

灰色理论在图像工程中的应用研究进展

马苗^{1),3)} 田红鹏²⁾ 张艳宁³⁾

¹⁾(陕西师范大学计算机科学学院, 西安 710062) ²⁾(西安科技大学计算机系, 西安 710054)

³⁾(西北工业大学计算机学院, 西安 710072)

摘要 随着传统图像信息处理技术的日趋成熟,寻求基于新理论和新思想的图像信息处理技术具有十分重要的理论意义和实用价值。为了使图像处理中的新理论——灰色理论更多地被人们所了解,首先简要介绍了灰色理论的研究内容、主要特点和基础理论;然后分别从图像处理、图像分析和图像理解3个层次来综述和分析灰色理论在图像工程中的应用研究进展,包括一些新的研究成果;最后,总结了在图像工程中应用灰色理论时,要解决的关键问题和未来的发展方向。研究结果显示,尽管灰色理论在图像工程中的应用研究还处于起步阶段,但其应用范围却几乎涉及了图像工程的各个方面,这充分显示它的广泛可行性、有效性,以及良好的发展潜力和应用前景。

关键词 灰色理论 图像工程 灰色模型 灰色关联分析

中图分类号: TP391.41 N941.5 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)11-1943-09

Research Progress on the Application of Grey Theory in Image Engineering

MA Miao^{1),3)}, TIAN Hong-peng²⁾, ZHANG Yan-ning³⁾

¹⁾(College of Computer Science, Shansi Normal University, Xi'an 710062)

²⁾(Department of Computer Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054)

³⁾(School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract With the increasing maturity of traditional image information processing, from the point of theories and utilities, it is of great importance for researchers to find new theories and new ideas based technology. First, this paper briefly introduces the research contents, main characteristics and basic theories of grey theory. Then the state-of-art of grey theory in image engineering is summarized and analyzed in three levels: image processing, image analysis and image understanding. In addition, some research fruits of the authors are reported. Finally, some key issues and perspectives of grey theory in image engineering are pointed out. Research conclusions show that in spite of a new theory in image engineering, grey theory is feasible, efficient and almost covers all the fields of image engineering.

Keywords grey theory, image engineering, grey model(GM), grey relational analysis(GRA)

1 引言

灰色系统理论(grey system theory),简称灰色理论,是我国学者邓聚龙1982年创立的^[1-3]。灰色理论问世以来,已成功地应用于社会、农业、工程控制、

经济管理、未来学研究等国内外150多个行业和部门,被誉为在诞生之初的10年内获得重大发展的自然科学学科之一^[4]。

如同模糊数学、粗糙集理论、神经网络、分形等新理论、新方法的出现一样,灰色理论极强的生命力和广阔的应用前景受到图像工程领域研究人员的关

基金项目:国家教委博士点基金项目(20040699034);国家自然科学基金项目(60472072, 40671133);中国博士后科学基金项目(20060401009);教育部科学技术研究重点项目(107106)

收稿日期:2006-02-20; 改回日期:2006-07-20

第一作者简介:马苗(1977~),女,副教授,博士。西北工业大学在站博士后。主要研究方向为图像处理、灰色理论及信息隐藏等。已发表学术论文20余篇。E-mail:mmhlp@snnu.edu.cn

注和重视,同时探讨它在图像工程中的可行性和有效性逐渐成为一个崭新的课题。

2 灰色理论简介

根据系统中信息的清晰程度,邓聚龙将系统分为白色系统、黑色系统和灰色系统^[1-3]。白色系统的信息完全清晰可见;黑色系统的信息全部未知;灰色系统介于白色系统和黑色系统之间,即部分信息已知,而另一部分信息未知。由于信息的清晰可见程度是变化的,因此 3 种系统可以相互转化(如图 1 所示)。



图 1 3 种系统及转化

Fig. 1 Three kinds of systems and their transform

2.1 灰色理论的研究内容

灰色理论研究灰色系统中灰色信息的白化问题,包括以下 8 个方面^[2-5]:①灰色观念,指“认知根据原理”、“差异信息原理”等基本原理解及“外延明确、内涵不明确”的灰概念;②灰色生成,即累加生成、累减生成、级比生成等数据生成技术;③灰色数学,以灰数为基础的数学,包括灰色矩阵、灰色方程等;④灰色关联分析,指根据灰色系统中各因素之间发展趋势的相似或相异程度,展现诸因素间各种关系的系统分析技术;⑤灰色建模,即利用灰色数列建立灰色模型的建模技术;⑥灰色预测,以灰色模型为基础,对事物的时间分布或数值分布进行的预测;⑦灰色决策,指灰靶决策、灰关联决策、灰聚类决策、灰色局势决策、灰色层次决策等决策方法;⑧灰色控制,指基于本征性灰色系统的控制或以灰色系统方法为主构成的控制。

2.2 灰色理论的主要特点

(1) 用灰色数学来处理 and 量化不确定量

灰色理论不同于概率统计和模糊数学(见表 1^[4])。概率统计是研究“随机不确定”现象中每种结

果发生的可能性大小,其出发点是服从某种典型分布的大样本;模糊数学是研究“认知不确定”问题,它凭借经验和隶属函数;而灰色理论则着重研究前两者所不能解决的“小样本、贫信息不确定”问题,其研究对象具有“外延明确、内涵不明确”的特点。

表 1 灰色理论与概率统计和模糊数学的区别

Tab. 1 Differences between grey theory, probability & statistics, and fuzzy mathematics

项目	灰色理论	概率统计	模糊数学
研究对象	贫信息不确定	随机不确定	认知不确定
基础集合	灰色朦胧集	康托集	模糊集
方法依据	信息覆盖	映射	映射
途径手段	灰序列生成	频率统计	截集
数据要求	任意分布	典型分布	隶属度可知
侧重	内涵	内涵	外延
目标	现实规律	历史统计规律	认知表达
特色	小样本	大样本	凭经验

