

基于 KL 展开的古铜镜图象相似性评估

叶 琰 孙卫东

谷口一夫

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系,合肥 230027) (日本帝京大学山梨文化财研究所)

摘 要 古铜镜在人文考古学上有着极为重要的研究价值,而古铜镜图象间的相似性评估则是解决古铜镜资料人工整理分析中所存在的诸多缺陷、实现其大规模定量解析的关键问题之一。此文探讨了 KL 展开在古铜镜图象相似性评估中的可适用性,明确了古铜镜图象的规范化处理以及基于 KL 展开的特征镜空间构成过程,提出了 3 种基于“类别”概念的相似性评估标准,并根据实验结果对各种相似性评估标准进行了详细的比较分析。实验结果表明,文中所提出的 3 种基于“类别”概念的相似性评估标准比传统的距离评估标准更为有效,在较高维数的 KL 特征镜空间上评估正确率可达到 85% 以上。

关键词 相似性评估, KL 展开, 特征镜空间, 基于类别概念的相似性评估标准

1 引 言

作为古代墓葬的常见随葬品和历史上东亚地区文化交流往来中的常用物品,古铜镜为遗迹遗物的年代判定以及东亚地区具体文化交流关系的研究提供了极为重要和丰富的研究资料。然而在对古铜镜图象的相似性评估及其相关数据资料的分析和整理上,目前主要采用的仍是人工分类和主观比较的方法,由此产生的过大工作量以及评估过程中个人主观因素的影响使得大规模的古铜镜资料一直难以得到系统的整理分析^[1]。从根本上解决这些问题的方法之一是借助计算机及图象处理技术,针对古铜镜图象及其数据资料的特点,建立一个具有镜资料输入输出、镜图象编辑处理、镜图象相似性评估和条件检索等功能古铜镜信息综合管理系统^[2]。其中有待解决的关键问题之一是不同古铜镜图象之间的相似性评估,即以古铜镜背面的纹饰图象为对象,定量评估同一镜式内、不同镜图象间的相似性。

目前,图象间相似性评估的方法可以大致分为两类。一类是抽取图象内部的具体形状特征,并通过它们的空间结构关系表达图象间的相似性^[3,4];另一

类则是将整幅图象作为对象进行统计意义上的相似性评估。后一种方法不针对图象内部的具体形状特征,所以具有较好的抗噪性能。其中最具代表性的是在基于 KL 展开的脸图象识别研究^[5~7]中,首先对多幅样本图象进行 KL 展开,构成特征脸空间,然后将任一给定的脸图象表述为特征脸空间上的矢量,并根据最小距离判别法进行脸图象的识别判断。对于镜图象的相似性评估来说,由于不同镜式的古铜镜图象在具体形状结构及其空间布局上存在着较大差异,如果采用前一种方法就必须针对不同镜式的古铜镜图象构造不同的特征提取和记述手段,鉴于古铜镜镜式的繁多,这种方法从系统化的角度来说是不现实的。因此,本文采取了后一种基于 KL 展开的统计相似性评估方法。此外,一直以来在图象识别领域中,都是采用最小距离判别法进行识别判断,但这种距离标准忽略了以图象“类别”概念为基础的类间差异及类内相似性,因而难以充分满足相似性评估的需要。本文在充分讨论距离标准在相似性评估中的有效性的基础上,进而提出了基于“类别”概念的类别差、权重差以及类区间重叠比等 3 种标准,并对它们分别进行了实验分析。

2 镜图象的预处理及处理对象的规范化切取

古铜镜信息综合管理系统^[2]中的镜图象都是 512×512 像素点的 8-bit 灰度图象,并且在入库过程中它们都已经过几何校正处理,成为中心位于 (256, 256)、半径为 200 像素点的标准镜图象。然而,由于 KL 变换对几何位置和照明条件的差异比较敏感,为了保证后继处理的准确性,还必须固定镜图象的基准点,使各幅镜图象有大致相同的起点位置和照明角度。由于镜图象的纹饰结构都存在周期性,文中采用的方法是在照明角度相同(左下方光源)的前提下,使各幅镜图象的周期起点重合于 x 轴上。

