

一种基于统计流形的光谱信息散度颜料识别方法

王伟超¹, 王慧琴¹, 王可¹, 王展²¹西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055;²陕西文物保护研究院, 陕西 西安 710075

摘要 每种物质都有其独特的光谱信息,因此可以根据光谱信息来鉴定物质。研究了基于统计流形的光谱信息散度颜料识别方法,将统计流形上的黎曼度量作为信息散度中新的度量标准。利用提出的新方法与传统光谱反射率匹配方法对4种常用矿物颜料进行光谱匹配,并将匹配结果进行比较。实验结果表明:利用基于统计流形的光谱信息散度方法,解决了概率变化量的几何度量问题,光谱信息匹配识别物质的精度得到了显著提高。

关键词 光谱学; 统计流形; 光谱信息散度; 黎曼度量; 光谱反射率匹配

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.013002

An Identification Method of Spectral Information Divergence
Pigment Based on Statistical ManifoldWang Weichao¹, Wang Huiqin¹, Wang Ke¹, Wang Zhan²¹ School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an, Shaanxi 710055, China;² Shaanxi Provincial Institute of Cultural Relics Protection, Xi'an,
Shaanxi 710075, China

Abstract Each substance has its own unique spectral information, so it is possible to identify substances based on spectral information. An identification method of spectral information divergence pigment based on statistical manifold is studied. The Riemann metric on the statistical manifold is used as a new metric in the information divergence. The spectral matching for four commonly used mineral pigments is carried out with utilization of the proposed method and traditional method, and the matching results are compared. The experimental results show that the method of spectral information divergence based on statistical manifold can solve the problem of geometric measurement of probability variation, and the accuracy of spectral information matching recognition is improved obviously.

Key words spectroscopy; statistical manifold; spectral information divergence; Riemann metric; spectral reflectance matching

OCIS codes 170.1470; 070.4790; 300.6170

1 引言

中国古代壁画最早可以追溯到古石器时代,那时它是一种重要的记事符号。随着人类文明的发

展,壁画作为建筑的附属部分,通常创作在建筑物的墙壁、天花板上,以达到美化建筑的功能。壁画的绘画手法、题材、内容,以及颜料的制作和使用等^[1],向人们提供了珍贵的历史信息。

收稿日期: 2017-05-27; 收到修改稿日期: 2017-07-12

基金项目: 教育部归国留学人员科研扶持项目(K05055)、国家自然科学基金(61701388)、陕西省国际科技合作项目(2017KW-036)、陕西省教育厅专项(17JK0431)、西安科技局软科学项目(2016043SF/RK06(3))、科技西安市碑林区局科技项目(GX1605,GX1606)、西安建筑科技大学青年科技基金(QN1628,QN1020)

作者简介: 王伟超(1991—),男,硕士研究生,主要从事多光谱图像分类方面的研究。E-mail: 1140380521@qq.com

导师简介: 王慧琴(1970—),女,博士,教授,主要从事数字图像处理方面的研究。

E-mail: hqwang@xauat.edu.cn(通信联系人)

在丰富多彩的颜料世界里,矿物颜料是人类最早青睐的对象之一。从最早的古壁画、艺术品,到现代的油画、水彩画等,矿物颜料是不可或缺的。我国古代的能工巧匠利用颜料绘画出了色彩绚丽的彩绘,而这些文物已成为中国古代文明的重要组成部分,具有极高的历史和文学价值,其中矿物颜料^[2]发挥了重要作用。古代文物具有不可再生性,随着时间的延长,颜料的色泽会出现不同程度的失真,失去了原有的绘画风采,因此对古代文物所用颜料的鉴定和识别研究,既有利于研究文物的历史价值,也有利于保护文物。

已有许多现代分析技术被应用于文物颜料的鉴定识别中。利用化学手段直接检测颜料的成分,或通过光谱仪器获取文物的光谱信息,利用文物反映出的光谱信息对颜料进行鉴定识别。对文物颜料材质的鉴定识别技术^[3-5]大多数都是有损或微损的,如X射线衍射(XRD)、X射线荧光光谱分析(XRF)等^[6-7]方法,需要在文物上取样,会对文物造成一定的破坏。理想的颜料鉴定识别技术应是无损的^[8-10],无损的分析方法主要有色散分析法^[11]、光导纤维反射光谱技术(FORS)^[12-13]、拉曼光谱分析技术^[14]、光谱相似度匹配(SCF)算法等。传统的光谱相似度匹配算法^[15-19]主要包括光谱角填图(SAM)、光谱特征拟合(SFF)、光谱相似度匹配和光谱信息散度(SID)等。