(2) 充分利用已知信息寻求系统的运动规律

灰色理论运用灰色系统建模的方法,把样本数据视为随时间变化的灰色量或灰色过程,通过累加生成和累减生成来使灰色量逐步白化^[4]。

(3) 灰色理论能处理小样本、贫信息系统

不同于传统的基于概率统计的图像信息处理方法,灰色理论的一个独特优点是对样本量要求不高,也不需要样本满足某些典型的分布规律。因此,在样本量很少的情况下,例如,在获取实验数据成本较高或破坏性实验等场合,灰色理论往往是一种行之有效的办法。

2.3 灰色理论的基础理论

(1) 灰色模型和灰色预测^[2-5]

灰色模型和灰色预测常常同时应用。一般步骤是把图像信息处理过程看作一个灰色过程,先通过白化微分方程建立灰色模型,再进行基于灰色模型的灰色预测或相关分析。

灰色模型有静态模型、状态模型和预测模型 3 类。最常用的是 GM(1,1) 预测模型,它是一阶一个变量的灰色模型,可预测变量本身,是灰色预测的基础。建立该预测模型只需一个数列,过程如下:

首先对原始数列 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(k) | k = 1, 2, 3, \dots, N\}$ 做一阶累加生成运算

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$$

并建立白化方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u$$

这是一个变量的一阶微分方程模型,记作 GM(1, 1)。令参数列 $a = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}$, 则根据最小二乘法, 可得其估计值

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T y_N$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(N-1) + x^{(1)}(N)) & 1 \end{bmatrix}$$

$$y_N = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \dots \\ x^{(0)}(N) \end{bmatrix}$$

则白化形式的微分方程的解为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right)e^{-at} + \frac{u}{a}$$

对其做一阶累加生成逆运算, 即可得到 $x^{(0)}$ 的预测模型

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right)(1 - e^{-a})e^{-at} \quad (1)$$

(2) 灰色关联分析

灰色关联分析是一种系统分析技术, 其实质是根据数据序列曲线间发展趋势的几何形状的相似性, 来找出系统中各因素间的复杂关系。如今已有多种计算灰色关联度的方法, 常用的是邓氏关联度, 计算方法如下^[2]:

设参考序列 $S_n = \{s_0(k) \mid k=1, 2, \dots, N\}$, 比较序列 $T_j = \{t_j(k) \mid k=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M\}$ 共 M 个, N 为各个序列的长度, 记 S_n 与 T_j 的第 k 项关联系数为 $\xi_{0,j}(k)$, 则两序列间的邓氏关联度为

$$R_{0,j} = \frac{1}{N} \times \sum_{k=1}^N \xi_{0,j}(k) \quad (2)$$

其中,

$$\xi_{0,j}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0,j}(k) + \zeta \Delta_{\max}}$$

$$\Delta_{0,j}(k) = |s_0(k) - t_j(k)|,$$

$$\Delta_{\min} = \min_k |s_0(k) - t_j(k)|,$$

$\Delta_{\max} = \max_j \max_k |s_0(k) - t_j(k)|$, ζ 称为分辨系数, 是一个事先取定的常数, 常取 $\zeta = 0.5$, 以保证 $\xi_{0,j} \in (0, 1]$ 。

当两个序列完全相同时, 即 $\forall k, \Delta_{0,j}(k) = \Delta_{\max} = 0$, 则计算 $\xi_{0,j}(k)$ 时, 会出现分母为 0, 邓氏关联度失效, 此时可以通过其他关联度进行求解, 如 B 型关联度。

(3) 灰色聚类^[2]

设有 N 个聚类对象, M 个聚类指标和 S 个灰类。将根据第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 个对象关于第 j ($j=1, 2, \dots, M$) 个指标的样本值 $d_{i,j}$ 将该对象归入第 k ($k=1, 2, \dots, S$) 个灰类的过程称为灰色聚类, 其一般步骤为确定聚类白化数 $d_{i,j}$ → 确定灰类白化函数 → 求各个标度聚类权 → 计算聚类系数 → 构造聚类向量 → 聚类。

3 灰色理论在图像工程中的研究进展

作为灰色理论的诞生地, 我国对灰色理论在图像工程中的应用研究有着得天独厚的优势。通过 SCI、EI 和 ISTP 检索可知, 中国在该领域的研究水平处于国际领先。清华大学章毓晋将图像工程划分为 3 个层次^[6], 即图像处理、图像分析和图像理解。下面分别从这 3 个层次论述灰色理论的应用研究进展。

3.1 图像处理层次

(1) 在图像压缩中的应用

图像压缩, 也称图像编码, 是灰色理论在图像处理中应用最早也是最广泛的方面之一^[7-33]。早期的无损压缩是 1993 年 Huang 等人提出的, 他们首先对图像像素序列建立 GM(1, 1) 预测模型, 然后计算像素的预测值与原值之差, 再使用熵编码器对差值进行编码^[7]。但这种基于 GM(1, 1) 预测模型的压缩方法效率较低, 其对于像素值变化缓慢的图像压缩比为 1.6 左右, 而对于变化剧烈的图像, 压缩率还将进一步降低。

为了提高压缩率, 文献[8]提出以块为单位进行灰色建模的方法, 即先通过“Zigzag”方式把每个 3×3 块的像素 1 维化, 再建立预测模型, 但最好的情况下, 压缩率也只有 2 左右。不久, 文献[9]和文献[10]从以下 3 个方面进行了改进^[33]: ①改进建模数据的选择顺序, 即以每两行的像素作为一个区域, 使用锯齿的方式选择建模数据; ②改进阈值检测方法, 即在加入新的像素建模时, 只比较该像素与前一个

