

敦煌壁画计算机存贮与管理信息系统研究*

曾群柱 李震 陈建明 孙文新 冯学智

(中国科学院兰州冰川冻土研究所 兰州 730000)

周丰昆 陈淑芳

(中国科学院长春精密光学机械研究所 长春 130021)

李最雄 李实 王宝义

(敦煌研究院文物保护研究所 兰州 730003)

摘要 该研究以045号窟为例,应用近景摄影测量、数字图象处理、色度学和信息系统理论和技术方法,以现有的仪器设备为基础,对洞窟内壁画、塑象等进行近景摄影测量、图象几何纠正和彩色失真矫正,建立了可操作的“敦煌壁画计算机存贮与管理信息系统”。为敦煌莫高窟壁画、塑象等文物图象数据永久保存、修复、还原和进一步开发研究等提供服务。

关键词 敦煌壁画,近景摄影测量,图象几何纠正,图象彩色失真矫正,信息系统

1 概述

敦煌莫高窟以其内容的博大精深,艺术的精美绝伦闻名于世。1961年被国务院列为第一批全国重点文物保护单位,1987年被联合国教科文组织列为“世界历史文化遗产”之一。千百年来,由于环境的变化、人类活动的影响以及历史上曾多次遭受到地震等重大自然灾害的严重破坏,使这一规模宏大的世界历史文化遗产正遭受着严重的退化和不断地损坏。同时近年来旅游事业的迅速发展又进一步恶化了洞窟内的文物保护环境,加速了文物的退化和损坏。因此,当务之急是采取措施有效地保存和保护这一人类稀世珍宝。

多年来研究表明,应用计算机图象处理技术,建立可操作的文物图象的计算机存贮、管理系统,是实现敦煌壁画全面、系统、科学保存和真实再现的有效途径。它不仅以高精度、永久地保存石窟文物图象、几何参数,空间相互关系,文物保护档案、属性资料等,为在高层次开展莫高窟考古和应用研究开拓新的领域,而且更为重要的是,一旦莫高窟遭受突发

性严重自然灾害或人为的破坏,这套系统可以为文物的修复或复原提供准确的几何数据,色度参数等科学依据。因此,该项目成果及其在全国推广应用对发展和提高我国文物保护、保存研究水平具有深远社会影响和历史意义。

本研究以045号窟为例,应用近景摄影测量、数字图象处理、色度学等理论和方法,对洞窟内壁画、塑象、藻井等进行相对控制测量、近景摄影测量、数字图象几何纠正和彩色还原与失真矫正,并在微机环境下建立“敦煌壁画文物计算机存贮与管理信息系统”。

2 莫高窟壁画、塑象的近景摄影测量

045号窟内的壁画、佛龕为盛唐时期的作品,距今已有一千一百多年历史,洞窟由一甬道和主室构成。主室底部呈近似正方形,边长约4.5m,顶部为覆斗型藻井。主室南北墙为颜色绚丽的壁画,正中为佛龕,由7尊栩栩如生的塑象组成。该窟壁画及佛龕塑象等艺术品是莫高窟盛唐时期的代表作,有很高的艺术及历史研究价值,被列为莫高窟一级保护窟。

根据045号洞窟的具体情况和精度要求,

*该课题为甘肃省“八·五”攻关项目,参加工作的还有:井小平,黄宗虎,刘景璜等同志。

收稿日期:1997年1月27日;收到修改稿日期:1997年8月26日

近景摄影测量选用德国蔡司 UMK10/1318 型全能摄影经纬仪、非量测摄影机为日产玛米亚相机,象幅 $6 \times 7\text{cm}$;感光材料用柯达爱克塔 100 型彩色反转片和富士 100 型彩色反转片 (8×10 英寸),其感光度为 100ASA、分辨率 80 线/mm;普通摄影用 120 柯达 100ASA 型彩色反转片;光源为色温 5600—6000K 的两只海鸥 SyS-200 型摄影室闪光灯,内装有自动感应同步装置,此外,在被摄物体周围设置若干块 16 开国际标准 (MUNSELL) 色卡同时成象。

