

敦煌壁画虚拟复原及演变模拟模型研究

华 忠 鲁东明 潘云鹤

(浙江大学人工智能研究所, 杭州 310027)

摘 要 古代一些壁画,由于长期受外界环境,如光照、湿度的影响,已程度不同地产生了破损,为了使人们能够欣赏到原作的风貌,可以采用计算机来进行模拟和复原,现以敦煌莫高窟壁画为应用背景,提出了一个使破损壁画虚拟复原和演变模拟的模型以及计算机模拟方法。它可以为复原性临摹、壁画研究以及壁画保护工作者提供参考。根据敦煌保护专家对壁画颜料成分的研究和艺术家积累的经验知识,参考目前保存得比较好的一些壁画,通过综合利用色彩学知识,图象处理、人工智能等计算机技术,实现了把一些变色、褪色、脱落的敦煌壁画复原为初画成时金碧辉煌的景象,并模拟出其在外界环境因素影响下渐变到现状的过程。其结果令人满意,部分成果已在德国汉诺威 2000 年世界博览会上展出。

关键词 复原对象 色彩层 色彩转换 色彩过渡 知识检索 边缘检测

中图法分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)02-0181-06

Research on Virtual Color Restoration and Gradual Changing Simulation of Dunhuang Fresco

HUA Zhong, LU Dong-ming, PAN Yun-he

(AI Institute, Zhe Jiang University, Hangzhou 310027)

Abstract In this paper, we introduce our research on virtual restoration and gradual changing simulation of Dunhuang frescoes. We present a feasible restoration model as well as introduce the technologies used. The model is designed to give instructions for restoration facsimilers, fresco researchers and fresco protectors. With the assistant of computer, it is a new and more effective way than manual to protect and preserve Dunhuang fresco which is one of the most brilliant culture heritages of the world. The fresco image restoration result can even be used in virtual cave navigation system to show the brilliance of the grottoes in ancient time. Based on the pigment component research of Dunhuang experts, the experience knowledge of Dunhuang artists, and the current well preserved frescoes, we studied color knowledge, image processing, artificial intelligence and etc to restore some color-changing, color-fading and color-stripping Dunhuang frescoes in computer. The most important of the restoration procedure is to separate the fresco image into some recovery objects (In this paper we adopt color layer division and edge detection technology). And then for each recovery object we get appropriate experience knowledge or analogical images for restoration guidance. Of course it still need some image processing tools such as cleaning dirty, color harmonize and etc to improve the last effect of the whole image. With the restored results then we can simulate the procedure that the frescoes change gradually from origin to current status. We made gradually changing demos for each category of restoration. We are satisfied with part of the results, and the achievement is shown in the EXPO'2000 in Hannover, Germany.

Keywords Recovery object, Color layer, Color transformation, Color transition, Knowledge retrieve, Contour detection

基金项目: 国家自然科学基金项目(69733030)

收稿日期: 2000-06-06; **改回日期:** 2000-12-15

0 引言

众所周知,敦煌壁画艺术,是中国古代艺术文明中的杰出代表,然而,由于自然风化的破坏以及受重大自然灾害的威胁,这个人类艺术的宝库已变得非常脆弱.由于受到外界因素,如光照、温湿度等的影响,莫高窟各个洞内的壁画或多或少地有褪色或变色现象,其按破损的情况可分为3种:第1种是变色破损,即某种颜料的颜色长期在光和其他因素作用下慢慢变成了另外一种颜色;第2种是褪色破损,即原来鲜艳亮丽的颜色,由于颜料颗粒的脱落或吸附粉尘,使掺杂了粉尘的颜色逐渐变淡;第3种是脱落破损,即壁画中局部区域的颜料层完全脱落,已露出了墙壁的色彩,并逐渐扩大.

为了使人们能够欣赏到原作的风貌,本文采用计算机辅助方法来虚拟复原古代壁画,同时利用计算机模拟技术来模拟壁面的各种破损情况,即模拟由初画好时到现状的渐变过程,并根据此过程估计出将来变化的趋势,以便为敦煌壁画保护工作者提供参考.利用计算机复原的好处在于:一是可以将不同专业有关壁画色彩的研究成果、经验知识加以归纳、抽象、存储,并应用于虚拟色彩复原中;二是可以把目前保存得比较好的壁画作为类比源,应用于虚拟壁画复原;三是在没有现成的经验知识或类比图象时,利用计算机方便地试验多种情形,并依据效果来得到新经验知识或新类比图象.此外,在复原过程中,随时可以放弃某一步的工作,重新开始,直到取得满意结果为止.