建模像素的灰度差值,若此差值小于预先设定的阈值,则将此像素加入建模序列中,如此反复,一直到两像素的差值大于阈值,再进行灰色建模。这使得每次建模所用数列的长度是变化的;③与文献[8]不同,它们不需要每加入一个新的像素点就做一次预测。改进后,算法建模次数明显减少,压缩率达到 8~9。文献[11]则采用另外一种锯齿建模方式将压缩率提高到 12 左右。

文献[14]以 Hilbert 曲线扫描整幅图像,先得到全部像素的 1 维数据序列;然后用参数 GDL (grey difference label) 表示相邻像素的最大灰度变化,用参数 N 表示建模序列的最大长度,若当前像素与其前一像素的灰度差小于 GDL,就将它加入到建模序列中,直到相邻像素的灰度差不小于 GDL 或模型序列中的元素个数达到 N ,再使用 GM(1,1) 预测模型进行预测,如此反复,直到将所有像素处理完为止。该方法的特色是利用某种特殊曲线一次性 1 维化整个图像,并对建模序列的最大长度进行了限制,不足之处为 1 维化较大图像时,耗时稍长。

文献[15]的独特之处在于将灰色模型推广到变换域,提出了一种小波域零树编码和 GM(1,1) 预测模型相结合的压缩方法。该方法在压缩率和压缩质量方面都有较好的表现。实验结果显示,当压缩率为 64 时,图像的峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 仍在 30dB 以上。

根据以上的分析,利用灰色模型和灰色预测压缩图像时,建模序列选取顺序^[11]、建模次数和建模精度是决定压缩率、压缩质量和压缩时间的重要因素。

除了基于 GM(1,1) 预测模型的图像压缩外,文献[24]~[32]分别讨论了基于灰色关联分析的压缩算法。压缩原理可归纳为以下两类:一类是在矢量量化(vector quantization, VQ) 码书设计过程中,通过码书矢量和训练矢量的灰色关联度来判定码书是否已达到要求^[25-29];另一类是通过灰色关联分析选择参与图像编码的重要像素点或像素块,而不重要的像素点或像素块不参与编码或以较小的权重参与编码^[31]。

(2) 在图像增强中的应用^[11,34-37]

图像增强的目的是突出给定图像中的某些信息,削弱或除去某些不需要的信息,使其对某种特定应用来说,比原始图像更合适。目前,用于图像增强的灰色理论主要为灰色模型和灰色预测。

较早进行尝试的是 Huang 等人,他们先通过两种不同的数列选择方式得到同一像素的两个灰色预测值,然后用两次预测值的算术平均值作为该像素点增强后的值^[11]。

去除噪声是改善图像质量的一种常用方法。文献[34]~[35]把图像中的椒盐噪声看作是离散的极值点,然后用其周围像素建立的 GM(1,1) 预测模型求出该点的预测值以代替原极值,从而有效去除了椒盐噪声。虽然这种方法滤除的噪声类型单一,但它表明了灰色理论在图像增强方面具有可行性和有效性。

(3) 在图像隐藏中的应用^[38-40]

将灰色理论用于图像隐藏的代表人物是 Hsieh Cheng Hsiung。1999 年,他利用灰色理论中的 GDFM 模型进行图像隐藏^[38],次年,又给出了基于该模型的多幅图像的隐藏策略^[39]。但至今,基于灰色关联分析或其他灰色理论的图像隐藏策略尚未见报道。

3.2 图像分析层次

(1) 在图像分割和边缘检测中的应用^[37,41-43]

同灰色关联分析在图像压缩中的应用原理类似,文献[37]利用灰色关联度判断 BP 神经网络是否满足训练要求,其中的灰色 BP 图像分割算法较好地解决了因隐含节点过大或过小而造成的泛化能力下降问题,分割效果较为理想。

以灰色模型和灰色预测为基础的图像边缘检测技术中,较有代表意义的是何仁贵等人根据 GM(1,1) 预测模型预测误差的大小来检测图像边缘的方法^[41,42]。其基本步骤是:①用图像中各像素的左边和上边的 4 个点同时进行水平预测和垂直预测(起始点不预测,直接使用原始值),分别建立 GM(1,1) 预测模型,然后取绝对误差大的预测值作为像素预测值,构成一幅预测图像;②先用原始图像和预测图像相减得到误差图像,再根据误差的正负,得到 2 幅误差子图像;③根据误差子图像的灰度直方图进行灰度变换,使误差子图像的对比度增加,最后,合成两个误差子图,得到边缘图像。该算法的优点是能检测出间隔细密的图像轮廓,适用于屋脊型、阶跃型和“第 3 类边缘”等 3 类边缘,其不足之处表现为对噪声敏感。

(2) 在目标运动特性分析中的应用^[44-52]

在目标运动特性分析方面的应用仍然是从灰色模型和灰色预测开始的。Huang 等人运用灰色预测和自组织模糊逻辑算法来控制机器人的运动^[44]。文献[45]~[49]尝试了基于灰色预测理论的目标

跟踪方法和块运动估计策略。

在目标运动预测方面,刘鸿彬提出了利用灰色理论预测空中目标的航迹^[50],灰色 GM(1,1) 模型预测的结果与其实际值相比,误差为 0.137%,这是其他预测方法不可比拟的。次年,顾晓辉提出用灰色理论解决直升机航迹预测问题,即通过在每个采样期间实时建立 GM 预测模型和残差模型,用于解决反直升机智能雷达系统中用有限数据预测直升机航迹的问题^[51]。

