

文章编号: 1001-0920(2005)12-1355-05

基于模糊逻辑的图像检索研究

王小玲^{1,2}, 谢康林¹

(1. 上海交通大学 计算机科学与工程系, 上海 200030; 2. 山西财经大学 信息与管理学院, 太原 030016)

摘要: 提出一个基于模糊逻辑的图像检索系统. 该系统使用模糊语言变量描述图像特征之间的相似性程度, 而非图像特征本身, 使得图像相似性推理能以非线性方式进行; 模糊规则建立在用户对对象的认知基础之上, 能够反映用户主观感知. 由于具有相似特征变化范围的不同对象可以适用于相同的规则, 使得算法对检索图像的不同类别具有良好的鲁棒性. 另外, 提出一种改进的直方图——平均面积直方图, 以提取色彩特征. 实验结果表明了模糊检索系统的有效性与其可行性.

关键词: 基于内容的图像检索技术; 语义鸿沟; 权重分配; 模糊推理; 色彩直方图; 空间信息
中图分类号: TN 911.73 **文献标识码:** A

On the Fuzzy Logic-based Image Retrieval

WANG Xiao-ling^{1,2}, XIE Kang-lin¹

(1. Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;
2. Department of Information and Management Institute, Shanxi Financial and Economic University, Taiyuan 030006, China. Correspondent: WANG Xiao-Ling, E-mail: clisdy@126.com)

Abstract: A fuzzy logic-based image retrieval system is proposed. The fuzzy language variables are used to describe the similarity degree of image features, not the features themselves. Image similarity then can be deduced in a nonlinear manner. These rules embed user general perceptions of an object, by which subjectivity of human perception of image contents can be expressed. In particular, different objects with same feature variations can be dealt with same fuzzy rules. The fuzzy logic-based image retrieval system has a good robustness to image categories. Moreover, an improvement on the traditional histogram called the average area histogram (AAH) is proposed to represent color features. Experimental results show the feasibility and efficiency of the proposed scheme.

Key words: Content-based image retrieval; Semantic gap; Weight assignment; Fuzzy inference; Color histogram; Spatial information

1 引言

随着通信以及多媒体技术的迅速发展, 检索和浏览海量的多媒体数据的需求日益迫切, 从而促进了图像检索技术的发展. 基于内容的图像检索技术 (CBIR) 是当前研究的热点. CBIR 直接根据描述图像内容的各种特征, 如色彩、纹理、形状等, 在图像数据库中寻找与查询图像最相似的一幅 (组) 图像. 然而, CBIR 的性能不尽如人意, 主要原因有:

1) 高层语义与低层特征之间存在差距. 人类

习惯根据图像所表达的语义概念来寻找相似图像, 而在 CBIR 中, 图像在内容特征空间的距离决定图像之间的相似度. 研究表明, 二者存在非线性映射关系. 例如形状和颜色都不太相似的图像, 可能具有相同的语义. 可见, 图像相似性判断存在一定的模糊性.

2) 不同内容特征的权重分配缺乏理论指导. 在图像检索中综合运用多种特征要比单一特征更加有效. 特征权重的分配主要有两类方法: 一类是基于

收稿日期: 2004-11-30; 修回日期: 2005-02-28

基金项目: 国家 863 计划项目 (2002AA 413420).

作者简介: 王小玲 (1975-), 女, 太原人, 讲师, 博士生, 从事多媒体数据挖掘、图像检索研究; 谢康林 (1947-), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事模糊逻辑、数据挖掘研究.

用户经验的线性分配方法;另一类是基于人工智能方法的非线性分配方法. 这些方法的不足之处是人机交互界面比较复杂,加重了用户的负担

3) 无法反映人类感知的主观性. 不同用户或者同一个用户,在不同场合对同一幅图像会有不同的认知,这就是人类感知的主观性. 目前,关于在检索中如何应用,体现这种主观差异的研究还很少,系统不能满足用户个性化的检索需求

由上述分析可见,图像检索是面向用户的,图像相似性匹配应符合人脑思维方式. 模糊数学方法是模拟人脑思维的有力工具,并在图像检索中获得了广泛的应用. 已有的研究主要使用模糊语言变量描述图像特征,如纹理粗糙度的强、中、弱等^[1],边缘的粗、中、细等^[2],人脸尺寸的大、中、小等^[3],从而支持基于自然语言描述的检索. 与上述方法不同,本文使