1 色彩虚拟复原系统

1.1 壁画复原依据的分类^[1]

敦煌壁画有着2000多年的历史.由于壁画破损原因十分复杂,即壁画所用的颜料成分复杂;不同成分、不同色彩颜料的混合又使得变色、褪色情况差别很大;颜料的使用又与绘画的风格、内容、技法等相关;不同时期、不同画派有着不同的绘画技法;影响壁画破损的外界因素又有很多;同一幅壁画中变色、褪色、脱落又三者并存.所有这些,一环套一环,错综复杂,因此,要想复原壁画必须利用所有可能的研究成果、经验知识.这些知识概括起来主要有以下四大类.

(1) 艺术家长期积累的经验知识 由于这类知识通常是在参阅历史文献和有关图片,考证衣冠制度、发髻装饰和风俗习惯等基础上总结得出的,因此具有普遍的指导意义;

(2) 壁画保护科学工作者的知识 这类知识是通过颜料的化学实验分析得出的颜料变色机理,这类知识较准确地反映了含铅颜料色彩的变色规律,比如铅丹(Pb_3O_4)在阳光照射下,从桔红色到棕红,最后变为黑红色;

(3) 来自于壁画自身的知识 这里指的是未变色或变色程度不严重的作品,特别是通过对重层壁画剥出的色彩鲜亮作品;

(4) 由计算机模拟试验得到的实验知识 因为有些比较特殊的情况,没有现成的前3种知识作为参照,所以这时可利用计算机易试验的特点,来试验多种复原函数,并根据其效果来选择其中最可能符合实际情况的复原函数,其可作一条特殊的实验知识.

1.2 壁画复原系统模型

该模型结构及整个复原的流程如图1所示.

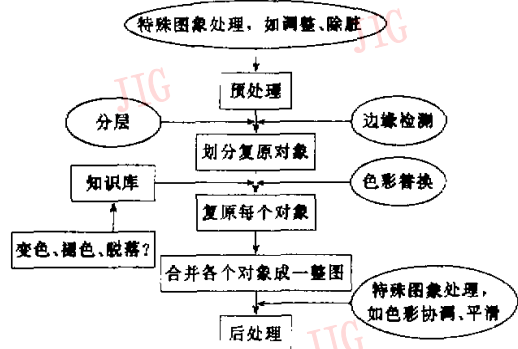


图1 复原处理流程图

1.2.1 预处理

一幅破损的图象,先从整体情况着手,再根据经验来处理图象,以使图象质量变好,便于下面的分层、边缘检测和划分对象.

1.2.2 划分复原对象

由于在一幅图象内有可能有多种破损情况,所以要区分破损情况不同的各部分,以使用不同复原方法进行复原.得到复原对象可以有两种方式:一是分层;二是通过边缘检测来确定一块区域.系统可以通过提取知识,且用最终算子(即基于知识的图象复原处理算法)来进行复原,其复原的单位(即复原图

象中可以用相同方法处理的一片区域)是复原对象。

1.2.3 复原对象

复原对象的过程比较复杂,又可以分为以下几个步骤:

(1) 合并对象 如果有些层或区域复原对象可以作相同的复原处理,则可以把它们合并到一层,最后每个复原对象各占一层,在这里还可以使用系统中的图象处理工具,对复原对象层进行特殊的图象处理,如果把对象层保存为一幅图象,甚至还可以利用其他的图象处理软件对各层图象进行处理,并重新导入系统中。

(2) 获得对象的描述信息 系统通过提供一个向导,引导用户收集一些复原必须知道的描述信息,如壁画所处朝代、洞窟和壁画主题、内容、风格、绘画技法,以及破损是变色、褪色,还是脱落破损等等。