2005 年,灰色关联分析见于目标运动规迹分析的应用。文献[52]以分布式多目标跟踪系统的航迹关联问题为研究对象,提出了一种新的航迹关联算法。由于算法根据数据序列因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量航迹间的接近程度,使航迹关联问题突破了样本容量和典型分布的两大限制。

(3) 在图像处理算法性能评估中的应用

在评价图像处理算法性能方面的应用具有代表性的是上海交通大学的狄宇春等人的研究成果^[53,54]。他们把灰色关联理论和层次分析法相结合,以属性矩阵的形式列出了多种分割算法在不同指标下与不同性能(正确分割、分割不连续、分割连续、分割完全不正确等)的关联程度,较好地克服了以往评估方法的不灵敏性和奇异性^[53]。

(4) 目标检测、识别和分类^[43,55-64]

Hsu 于 1998 年利用灰色理论进行了多噪声车牌图像识别的研究^[55]。与之类似,刘泉等人将随机车牌图像到标准车牌图像的映射看作是灰色系统的白化过程,用已知典型车牌图像模式形成参考序列,用待定车牌图像模式形成比较序列,然后通过灰色关联度确定车牌字符中种子的位置^[56]。该方法的优点是在复杂背景及非均匀光照条件下也能准确、实时地定位车牌。

用灰色关联分析理论进行图像识别和分类的报道还有文献[43],[57]~[60]。其中,文献[58]在分析航空润滑油中所含磨粒的特征参数的基础上,提出了融合 2 维、3 维特征参数的磨粒形态综合描述方法,并应用灰色关联分析对航空润滑油中所含的 6 种典型磨粒进行识别。与之理论基础类似,文献[59]根据大量铁谱分析数据与专家经验,建立了发动机磨损模式识别标准样本库之后,分别给出了发动机磨损模式识别的“模糊均权灰色关联分析”模型和“模糊加权灰色关联分析”模型。在对某船用发动机的 20 个铁谱分析油样的识别实验中,模糊

均权灰色关联分析模型的磨损识别率为 95%,模糊加权灰色关联分析模型的磨损模式识别率达 100%。文献[60]和文献[61]将神经网络与灰色关联分析相结合,分别实现了遥感图像的分类和混合像元的分解。

文献[63]、[64]的新颖之处在于将灰色理论中的灰色聚类用于磨损颗粒的自动识别。例如,文献[64]在对磨粒图像的形态特征参数进行分析的基础上,确定了各特征参数的灰类白化权函数和聚类权值,其聚类正确率在 90% 以上,且识别速度较快。

3.3 图像理解层次

(1) 在图像检索中的应用^[65-67]

利用灰色模型进行图像检索的一个代表性成果见文献[65],该文首先对图像像素进行 GM(1,1) 模型化处理,先得到各个模型的发展系数、灰输入以及模型序列的元素个数和首元素,再利用各模型发展系数的概率分布来描述图像特征,以实现基于语义的灰度图像检索。值得注意的是,这种检索方法在使用灰色理论的同时,也利用了传统的数理统计和概率论知识。曹奎等人在文献[65]的基础上,把 GM(1,1) 预测模型的适用范围推广到真彩色图像。文献[66]通过对 2000 幅真彩图像进行检索的结果表明了其有效性。

同年,曹奎等人还把灰色关联分析理论应用到图像检索^[67]。其检索原理是把图像检索过程视为一个灰色系统,将查询向量及图像特征的权值视为“灰数”,再采用灰色关联度来描述和分析“例子图像”与“相关图像”之间的关系,并据此自动更新查询向量与图像特征的权值,从而描述用户的查询需求。在对 5 类图像(每类 300 幅)的仿真实验中,经过 3 次相关反馈后所得到的平均检索率,分别提高了 8.1%、4.6%、12.4%、8.9% 和 9.1%,显著改善了检索性能。

(2) 在图像信息融合中的应用

熊和金等人就灰色理论在多传感器信息融合中的应用问题进行了讨论,分别提出了多传感器数据融合的灰色关联算法、灰色统计算法、灰色聚类算法、灰色统计聚类算法、灰色层次聚类算法及灰色综合决策算法^[68],但遗憾的是没有进一步结合实际数据进行验证。

(3) 在图像解释、推理(包含信息模型)中的应用

文献[69]同时运用灰色关联分析和灰色建模

理论,并以陆地卫星 TM 图像数据为信息源,结合表层海水叶绿素浓度实测数据来建立信息模型。其基本原理是在叶绿素光谱特征及遥感估算叶绿素浓度机理研究的基础上,通过选取 TM1 ~ TM4 波段的 75 种波段组合为比较序列,以叶绿素浓度为参考序列来分析各波段组合与叶绿素浓度之间的灰色关联度;再将关联度最大的 5 种波段组合分别采用 GM(0,2) 模型建模来得到 5 个估算表层海水叶绿素浓度的反演模型。各模型均具有明确的物理意义,且形式简明、精度较高。

3.4 笔者的工作

鉴于灰色模型和灰色预测的应用研究相对成熟的现状,笔者选择灰色关联分析理论为对象,研究了其“小样本分析特性”、“无量纲化预处理”和“整体比较机制”在图像工程中应用的基本方法,初步取得了一些成果^[70-76]。

(1) 小样本分析特性及其应用

与传统的系统分析方法相比,灰色关联分析不需要大量的数据作为样本,且对样本的分布规律也无特殊要求,这使得 2 维图像的短序列数据分析成为可能。

文献[70]利用图像中“噪声点与其邻域像素的相关性较弱,而边缘点与其邻域像素的相关性较强”的特点,设计了以灰色关联度作为相似性度量指标的噪声去除算法,实现了近似二值图像的保边盲除噪。文献[71]则利用边缘像素与非边缘像素空域分布连续性不同的区别,以非边缘点的特征序列作为参考序列,各个像素为中心组成的序列作为比较序列,根据两类序列之间的关联度区分边缘点和非边缘点,其优点是不仅能够较为准确地检测出有用的边缘信息,而且具有一定的抗噪声能力。