用模糊语言变量描述图像特征之间的相似程度,而非图像特征本身,使得图像相似性推理能够以非线性方式进行;在推理过程中,模糊规则隐含地解决了图像特征的权重分配问题;由于模糊规则建立在用户对某一对象的认知与先验知识基础之上,因此检索系统能够反映用户主观感知的差异. 同时,当对象具有相似的特征变化范围时,算法能够检索不同领域的图像,对图像类别具有良好的鲁棒性. 本文还提出一种改进的直方图:平均面积直方图,以提取色彩特征. 实验结果表明,本文提出的模糊检索系统能够获得较好的检索性能

2 基于模糊逻辑的图像检索系统

本文提出的基于模糊逻辑的图像检索系统由4部分组成,如图1所示

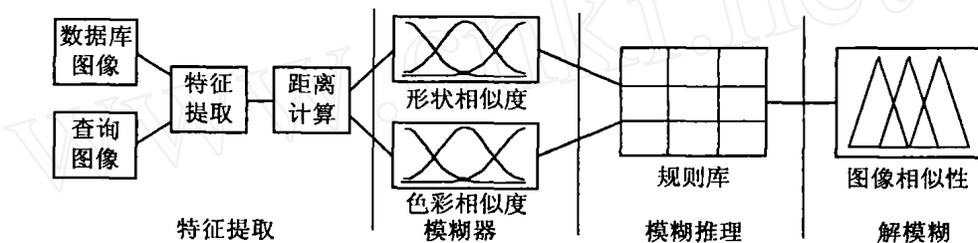


图1 基于模糊逻辑的图像检索系统结构

1) 特征提取. 色彩与形状特征是图像检索中的关键特征,本系统基于这两种特征进行设计:应用本文提出的平均面积直方图在HSV空间提取色彩特征;采用不变矩方法表示形状特征

2) 模糊器. 查询图像与数据库图像的色彩相似度和形状相似性是模糊检索系统的两个输入. 采用3个模糊语言变量:“很相似”、“相似”、“不相似”进行描述. 这种描述使得后续图像匹配能够以符合人脑思维的方式进行推理

3) 模糊推理. 根据用户对某一对象的认知与先验知识,建立一个包括9条模糊规则的规则库. 每一条规则处理对象的色彩与形状分布的一种情形

4) 去模糊器. 采用区域重心法(COG)去模糊,得到系统输出 S ,即查询图像与数据库图像的相似度,同样使用3个模糊语言变量描述:“很相似”、“相似”、“不相似”

3 特征提取

本文提取图像的色彩和形状特征作为检索索引. 其中,形状特征采用不变矩方法表示;色彩特征采用本文提出的平均面积直方图表示

3.1 色彩特征提取

基于色彩的图像检索方法一直是CBIR的研究

重点. 颜色特征表示方法主要有颜色直方图、颜色矩和颜色集,其中尤以直方图应用广泛. 直方图主要优点是计算效率高,对图像变形、旋转具有鲁棒性,通过归一化后具有尺寸不变等优点. 不足之处是无法反映色彩分布的空间信息. 内容完全不同的图像可能具有非常接近的直方图. 为了解决这个问题,出现了许多直方图改进算法. 文献[4]利用聚类方法将图像的整体直方图分解成局部的区域直方图系列,反映色彩的空间分布特征. [5]提出了CCV(Color Coherence Vector)概念:基于空间一致性,将直方图分裂为连续与非连续两种. 通过将色彩与纹理、形状、方向等特征结合,避免了不属于同一区域的色彩间的比较,提高了辨识度. [6]根据图像色块位置和方差特征提出了Spatial-chromatic直方图. [7]提出滑动结构元素方法,计算在其中出现的具有相同色彩的一组像素的数目. 通过在不同尺度范围内收集这些区域的相对尺寸和频率分布,建立有关色彩空间分布信息的描述. [8]引入一种地理统计量方法描述色彩的空间分布关系. [9]提出一种色彩-空间特征用于描述像素在图像不同位置的分布状态