在考古学上,一枚古铜镜背面的纹饰图象主要分为内区和外区 2 个部分。由于对镜式分类起主要作用的主题纹饰都是位于内区,因此相似性评估的对象可仅限于内区图象。为了实现不同大小、不同照明强度下内区图象的相似性评估,需从原镜图象中切取、展开其内区部分并进行几何和灰度级上的规范化处理。实际评估对象的提取过程如下:

(1) 内区半径范围的计算

首先检测原始镜图象的边缘图象,并通过 Hough-MF 法^[8]提取各同心圆的半径参数,然后根据各同心圆的大小及位置关系确定内区的半径范围;

(2) 内区图象的几何规范化

从原始镜图象中切取、展开内区图象,并规范化为 360×100 像素点的标准图象;

(3) 内区图象的灰度规范化

对展开后的内区标准图象进行均值和方差固定的灰度规范化处理,以吸收因照明强度不同而引起的图象明暗差异。

3 特征镜空间的构成和相似性评估参数的计算

在图象识别的研究领域中,目前已有不少利用 KL 展开这种统计特征提取法进行信息压缩和识别处理的先例,其中较为成功的是对脸图象的识别研究^[5~7]。本文将类似的思想用于镜图象间的相似性评估中,通过 KL 展开构成特征镜空间,并在此空间中提取可用于相似性评估的参数。不同之处在于,为

了充分反映图象“类别”在相似性评估中所起的作用,本论文中除了传统的距离评估标准以外,还提出了以“类别”概念为基础的类别差、权重差以及类区间重叠比 3 种评估标准。

3.1 样本镜的 KL 展开

对样本集合进行 KL 展开的具体步骤如下。首先设由 N 枚样本镜构成的样本集合为 $\{\vec{M}_i\}$,其中每一样本均为 $\{\vec{M}_i\}$ 由相应标准镜图象中的 360×100 个像素点构成的 $p=36\ 000$ 维的列矢量。

(1) 求 N 枚样本镜的均值矢量 $\vec{\mu}$ 及协方差矩阵 C 。

$$\vec{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{M}_i,$$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\vec{M}_i - \vec{\mu})(\vec{M}_i - \vec{\mu})^T = \frac{1}{N} \mathbf{A} \mathbf{A}^T \quad (1)$$

其中 $\mathbf{A} = [\vec{M}_1 - \vec{\mu}, \dots, \vec{M}_N - \vec{\mu}]$, 是 $p \times N$ 维的矩阵。

(2) 计算协方差矩阵 C 的特征值 λ_i 和特征矢量 \vec{U}_i 。由于 C 是 $p \times p$ 维 ($p=36\ 000$) 的超大矩阵,直接求解其特征值和特征矢量存在较大的困难。然而当样本数 $N \ll p$ 时, C 是奇异矩阵,因此可以通过以下公式,将求取 $p \times p$ 维 C 矩阵的 N 个非零特征值问题转化为求取 $N \times N$ 维 D 矩阵的 N 个特征值的问题。设 $D = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$, 其特征值和特征矢量分别为 ϕ_j 和 \vec{W}_j , 则有

$$\lambda_j = \phi_j / N, \vec{U}_j = \mathbf{A} \cdot \vec{W}_j \quad (2)$$

求得协方差矩阵 C 的 N 个特征值和特征矢量以后,根据特征值从大到小的顺序,取出相应的前 G 个特征矢量,即可构成 G 维的特征镜空间。由于每个特征矢量都是 $p=36\ 000$ 维的矢量,其中包含了镜图象的主要特征,因此以下将其称为特征镜。

(3) 将任一给定的镜图象 \vec{M}_d 表述为 G 维特征镜空间 $\{\vec{U}_j\}$ 上的矢量 $\vec{R}_d = (r_{d1}, \dots, r_{dG})^T$, 这就是相似性评估中将要用到的镜图象 \vec{M}_d 的 KL 统计特征,其中

$$r_{dj} = \vec{U}_j^T \cdot (\vec{M}_d - \vec{\mu}) \quad (j = 1 \dots G) \quad (3)$$