(3) 知识检索 根据前面得到的描述信息以及对对象本身的图象信息,从知识库中检索到可用的经验知识或类比图象,知识库有经验知识库(包括研究工作者的化学知识和艺术家的经验知识)和类比库(类比库保存了现存较好的壁画或复原好的壁画图象,用于类比方法复原时没有经验知识可采用的情况)两种,两个知识库都可利用复原例子来扩充,也就是说,不停地使用复原系统,还可以把一些较好的复原结果作为实验知识保存下来,这样既可以将其保存为一条具体经验知识,也可以把复原前后的图作为类比图存入类比库,以达到知识积累的目的。

(4) 进行色彩替换复原 以上都是复原的预备工作,而这里叙述的将是复原的核心过程,复原的色彩替换是根据知识库提取的知识所包含的信息来进行的,对于变色和褪色的色彩复原,实际上其复原最后都是操作每个象素上的色彩值,把现在的值映射回作画时颜料的色彩空间,故它们在原理上是一致的;对于脱落色彩的复原,一般使用的是类比知识,它的色彩替换就是用类比图象中截取的图案象素来替换目前脱落区域的象素。

1.2.4 合并对象

合并时,首先定义各个对象的合并顺序,再把各个对象与原始图重新合并成一幅整图。

1.2.5 后处理

同预处理一样,采用相同的图象处理工具,也可以利用现成的图象处理软件,如 Photoshop 等(复原结果参见图版 I 图 1)。

2 演变模拟系统

根据壁画破损的 3 种情况,演变模拟也应有变色模拟、褪色模拟及脱落模拟 3 种,对一幅壁画图象进行演示模拟的过程如下:

(1) 首先把图象分割成多个对象,然后把不同演变模拟的对象区分出来分别进行处理(这些对象基本上与复原对象同,但为了避免重复工作,在复原时,需要保存复原对象,以用于此处作为单个演示处理对象)。

(2) 为变色演变对象指定其变色的中间插值色;为褪色演变对象赋予褪色原因及各种影响褪色的环境因素;为脱落演变对象指定脱落起始时的中心点等必需信息。

(3) 开始演变 对变色及褪色对象,根据颜色过渡算法;对脱落对象,根据脱落算法计算出每个对象的中间结果图象。

(4) 把所有对象的中间结果图象合并,得到整幅图象的中间结果图象。

(5) 继续计算下一步中间结果图象,直至与现状图象一样为止。

3 关键技术

3.1 对象的分割

3.1.1 色彩分层技术

色彩分层技术关系到一个颜色空间选择的问题,在实际应用中,常见的颜色空间有 RGB、CMY、YIQ 模型,另外,很多模型,如 HSV、HLS、L*a*b*、11-12'-13'、YES 等都是通过线性或非线性变换从 RGB 模型计算得出的颜色空间,究竟选择哪种颜色空间用于图象处理更好,一直为人们所重视,但对颜色空间及特征的选取,似乎是不同的组合用于不同的目的,而针对壁画图象,本文选择了 HSV 和 RGB 颜色空间,由于 HSV 颜色空间^[3]在视觉上是均匀的,与人的颜色视觉有很好的一致性,因此它比较适合于人机交互式图象分割,但选择 HSV 颜色空间并非在整个色彩分布范围内都能取得理想的效果,实验结果表明饱和度分量 S 的取值范围对以色调分量 H 为主的图象分割结果有一定的影响,当 S > 20% 时,分割结果比较可靠,而当 S < 10% 时,分割结果则与视觉有较大的差距,因此,当 S < 10% 或

R 、 G 、 B 3 分量值比较接近时,将直接在 RGB 颜色空间上分割图象。

本文设计了一个图象自动分层算法,在自动分层基础上,还可以再进行手工分层或合并两层等操作,因手工分层可以让用户凭感觉判断图象的主要色彩,这种自动分层的关键在于,要自动地统计出图象的几种主要色彩,这里采用的是基于直方图统计的自动分层算法^[3],其处理流程如图 2 所示。