2.1 相对控制测量

窟内壁画摄影是分幅进行的,各幅壁画的控制点坐标,采用相对控制测量方法测定。按图象处理要求,为规化摄影比例尺及消除外方位元素对图象变形的影响,竖面壁画的相对控制测量采用前方交会方法和在壁画两边各悬挂一条直径 0.3mm 的钢丝垂线方法测定,两钢线垂线所构成的平面与壁面平行。在垂线的两端和中间各固定一个测量标志,标志间距和垂线之间距用钢尺量测至毫米,两垂线上标志间的高差用经纬仪水准方法测定,最大误差小于 0.3mm,其最大点位误差为 $\pm 0.5\text{mm}$,相当于 1/30 象片上的 0.017mm,即 0.8 个象元。

控制点应用经纬仪交会法测定。选择象上明显的特征点,如手指尖端,眼角及衣角等作为控制点,并另设若干个人工标志点。二起始点间边长用横视差基线法测定,视差角用经纬仪观测,起始点间高差用经纬仪水准法测定,读至 0.1mm,佛龕内共测 9 个控制点,水平角测角中误差为 $\pm 4''$,垂直角测角中误差 $\pm 2.8''$,视差角交差误差 $\pm 2.9''$ 。由经纬仪交会点精度公式计算,控制点的平面位置误差为 $\pm 0.4\text{mm}$,高差误差为 $\pm 0.3\text{mm}$,其点位误差为 $\pm 0.5\text{mm}$,相当于象片上的影象为 0.013mm,即 0.7 扫描象元。

2.2 近景摄影

根据设计精度的要求,近景摄影采用 UMK-10/1318 量测型摄影机,对 045 号窟的平面型壁画及佛龕塑象分别采用单片和立体摄影方式进行拍摄。为了便于后续的图象色彩矫正,在竖面壁画和佛龕均设置若干块 16 开 Munsell 国际标准色卡同时成象。

045 号洞窟的壁画按墙面和顶面可分成 9 幅相对独立的画面,其中竖面墙 4 幅 ($4.5\text{m} \times 2.9\text{m}$),平顶一幅 ($0.56\text{m} \times 0.56\text{m}$),倾斜面 4 幅 ($0.56\text{m} \times 4.5\text{m}$)。因

此,摄影时也按上述分幅进行。对竖面壁画(近似垂直)则采用单片水平正直摄影,而对倾斜顶面采用“倾斜正直摄影”。为了保证壁画 1:1 成图的清晰度和数字图象拼接试验,对竖面壁画分别进行整幅和分二幅进行摄影。此外,用日产玛米亚非量测型相机对壁画、佛龕进行整幅和局部特写摄影,以便参考补充。

对 045 号窟的佛龕塑象采用正直立体摄影方式进行摄影。摄影基线与佛龕面平行,基线长度用钢尺量测至毫米,基线测量相对误差为 0.0017。摄影距离为 3.6—4.2m,平均摄影比例尺为 1/40。

3 敦煌壁画数字图象处理

为了建立计算机数字图象处理与存贮系统,必须将壁画实体转换为数字表示的数据集,它包括数字图象文件和有关参数文件。敦煌壁画数字图象处理包括以下几个方面的工作:

3.1 模数转换

在获取近景摄影反转照片后,利用 C-4500 和 Scan Master-4500 滚筒彩色扫描仪对影象进行扫描,完成模数转换工作。考虑图象有足够的分辨率和数据量大小的矛盾,扫描线数设置做多种试验,扫描获得彩色 TIF 格式图象数据。实验表明当分辨率为 1200DPI 时可获得比较清晰的影象,此时一个象元在实际距离上小于 0.8mm。

3.2 图象几何纠正

进行文物计算机存贮,最重要的一点就是保存文物原样,将失真降到最低程度,使之能做到准确的再现。敦煌石窟主要以壁画和彩塑为主,对它们的计算机存贮的两个关键问题之一就是几何失真的改正。

由于壁画是以平面为主,主要利用摄影获取的影象坐标和控制点坐标,根据多项式方程^[1,2]:

$$\begin{aligned} x &= a_0 + (a_1X + a_2Y) + (a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2) \\ &\quad + (a_6X^3 + a_7X^2Y + a_8XY^2 + a_9Y^3) + \dots \\ y &= b_0 + (b_1X + b_2Y) + (b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2) \\ &\quad + (b_6X^3 + b_7X^2Y + b_8XY^2 + b_9Y^3) + \dots \end{aligned} \quad (1)$$