本文将光谱信息散度与统计流形引入光谱匹配中,在光谱信息散度的基础上,将光谱向量概率之差作为概率变化量,将欧氏度量标准替换成黎曼度量标准,以实现鉴定识别。利用分光光度计对4种矿物颜料的光谱反射率进行光谱匹配,分别采用光谱角填图、光谱相似度匹配、光谱信息散度和统计流形的光谱信息散度方法进行鉴定识别对比。实验结果表明,本文提出的基于统计流形的光谱信息散度方法可以提高对物质鉴定识别的精度。

2 原理及方法

2.1 光谱匹配方法

一般情况下,光谱匹配计算是通过通过对两条物质的光谱数据匹配来识别物质的,将匹配算法计算得到的光谱曲线与已记录的光谱曲线集合进行比较,求得两条曲线之间的相似性或差异性。目前较为成熟的光谱相似度算法包括光谱信息散度、光谱角填图和光谱相似度匹配。

1) 光谱信息散度

光谱信息散度^[20]是一种基于信息论衡量两条

光谱之间差异的波谱分类方法。将光谱向量看作是随机变量,基于概率统计理论分析两个随机向量的相似度。光谱信息散度的表达式为

$$D_{KL}(\mathbf{x} \parallel \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n [p(x_i) - p(y_i)] \cdot \{ \lg [p(x_i)] - \lg [p(y_i)] \}, \quad (1)$$

式中 x_i 、 y_i 分别为参考光谱和测试光谱, n 为测试光谱与参考光谱重合的波段数量, $p(x_i) = x_i / \sum_{i=1}^n x_i$ 和 $p(y_i) = y_i / \sum_{i=1}^n y_i$ 分别为光谱向量 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 的第 i 个分量的概率。将分量的概率代入(1)式中,(1)式可转化为

$$D_{KL}(\mathbf{x} \parallel \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} - \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \right) \cdot \left[\lg \left(\frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \right) - \lg \left(\frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \right) \right]. \quad (2)$$

光谱信息散度的值越小,说明两组光谱越相似。

2) 光谱角填图

光谱角填图将光谱向量作为 N 维空间矢量,其广义夹角可用反余弦方式表示:

$$\theta = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i}}, \quad (3)$$

式中 θ 的取值范围为 $(0, \pi/2)$,其值越小,夹角越小,光谱越相似。

3) 光谱相似度匹配

光谱相似度匹配法需要一个指标来衡量整个测量波长范围内光谱的相似程度,可以利用相关系数进行测度,相关系数的公式为

$$k = \frac{\delta_{ij}^2}{\delta_{ii} \delta_{jj}} = \frac{\sum_{k=1}^n \{ [x_i(k) - \overline{x_i}] [y_i(k) - \overline{y_i}] \}}{\sqrt{[x_i(k) - \overline{x_i}]^2 [y_i(k) - \overline{y_i}]^2}}, \quad (4)$$

式中 $\overline{x_i}$ 、 $\overline{y_i}$ 为平均光谱, δ_{ij} 为协方差, δ_{ii} 、 δ_{jj} 为标准差, $x_i(k)$ 为一种光谱分量, $y_i(k)$ 为另一种光谱分量。相关系数范围为 $(-1, 1)$,越接近于1说明两种光谱越相似。

以上三种传统的光谱匹配方法在以欧氏度量为度量标准的情况下,无法解决几何度量问题。本课题组用黎曼度量标准代替欧氏度量标准,成功解决了几何度量问题,提高了区分精度。

2.2 统计流形

集合 $S = \{p(x, \theta) | \theta \in \Theta\}$ 称为统计流形^[21]。其中: x 为样本空间 \mathbf{X} 中的随机变量; $p(x, \theta)$ 为 x 的概率密度函数, 满足一定的正则条件; θ 是一个 m 维向量, $\theta = [\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^m] \in \Theta$, Θ 为 m 维实空间 \mathbf{R}^m 的开集。概率归一化为 $\int_{\mathbf{X}} p(x, \theta) dx = 1$ 。