上述改进算法在反映色彩空间分布的同时,其提取色彩的方式,如[4]中区域的划分,[6]中提取

色块的位置, [7] 中采用的滑动结构元素的形状、尺寸等, 都不同程度地破坏了原有算法对变形、旋转的鲁棒性, 从而降低了原算法的有效性。而本文提出的平均面积直方图(AAH), 能在反映色彩空间分布的同时, 保持原算法对变形、旋转的鲁棒性优点。

3.2 平均面积直方图

给定色彩空间 C , 图像的平均面积直方图的定义如下:

$$H_c^*(I) = \left\{ \frac{N(I, C_i)}{M(I, C_{8i})} \mid i = 1, 2, \dots, n \right\}, \quad (1)$$

其中 $N(I, C_i)$ 是落入色彩等级 C_i 的像素数目, 它直接反映了图像的色彩构成。 $M(I, C_{8i})$ 是对落入色彩等级 C_i 的像素形成的区域进行 8 连通标记后, 获得的非连通区域数目。 i 表示色彩空间 C 的色彩等级, 则 H^* 表示落入色彩等级 C_i 的非连通区域的平均面积取值。这里忽略了由 1 个像素构成的非连通区域, 实验证明这些非常小的区域对检索性能没有影响。

图 2 给出了同一色彩等级 C_i 的像素在图像 I 中的 3 种空间分布。假设 3 种情形中, 像素的总量相等或者接近。由于传统直方图仅仅考虑像素总量, 即这些区域的面积总和这一单一指标, 则这 3 种情形将被视为完全相等或接近, 从而造成图像误匹配。而在这 3 种情形中, 非连通区域的平均面积大小差异较大, 即 AAH 可以正确区分 3 种情形。

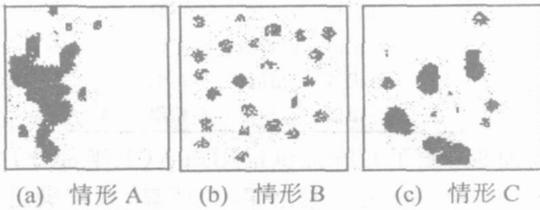


图 2 相同色彩等级的像素的空间分布

本文采用了具有与人眼感知一致性的 HSV 色彩空间, 这主要是考虑到后续模糊推理规则的建立是以用户对色彩、形状的认知为基础的。图像由 RGB 空间到 HSV 空间的变换可以参见文献[10]。为了提高计算速度, 需要根据色彩的不同范围对 HSV 空间进行适当的量化, 这里参考文献[10]选取 72 个量化等级, 并计算平均面积直方图 H^* 。采用如下相交公式计算查询图像 Q 与数据库图像 I 的平均面积直方图相似性:

$$d_c(H^*(I), H^*(Q)) = \frac{1}{71} \min_{i=0} (H^*(I_i), H^*(Q_i)). \quad (2)$$

3.3 形状特征提取

形状特征是识别对象的关键特征。形状的描述方法主要有两类: 一类是基于边界轮廓特征的, 包括

边界直方图、方向链码、付立叶描述子等; 一类是基于区域特征的, 如不变矩^[11]方法。本文采用不变矩方法描述形状特征。设 $f(x, y)$ 表示对象的二进制图像, 定义二维离散数字图像的 (p, q) 阶矩 m_{pq} 以及中心矩 μ_{pq} 分别为

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^p y^q f(x, y), \quad (3)$$

$$\mu_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (x - \mu_x)^p (y - \mu_y)^q f(x, y), \quad (4)$$

其中

$$\mu_x = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \mu_y = \frac{m_{01}}{m_{00}}, p, q = 0, 1, 2, \dots$$

中心矩经过下述正规化处理后对图像平移与尺度变化具有不变性:

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^p}, r = \frac{p+q+2}{2}, p+q = 2, 3, \dots \quad (5)$$

利用 2 阶矩和 3 阶矩可导出以下 7 个不变矩, 用来描述区域形状特征:

- 1) $\mathcal{Q}_1 = \eta_{20} + \eta_{02}$;
- 2) $\mathcal{Q}_2 = (\eta_{20} + \eta_{02})^2 + 4\eta_{21}$;
- 3) $\mathcal{Q}_3 = (\eta_{20} - 3\eta_{22})^2 + (3\eta_{11} - \eta_{33})^2$;
- 4) $\mathcal{Q}_4 = (\eta_{20} + \eta_{12})^2 + (\eta_{11} + \eta_{33})^2$;
- 5) $\mathcal{Q}_5 = (\eta_{20} - 3\eta_{22})(\eta_{20} + \eta_{12})[(\eta_{20} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{11} + \eta_{33})^2] + (3\eta_{11} - \eta_{33})(\eta_{11} + \eta_{33})[3(\eta_{20} + \eta_{12})^2 - (\eta_{11} + \eta_{33})^2]$;
- 6) $\mathcal{Q}_6 = (\eta_{20} - \eta_{22})[(\eta_{20} + \eta_{12})^2 - (\eta_{11} + \eta_{33})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{20} + \eta_{12})(\eta_{11} + \eta_{33})$;
- 7) $\mathcal{Q}_7 = (3\eta_{22} - \eta_{20})(\eta_{20} + \eta_{12})[(\eta_{20} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{11} + \eta_{33})^2] + (3\eta_{11} - \eta_{33})(\eta_{11} + \eta_{33})[3(\eta_{20} + \eta_{12})^2 - (\eta_{11} + \eta_{33})^2]$;

这样, 如果二进制表示的对象的区域由特征向量 $M = (\mathcal{Q}_1, \mathcal{Q}_2, \mathcal{Q}_3, \mathcal{Q}_4, \mathcal{Q}_5, \mathcal{Q}_6, \mathcal{Q}_7)$ 表示, 则查询图像 Q 与数据库图像 I 的区域形状特征相似性按下式计算:

$$d_s(M(I), M(Q)) = \left[\sum_{i=1}^7 (\mathcal{Q}_i - \mathcal{Q}_i')^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

4 基于模糊逻辑的相似性匹配

4.1 数据规范化

图像的色彩、形状特征由不同的计算方法得到, 并且具有不同的物理意义, 因此需要对其进行数据规范化。本文借助高斯规范化方法, 按下式将这些特征映射到区间 $[0, 1]$:

$$F' = \left[\frac{F - m}{3\sigma} + 1 \right] / 2, \quad (7)$$

其中: m 是特征 F 的平均值, σ 是特征 F 的标准差 3σ 法保证了 99% 的图像特征 F 可以落在区间 $[0, 1]$ 之内 对于区间以外的值, 可根据式 (7) 直接变换为 $0 (< - 1)$ 或者 $1 (> 1)$. 由式 (2) 可见, d_c 越接近 1, 两幅图像的色彩越相似 然而, 本文设计的模糊推理假设两幅图像的色彩差距越接近 100%, 则越不相似 因此, 需要对 d_c 进行适当的转换:

$$d_c = d_c - 1 \quad (8)$$

4.2 图像相似度模糊推理系统

人们判断图像相似性的一般经验是: 两幅图像的色彩或形状的差别在 30% 以内, 可以认为是非常相似的; 在 40% ~ 50% 以内可认为是相似的; 60% ~ 90% 之间可认为不相似 根据这些经验, 建立色彩和形状相似度的隶属度函数 输入变量“色彩相似度”与“形状相似度”均采用 3 个模糊语言变量“很相似”、“相似”、“不相似”描述 与之对应的隶属度函数分别采用高斯型隶属度函数, 联合高斯型隶属度函数和高斯隶属度函数 系统输出“图像相似度”也采用相同的 3 个模糊语言变量描述, 相应的隶属度函数分别采用高斯型隶属度函数, 联合高斯型隶属度函数和高斯隶属度函数

在获得了色彩、形状相似度的模糊描述之后, 根据用户对对象的认知与相关先验知识, 可建立一个由 9 条规则组成的模糊推理规则库, 对图像的相似度进行推理 规则的权重则反映了用户对该条推理规则正确性的把握程度 模糊推理采用 Max-Min 规则, 解模糊化采用面积重心 (COG) 法 模糊关系矩阵 R 由下式确定:

$$R = (d_c \times d_s) \times S \quad (9)$$

其中: d_c 和 d_s 是系统的两个输入: 色彩相似度与形状相似度; S 是系统输出的图像相似度 规则库中的每条规则蕴含了用户对检索对象的色彩、形状特征可能的变化范围的认知 这里分别针对色彩、形状变化较大; 色彩、形状变化较小; 色彩变化较大, 形状变化较小; 色彩变化较小, 形状变化较大 4 种情形, 建立 4 个一般模糊推理规则库, 供用户检索时选择使用 特征变化范围相似的对象, 可以适用相同的规则库, 从而使得模糊检索系统对不同类别的图像具有良好的鲁棒性 同时, 也可利用模糊规则表达用户的主观感知 下面给出一个检索实例