其中 X, Y 为控制点纠正前的影象坐标; x, y 为同名控制点纠正后的坐标。

利用已知控制点的坐标值按最小二乘法求解多项式的系数 a_i, b_j (i, j 为 $0, 1, 2, \dots$), 再利用方程对壁画影象进行重采样,完成几何纠正的工作。实现上述处理的过程是在遥感图象处理系统 ERDAS 软

件支持下完成的。

对塑象而言,由于它是立体的画面,需利用近景摄影中的近似正直摄影方法获取立体相对,并进行控制测量,进行几何纠正时,利用近似正直摄影图象的扫描数据和控制参数进行几何纠正。纠正时主要利用共线方程式^[1,3]:

$$x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \quad (2)$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}$$

其中: x_0, y_0, f 是内方位元素; X_S, Y_S, Z_S 是外方位元素; a_i, b_i, c_i 是方向余弦值。

将控制点的坐标值,利用上述方程,按最小二乘法迭代计算内外方位元素,最后计算出象点的改正坐标值,构成所测目标的数字模型。具体实现是应用基于微机 (pc-486以上,大于 600M 硬盘),在近景摄影测量制图软件 DCP II 系统支持下的数字摄影测量工作平台上完成。主要经过相对定向建立立体模型,再根据控制点数据进行绝对定向,然后进行三维立体模型的数字采集,生成三维数字模型,按正射投影模式对立体模型进行正射纠正,便得到数字影象图,同时也可产生塑象的等值线影象图。

通过对平面型壁画和佛龛立体数字图象进行几何纠正,达到图象几何变形纠正的要求。由于采用了精确的图象坐标点位纠正,经定向后量测与实地量测的坐标结果相比误差在 0.5—1mm 之

表1 045号窟北面竖墙壁画和立体佛龛的控制点余差(单位: mm)

Table 1 The reside error of control points in mura painting on northern wall and painted sculpture of 045 grotto

点号	壁画(北面竖墙)		塑象		
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔZ
1	0.48484	-0.69988	1.112	1.061	-0.137
2	0.26350	0.09802	-0.670	-0.434	0.252
3	-0.50805	0.60175	-0.114	-1.165	-0.368
4	-0.39124	0.58522	-0.770	-1.110	0.189
5	0.07092	-0.19458	-0.399	0.908	-0.246
6	0.32024	-0.39059	0.951	0.919	0.383
7			0.028	0.424	0.121
8			-0.131	-0.587	-0.190
RMS(σ)	0.38847	0.52629	0.69616	0.93325	0.27028

间,平面纠正的象元精度约为 0.3 个象元。计算结果如表 1。

3.3 图象色彩纠正

所谓的颜色还原和再现,实际上就是实现计算机工作站显示的敦煌壁画图象中的每一颜色具有的三刺激值 XYZ 与洞窟中壁画对应颜色的三刺激值相同。

根据色度学理论^[4],任何物体 $R(\lambda)$ 在给定照明光源 $S(\lambda)$ 情况所具有的颜色三刺激值 X, Y, Z 如下式:

$$\begin{aligned} X &= k \int s(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int s(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int s(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

其中, k 为调整因子; $R(\lambda)$ 为物体光谱反射率; $S(\lambda)$ 为光源相对光谱功率分布; $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 为标准观察者光谱三刺激值; $d\lambda$ 为波长间隔。

计算机数字图象处理工作站将红绿蓝 RGB 电子枪各量化为 256 个灰度级,理论上可显示 $256 * 256 * 256$, 即约 16.8 兆种颜色,如此的细分,完全满足视觉的颜色分辨要求,给予电子枪一定的 RGB 刺激值,就有一颜色 XYZ 三刺激值与之对应,反之亦然。那么,颜色显示系统即该研究中的计算机工作站的高分辨率彩色监视器的 RGB 量值与颜色 XYZ 三刺激值间可建立一对对应关系。通常采用的有矩阵法、 γ 值法、迭代法和数据库法等。基本方法如下式中的 3×3 阶矩阵:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 R_1, R_2, R_3 分别为工作站监视器红、绿、蓝荧光粉亮度随 R, G, B 输入的非线性相应 D 值。理想的系统是 $R_1 = R_2 = R_3 = 1.0$, 较理想的系统是 R_1, R_2 和 R_3 各为一确定常数,一般在 2.2—2.8 之间,较差的系统则需要分段确定 RGB 各自每段上的 D 值。利用测色仪器测试监视器上显示的某些特殊颜色,如红绿蓝三基色等,则可计算上式 3×3 矩阵中的九个因子 M_{ij} 。