3.2 相似性评估标准的定义

如前所述,在脸图象的识别研究中,往往是采用最小距离判别法进行识别判断,然而对于图象间的相似性评估,还应考虑基于图象“类别”概念的类间差异性和类内相似性。假设在 2 维特征空间上有 3 个矢量 $\vec{M}_1, \vec{M}_2, \vec{M}_3$ 分别代表 3 幅镜图象(如图 1),由其空间坐标关系易知, $|\vec{M}_1 \vec{M}_2| < |\vec{M}_1 \vec{M}_3|$ 因此根据

距离评估标准 \vec{M}_1 与 \vec{M}_2 比 \vec{M}_1 与 \vec{M}_3 更为相似,但由于 \vec{M}_1 和 \vec{M}_3 都比较靠近 \vec{U}_1 轴,所以可以认为它们都属于特征镜 \vec{U}_1 所代表的“类别”,因此 \vec{M}_1 应与 \vec{M}_3 更为相似。由这一想法引申开去,即得到本论文所提出的基于“类别”概念的类别差、权重差和类区间重叠比 3 种评估标准。这里,首先假设在 G 维的特征空间上,2 枚镜图象分别被表达为 $\vec{M}_i = (r_{i1} \cdots r_{iG})^T$ 和 $\vec{M}_j = (r_{j1} \cdots r_{jG})^T, i \neq j$ 。

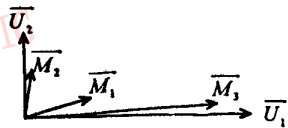


图 1 图象“类别”概念示例

Fig. 1 Illustration of the conception of “image class”

(1) 距离评估标准 D :

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^G (r_{ik} - r_{jk})^2} \quad (4)$$

(2) 类别差评估标准 C : 首先定义镜图象 \vec{M}_i 的类别均值和方差分别为,

$$m_i = \sum_{k=1}^G (|r_{ik}| / \sum_{k=1}^G |r_{ik}|) \cdot k, \quad (5)$$

$$v_i = \sqrt{\sum_{k=1}^G (|r_{ik}| / \sum_{k=1}^G |r_{ik}|) \cdot (k - m_i)^2}$$

则 2 枚镜图象 \vec{M}_i, \vec{M}_j 间的类别差 $C_{ij} = |m_i - m_j|$ 。

(3) 权重差评估标准 W : 定义镜图象 \vec{M}_i 的权重矢量 $\vec{w}_i = (w_{i1} \cdots w_{iG})$, 其中

$$w_{ik} = |r_{ik}| / \sum_{k=1}^G |r_{ik}| \quad (k = 1, \cdots, G) \quad (6)$$

易见, 权重矢量 \vec{w}_i 反映了各特征镜图象 \vec{U}_k 在镜图象 \vec{M}_i 中所占的比重。2 枚镜图象 \vec{M}_i, \vec{M}_j 间的权重差

$$W_{ij} = \frac{1}{G} \sum_{k=1}^G |w_{ik} - w_{jk}|, \quad (0 < W_{ij} < 1).$$

(4) 类区间重叠比评估标准 O : 假设镜图象 \vec{M}_i 的类别位于区间 $[m_i - v_i, m_i + v_i]$ 上, 其中 m_i, v_i 如式(5)所定义, 则 2 枚镜图象 \vec{M}_i, \vec{M}_j 的类区间重叠比 $O_{ij} = \text{重叠区间长度} / \text{总区间长度}, (0 < O_{ij} < 1)$ 。

4 实验结果及分析

4.1 样本镜图象的收集以及特征镜空间的构成

作为考古学资料的古铜镜图象照片, 虽然数量

很多, 但其中相当一部分存在着镜面残损或腐蚀比较严重的问题, 这些图象不宜作为目前实验阶段的处理对象。兼顾到镜式在考古学上的重要性以及收集镜资料照片的难易程度, 本论文的实验以考古学上称为“规矩纹镜”的古铜镜为对象, 从现有的 3 本资料照片集中收集到 9 枚质量较好的镜图象构成样本镜集合, 并通过扫描仪扫描的方式将这些资料照片转化为 512×512 象素点的 8-bit 灰度图象文件。由于经过了成像、印刷和扫描等中间过程, 不可避免地造成了图象质量一定程度上的劣化, 这也是本实验本身所固有的一个不利因素。对所选的这 9 枚样本镜图象进行几何和灰度级上的规范化处理后, 就得到了只包含内区图象的标准样本镜集合, 规范化前后的镜图象如图 2 所示。