用户 A 想检索所有形状和色彩与图 3 左上角所示 5.jpg 相似的图像, 即所有的花朵图像 因此他认为与 5.jpg 图像相比, 如果某一图像与之色彩相似, 形状很相似, 则这幅图像便是相似图像 根据该用户的认知和检索需求, 建立如表 1 所示的规则库 而用

户 B 只想检索与 5.jpg 色彩十分相似的图像, 即红色系的花朵图像 因此他会认为与 5.jpg 色彩相似, 形状很相似的图像并非相似图像, 而只有那些色彩非常相似的花朵图像才满足其检索要求 根据用户 B 的需求, 建立如表 2 所示的规则库 两个规则库规则的不同是由于用户需求差异造成的, 它体现了用户的主观感知差异

表 1 用户 A 使用的模糊推理规则

| 规则 | 输入 | | 输出 | 权重 |
|----|-------|-------|-----|-----|
| | d_c | d_s | S | |
| 1 | 很相似 | 很相似 | 很相似 | 1 |
| 2 | 很相似 | 相似 | 相似 | 1 |
| 3 | 很相似 | 不相似 | 不相似 | 1 |
| 4 | 相似 | 很相似 | 相似 | 0.3 |
| 5 | 相似 | 相似 | 相似 | 0.5 |
| 6 | 相似 | 不相似 | 不相似 | 1 |
| 7 | 不相似 | 很相似 | 相似 | 0.5 |
| 8 | 不相似 | 相似 | 不相似 | 1 |
| 9 | 不相似 | 不相似 | 不相似 | 1 |

表 2 用户 B 使用的模糊推理规则

| 规则 | 输入 | | 输出 | 权重 |
|----|-------|-------|-----|-----|
| | d_c | d_s | S | |
| 1 | 很相似 | 很相似 | 很相似 | 1 |
| 2 | 很相似 | 相似 | 相似 | 0.5 |
| 3 | 很相似 | 不相似 | 不相似 | 1 |
| 4 | 相似 | 很相似 | 不相似 | 1 |
| 5 | 相似 | 相似 | 相似 | 0.6 |
| 6 | 相似 | 不相似 | 不相似 | 1 |
| 7 | 不相似 | 很相似 | 很相似 | 1 |
| 8 | 不相似 | 相似 | 不相似 | 1 |
| 9 | 不相似 | 不相似 | 不相似 | 1 |

图 3 给出了系统提供给用户 A (上半部分) 和用户 B (下半部分) 的检索结果 很明显, 系统满足了用户 A, B 的检索要求: 用户 A 检索到了红色、黄色、紫色与粉色花朵图像; 用户 B 则检索到了红色为主的花朵图像 在模糊推理过程中, 这 9 条规则隐含地解决了图像色彩、形状特征的权重分配问题, 无需用户直接给出具体的分配取值, 从而降低了用户的检索难度 采用这 9 条规则进行模糊推理, 能够对图像色

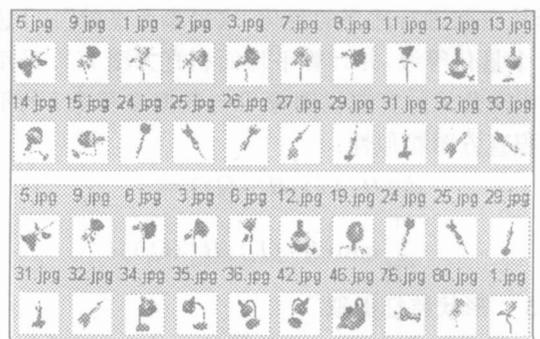


图 3 用户 A (上半部分), 用户 B (下半部分) 的检索结果

彩、形状特征分布的 9 种情形并行处理, 综合推理, 给出一个比较合理的结果。而在线性权重分配方式中, 每次只能处理某一种固定的特征分配模式。

5 实验结果

5.1 图像预处理

本文实验数据库由 400 幅 30 类人造对象真彩色图像构成。在提取图像色彩特征时, 首先要将图像由 RGB 真色彩转换到 HSV 色彩空间, 然后对其建立平均面积直方图。为了提取对象区域形状, 首先应用 Sobel 算子检测对象边缘, 然后用种子填充消除对象内部的空洞以获得对象区域, 再使用不变矩方法提取其形状特征。实验包括两部分: 一是平均面积直方图检索; 二是基于模糊逻辑的图像检索。