(2) 数据序列的无量纲化预处理及其应用

无量纲化预处理使不同量纲的各类数据之间的“比较”成为可能。在建立量化比较关系时,可以根据各类数据的重要性,赋予其适当的权值。

文献[72]根据融合目的、专家经验、研究兴趣等先验知识,确定性能评价指标和相应的权值,由参与评价的各个融合算法所得的融合图像的性能指标构成比较序列,并根据各指标的类型选取最优特征作为参考序列,最后通过两类序列间的定权关联度来评价融合算法。这种思想可以推广到以融合算法为代表的图像信息处理算法的多因素评价。

(3) 整体比较机制及其应用

灰色关联分析的整体比较机制克服了两两比较的局限性,若与变换域技术或传统的统计方法相结合,则有可能产生新的图像信息处理算法。

例如,文献[73]对标准图像和各个待评价图像分别进行小波分解,先得到不同尺度、不同方向的细节子图和最高尺度的概貌子图,然后通过灰色关联分析来计算质量关联矩阵,并进行质量评价。文献[74]则将灰色关联度的整体比较机制直接应用于数字水印的透明度评价。

4 关键问题

根据现有资料分析和亲身经验,笔者认为在图像工程中应用灰色模型和灰色预测理论需解决以下关键问题^[75]:①如何在 2 维的图像数据中选择合适的 1 维数列,以便建立高精度的 GM(1,1) 预测模型;②GM(1,1) 预测模型并非适合于任意的 1 维序列,如何扩展该模型的适用范围;③如何修正 GM(1,1) 预测模型的预测误差。

应用灰色关联理论需解决以下关键问题^[75]:①如何正确选取比较序列和参考序列,这是进行灰色关联分析的第 1 步;②进行灰色关联分析时,如何取舍或选取分辨率;③数据序列无量纲化的取舍或选取;④如何选取关联度计算公式,即如何运用灰色关联分析理论来分析系统中各因素相互影响的关系,其关键在于如何计算关联度,至今关联度计算的量化模型已有 20 余种,因此如何选择合适的关联度是在具体应用中必须解决的问题。

5 未来展望

同任何新生事物一样,基于灰色理论的应用还很不成熟,笔者认为还有很多方面值得进行更深入的研究^[75,76]。例如,①利用 GM(1,1) 预测模型能够压缩图像,而在一定误差范围内利用 GM 预测模型也能恢复所压缩的图像,这在图像隐藏方面有应用发展潜力;②通过灰色模型可以对动态图像序列进行短期预测,这为寻求新的图像变形算法提供了可能;③通过融合源图像之间灰色模型系数的融合处理,有望实现特征级图像融合;④其他灰色理论在图像信息处理技术中也有潜在的应用空间,如局部生成函数^[4,5]提供了多种序列间插值的方法,这为图像的无锯齿放大、动态图像序列的短期预测及动态

图像序列中缺失图像的估计等许多图像信息处理方法提供了可能。最后与模糊数学、粗集理论等其他方法的交叉应用也是一个较新的发展方向^[75,76]。

综上所述,有关灰色理论在图像工程中的应用报道不足百篇,但其范围却几乎涉及了图像工程的各个方面,这充分显示了它的广泛可行性和有效性。有理由相信,随着研究人员的共同努力,灰色理论在图像工程中有着良好的发展潜力和应用前景。

参考文献 (References)