图 2 原始镜图象和标准样本镜图象

Fig. 2 Original image and its standardized sample image

对样本集合进行 KL 展开, 共得到 9 个非零特征值。其中前 8 个处于同一数量级, 而第 9 个特征值远远小于其它特征值(比值小于 10~5), 因此在以下的实验中可不再考虑第 9 个特征矢量。图 3 中给出了特征值最大的前 3 枚特征镜的图象。

4.2 人类主观评估的结果

为了得到实验结果的验证基准, 首先对 9 枚样本镜构成的样本集合进行了人类主观相似性评估的调查, 调查结果列于表 1, 其中 9 枚样本镜分别编为 A~I。考虑到人类主观意识的“模糊性”, 进行主观相似性评估调查时没有强制限定相似镜的个数, 即被调查人可以自由评价出某枚镜的一枚或几枚相似

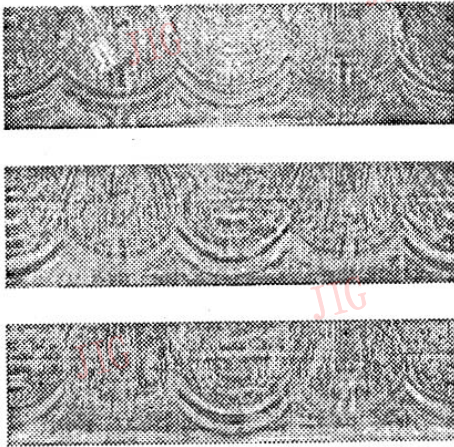


图 3 特征空间上的前 3 枚特征镜

Fig. 3 The first 3 eigenmirrors on eigenspace

镜,并且不强调这几枚相似镜的先后顺序差异。

表 1 主观相似性评估的调查结果

Table 1 Investigation results of subjective similarity evaluation

基准镜	A	B	C	D	E	F	G	H	I
相似镜	B,C,D	A	A,D	A,C	无	G,I	F,H,I	G	F,G

4.3 基于不同维数及不同评估标准的实验结果

在此首先要说明本文中采用的实验结果与主观评估结果的比较方法。在某一维数及某一评估标准下,对于某一给定的镜图象,首先将其它各枚镜图象按照实验所得出的与该枚镜图象的相似程度进行从大到小的排序,然后记下人类主观评出的相似镜在该序列中所出现的位置,主观相似镜出现的位置标号越小,说明此时的主客观评估结果吻合得越好。同样对于所有的样本镜,其标号平均值越小,说明此时的客观评估结果越准确。容易算得,对除掉无相似镜的 E 镜以外的 8 枚样本镜来说,该标号平均值的取值区间为 [1.5, 7.5],由此可定义评估正确率 $\eta = (7.5 - L) / (7.5 - 1.5)$,其中 L 为标号平均值。

图 4 中给出了分别使用 D、C、W、O 4 种不同的相似性评估标准、在不同维数的特征镜空间上进行相似性评估时的实验结果。分析图 4 中的各曲线,可以得到以下 3 点结论。

(1) 所有这 4 种评估标准的正确率都在 3 维时出现局部峰值。这一现象或许和这 9 枚古铜镜本身可以分为 3 类有关。当样本集合经过也叫做主成分

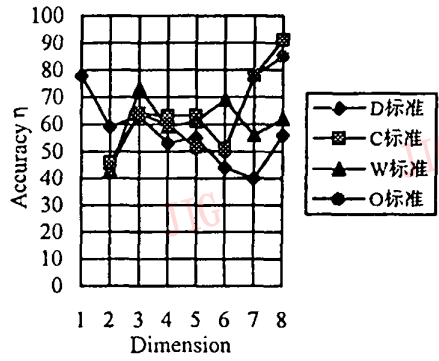


图 4 不同维数下 4 种评估标准的评估正确率

Fig. 4 Accuracy of the 4 evaluation standards under different dimensions

分析的 KL 展开以后,特征值最大的前 3 个特征矢量中应包含了区分这 3 类镜图象的最显著特征,所以在使用且只使用这 3 个特征矢量对镜图象进行表达时,不论在何种评估标准下,评估正确率 η 都应出现局部峰值。而 2 维时的评估正确率之所以偏低,可能正是由于去掉了代表主要类别特征的某一个特征矢量而造成的。这一现象也说明,可以根据样本集合的内在类别对已经经过维数压缩后的特征空间再次进行维数压缩,此时同样可以保证较高的评估正确率。