5.2 检索性能

查准率 (Precision) 和查全率 (Recall) 是评估检索算法性能的两个通用准则。记与查询图像相关的图像为 {Relevant}, 系统检索出的一组图像为 {Retrieved}, 既相关又有被检索出的图像为 {Relevant} ∩ {Retrieved}。查准率是指实际检索到的图像中与查询相关的图像所占的比例, 其形式定义为

$$\text{Precision} = \frac{|{\text{Relevant}} \cap {\text{Retrieved}}|}{|{\text{Retrieved}}|} \quad (10)$$

查准率反映了系统拒绝无关图像的能力。查全率是指与查询相关的, 并被实际检索出的图像所占的比例, 其形式定义为

$$\text{Recall} = \frac{|{\text{Relevant}} \cap {\text{Retrieved}}|}{|{\text{Relevant}}|} \quad (11)$$

查全率反映了系统检索相关图像的能力。查准率和查全率越高, 说明该检索算法的效果越好。

为验证平均面积直方图检索方法的有效性, 在 HSV 空间建立图像的平均面积直方图, 并采用式 (2) 比较直方图。图 4 给出了平均面积直方图与传统直方图在 HSV 空间的检索性能比较。实验结果表明, 平均面积直方图的检索性能优于传统直方图, 在 HSV 空间内其平均检索性能提高了 16%。

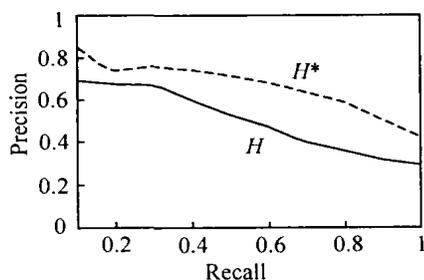


图 4 传统直方图与平均面积直方图的检索性能比较

当使用模糊系统检索图像时, 用户需根据检索对象的色彩与形状特征的变化范围情形, 从 4 个规则库中选择其一进行检索。并可通过调整规则的权重表达个性化的查询需求。图 5 给出了本系统的查准率-查全率检索性能曲线。实验表明, 系统获得了较好的检索性能。

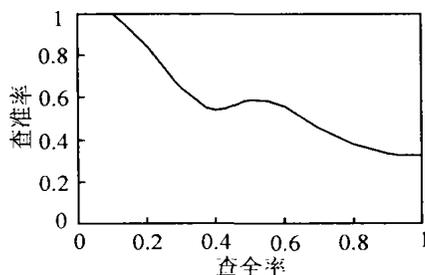


图 5 模糊图像检索系统查全率-查准率

通过实验可以发现, 本文所提出的模糊系统对检索人造对象图像比较有效, 而对非人造对象的检索效果不是很理想, 如自然景色等。这主要是由于本文的检索系统建立在用户对色彩与形状的感知基础之上。而形状特征的提取在图像检索中一直是比较困难的课题之一, 现有方法普遍与人的感知存在一定的差距。因此, 造成了系统的模糊规则与实际提取的低层形状特征之间的差距, 进而影响了检索性能。而人造对象一般具有比较明确的形状边缘, 易于使用现有方法提取和描述, 并且提取的形状特征与用户的感知也更趋于一致。非人造对象, 一般包含多个对象, 缺乏具体的形状, 用户难以对其进行描述、比较, 导致检索性能不理想。

6 结 语

本提出了一个基于色彩、形状特征的模糊图像检索系统。基于用户对对象的感知和先验知识, 建立模糊规则进行图像检索。模糊规则隐含地为图像特征分配权重, 并能较好地表达用户的主观感知。基于 400 幅人造对象图像数据库的仿真实验结果表明, 本文提出的模糊检索机制获得了较好的检索性能。

由前述分析可见, 模糊规则的有效性, 取决于特征的抽取方式与用户感知之间的一致性, 因此寻求更有效的形状特征提取方式是提高本系统检索性能的有效途径之一。

参考文献 (References)

- [1] Kulkarni S, Vemba B. Fuzzy Logic Based Texture Queries for CB IR [A]. *Proc of the 5th Int Conf on Computational Intelligence and Multimedia Applications* [C]. Xi'an, 2003: 223-228.

