. 金属漆样本的纹理及多角度颜色评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 25-67.
- [7] National Technical Committee of Color Standardization. Standard illuminants and geometric conditions: GB/T 3978-2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
全国颜色标准化技术委员会. 标准照明体和几何条件: GB/T 3978—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [8] Gómez O, Perales E, Chorro E, et al. Visual and instrumental correlation of sparkle by the magnitude estimation method [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6458-6463.
- [9] Sarkar N, Chaudhuri B B. An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1994, 24(1): 115-120.
- [10] Shanmugavadivu P, Sivakumar V. Fractal dimension based texture analysis of digital images[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 38: 2981-2986.
- [11] Nayak S R, Mishra J. On calculation of fractal dimension of color images[J]. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 2017, 9(3): 33-40.
- [12] Zhang X, Cui J T, Wang W S, et al. A study for texture feature extraction of high-resolution satellite images based on a direction measure and gray level Co-occurrence matrix fusion algorithm[J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1474.
- [13] Chen Y, Yang F Y. Analysis of image texture features based on gray level co-occurrence matrix[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204/205/206/207/208: 4746-4750.
- [14] Liu Q, Liu X P, Zhang L J, et al. Image texture feature extraction & recognition of Chinese herbal medicine based on gray level co-occurrence matrix [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 605/606/607: 2240-2244.
- [15] Sulochana S, Vidhya R. Texture based image retrieval using framelet transform-gray level co-occurrence matrix(GLCM) [J]. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, 2013, 2(2): 68-73.
- [16] Liu L Y, Fan X J. The design of system to texture feature analysis based on gray level co-occurrence matrix[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 727/728: 904-907.
- [17] Ojala T, Pietikäinen M, Mäenpää T. A generalized local binary pattern operator for multiresolution gray scale and rotation invariant texture classification[C]// *Advances in Pattern Recognition—ICAPR 2001*, 2001.
- [18] Ojala T, Pietikäinen M, Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. *IEEE Transactions on*

- Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24 (7): 971-987.
- [19] Zhang Y, Xiang Z Y, Chen S Y, et al. Optimization on visual odometry under weak texture environment [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0615001.
张易, 项志宇, 陈舒雅, 等. 弱纹理环境下视觉里程计优化算法研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0615001.
- [20] Hu Z Y, Zhou X D, Tang Y J, et al. Measurement and resolution method for intra-pixel response of front-illuminated CMOS sensors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0910002.
胡琰悦, 周晓东, 唐玉俊, 等. 一种前照式 CMOS 探测器像元内响应测量和解算方法 [J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0910002.
- [21] Wu X M. Study of luminous environment measurement through high dynamic range imaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 6-70.
吴晓玫. 基于高动态范围成像的光环境测量研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 6-70.
- [22] Kirchner E, Dekker N. Performance measures of color-difference equations: correlation coefficient versus standardized residual sum of squares [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(9): 1841-1848.