

皮影文物保存状况数学模型评价方法 在数字化信息中的构建

雷欣怡^{1, 2} 李 龙³ 李映福⁴ 杜之岩⁵

(1. 成都博物馆, 四川成都, 610015; 2. 中国皮影博物馆, 四川成都, 610015; 3. 成都武侯祠博物馆, 四川成都, 610041; 4. 四川大学考古文博学院, 四川成都, 610064; 5. 复旦大学文物与博物馆学系, 上海, 200433)

摘要 博物馆收藏的大量中国传统皮影文物, 都受到不同程度的病害破坏。准确评价皮影文物病害, 有利于中国传统皮影文物的有效保存。因此, 迫切需要开发一种操作方便、准确率高的病害评价方法。由于其特殊的生皮结构和独特的观看方式, 人们更喜欢将其二维图像记录在背投光源中, 这样可以很好地反映颜色对比关系。病害会导致皮影文物中皮质胶原的质地和透光率以及表面生色团的结构发生变化, 从而影响色彩呈现。因此, 本文提出了一种定量评价皮影文物保护状况的方法。首先, 将二维图像中皮影遗迹的颜色特征转换为数字信息, 在处理软件中利用数字信息构建像素矩阵。对皮影文物图像的定量信号进行无量纲提取, 并用于计算色度与整体和局部本身的偏差, 从而评估其异常程度和劣化风险。最后, 基于像素格中皮影文物的颜色值建立隶属函数, 并指定离散模糊集及其评分指标, 对像素格中具有不同色度属性的区域给出相应的权重值, 通过计算得到总体得分, 用于综合评价皮影遗物的整体保存状况。本文利用像素格和隶属函数建立了皮影文物预防性保护与评价的技术标准体系, 对皮影文物虚拟修复的量化和规范化具有重要的指导意义。

关键词 皮影 病害 保存状况 评估

1 绪 论

皮影戏是一种传统的中国民间戏剧形式, 它利用动物皮料或纸板制作的角色和场景剪影来表演戏剧故事。它的起源可以追溯到汉代, 盛行于宋代, 至今仍深受中国人民的喜爱。2011年, 中国皮影戏被列入联合国教科文组织人类非物质文化遗产名录(名册), 这一荣誉承认了它的重要性。皮影文物作为这一文化遗产的有形证据, 逐渐从传统民俗风物进入博物馆收藏, 成为一种新的展品门类。作为珍贵的文化和历史实物, 皮影文物应该得到妥善的保存和传承。然而, 大量藏品普遍存在不同程度的病害和劣化, 与此同时, 文物保护领域对于皮影的研究也相对缺乏。因此, 亟须开展基

于自然科学技术的系统保护研究，以延长皮影文物的保存期限。

制作皮影的过程包括两个主要阶段：制皮和敷彩。在制皮阶段，机械地去除生牛皮的表皮、脂肪组织、血管、淋巴管和皮肤附件，只留下真皮层的胶原蛋白纤维组织。这个过程增强了材料的强度，但没有使其经历鞣制，材料特性也不同于鞣制皮革。因此，皮影原皮具有皮质较硬、透光性好、纤维分散度低等特点，一般用于鞣制皮革文物的研究方法不能直接应用于皮影文物的分析，必须另行开发具有针对性的方法来研究其保存状况。敷彩阶段则是将明胶或由切碎的生皮煮制而成的皮胶以特定比例与颜料混合加热制成敷彩料，然后涂敷到皮影表面上色。皮影通常使用五种基本颜色敷彩，白色、黄色、红色、蓝色和黑色，用于构建不同的人物和场景。要欣赏到皮影特殊的五彩效果，必须在逆光下观看，这决定了对所选颜料的透光性能要求，即选择具有优异透光性的水溶性植物颜料，舍弃几乎不透光的矿物颜料。当然，不同地区的皮影制作技术和材料各有差异，即使皮影表面的颜色看起来相同，所使用的颜料也可能不同。而大部分皮影文物来源都是民间征集，很多缺乏制作技术和材料选择等关键信息，这妨碍了我们对这些皮影文物进行批量分析。为了解决这个问题，本文建立了一个标准化的数学模型，为描述皮影文物病害提供清晰的指标和权重，它将物理系统的绝对值转化为相对值的关系。一方面减少了图像数据采集拍摄方法和设备条件对数字图像分析的影响；更重要的是通过对数字化信息进行标准化处理，实现无量纲的文物信息量化，增强数据的可比性，使建设定量评估系统和数据库成为可能。