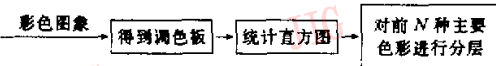


图 2 基于颜色表类别的自动分层算法流程图

因为一幅敦煌壁画图象中,实际使用的颜色一般都小于 256 色,所以可以把 24 位模式的彩色图象用 Photoshop 等图象处理工具先转换成 8bit 模式,而 8bit 模式的 BMP 图象文件中有调色板信息,调色板有 256 种颜色,或者也可以自己在程序里通过扫描整幅图象来构造这个调色板;然后就可为这 256 种色彩统计色彩直方图,再取直方图中比例最大的前 N 种色彩,对这 N 种主要色彩进行壁画图象分层,而与主要色彩相似的象素色彩在层中则保留原值,而其他不相似的象素则被填为白色。敦煌壁画例子的分层结果如图版 1 图 2 所示。

由于要把与主色相似的象素分在一层,所以实际上一层上的象素色彩并不是只有一个值,但它们都是与主色相似的色彩。这里,定义色彩是否相似,是看两种色彩的相似度是否大于一个阈值。本文即将 HSV 颜色空间的两种颜色的相似度 R 定义为(此相似度已作归一化处理):

$$R = 1 - \frac{1}{3} [(v_1 - v_2)^2 + (s_1 \cos(\pi h_1 / 180) - s_2 \cos(\pi h_2 / 180))^2 + (s_1 \sin(\pi h_1 / 180) - s_2 \sin(\pi h_2 / 180))^2]^{1/2}$$

3.1.2 边缘检测技术

分层是在整幅图象上进行的,但有时候变色后的某种颜色不一定是由同一种颜色变化而来,或者有些颜色的变色结果和原来壁画上的其他颜色正好相似。由于分层不考虑空间信息,这就使得它们都分在同一层,但它们不能作相同的复原处理。另外,考虑到有的图象质量太差,变色不太一致,或脱落,或黏附粉尘,使本来作画时属同种色相的一块区域,在现状图象中却表现得色彩信息很复杂,因此这时就需要把这块区域最外层的边缘提取出来。

由于图象内容的复杂性,开发全自动的通用边缘检测技术还需要相当长的时间,而用手工方式对图象边缘进行标示又十分繁重,而且不精确,在这种情况下,通过权衡,本文选择了人机协同的交互式边缘检测技术。这方面的技术归纳起来主要有区域生长法(Floodfill)、基于 Snake 活动轮廓的算法^[4]和交互的动态规划方法(Dynamic Programming)。敦煌图象历经千年,由于颜料变色、破损,使得图象变得十分复杂。前两种方法,当图象包含多个色彩区域,且内容复杂或含有很多噪声时,效果不太理想。所以本文对基于动态规划的半自动边缘检测技术进行了研究。这种方法有很好的灵活性,而且很好地结合了人的判断能力和计算机的计算能力,且具有易交互性。

现将基于动态规划的边缘检测算法描述如下:

由于图象是由象素组成的,因此可给每两个相连象素之间定义一条边,且边有权值。边的权值由图象的边缘特征确定(边的权值的确定^[5]是边缘检测算法效果好坏的关键),这样图象就成为一张赋权图。动态规划需要用用户确定一个起始点和终点,然后在赋权图中计算从起始点到终点的最短路径,则在最短路径上的象素就形成了图象对象的一段边缘。这种求取边缘的整个过程是交互完成的,即首先从一个起始点到一个中间终点,然后从中间终点再到下一个中间终点,这样利用人的判断,再通过手工引导,一直进行到边缘最后闭合。综上所述,此算法的关键是如何确定边的权值,而计算最短路径采用的是 Dijkstra 算法。边缘检测结果如图版 1 图 3 所示。

3.2 知识检索

虽然敦煌壁画内容丰富多彩,但实际上画家所用颜料并不多,各种颜料发生的化学变化可以用有限条化学知识描述出来,而且壁画中真正变色严重的只是某些黑色或棕色区域,而艺术家根据色彩协调的原理对这些区域原来该是何种颜色也已有许多经验。化学知识和经验知识是通用性很强的知识,再加上同一洞窟中内容相似的壁画具有可类比性;属于同一时期或同一朝代,甚至是不同朝代的,但主题、内容相同的壁画,在绘画风格、技法上也具有一定的类比性,因此,将色彩保持相对完好的壁画图象连同其相关的特征信息作为类比源存储、利用,也可以广泛用作复原的依据。