上式一经确定,只要知道 R, G, B 刺激值,便可计算出监视器屏幕上对应颜色所具备的 XYZ 三刺激值。反之,由上式计算出其逆变换,即 RGB 向 XYZ 的逆转换,只要给出欲显示颜色的 XYZ 三刺激,便可计算出所需要的 RGB 值。

将摄影胶片经数字化扫描后获得的 R, G, B 数据刺激计算机工作站显示器,各环节引起壁画的颜色失真在此显露无疑。测试此时屏幕上3种特殊需矫正的颜色,分别获得 (X'_r, Y'_r, Z'_r) 、 (X'_g, Y'_g, Z'_g) 和 (X'_b, Y'_b, Z'_b) 3组颜色三刺激值。因颜色失真,必然使这3组数据与3种特殊颜色应该具有的 (X_r, Y_r, Z_r) 、 (X_g, Y_g, Z_g) 和 (X_b, Y_b, Z_b) 数据产生差异。显而易见,根据上式,便可计算出矫正这3种颜色的三刺激值即矫正扫描后的原始 RGB 数据文件的数学模式。3种颜色得到矫正,其色域内的颜色便得到相应的矫正。

为避免主观评价中人为因素的影响,该研究采用测试某些标准色的还原效果的方法客观评价壁画颜色矫正的好坏,色差 ΔE 作为理想的评价函数。为使色差大小与视觉感知差异本一致,拟选用具有较好均匀性的 CIE1976 ($L^* a^* b^*$) 颜色空间。

$$\begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500[X/X_0 - (Y/Y_0)^{1/3}] \\ b^* &= 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}] \\ \Delta E &= [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 X, Y, Z 为 CIE1931 (XYZ) 颜色系统物体的颜色三刺激值。

以敦煌莫高窟 045 号洞窟壁画和佛龕为例,根据壁画和佛龕的主色选定几种标准色卡,同时对色卡、壁画或佛龕进行摄影。依据以上方法计算和确定了相应的颜色矫正转换模式。再进行矫正精度评定。

比较矫正后图象显示的标准色卡的颜色色度数据与 $MUNSELL$ 色卡的标准颜色色度数据(在日光下测试),有如下结果(表 2)。

表 2 标准色卡的评价指数 ΔE 值

Table 2 The evaluation value of four standard Munsell color cards

色卡号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
$\Delta E(1976 \text{ Lab.})$	2.51	2.47	7.59	2.04

经颜色矫正后显示的色卡与标准值很相近,客观值差别已令视觉较难识别。有关专家认为目视判别此时矫正后的壁画佛龕图象,与 045 号洞窟壁画的颜色接近。

通过对敦煌莫高窟 045 号窟壁画和佛龕的颜色还原矫正主客观评价结果可以认为:根据前面介绍的颜色还原矫正基本原理,具体分析案例的颜色失真规律,采用灵活多变的数学转换模式,我们可以对摄影、扫描、显示等环节铸成的颜色失真实现一次性总体矫正,达到令人满意的效果。

4 敦煌壁画的计算机存贮与管理信息系统

建立计算机存贮与管理信息系统,是研究的主要目的之一。该系统是利用基于微机的数据库管理系统 FOXPRO 建立的敦煌壁画的计算机查询与管理信息系统。

对数字图象进行存贮是建立该系统的主要目的,针对文物存贮与管理的特点,利用图象编码的方法,构成多层次编码检索图象库(表 3)。并连接与每幅图象对应的文字档案库。

表 3 图象编码表

Table 3 The code table of images

码位	第 1—3 位	第 4 位	第 5—6 位	码全貌
含义	窟号	方位	朝代	
举例	045	2	08	045208

由于每幅图象进行分别存贮,并附以相应的文件名,因此,就以每个文件名形成编码,并赋予一个号码以说明图象间的连接关系,使序号按其所代表的图象位置进行序号排列,这样就能方便组成整体画面。其编码表由表 3 所示。处理后的图象数据采用图象数据库的数据结构进行分层存贮,并可提供数据格式的相互转换功能,使其方便与外部接口,既保持图象库内部数据格式的统一,又能够与其它系统进行数据交换。