- Deng J L. Control problems of grey system[J]. System and Control Letters, 1982, 1(5): 288 ~ 294.
- Deng Ju-long. The Basic Method of Grey System [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996. [邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1996.]
- Deng Ju-long. Grey System Tutorial [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996. [邓聚龙. 灰色系统教程[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1996.]
- Liu Si-feng, Guo Tian-bang, Dang Yao-guo, et al. Grey System and its Applications[M]. Beijing: Science Press, 1999. [刘思峰,郭天榜,党耀国等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1999.]
- Fu Li. Grey System and its Applications[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1992. [傅立. 灰色系统理论及应用[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1992.]
- Zhang Yu-jin. Image engineering in China: 2004 [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(5): 537 ~ 560. [章毓晋. 中国图像工程: 2004[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(5): 537 ~ 560.]
- Huang Ho Chao, Wu J L. Grey system theory on image processing and lossless data compression for HD-media[J]. The Journal of Grey System Theory and Practice, 1993, 3(2): 9 ~ 15.
- Huang Y P, Chu H C, Hsia K H. Dynamic grey modeling: theory and application[A]. In: Proceedings of the 1st National Symposium on Grey System Theory and its Application [C], Luzhu, Taiwan, China, 1996: 47 ~ 56.
- Yeh C H, Chen C M, Hsu Y T. Image compression using grey model [A]. In: Proceedings of Grey System Theorem and Applications Conference [C], Changhua, Taiwan, China, 1997: 184 ~ 192.
- Hsu Y T, Jerome Yeh. Grey-based image compression [J]. The Journal of Grey System, 1998, 10(2): 105 ~ 121.
- Huang Y P, Chu H C. A practical consideration for grey modeling and its application to image processing [J]. The Journal of Grey System, 1996, 8(3): 217 ~ 233.
- Hsu Y T, Jerome Yeh. A novel lossless image compression based on GM [J]. The Journal of Grey System, 2000, 12(3): 263 ~ 274.
- Hsu Y T, Jerome Yeh. A novel image compression using grey models on a dynamic window [J]. International Journal of Systems Science, 2000, 31(9): 1125 ~ 1141.
- Cao Kui, Feng Yu-cai. An image compression method based on GM and Hilbert space-filling curve [J]. Mini-micro Systems, 2002, 23(11): 1359 ~ 1362. [曹奎,冯玉才. 基于 GM 模型和 Hilbert 空间填充曲线的图象压缩方法[J]. 小型微型计算机系统, 2002, 23(11): 1359 ~ 1362.]
- Xie M X, Huang Y H, Lin X J, et al. Application of grey prediction in image compression [A]. In: Proceedings of the 4th Conference on Artificial Intelligence and Applications [C], Changhua, Taiwan, China, 1999: 294 ~ 299.
- Hsu Y T, Jerome Yeh. Lossless image compression based on GM(1, 1) predictor [A]. In: Proceedings of the 3rd National Conference on Grey Theory and Applications [C], Changhua, Taiwan, China, 1998: 349 ~ 352.
- Hsu Y T, Jerome Yeh, Chang H C. Image coding using grey-based codebook generation [A]. In: Proceedings of the 4th Conference on Artificial Intelligence and Applications [C], Changhua, Taiwan, China, 1999: 282 ~ 285.
- Hsieh ChengHsiung, Shen M C. An efficient grey approach to nearly lossless image coding [A]. In: Proceedings of the 4th National Conference on Grey Theory and Applications [C], Kaohsiung, Taiwan, China, 1999: 158 ~ 160.
- Hsieh ChengHsiung. Grey data fitting model and its application to image coding [J]. The Journal of Grey System, 2001, 13(1): 69 ~ 76.
- Jou Jermin, Chen Pei-yin. Adaptive arithmetic coding method using fuzzy logic and gray theory [A]. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. Monterey, CA, USA, 1998, 4: 142 ~ 145.
- Xie M X, Zhuang Y D, Zeng D Z. A grey-prediction-based image compression [EB/OL]. <http://www.im.cpu.edu.tw/conference2001/pdf/b1-3.pdf>, 2005-03-12/2006-02-06.
- Cao Kui, Feng Yu-cai. GM (1, 1)-based approach to image representation and retrieval [J]. Computer Engineering, 2004, 30(7): 121 ~ 123, 127. [曹奎,冯玉才. 基于 GM(1, 1)模型的压缩域图像表示与检索技术[J]. 计算机工程, 2004, 30(7): 121 ~ 123, 127.]
- Chen Pei-yin, Jou Jermin. Adaptive arithmetic coding using fuzzy reasoning and grey prediction [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 114(2): 239 ~ 254.
- Yeh Jerome, Chang H C, Hsu YenTseng. Image coding based on SGRA [A]. In: Proceedings of Accepted by the 5th Conference on Artificial Intelligence and Applications [C], Hainchu, Taiwan, China, 2000.
- Hsu YenTseng, Yeh Jerome, Chang H C. Grey relational analysis for image compression [J]. The Journal of Grey System, 2000, 12(2): 131 ~ 138.
- Tung Chunliang, Lin Jzausheng, Liu Shaohan. Vector quantizer in transform coding using a grey neural network [A]. In: Proceedings of the Joint Conference on Information Sciences [C], Research Triangle Park, NC, United States, 2002: 803 ~ 806.
- Hsieh ChengHsiung. Application of GRA in transform coding [A]. In: Proceedings of the 6th National Conference on Grey Theory and Applications [C], Yunlin, Taiwan, China, 2001: C79 ~ C82.
- Lin ChiYuan, Chen ChinHsing. Image compression using grey-based neural networks in the wavelet transform domain [A]. In: National