2 研究方法

为进一步加强皮影文物预防性保护，并在一定程度上辅助文物实体修复与虚拟修复工作，准确评估皮影的保存状况至关重要。当前的文物评估方法主要依赖于视觉观察和主观定性描述，缺乏一个强有力的指导框架。因此，本文提出利用数字成像技术和数学模型对皮影文物的保存状况进行定量。在原始状态下，皮影材料表现出至少在较小范围内的色度均匀性和连续性。然而，受早期保存条件的限制，存储环境中温度、湿度、光照以及其他人为因素的波动会导致文物材料的老化，随着时间推移出现褪色、霉菌生长、分层和裂纹等问题。这些问题常常在皮影文物的表面颜色的突变中可见。在逆光条件下，病害引起的这些颜色变化可以轻松观察到，数码相机捕捉的图像可以有效获取这些信息并进行数字化，从而为准确评估皮影文物的保存状况提供可靠材料。

数学模型是利用数学语言以一种广义或近似的方式捕捉特定系统或现象的特征与数量关系的数学结构。通过数学模型，文物的评估不再依赖经验判断，保存状况的量化将为后续文物的干预保护提供精确的指导。数学建模基于结构化数据，因此在建模之前需要将文物图像转换为结构化数据。本研究采用构建像素点阵的方法来促进数据转化。使用高清数码相机在背光条件下拍摄皮影文物的照片。在图像处理软件中，将图片转换为像素点整齐排列的点阵模型。像素作为数字图像不可再分割的单元，任何像素的颜色信息都可以用RGB色彩空间中的唯一坐标表示。RGB色彩模型是一种颜色标准，通过变化红色（R）、绿色（G）和蓝色（B）三个色彩通道的值，可以生成人眼可感知的所有颜色。重要的是，RGB色彩空间的三个轴是正交的，这使得我们在三维坐标空间中精确量化颜色偏差和变化成为可能。由RGB色彩空间所表达的像素分布及其颜色信息构成了皮影文物的完整结构化数字图像信息，这也是皮影文物表面色度分布的结构化数据框架。色度不连续是皮影文物恶化的可见表现，局部区域内显著色度变化会导致RGB色彩空间内像素坐标的异常变化。通过对像素点

阵数据的数学计算和定量,可以准确提取文物图像中的关键信息,如损伤位置和严重程度,进而准确评估文物的保存状况,并实现对评估结果的可靠比较。

2.1 基于像素点阵的病害定量方法

像素点阵中参与计算与研究的“五色”区域像素点总数计算式为:

$$N_0 = \sum_{k=1}^m N_k$$

式中,设 k 代表白、黄、红、蓝、黑的一个单色区域, N_k 为各个单色区域 k 内像素点数量。 N_0 为组成皮影“五色”单色区域 k 的像素点数之和。 m 是该像素点阵所含“五色”单色区域 k 的种数。

将所含像素点数目与像素点阵总数目相除,得到某色在文物表面的敷彩面积比例 P_k 。这一比例的意义是选中区域面积相对于整体或其他部分的面积占比,这种面积表示方法是去量纲的,得到的数据摆脱了图像清晰度、像素点阵本身数据规模以及奇异数据的影响,具有可以定量计算、交叉比较的可公度性。计算公式表示为:

$$P_k = \frac{N_k}{N_0} \times 100\%$$

式中, P_k 是单色区域 k 在整体中的面积占比。由于像素点阵的变量本质是面积,因此在讨论单色区域 k 对整体影响时,需要将该影响系数乘以其面积占比 P_k 。