(下转第 1369 页)

μ_i^*), $z_1, \dots, z_p, \theta, \tilde{P}, \epsilon, \tilde{\Theta}, \tilde{\lambda}, \tilde{\eta}, \zeta_h \quad L$. 采用文[5]中定理 1 的方法即可证得定理 1.

6 结 语

针对含有输入未建模动态的一类 M M O 系统, 在高频增益矩阵的顺序主子式的符号已知的前提下, 给出了多变量自适应反推控制器的设计和分析. 但仍有一些问题值得深入研究, 比如如何找出更多的矩阵分解形式, 比较各种分解对参数化系统模型和设计控制器的优缺点; 如何在更弱的条件下设计和分析多变量自适应反推控制器等.

参考文献(References)

- [1] Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P V. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M]. New York: Wiley, 1995.
- [2] Ling Y, Tao G. Adaptive Backstepping Control Design for Linear Multivariable Plant [A]. *Proc of IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Kobe, 1996: 2438-2443.
- [3] Mai A K, Costa R R, Hsu L, et al. Multivariable MRAC Using High Frequency Gain Matrix Factorization [A]. *Proc of 40th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Orlando, 2001: 1193-1198.
- [4] Costa R R, Hsu L, Mai A K, et al. Adaptive Backstepping Control Design for M M O Plants Using Factorization [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Archoage, 2002: 4601-4606.
- [5] Wu Z J, Xie X J, Zhang S Y. Robust Decentralized Adaptive Stabilization for a Class of Interconnected Systems with Unmodeled Dynamics [J]. *Int J of Systems Science*, 2004, 35(7): 389-404.
- [6] Banerjee M, Kundu M K. Content Based Image Retrieval with Fuzzy Geometrical Features [A]. *Proc of the 12th IEEE Int Conf on Fuzzy Systems* [C]. St. Louis, 2003, 2: 932-937.
- [7] Qian R J, Van Beek P J L, Sezan M I. Image Retrieval Using Blob Histograms [A]. *IEEE Int Conf on Multimedia and Expo* [C]. New York, 2000, 1: 125-128.
- [8] Lim S, Lu G. Spatial Statistics for Content Based Image Retrieval [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Information Technology: Computers and Communications* [C]. Las Vegas, 2003: 159-155.
- [9] Chan Y K, Chen C Y. Image Retrieval System Based on Color-complexity and Color-spatial Features [J]. *J of Systems and Software*, 2004, 71(1-2): 65-70.
- [10] 曹莉华, 柳伟, 李国辉. 基于多种主色调的图像检索算法研究与实现 [J]. *计算机研究与发展*, 1999, 36(1): 96-100.
- [11] Ezer N, Anarim E, Sankur B A. Comparative Study of Moment Invariants and Fourier Descriptors in Planar Shape Recognition [A]. *Proc of the 7th Mediterranean Electro Technical Conf* [C]. Antalya, 1994: 242-245.
- [12] 缪国平. 帆船运动的力学原理 [J]. *力学与实践*, 1994, 16(1): 7-18.
(Miu G P. Dynamics Theory for Steering a Sailboat [J]. *Lixue Yu Shijian*, 1994, 16(1): 7-18.)
- [13] Flay R G J, Vuletich I J. Development of a Wind Tunnel Test Facility for Yacht Aerodynamic Studies [J]. *J of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, (58): 231-258.
- [14] 庄晓东, 孟庆春, 殷波, 等. 动态环境中基于模糊概念的机器人路径搜索方法 [J]. *机器人*, 2001, 23(5): 397-399.
(Zhuang X D, Meng Q C, Yin B, et al. A Method of Robot's Path Searching in Dynamic Environment Based on Fuzzy Concept [J]. *Robot*, 2001, 23(5): 397-399.)
- [15] 田清钧. 帆板运动的力学探讨 [J]. *天津师大学报* 1996, 16(2): 26-29.
(Tian Q J. A Mechanical Analysis of Headwind Sailing [J]. *J of Tianjin Normal University*, 1996, 16(2): 26-29.)

(上接第 1359 页)

(上接第 1364 页)