在统计流形上, 用费舍尔的信息矩阵作为黎曼度量, 公式定义为

$$g_{jk}(\theta) = \int_{\mathbf{X}} \frac{\partial \lg p(x, \theta)}{\partial \theta_j} \frac{\partial \lg p(x, \theta)}{\partial \theta_k} p(x, \theta) dx, \quad (5)$$

式中 $g_{jk}(\theta)$ 为黎曼度量, θ_j, θ_k 为数据分量。

对样本空间 \mathbf{X} 内所有的 x 进行积分, 变量 θ 看作是统计流形的坐标系。

将自信息量 $i(x, \theta) = -\lg p(x, \theta)$ 代入(5)式, 定义新的等价形式, (5)式变为

$$g_{jk}(\theta) = \int_{\mathbf{X}} \frac{\partial^2 i(x, \theta)}{\partial \theta_j \partial \theta_k} p(x, \theta) dx = E \left[\frac{\partial^2 i(x, \theta)}{\partial \theta_j \partial \theta_k} \right], \quad (6)$$

式中 $E \left[\frac{\partial \lg p(x, \theta)}{\partial \theta_j} \right] = 0$ 。

2.3 统计流形的信息散度(SMKL)

对于一组观测数值 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和概率分布模型 $p(x, \theta)$, θ 是需要估计的参数。对于参数的变化(自变量), 可以直接采用欧氏度量计算估计参数的变化量 $\Delta\theta$, 但由于自变量变化导致因变量变化, 也就是概率的变化无法用欧氏距离度量。度量概率分布满足信息散度, 于是对应的概率分布 $p(x, \theta)$ 和 $p(x, \theta + \Delta\theta)$ 的信息散度为

$$D_{\text{KL}} [p(x, \theta) \parallel p(x, \theta + \Delta\theta)] = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x, \theta) \lg \frac{p(x, \theta)}{p(x, \theta + \Delta\theta)} dx. \quad (7)$$

利用统计流形和黎曼度量标准简化信息散度的计算, 则(7)式可以写成:

$$D_{\text{KL}} [p(x, \theta) \parallel p(x, \theta + \Delta\theta)] = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x, \theta) [\lg p(x, \theta) - \lg p(x, \theta + \Delta\theta)] dx, \quad (8)$$

令 $\lg p(x, \theta) = f(\theta)$, $\lg p(x, \theta + \Delta\theta) = f(\theta + \Delta\theta)$, 再结合函数展开式, 可以得到:

$$f(\theta + \Delta\theta) \approx f(\theta) + \Delta\theta^T \frac{f(\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \Delta\theta^T \frac{f(\theta)}{\partial \theta} \left[\frac{f(\theta)}{\partial \theta} \right]^T \Delta\theta. \quad (9)$$

结合(8)式和(9)式可得到:

$$D_{\text{KL}} [p(x, \theta) \parallel p(x, \theta + \Delta\theta)] \approx \int_{-\infty}^{+\infty} p(x, \theta) \left\{ \Delta\theta^T \frac{\partial}{\partial \theta} \lg p(x, \theta) + \frac{1}{2} \Delta\theta^T \frac{\partial}{\partial \theta} \lg p(x, \theta) \cdot \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \lg p(x, \theta) \right]^T \Delta\theta \right\}, \quad (10)$$

对于(10)式的一次项积分, 可以得到:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x, \theta) \Delta\theta^T \frac{\partial}{\partial \theta} \lg p(x, \theta) dx = 0. \quad (11)$$

于是(10)式可以简化为

$$D_{\text{KL}} [p(x, \theta) \parallel p(x, \theta + \Delta\theta)] \approx \frac{1}{2} \Delta\theta^T G(\theta) \Delta\theta, \quad (12)$$

式中 $G(\theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x, \theta) \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \lg p(x, \theta) \right] \cdot \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \lg p(x, \theta) \right]^T dx$ 。

2.4 基于统计流形的光谱信息散度方法(SMSID)