另一方面,建立快视图象库,快视图象提供辅助性文字说明,主要包括低分辨率图象及每一图象的一般性解释和说明,已有的研究成果和文献等。这些文字档案也按窟号、方位等分别存贮,并按树状结构赋予与图象相同的编码,对每幅图象的档案(如所属的创作年代、完好情况)及对应文献资料、壁画简介等文字材料分别赋码。通过编码,使图象数据与文字档案有机连接,做到图象与文字检索查询同时进行。

5 结 语

通过 4 年来对“敦煌壁画文物计算机存贮与管理信息系统研究”课题任务的实施,以莫高窟 045 号洞窟为试验,系统地研究了对不同形式的文物壁画、塑象等进行近景测量取得高质量的图象数据、几何纠正、彩色还原矫正等一套完整的技术方法,并在微机环

境下建立可操作的“敦煌文物壁画计算机存贮与管理信息系统”。此系统融当今近景摄影测量、数字图象处理、色度学及计算机技术于一体,是将高新技术应用于文物保护与管理的重要尝试。可以逐步在全国推广应用,对我国文物图象数据永久保存、管理和进一步开发研究具有重要意义,并将获得显著的社会经济效益。

虽然前阶段试验对平面型的图象进行了几何纠正和彩色矫正,并取得较满意的结果,但对不规则曲面的摄影及图象几何纠正、塑象群的立体摄影及三维图象的几何纠正等问题还有待于今后重点研究解决,为此,我们已制定了一套技术方案及解决方法。另外,通过前阶段研究,还发现图象的计算机存贮与色彩矫正也还存在一些问题,主要是如何选择适用于洞窟壁画摄影的感光材料、光源(色温)以及现场供电条件、摄影底片的冲洗技术等,这些因素都将影响图象质量和色彩矫正。由于项目投入低不能购买高档的设备和软件,尚未建成先进、配套的技术设备系统。没有形成适用文物近景摄影测量、图象计算机处理存贮与管理的技术标准和技术规程,影响成果推广应用。

我国在 5000 多年漫长的历史长河中,勤劳勇敢的人民创造出无数辉煌文化艺术,它是世界文明的重要组成部分。这些历史文化遗产有很高的文化、

艺术、历史及科学研究价值,如举世闻名的敦煌莫高窟、秦兵马俑、麦积山和云岗石窟等。长期以来这些文物古迹遭受自然和人为的破坏,有的已被彻底损坏而消失,有的面目全非,有的正在不断地变形、退化、变色。为此,我国政府十分重视文物保护工作,投入大量人力物力保护、保存,并取得举世瞩目的成就。但由于受不可抗拒的自然因素影响和人为的破坏,历史文物仍在继续遭受不同程度的损失。因此,如何永久地保存历史文物,其图象数据、色度参数、几何尺寸及空间相互关系等成为当前实现这一目标的重要研究课题。

参 考 文 献

- [1] 冯文灏. 非地形摄影测量. 北京:测绘出版社,1985.
- [2] 杨凯等. 遥感图象处理原理与方法. 北京:测绘出版社,1988.
- [3] 俞清浩. 摄影与空中摄影. 北京:测绘出版社,1985.
- [4] 荆其诚等. 色度学. 北京:科学出版社,1979.

作 者 简 介

曾群柱,男,1937年9月生,研究员,博士生导师,1959年毕业于兰州大学地理系,现主要从事遥感与地理信息技术在寒区环境研究中的应用,在国内外专业刊物发表论文70余篇,参与6部专著编写。

Study on Information System of Dunhuang Mural Paintings Storage and Management

Zeng Qunzhu Li Zhen Chen Jianming Sun Wenxin Feng Xuezhi

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences)

Abstract The Mogao grottoes of Dunhuang are valuable remains of world humankind, it's very important to storage really and manage the Dunhuang mural paintings and painted sculpture. The information system of Dunhuang mural painting's computer storage and management was established using the basic instrument, based on the methods integrated with close range photogrammetry, digital image processing, color science and information system theory. This study provided a useful test for conservation, reconstruction and development of the data of mural paintings and painted sculpture in Mogao grottoes of Dunhuang.

Key words Dunhuang mural paintings, Rang close photogrammetry, Geometric correction of image, Color distortion correction of image, Information system