本文用数据库存储经验知识、类比图象和壁画特征属性信息。当系统面对一个输入的复原对象及

其特征信息时,为了使系统能够准确地从数据库中检索出经验知识或类比图象,需要确定知识表应该包括哪些属性特征信息及每个属性所占的权值。检索所用的属性及权值是一幅具体壁画的条理性分析,因而它是抽象知识的一种具体表达形式。检索知识时,先查找经验知识库,当查不到可用的知识或所有知识复原效果都不太好时,再检索类比图象库。事实证明,通常都可以检索到合适的知识或类比图象。

检索用到许多壁画特征属性,设第 i 个属性权值为 W_{Ai} ,当检索出多条知识时,对它们按权值的大小进行排列,以供系统取舍和使用。计算权值公式为

$$S = \sum_0^N W_{Ai} \times S_{Ai}$$

其中, S_{Ai} 用以表示属性是否与输入图象的信息匹配,若匹配则取值为1,否则为0。

3.3 色彩转换和色彩过渡

复原的过程实际上是一个色彩转换的过程。对一个复原对象,在HSV空间统计出此对象的颜色直方图,并由此确定当前图象色彩分布(主要指直方图的峰值),而复原后图象的色彩分布是从经验知识或类比图象中提取出来的。本文采用一种线性变换来实现复原对象中象素的色彩转换,其方法是将前后 h, s, v 两峰值的 (HM_i, SM_i, VM_i) 和 (HM_c, SM_c, VM_c) 作为参数,按下式求出所要恢复区域象素 i 的色彩值(系统也提供了在R、G、B空间的这种线性色彩转换):

$$\begin{cases} h_i = HM_i \\ s_i = s_i + (SM_i - SM_c) \\ v_i = v_i + (VM_i - VM_c) \end{cases}$$

变色及褪色演变过程实际上是一个色彩过渡过程。这种色彩过渡指的是在颜色空间中找一条过渡曲线,色彩从一种颜色慢慢变到另一种颜色。考虑到变色或褪色过程通常是开始进行得比较快,而后慢慢变缓,故采用线性过渡不太合适。要达到本文变色的效果有如下两种方法:一是插几个中间颜色过渡值,利用这些过渡值控制演变速度,从而得到一条贝塞尔曲线来作为色彩过渡的过渡曲线;第2种方法是采用一些非线性函数,即一开始曲线斜率比较大,而后渐渐变缓。

系统中采用第2种方法时,用下式作为过渡曲线:

$$\begin{cases} H = h_1; S = s_1, V = v_1 \\ H = (h_2 - H)/(T - t) + h_1 \\ S = (s_2 - S)/(T - t) + s_1 \\ V = (v_2 - V)/(T - t) + v_1 \end{cases}$$

式中, (h_1, s_1, v_1) 为初始值, (h_2, s_2, v_2) 结束值, (H, S, V) 中间值, $t: [0, \dots, T-1]$ (采用RGB颜色空间也可以得到较好效果)。

3.4 脱落模拟

这里需要预先得到如下信息:脱落前的图象和脱落后的图象;脱落后图象中的脱落区域;脱落起始时的中心点。

脱落模拟过程如下:

(1)先是在中心点附近一下子脱落一个多边形形状的区域。此多边形区域面积固定,但其形状对以后脱落的趋势及各个方向的脱落速度有很大影响,所以要按需要来选择和给定此多边形。

(2)由于起始多边形的脱落,在起始多边形外圈的邻界区域因受其影响也开始有象素脱落。此邻界区域的脱落有随机大面积脱落,也有随机象素脱落。此时得到脱落过程的一步中间结果。

(3)使上一步的邻界区域象素全部脱落,然后在此更大脱落区域基础上,其又对它的邻界区域产生影响,并使其邻界区域象素开始脱落,如用步骤2中的随机方式来处理此步的邻界区域象素脱落。

(4)重复步骤3,直至脱落到最终的脱落后图象。

4 结论

本文介绍了敦煌壁画虚拟复原及演变模拟技术。由于目前利用计算机技术进行文物保护复原的工作开展得还比较少,因此本文提出的一个复原系统结构模型及其复原的流程思路,以及用到的关键技术也属于探索性的工作。由于系统的设计都是模块性的,且各个模块基本上相互独立,因此这就相当于建立了一个实验系统,以后的研究工作可以在其上继续进行。

虽然一般情况下,其复原和演示效果较好,但仍需再改进的地方:一是研究非线性的色彩转换方法;二是改进脱落演示的效果。另外,考虑到系统的实用性,很多地方都采用人机协作的方式,如边缘检测,知识检索结果的手工确认选择等等,这些研究的继续可以使自动化程度更高。

参考文献

- 1 魏宝刚,潘云鹤,华忠.基于类比的壁画色彩虚拟复原[J].计算机研究与发展,1999,12(4):59-62.