统计流形的光谱信息散度方法将黎曼度量作为新的度量标准, 利用光谱信息相对熵对两条光谱进行相似度计算。将两个光谱向量的分量差值 Δp 作为概率变化量, 将其代入(7)式可得到新的信息散度公式:

$$D_{\text{KL}} [p \parallel (p + \Delta p)] = \int_{-\infty}^{+\infty} p \lg \frac{p}{p + \Delta p} dp, \quad (13)$$

式中 p 为分量概率矩阵。

经过统计流形的黎曼度量标准可以将(13)式转化为

$$D_{\text{KL}} [p \parallel (p + \Delta p)] \approx \frac{1}{2} \Delta p^T G(p) \Delta p. \quad (14)$$

每种颜料都有其特有的光谱曲线, 颜料光谱曲线的形状有 S 型、钟型和斜线型, 由于颜料配制浓度的不同或加入增强附着力的物质不同, 会导致不同种颜料的光谱曲线极其相似。传统的光谱匹配算法在进行光谱相似度匹配时具有区分度低、光谱相似度匹配值大的缺点。区分度低会导致在光谱匹配过程中无法通过设定阈值的方式区分颜料, 从而对匹配结果产生影响。通过设定阈值的方式区分颜料时, 阈值设定的过大就会导致颜料的匹配准确度降低, 阈值设定过小则会导致

无法从匹配结果中判定出所用的颜料,对文物研究具有不科学性、不真实性。针对传统光谱匹配算法存在的问题,本课题组提出了基于统计流形的光谱信息散度方法,该方法可提高光谱相似度匹配值的精度,使匹配值的取值范围更小,能更有效地区分颜料。

2.5 算法步骤

算法步骤如下:

1) 选取两组光谱向量,分别设为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 和 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$,求得光谱向量 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 的第 i 个分量的概率分别为

$$p(x_i) = x_i / \sum_{i=1}^n x_i \text{ 和 } p(y_i) = y_i / \sum_{i=1}^n y_i。$$

2) 计算两组光谱向量之间的概率差值 $\Delta p(\mathbf{x} | \mathbf{y}) = p(x_i) - p(y_i)$ 和 $\Delta p(\mathbf{y} | \mathbf{x}) = p(y_i) - p(x_i)$ 。

3) 将光谱向量之差 $\Delta p(\mathbf{x} | \mathbf{y})$ 代入 $D_{KL}(\mathbf{x} \| \mathbf{y}) = \{p(\mathbf{x}) \| p[\mathbf{x} + \Delta p(\mathbf{y} | \mathbf{x})]\}$ 中,计算出光谱信息散度值。

4) 循环步骤 3),将光谱向量之差替换成 $\Delta p(\mathbf{x} | \mathbf{y})$,计算出 $D_{KL}(\mathbf{y} \| \mathbf{x})$ 。

5) 将 $D_{KL}(\mathbf{x} \| \mathbf{y})$ 和 $D_{KL}(\mathbf{y} \| \mathbf{x})$ 相加得到综合的光谱信息散度值。

3 颜料数据采集

3.1 实验仪器

实验仪器为海洋光学 Spectro Suite 分光光度计,测量波长范围为 200~1100 nm,光谱数据采集波长为 380~780 nm,光谱数据采集间隔为 0.8 nm 左右。采用 MATLAB 软件仿真,计算机硬件环境为:Windows 7 64 位系统, I5 处理器, 2 GB 内存。

3.2 颜料参考

中国古代彩绘所用颜料种类比较多,不同时期使用的颜料也有所不同。由于历史变迁,彩绘受到了不同程度的损伤,表面颜料色彩比较暗淡。

中国古代壁画颜料的使用情况不一,有些朝代使用的基本都是矿物颜料,有些朝代使用的是矿物和植物颜料,有些朝代则是将国外颜料与已有的天然颜料混合使用。古代壁画常用颜料如表 1 所示。若修复彩绘时使用的颜料与彩绘本身的颜料不一,研究时会产生误区,无法还原壁画本身的绘画面貌。因此,明确颜料使用的情况对文物的保护具有着重要意义。

表 1 古代壁画常用颜料

Table 1 Frequently-used pigments of ancient frescoes

Colour	Pigment	
	Mineral	Animal and plant
White	Chalk (lime, calcite), ceruse	Clamshell powder
Red	Iron oxide red (ochre, red soil, vermilion, and red lead)	Rouge
Yellow	Naturals, realgar	Gamboge, Zhi Huang
Green	Malachite green (malachite)	Zhi Lü
Blue	Azurite, ultramarine	Anthocyanin
Black		Black
Gold		Gold mud
Silver		Silver mud
Glue		Bovine glue (bone glue)