(2) 在 4 种评估标准中,以“类别”概念为基础的 3 种评估标准的平均正确率取值较高,尤其是在 8 维时,C 和 O 评估标准的正确率达到了 85% 以上。该结果说明,相比于图象识别中常用的最小距离判别法,在相似性评估中,使用基于“类别”概念的评估标准更为有效。图 5 中给出了在 8 维特征空间中,使用 C 评估标准为 G 镜评估出的 3 枚相似镜 F、H、I,该结果与人的主观评估结果完全吻合。

(3) 误差分析:从图 4 中可以看出,不同维数下各评估标准的正确率曲线起伏较大,而且在谷点的正确率较低。这可以大致归纳为两方面的原因:一是本实验中比较主客观评估结果相符程度时所采用的排序标记方法的稳定性不是太好,尤其当样本镜数量较少时,更容易使结果产生起伏;二是样本图象质量的局限性所引起的误差。样本图象的精度不高直接影响到特征镜图象的质量,从而给在该特征空间上表达镜图象并进行相似性评估的过程造成误差积累,影响了评估正确率的取值。

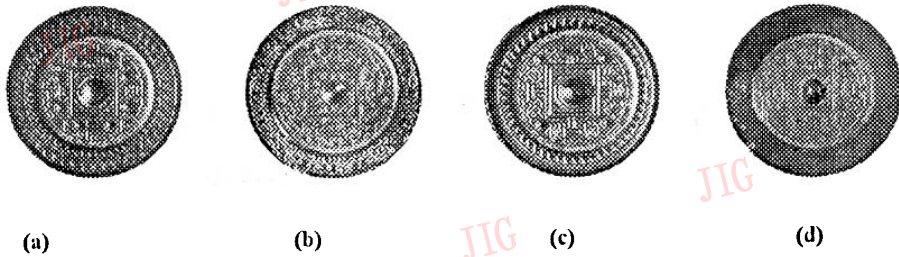


图 5 使用 C 标准在 8 维特征空间中的评估结果示例

(a) 基准镜 G (b)、(c)、(d) 相似镜 F、H、I

Fig. 5 Example of evaluation result using standard C under eigenspace of 8 dimensions

(a) Mirror G to be evaluated (b)、(c)、(d) Similar mirrors F、H、I

5 结 论

本文探讨了 KL 展开在古铜镜图象相似性评估中的可适用性,明确了古铜镜图象的几何和灰度规范化处理以及基于 KL 展开的特征镜空间构成过程,提出了三种基于“类别”概念的相似性评估标准,并根据实验结果对各种相似性评估标准进行了比较分析。实验结果表明:(1) KL 展开可用于古铜镜图象间的相似性评估,其评估正确率最高可达到 85% 以上;(2) 当系统需要较高的信息压缩比时,可以根据样本图象的内在类别数确定所用维数,此时同样可以保证较高的评估正确率;(3) 本文中所提出的 3 种基于“类别”概念的相似性评估标准比传统的距离标准更为有效。

正如前言中所指出的,古铜镜信息综合管理系统的最终目的,在于为考古学家提供一个进行古铜镜图文信息的综合管理及古铜镜图象间定量相似性评估的辅助工具。由于目前的工作还处于可行性实验阶段,如何将目前的方法系统化并使之能够容纳大批量的古铜镜图象数据,不仅包括许多处理过程的自动化问题,而且还包括如何将目前的客观相似性评估结果转化为定量的主观相似度评估结果,这