- Computer Symposium[C], Taipei, Taiwan, China, 2001, 4: D083 ~ D090.
- 29 Lin ChiYuan, Chen ChinHsing. Color image compression using spread grey-based neural networks in the transform domain[A]. In: Proceedings of the 19th Workshop on Combinatorial Mathematics and Computation Theory[C], Kaohsiung, Taiwan, China, 2002: 137 ~ 145.
- 30 Lin ChiYuan, Chen ChinHsing. Image compression using grey-based hopfield neural network and block truncation coding[A]. In: Proceedings of the 20th Workshop on Combinatorial Mathematics and Computation Theory[C], Chiayi, Taiwan, China, 2003: 193 ~ 198.
- 31 Hsieh ChengHsiung. Application of grey relational analysis to image coding[J]. The Journal of Grey System, 2003, 15(1): 21 ~ 28.
- 32 Lin ChiYuan, Chen ChinHsing. A genetic grey-based neural networks with wavelet transform for search of optimal codebook[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2003, E86-A(3): 715 ~ 721.
- 33 Xie Ming-xing, Zhuang Yong-da, Zeng Ding-zhang, et al. A grey-prediction-based image compression [EB/OL]. <http://www.im.cpu.edu.tw/conference2001/pdf/b1-3.pdf>. [谢明兴, 莊永达, 曾定章等. 以灰预测为基础的影像压缩之探讨[EB/OL]. <http://www.im.cpu.edu.tw/conference2001/pdf/b1-3.pdf>.]
- 34 Hu Juan, Yang Ping, He Fu-yun. The application of the gray system model in picture processing[J]. Journal of Shanghai Institute & Electric Power, 2004, 20(1): 1 ~ 4. [胡隽, 杨平, 何辅云. 一阶灰色系统模型在图像处理中的应用[J]. 上海电力学院学报, 2004, 20(1): 1 ~ 4.]
- 35 Hu Juan, He Fu-yun, He Jing. Application of gray system theory in image processing[J]. TV Engineering, 2003, (7): 19 ~ 22. [胡隽, 何辅云, 贺静. 灰色系统理论在图像处理中的应用[J]. 电视技术, 2003, (7): 19 ~ 22.]
- 36 Hsieh ChengHsiung, Tu ChingChi. Grey filtering based on GM(1,1) model[A]. In: Proceedings of the 5th National Conference on Grey Theory and Applications[C], Taipei, China, 2000: 257 ~ 264.
- 37 Tao Jian-feng. Algorithm Research of Digital Image Processing Based on Gray System Theory [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004. [陶剑锋. 基于灰色系统理论的数字图像处理算法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.]
- 38 Hsieh ChengHsiung, Shen MengCheng. A grey approach to image hiding based on GDFM model[A]. In: Proceedings of the 4th National Conference on Grey Theory and Applications[C], Kaohsiung, Taiwan, China, 1999: 161 ~ 163.
- 39 Hsieh ChengHsiung. Multi-image embedding based on GDFM model[A]. In: Proceedings of The 5th National Conference on Grey Theory and Applications[C], Taipei, Taiwan, China, 2000: 325 ~ 330.
- 40 Hsieh ChengHsiung. Grey image hiding[J]. The Journal of Grey System, 2000, 12(3): 275 ~ 282.
- 41 He Ren-gui, Huang Deng-shan, Chen Jin-bing. Image edge detection based on grey prediction model[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(1): 15 ~ 18. [何仁贵, 黄登山, 陈金兵. 基于灰色预测模型的图像边缘检测[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(1): 15 ~ 18.]
- 42 He Ren-gui. The Application of Grey Prediction Model in Digital Image Processing [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. [何仁贵. 灰色预测模型在数字图像处理中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.]
- 43 Li Xue-lian. Application of Grey System to Medical Image Preprocessing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. [李雪莲. 灰色系统理论及其在医学图像处理中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.]
- 44 Huang S J, Lee J S. Robotic motion controller using a self-organizing fuzzy logic algorithm with grey prediction[J]. Journal of Systems & Control Engineering, 1998, 212(4): 293 ~ 304.
- 45 Luo Ren C, Chen TseMin. Target tracking by Grey prediction theory and look-ahead fuzzy logic control[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C], Detroit, MI, USA, 1999, 2: 1176 ~ 1181.
- 46 Jou JerMin, Chen PeiYin, Sun JianMing. The gray prediction search algorithm for block motion estimation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1999, 9(6): 843 ~ 848.
- 47 Chen TseMin, Luo Ren C. Mobile target tracking using hierarchical grey-fuzzy motion decision-making method[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C], San Francisco, CA, USA, 2000, 3: 2118 ~ 2123.
- 48 Wong C C, Lin B C, Cheng C T. Fuzzy tracking method with a switching grey prediction for mobile robot[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems[C], Melbourne, Australia, 2001, 1: 103 ~ 106.
- 49 Chen J L, Chen P Y. An efficient gray search algorithm for the estimation of motion vectors[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, 2001, 31(2): 242 ~ 248.
- 50 Liu Hong-bin, Xiong Shao-hua. Prediction of airborne objectives with grey system theory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 122(15): 30 ~ 32. [刘鸿彬, 熊少华. 空中雷达目标的灰色预测[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 122(15): 30 ~ 32.]
- 51 Gu Xiao-hui, Wang Xiao-ming, Zhao You-shou. Prediction of helicopter tracks based on grey system theory[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2001, 22(6): 559 ~ 562. [顾晓辉, 王晓鸣, 赵有守. 基于灰色系统预测直升机航迹的研究[J]. 航空学报, 2001, 22(6): 559 ~ 562.]
- 52 Yi Xiao, Guan Xin, He You. Gray track correlation model for distributed multitarget tracking system[J]. Signal Processing, 2005, 21(6): 652 ~ 655. [衣晓, 关欣, 何友. 分布式多目标跟踪系统的灰色航迹关联模型[J]. 信号处理, 2005, 21(6): 652 ~ 655.]
- 53 Di Yu-chun, Deng Yan-ping. Performance evaluation based on the grey relational grade of image segmentation[J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(3): 19 ~ 23. [狄宇春, 邓雁萍. 基于灰色关联度分析的图像分割性能评估[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(3): 19 ~ 23.]
- 54 Li Bao-zhou, Wang Jian-qi, Deng Yan-ping. Synthetic performance evaluation of image segmentation algorithms[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(6): 824 ~ 826. [李保洲, 王建琦, 邓雁萍. 基于关联度分析的图像分割性能评估[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(6): 824 ~ 826.]
- 55 Hsu Y T, Lin C B, Mar S C, et al. High noise vehicle plate