3.3 矿物颜料光谱数据的采集

颜料的光谱曲线各有特征,通过其波形、特征吸收位置、反射率大小等可对未知颜料进行鉴定识别。本课题组采用的数据是 4 种常用矿物颜料(石青、石绿、银朱、铅丹)的光谱反射率,将颜料分成等量的两份,涂成颜料块,颜料样本块如图 1 所示。颜料块制作步骤如下:

1) 先将颜料用适量的清水浸透,待全部融化后方可使用(矿物质块状颜料本身是加胶后的颜料)。

2) 倒出所需量的胶粒(明胶),加入 4 倍清水,待胶粒膨胀后,再加入 5~6 倍温度为 80 °C 的热水,充分搅拌成透明胶液;取出所需量的矿物粉末,加入同等量的胶液后用乳钵研磨,待充分调和成糊状后加入清水稀释。加入清水量的多少可以控制颜料的浓度。

3) 在木基板上面均匀涂抹薄薄的一层碳酸钙(CaCO₃),待其干燥后画好方格,再用刷子平涂矿物颜料。矿物颜料是颗粒状沉淀颜料,若平涂 1~2 遍也不均匀时,待其干后再涂 3~4 遍即可达到饱和的发色效果。加胶要适度,以干后不脱落为宜。

通过分光光度计测得这两份不同浓度颜料的光谱反射率曲线,分光光度计及实验环境如图 2 所示。在图 2 中,1 为光谱仪,2 为光源,3 为光纤,4 为积分球,5 为标准白板,6 为便携式计算机。为了去除噪声

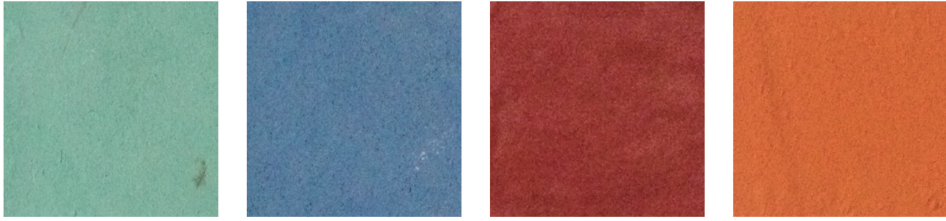


图1 石青、石绿、银朱、铅丹4种矿物颜料样本

Fig. 1 Four kinds of mineral pigment samples of azurite, malachite green, vermilion, and red lead

的影响,选择平滑次数为2、平滑度为4,并将积分球对准标准白板进行光谱曲线校正,以达到平滑曲线的目的。积分球的孔径为8 mm,积分球利用全反射、漫反射对光谱反射率进行处理。光谱仪通过光纤与积分球连接,被检测的光谱信号通过光纤输送到光谱仪中,再通过USB接口与计算机相连,完成对数据的采集。

待分光光度计调好后,将积分球放置在颜料色块上面,待光谱曲线稳定后开始采集光谱数据,结果如图3所示。由图3可以看出:相同颜料的光谱曲线波形基本一致;由于颜料的浓度不同,光谱反射率的吸收百分比有比较明显的差异。