些将是下一步工作所面临的主要课题。

参 考 文 献

- 1 Shiraishi T, et al. Joint Research: Compilation of Data of Mirrors Excavated in Japan 1—Questions Concerning Mirrors Excavated in Japan—. Bulletin of the National Museum of Japanese History, 1993, 55.
- 2 叶琰,孙卫东,谷口一夫. 古铜镜信息综合管理系统. 全国第四次科技考古学术会议论文集,1995.
- 3 Kato T, Shimogaki H, Fujimura K. TRADEMARK: Multimedia Image Database System with Intelligent Human Interface. Trans. of IEICE, 1989, J72-D-II(4): 535~544.
- 4 Tagaki M, Zhou C. Image Similarity Retrieval by Graph Description and Graph Matching. Bulletin of the National Museum of Japanese History, 1993, 53: 161~182.
- 5 Turk M, Pentland A. Face Recognition without Features. IAPR Workshop on Machine Vision Applications, 1990.
- 6 Akamatsu S Sasaki T, Fukamachi H, Suenaga Y, Robust Face Identification by Pattern Matching Based on KL Expansion of the Fourier Spectrum, Trans. of IEICE, 1993, J76-D-II(7): 1363~1373.
- 7 Matsuno K, Lee C W, Tsuji S. Recognition of Facial Expressions Using Potential Net and KL Expansion. Trans. of IEICE, 1994, J77-D-II(8): 1591~1600.
- 8 Merlin P M, Farber D J, A Parallel Mechanism for Detecting Curves in Pictures. IEEE Trans. on Computers, 1975, C-24 (1): 96~98.



叶琰,1994 年获中国科学技术大学电子工程与信息科学系学士学位,现为中国科学技术大学电子工程与信息科学系硕士研究生,主要研究方向为数字图象处理及模式识别。

Similarity Evaluation of Bronze Mirror Images Based on KL Expansion

Ye Yan¹, Sun Weidong¹, Taniguchi Kazuo²

(1 Dept. of Elec. Eng. & Info. Sci., Univ. of Sci. & Tech. of China, Hefei 230027)

(2 Yamanashi Research Institute of of Cultural Properties, Teikyo University, Japan)

Abstract Bronze mirrors have very important research values on archaeology, and the similarity evaluation of bronze mirror images is the key to solving the problems in manual classification and realizing the large-scale quantitative analysis of bronze mirror images. This paper discussed the feasibility of KL expansion for similarity evaluation of mirror images, specified the normalization of mirror images and the procedure of eigenspace construction through KL expansion, and proposed 3 similarity evaluation standards based on the "class" conception. Experimental comparisons and analyses of these evaluation standards show that, the 3 proposed evaluation standards based on the "class" conception are more effective than the conventional distance standard, and their evaluation accuracy reached higher than 85% under eigenspace of higher dimension.

Keywords Similarity evaluation, KL expansion, Eigenspace, Evaluation standards based on class conception

天津引进 VTEL 美国视讯公司智能多媒体 会议电视设备建设 ATM 远程医疗网络

1997年10月18日讯:天津市数据通信局、天津大学、天津市肿瘤医院与VTEL美国视讯公司签署合约。引进VTEL公司TC2000, HS2000及SmartLink等智能多媒体会议电视设备及配套智能设备建设天津市ATM宽带远程医疗网络。

TC2000是VTEL公司推出的性能价格比最好的全功能会议电视系统。该系统的智能特性决定其可以很容易地接入各种网络,实现多媒体数据和图文交换,并可连接Internet。

HS2000是VTEL公司基于其通用ESA平台推出的新一代多媒体远程医疗专用设备,可以连接耳鼻喉观测镜等图象医疗外围设备,是现今远程医疗会诊等医学活动的最佳选择。

此项目是天津市邮电管理局为充分发挥邮电公网优势,加快天津信息港建设,提高天津医疗卫生水平,与有关医学院校及医疗单位合作进行的,采用了ATM宽带技术和智能多媒体会议电视等高新技术。建成后还可以和北京、上海、广州等大城市的ATM远程医疗网络进行互联,实现更广泛的应用。

三家单位对各会议电视厂商及产品进行了严格的比较及综合评估。最终VTEL智能多媒体会议电视设备以其优良的图象质量,灵活方便的操作,智能多媒体化的设备,极好的用户界面以及合理的价格等优势而赢得此项目。

此项目标志着天津会议电视网络开始进入智能多媒体化的新时代。