- recognition using grey system [J]. *The Journal of Grey System*, 1998, 10(3): 193 ~ 208.
- 56 Liu Quan, Xie Ming, Zhong Luo. The application of developed seeds algorithm based on grey system theory in license plate location system [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2002, 24(2): 60 ~ 62. [刘泉, 谢鸣, 钟路. 灰色理论的改良种子算法在车牌定位中的应用[J]. *武汉理工大学学报*, 2002, 24(2): 60 ~ 62.]
- 57 Hsu Y T, Chen C M, Liu T Y. Grey-based ART system for classifications [J]. *The Journal of the Chinese Grey System Association*, 2001, 4(1): 1 ~ 16.
- 58 Jiang Xu-feng, Peng Xiu-hua, Fei Yi-wei, et al. Wear particle classification based on the theory of grey relational analysis [J]. *Lubrication Engineering*, 2005, (5): 112 ~ 116. [姜旭峰, 彭秀华, 费逸伟等. 基于灰色关联分析的磨粒识别[J]. *润滑与密封*, 2005, (5): 112 ~ 116.]
- 59 Fu Jian-ping, Liao Zhen-qiang, Li Guo-zhang, et al. Pattern recognition method for wear mode of engine based on the fuzzy grey cognate analysis [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(24): 2215 ~ 2218. [傅建平, 廖振强, 李国章等. 基于模糊加权灰色关联分析的发动机磨损模式识别[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(24): 2215 ~ 2218.]
- 60 Gui Yu-feng, Zhang Ji-xian, Lin Zong-jian, et al. Research on method of decomposing remote sensing mixed pixel based on grey neutral network theory [J]. *Remote Sensing Information*, 2000, (4): 27 ~ 28, 40. [桂预风, 张继贤, 林宗坚等. 基于灰神经网络理论的混合像元分解方法研究[J]. *遥感信息*, 2000, (4): 27 ~ 28, 40.]
- 61 Gui Yu-feng, Li Gang, Xiao Xin-ping. Remote sensing image classification based on grey relational degree and ART neural network [A]. In: Wang Lei-zheng, Liu Ke, Hui Xing Jie, et al. edis. *Proceedings of the 6th National Youth Conference on Operations Research and Management* [C]. Qinhuangdao, Hebei, China, 2004: 379 ~ 383. [桂预风, 李刚, 肖新平. 基于灰色关联度与 ART 神经网络的遥感影像分类[A]. 见: 王雷震, 刘克, 惠兴杰, 等编. 第六届中国青年运筹与管理学者大会论文集[C], 中国河北: 秦皇岛, 2004: 379 ~ 383.]
- 62 Yang Gui-jun, Zhang Ji-xian. Research on method of decomposing remote sensing mixed pixel based on grey correlation theory [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2004, (10): 1 ~ 3. [杨贵军, 张继贤. 利用灰色相关分解混合像元方法研究[J]. *测绘通报*, 2004, (10): 1 ~ 3.]
- 63 Li Yan-jun, Zuo Hong-fu, Wu Zhen-feng, et al. Fixed weight grey clustering and its application in wear particle classification [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2002, 17(1): 108 ~ 112. [李艳军, 左洪福, 吴振锋等. 灰色定权聚类在磨粒识别中的应用[J]. *数据采集与处理*, 2002, 17(1): 108 ~ 112.]
- 64 Li Yan-jun, Zuo Hong-fu, Chen Guo. Wear particles identification based on grey clustering analysis [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2003, 24(4): 373 ~ 376. [李艳军, 左洪福, 陈果. 基于灰色聚类的磨粒自动识别[J]. *航空学报*, 2003, 24(4): 373 ~ 376.]
- 65 Yuan Lei, Cao Kui, Feng Yu-cai, et al. An approach to semantic based image retrieval using LSI [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2002, 30(2): 105 ~ 107. [袁磊, 曹奎, 冯玉才等. 一种基于 LSI 的图像语义检索技术[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(2): 105 ~ 107.]
- 66 Cao Kui, Feng Yu-cai. GM (1, 1)-based approach to image representation and retrieval [J]. *Computer Engineering*, 2004, 30(7): 121 ~ 123, 127. [曹奎, 冯玉才. 基于 GM(1, 1) 模型的压缩域图像表示与检索技术[J]. *计算机工程*, 2004, 30(7): 121 ~ 123, 127.]
- 67 Cao Kui, Feng Yu-cai. A grey relevance feedback algorithm for image retrieval [J]. *Computer Engineering*, 2004, 30(6): 18 ~ 20. [曹奎, 冯玉才. 一种图像检索中的灰色相关反馈算法[J]. *计算机工程*, 2004, 30(6): 18 ~ 20.]
- 68 Xiong He-jin, Liu Zu-yuan, Tang Xiao-guang. A study of grey engineering methods for information fusion [J]. *Journal of Wuhan Transportation University*, 1999, 23(6): 589 ~ 593. [熊和金, 刘祖源, 唐晓光. 信息融合的灰色工字方法研究[J]. *武汉交通科技大学学报*, 1999, 23(6): 589 ~ 593.]
- 69 Chen Chu-qun, Shi Ping, Mao Qing-wen. Study on modeling chlorophyll concentration of surface coastal water using TM data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 11(3): 168 ~ 176. [陈楚群, 施平, 毛庆文. 应用 TM 数据估算沿岸海水表层叶绿素浓度模型研究[J]. *遥感学报*, 1996, 11(3): 168 ~ 176.]
- 70 Ma M, Tian H P, Hao Ch Y. Image denoising using grey relational analysis in spatial domain [A]. In: *Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing* [C], Beijing, China, 2005, 5960: 335 ~ 342.
- 71 Ma Miao, Fan Yang-yu, Xie Song-yun, et al. A novel algorithm of image edge detection based on grey system theory [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(10): 1136 ~ 1139. [马苗, 樊养余, 谢松云等. 基于灰色系统理论的图象边缘检测新技术[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(10): 1136 ~ 1139.]
- 72 Ma M, Tian H P, Hao Ch Y. A new method to quality evaluation for image fusion using GRA [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(8): 087010-1 ~ 5.
- 73 Ma Miao, Hao Chong-yang, Han Pei-you, et al. Image fidelity criterion based on grey relational analysis [J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(7): 978 ~ 983. [马苗, 郝重阳, 韩培友等. 基于灰色关联分析的图像保真度准则[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(7): 978 ~ 983.]
- 74 Ma Miao, Ding Li, Hao Chong-yang. Judgment of the imperceptibility of digital watermarking based on gray correlation degree [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(22): 22 ~ 23. [马苗, 丁力, 郝重阳. 数字水印的透明性的灰评判[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(22): 22 ~ 23.]
- 75 Ma M, Hao C Y, Li X W. A survey on grey image processing [A]. In: *IEEE Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C], Hangzhou, China, 2004, 5: 4141 ~ 4145.
- 76 Ma Miao. Study on the Image Information Processing Based on Grey System Theory [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. [马苗. 基于灰色系统理论的图象信息处理技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.]