图2 分光光度计及实验环境

Fig. 2 Spectrophotometer and experimental environment

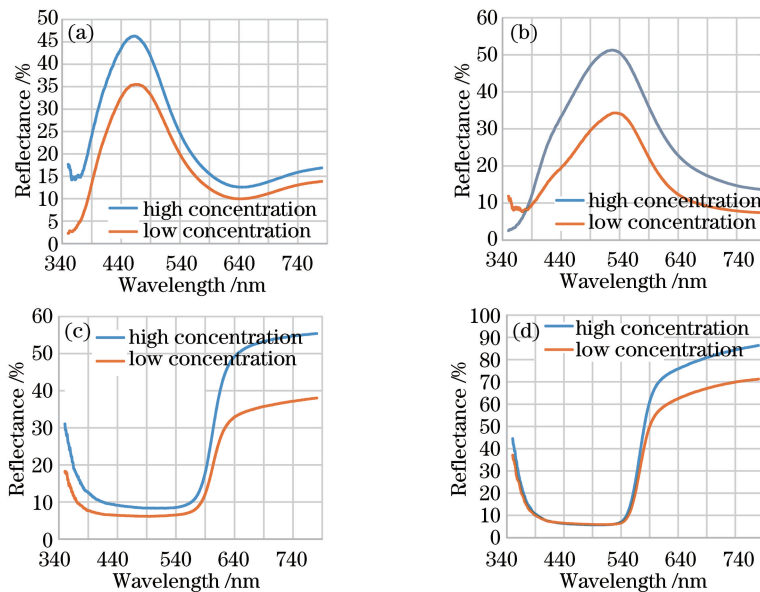


图3 不同浓度颜料的光谱反射率曲线图。(a)石青;(b)石绿;(c)银朱;(d)铅丹

Fig. 3 Spectral reflectance curves of pigments with different concentrations. (a) Azurite; (b) malachite green; (c) vermilion; (d) red lead

4 实验结果

4.1 实验结果分析

采用三种传统的匹配方法和本课题组提出的匹配方法对实验数据进行光谱相似度匹配值计算,4种方法的匹配结果如表2~5所示。由表2~4可以看出:同种颜料的匹配值比异种颜料的匹配值小;对

于同种颜料,采用光谱角填图和光谱信息散度匹配判定颜料的阈值比采用光谱相似度匹配得到的匹配阈值小。异种颜料具有明显的形状差异,但对同种颜料而言,判定阈值大小的设定会显著影响颜料的匹配值。

由表5可以明显地看出,本课题组提出的方法跟其他三种传统匹配方法相比,相似度匹配结果的

表2 光谱信息散度方法的匹配结果

Table 2 Spectral matching results of SID method

Pigment	Azurite	Malachite green	Vermilion	Red lead
Azurite	0.0150	0.1041	0.4907	0.6251
Malachite green	0.1054	0.0163	0.6625	0.7547
Vermilion	0.4621	0.5879	0.0005	0.0210
Red lead	0.6538	0.7381	0.0269	0.0007

表3 光谱角填图方法的匹配结果

Table 3 Spectral matching results of SAM method

Pigment	Azurite	Malachite green	Vermilion	Red lead
Azurite	0.1215	0.4360	0.8940	0.9350
Malachite green	0.4484	0.1136	1.0335	1.0367
Vermilion	0.8650	0.9762	0.0252	0.1313
Red lead	0.9212	0.9935	0.1394	0.0157

表5 SMSID方法匹配结果

Table 5 Spectral matching results of SMSID method

Pigment	Azurite	Malachite green	Vermilion	Red lead
Azurite	0.221×10^{-12}	0.688×10^{-11}	0.808×10^{-11}	0.107×10^{-10}
Malachite green	0.688×10^{-11}	0.207×10^{-12}	0.108×10^{-10}	0.227×10^{-10}
Vermilion	0.968×10^{-11}	0.845×10^{-11}	0.577×10^{-13}	0.201×10^{-11}
Red lead	0.141×10^{-10}	0.209×10^{-10}	0.245×10^{-11}	0.973×10^{-14}

可以明显地看出,与三种传统的光谱匹配方法相比,所提方法得到的光谱相似度匹配精度显著提高。表6中光谱曲线形状为S型(红色)的颜料的相似度匹配值更加明显,但光谱曲线形状为钟型(绿、蓝色)的颜料的相似度匹配精度没有那么明显。

表6 4种匹配方法的结果对比

Table 6 Results comparison of four spectral matching methods

Pigment	SMSID	SID	SAM	SCF
Azurite	0.221×10^{-12}	0.0150	0.1215	0.0402
Malachite green	0.207×10^{-12}	0.0163	0.1136	0.0238
Vermilion	0.577×10^{-13}	0.0005	0.0252	0.0012
Red lead	0.973×10^{-14}	0.0007	0.0157	0.0001

4.2 算法比较

信息散度是通过欧氏距离度量来衡量两个随机分布之间距离的。当两个随机分布相同时,信息散度值为零;当两个随机分布的差别较大时,信息散度值也会较大。如果两条不同颜料的光谱向量曲线极其相似,通过欧氏距离度量会无法识别,本课题组提出的算法是将黎曼度量作为欧氏距离空间的点乘几何度量问题,减小了距离计算的误差,达到了较高的相对精度。