根据RGB色品空间内的像素点色度整体分布平均与实际偏移情况确定单色基准点 O_k 。针对每一件文物的5个标准点 O_k 的设置,要结合皮影其他表面特性综合判断,它是必须通过观察研究、人为判定的,因为在超长时间的文物保存期限内,色度的绝对变化是不可预估的,因此每一个单色区域 k 的区域范围和标准点 O_k 的确定必须人为判定。分级设置色彩容差条件 i , i 是像素点在与该文物单色基准点 O_k 的色差绝对值。存在 $i \in I$,色彩容差值的集合 I 可以表示为:

$$I = \{i | 10, 20, 30, 40, 50, \dots, 150\}$$

以 O_k 点的色品坐标为零点,选取与它色彩容差在 $[0, i]$ 区间内的像素点,这些被选中像素点代表的文物表面积,其含义是呈现该色度的文物显色面积占单色区域 k 面积的比例 P_{ki} ,本质是皮影外表面能满足该保存状况要求的面积占比,可以表示为:

$$P_{ki} = \frac{N_{ki}}{N_k} \times 100\%$$

有 $i, j \in I$,存在 $i > i - j > 0$,在区域 k 内选中相对于基准 O_k 点色差为 $[j, i]$ 之间的点,计算式为:

$$\Delta P_{k(i-j)} = \frac{N_{ki} - N_{kj}}{N_k} \times 100\%$$

式中, $\Delta P_{k(i-j)}$ 表示在单色区域 k 内、相对于 O_k 点在RGB色品空间的色差为区间 $[j, i]$ 中的面积占比,本质是具有相近保存状况的文物表面积占比,将其命名为单色像素显色分级占比。

当规定在 $[j, i]$ 区间内的像素点属于 X 等级病害时, $\Delta P_{k(i-j)}$ 就是 X 等级病害的面积,此类像素点集合的位置就是 X 等级病害的所在。通常来说 i 与 j 的数值越大,色度偏移标准点 O_k 越多,病害就越严重。而 i 与 j 的差值越大, X 等级病害的定义域越宽,所含像素点更多,面积越大;反

之,则分级越细,定义域窄,包含面积小。这就是建立像素点阵并解构其中文物色彩、病害和保存信息的方法,用这种去量纲的手段提取出皮影图像定量信号,并以此评估皮质异变面积、程度及其劣化风险。

2.2 基于隶属函数的文物保存状况定量评估

在像素点阵系统中,设所求文物为单色区域 k 的皮质保存状况评分数 F_k ,计算式为

$$F_k = \sum_{i=1}^n y_{ij} \cdot \Delta P_{k(i-j)} = \sum_{i=1}^n y_{ij} \cdot \frac{(N_i - N_j)}{N_k}$$

式中, F_k 代表由隶属函数计算求得的单色区域 k 皮质保存状况评估得分。 i 与 j 代表设置像素点相对于 O_k 点的色彩容差选择条件, y_{ij} 是权重系数,实际是不同色度水平的像素点对评分数的影响力,它既可以理解为该类像素点集合属于较好标准的程度,也可以理解为对该类像素点代表图像之优劣的描述。 $[y_{ij} \cdot \Delta P_{k(i-j)}]$ 代表包含在容差 $[i, j]$ 区间中像素点得到的隶属得分。 n 代表所使用的像素显色分级占比的种类数。各级分区面积占比乘以各自的权重数,这些乘积的算数总和就是单色区域保存状况分数 F_k 。

单色区域 k 中,相对 O_k 点的色彩容差小的点越多,像素点色度分布越统一集中,皮影文物成像颜色越均匀、连续,则文物表面性质越一致,劣化、病害风险小,保存状况分数 F_k 越高,保存状况越好;反之,则 F_k 分数小,病害风险高,保存状况差。 i 与 j 值越接近0,区间内像素点色度越接近 O_k ,像素集合代表表面保存状况越好,于是令此等级权重 y_{ij} 越高,则该集合属于较好标准等级;反之亦然。但是 y_{ij} 一定是以非线性速度下降的,且与 i, j 值相关。 i 与 j 值越高,分数减少得越快,此时,该面积占比能得到的计算分数越少,甚至成为负数, F_k 更低。所以根据 y_{ij} 的变化趋势规律,它的变化函数一定包含一段抛物线。