- 2 汤顺青. 色度学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1990.
- 3 张星明,陈加武,余信等. 彩色图像自动分层算法研究[J]. 计算机学报,1999,22(7):703~707.
- 4 Wang Y Y, Yuen P C, Tomg C S. Segmented snake for contour detection[J]. Pattern Recognition,1998,20(11):1669~1679.
- 5 Saber E, Tekalp A M, Bozdagi G. Fusion of color and edge information for improved segmentation and edge linking[J]. Image and Vision Computing, 1997,15:769~780.



华忠 1977年生,2001年获浙江大学计算机应用专业硕士学位. 主要研究领域为图象处理、敦煌壁画虚拟复原.



鲁东明 1968年生,副教授,研究生导师. 主要从事虚拟现实、图象处理、人工智能、多媒体协同、网络等相关的研究开发工作.



潘云鹤 1946年生,教授,中国工程院院士,博士生导师. 主要从事人工智能、智能CAD、形象思维模拟等的研究.

《中国图象图形学报》文后参考文献编排格式

1. 专著、论文集、学位论文、报告

[序号]主要责任者. 文献题名[文献类型标识]. 出版地:出版者,出版年. 起止页码.

- 1 刘国钧,陈绍业,王凤. 图书馆目录[M]. 北京:高等教育出版社,1957:15~18.
- 2 张筑生. 微分半动力系统的不变集[D]. 北京:北京大学数学系数学研究所,1983.

2. 期刊文章

[序号]主要责任者. 文献题名[J]. 刊名,年,卷(期):起止页码.

- 1 金显贺,王昌长,王忠东等. 一种用于在线检测局部放电的数字滤波技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),1993,33(4):62~67.

3. 论文集集中的析出文章

[序号]析出文献主要责任者. 析出文献题名[A]. 见(In);原文献主要责任者(任选). 原文献题名[C]. 出版地:出版者,出版年. 析出文献起止页码.

- 1 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[A]. 见:赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集[C]. 西安:西安电子科技大学出版社,1996:468~471.
- 2 Middleton V, Owen M J, Elliman D G *et al.* Development in non-axisymmetric filament winding [A]. In: Proceedings of 2nd International Conference on Automated Composite'88 Noordwijkerhout[C], the Netherlands,1988:324~335.

参考文献类型及标识

参考文献类型	专著	论文集	报纸文章	期刊文章	学位论文	报告	标准	专利
文献类型标识	M	C	N	J	D	R	S	P

电子文献类型参考文献标识

电子参考文献类型	数据库	计算机程序	电子公告
电子文献类型标识	DB	CP	EB

载体类型标识

载体类型	联机网络	磁带	光盘	磁盘
载体标识	OL	MT	CD	DK



图1 复原结果图

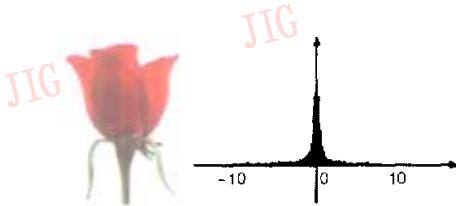


图2 分层例子图



图3 边缘检测示例

王博等:基于数码相机的图象数字变焦(视图插补)算法



(a) 原图象 (b) 图象的空间相关分布直方图

图1 图象的空间相关分布直方图



(a)原图象 (b)1/4 变焦结果 (c)1/3 变焦结果 (d)1/2 变焦结果
(640 × 480) (800 × 600) (960 × 720) (1280 × 960)

图2 图象(a)的数字变焦结果



(a) 原图象 (b)1/4 变焦结果 (c) 1/3 变焦结果 (d) 1/2 变焦结果
(352 × 288) (469 × 384) (528 × 432) (704 × 576)

图3 图象(a)的数字变焦结果