表4 光谱相似度匹配方法匹配结果

Table 4 Spectral matching results of SCF method

Pigment	Azurite	Malachite green	Vermilion	Red lead
Azurite	0.0402	0.4378	1.6788	1.7482
Malachite green	0.4222	0.0238	1.8032	1.7466
Vermilion	1.5290	1.7007	0.0012	0.0293
Red lead	1.6112	1.6544	0.0312	0.0001

精度显著提高,同种颜料的光谱相似度匹配值明显低于两种不同颜料的光谱匹配值。光谱曲线形状为S型(红色)和钟型(蓝、绿色)的颜料其各自的光谱相似度匹配值比S型颜料对钟型颜料的光谱相似度匹配值小,有利于鉴定颜料。

将本课题组提出的新方法与传统光谱匹配方法的匹配结果进行对比,匹配结果如表6所示。

5 结论

提出了一种基于统计流形空间上的信息散度方法,该方法将信息散度的度量标准转换成黎曼度量,对两组光谱向量的分量概率分别求取相互之间的差值,将光谱向量的分量概率之差作为概率变化量,通过光谱信息对颜料进行鉴定识别,有效地提高匹配结果的精度。不同颜料具有不同的光谱曲线,从颜料的光谱信息可以准确判定颜料类别,对所使用颜料的判定具有重要的参考价值。从实验结果可以看出,基于统计流形空间的信息散度方法比传统光谱匹配方法的精度更高,可以减小对颜料鉴定识别产生的误差,为未知彩绘颜料的鉴定识别奠定了基础。

本课题组对颜料的鉴定识别未考虑彩色文物的绘画载体基质对光谱反射率的影响,也未涉及对未知颜料的鉴定识别等问题。随着后续研究的深入开展,这将是今后研究工作的重点。

参考文献

- [1] Yamabf N, Chen R L, Yang F X. An examination of mural paintings of visualizing monks in Toyok cave 42: in conjunction with the origin of some Chinese