对于各个单色区域 k 而言,当 $i \leq 20$,令 $y_{ij} = 100$,因为此范围内的像素点与单色标准点 O_k 的色差足够小,可以认为呈现标准色彩,保存状况良好,故该面积内的像素点权重为满分;当 $i > 20$,令 y_{ij} 是一个向下开口的抛物线,色差 i 值越大(此时计算式中一定有 $i - j = 10$),即选中面积内像素点呈色相对于标准点 O_k 的差异越大,变质更严重,分数减少更多,权重 y_{ij} 下降更快,计算表达为分段函数:

$$y_{ij} = \begin{cases} 100 & , i \leq 20 \\ ai^2 + bi + c & , i > 20 \text{ 且 } i - j = 10 \end{cases}$$

综合考虑不同色彩的光学特性和不同单色区域物质材料特点,在各个单色区域 k 内, y_{ij} 曲线陡缓程度是不同的,因此它们的 y_{ij} 曲线的计算式和取值并不完全相同,这一现象体现为 y_{ij} 函数的二次项系数 a 、一次项系数 b 和常数项 c 值的变化。 y_{ij} 的二次函数分段各项系数 a, b, c 的确定,是通过假定数个 i 值及其对应 y_{ij} 值,然后进行高斯曲线拟合,最后对得到的二次函数取值验算。

打分数 F 的本质是面积计算和基于面积计算建立的模糊聚类系统,各个单色区域的打分数乘以各自在整体的面积占比,它们的算术和就是文物整体保存状况评分计算的隶属函数:

$$F = \sum_{k=1}^m P_k \cdot F_k = \sum_{k=1}^m P_k \left(\sum_{i=1}^n y_{ij} \cdot \frac{(N_i - N_j)}{N_k} \right)$$

其中, F 代表由隶属函数计算求得的文物整体皮质保存状况评估分数。通过计算得到 F 值, 用数值高低表示文物保存状况优劣, 就完成了定量评估。这一结果将是进一步开展文物保护工作的基础和依据。

3 讨论与结论

随着数据累积, 确定像素点阵与隶属函数的评价标准则将日益清晰, 可以发展建立皮影文物的预防性保护技术标准综合系统。虚拟修复已经是常见的文物保护修复手段, 但一般的皮影文物虚拟修复还停留在经验操作的阶段。而像素点阵与隶属函数对于虚拟修复的规范化提供了新的思路。使用像素点阵模型, 通过设定自身色彩平均值 O_k 点和选择相对于 O_k 容差为 i 的像素点, i 值本身是皮影变色量, 精准计算病害所占面积 P_{ki} , 单色像素显色分级占比 $\Delta P_{k(i-j)}$ 在每个位置上都能以分级方式评估损伤的程度和严重性。尤其当 $\Delta P_{k(i-j)}$ 随 i 与 j 的变化出现占比数目突变, 表明发生色度变化, 这意味着明显的病害和潜在的扩散风险。利用这个模型, 可以确定需要修复的特定点, 并进行模拟来将色彩异常恢复到目标色度。这种方法为皮影文物的虚拟修复提供了科学和定量的方法, 特别是在精确色度修复方面, 其他方法可能无法实现。像素点阵模型还提出了一种新颖的民俗色彩研究方法, 它引入了一个定量工具, 为现有的民俗研究方法提供了补充, 使我们能够更深入地研究与皮影文物相关的工艺技术。通过分析像素点阵和隶属函数, 可以获得有关皮影色彩使用和分布模式的详细信息。它提供了一种探索皮影中色彩应用的方法, 在推动我们对这些文物所处的历史和文化背景的理解方面具有巨大潜力。此外, 从这个模型中得出的研究结果可以为未来的修复和保护工作提供指导, 确保更准确、更具文化敏感性的方法来保护皮影文化遗产。