- texts on meditation [J]. *Dunhuang Research*, 2015 (4): 35-42.
- 山部能宜, 陈瑞莲, 杨富学. 吐峪沟第 42 窟禅观壁画研究——兼及汉文禅观文献的起源 [J]. *敦煌研究*, 2015(4): 35-42.
- [2] Li S H, Zhu T Q. Analysis on the component of several common mineral pigment in Tibet [J]. *Journal of Tibet University*, 2015, 30(2): 47-54.
李舒涵, 朱铁权. 西藏几种常见矿物颜料的成分分析 [J]. *西藏大学学报*, 2015, 30(2): 47-54.
- [3] Snickt G V D, Nolf W D, Vekemans B, *et al.* μ -XRF/ μ -RS vs. SR μ -XRD for pigment identification in illuminated manuscripts [J]. *Applied Physics A*, 2008, 92(1): 59-68.
- [4] Li M, Xia Y, Wang L Q. The application of PLM and RM in the pigment identification analysis on the polychrome relics [J]. *Journal of Light Scattering*, 2013, 25(3): 268-275.
李蔓, 夏寅, 王丽琴. 偏光显微分析和拉曼光谱分析在彩绘颜料鉴定中的应用 [J]. *光散射学报*, 2013, 25(3): 268-275.
- [5] Wu C, Wang L, Yang L, *et al.* Application of gas chromatography-mass spectrometry for identification of organic compounds in cultural relics [J]. *The Journal of Analytical Chemistry*, 2013, 41 (11): 1773-1779.
- [6] Wang J Y. The producing area of Hecub a Juno application of lapis lazuli pigment of polychrome arts on ancient China [J]. *Relics and Museology*, 2009 (6): 396-402.
王进玉. 中国古代彩绘艺术中应用青金石颜料的产地之谜 [J]. *文博*, 2009(6): 396-402.
- [7] Yan J, Wang L Q, Li L. Analysis of the red pigments in ancient architecture of summer place [J]. *Journal of Analytical Science*, 2010, 26(3): 275-278.
严静, 王丽琴, 李立. 北京颐和园古建筑上红色颜料的分析研究 [J]. *分析科学学报*, 2010, 26(3): 275-278.
- [8] Li J L, He B, Liu S, *et al.* Nondestructive analysis of blue and white porcelain excavated from Nan'ao No. 1 shipwreck [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051101.
黎继立, 何斌, 刘松, 等. 南澳一号沉船出水青花瓷的无损分析研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051101.
- [9] Yang S S, Zhu R, Mi L, *et al.* Application of optical coherence tomography in the detection of the mural [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0511005.
杨珊珊, 朱锐, 米磊, 等. 光学相干层析成像技术对壁画的检测研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0511005.
- [10] Wang X P, Zhao H X, Li Q H, *et al.* Relevant fundamental research of colored artworks by multispectral imaging technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1030003.
王雪培, 赵虹霞, 李青会, 等. 多光谱成像技术分析彩色艺术品的相关基础研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1030003.
- [11] Zhou S H, Fu L, Liang B L. Study on the cultural relic material site and period by EDXRF [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(5): 1181-1185.
周少华, 付略, 梁宝鏊. EDXRF 微量元素分析在文物断源断代中的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(5): 1181-1185.
- [12] Wang L Q, Dang G C, Zheng L P, *et al.* A simple optical fiber reflectance spectrophotometer and its application in identification of pigments on relics [J]. *Chines Journal of Analytical Chemistry*, 2000, 28 (4): 513-517.
王丽琴, 党高潮, 郑利平, 等. 一种简易光导纤维反射分光光度计的研制及其在文物颜料鉴定中的应用 [J]. *分析化学*, 2000, 28(4): 513-517.
- [13] Zhao X, Wang L Q. Progress in the analysis and conservation of cultural relics and artworks with fiber optic reflectance spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(1): 21-26.
赵星, 王丽琴. 光导纤维反射光谱法在文物、艺术品分析和保护中的进展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(1): 21-26.
- [14] Liu Z J, Han Y X, Yang R, *et al.* Micro-Raman analysis of the pigments in the mural paintings from a Ming dynasty tomb [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0615003.
刘照军, 韩运侠, 杨蕊, 等. 明代古墓葬壁画颜料的显微拉曼光谱分析 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0615003.
- [15] de Carvalho O A, Jr, Meneses P R. Spectral correlation mapper (SCM): an improvement on the spectral angle mapper (SAM) [Z/OL]. [2017-05-25]. <https://www.mendeley.com/research-papers/spectral-correlation-mapper-scm-improvement-spectral-angle-mapper-sam/>.
- [16] Gong M T, Feng P L. Preliminary study on the application of hyperspectral imaging in the classification of and identification Chinese traditional

- pigments classification—a case study of spectral angle mapper [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2014, 26(4): 76-83.
- 巩梦婷, 冯萍莉. 高光谱成像技术在中国画颜料分类和识别上的应用初探—以光谱角填图(SAM)为例[J]. *文物保护与考古科学*, 2014, 26(4): 76-83.
- [17] Wu F Q, Yang W N, Li D. Research on art painting pigment composition recognition based on spectra feature fitting[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2014, 26(1): 88-92.
- 武锋强, 杨武年, 李丹. 基于光谱特征拟合的艺术画颜料成分识别研究[J]. *光散射学报*, 2014, 26(1): 88-92
- [18] Khaleghi M, Ranjbar H, Shahabpour J, *et al.* Spectral angle mapping, spectral information divergence, and principal component analysis of the ASTER SWIR data for exploration of porphyry copper mineralization in the Sarduiyeh area, Kerman province, Iran [J]. *Applied Geomatics*, 2014, 6(1): 49-58.
- [19] Liu W J, Yang X H, Qu H C, *et al.* Hyperspectral unmixing algorithm based on spectral information divergence and spectral angle mapping[J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(3): 844-848.
- 刘万军, 杨秀红, 曲海成, 等. 基于光谱信息散度与光谱角匹配的高光谱解混算法[J]. *计算机应用*, 2015, 35(3): 844-848.
- [20] Xu Z, Zhao H. A new spectral unmixing algorithm based on spectral information divergence[C]. *SPIE*, 2008, 7127: 712726.
- [21] Calmet X, Calmet J. Dynamics of the Fisher information metric[J]. *Physical Review E*, 2005, 71: 056109.