

多粒度的图像检索方法研究

郭庆文^{1,2} 王国胤^{1,2} 张清华^{1,3}

(重庆邮电大学计算智能重庆市重点实验室 重庆 400065)¹

(重庆邮电大学计算机科学与技术研究所 重庆 400065)² (重庆邮电大学数理学院 重庆 400065)³

摘 要 从商空间粒度理论角度分析了图像检索的过程,给出了基于商空间的多粒度图像检索方法。首先根据等价关系 R (即图像主色的连通性)将图像划分为不同的区域,然后分别从颜色、形状、空间分布等不同的粒度提取区域的特征属性,利用商空间多粒度属性函数合成思想,将每个粒度下的属性函数合成,形成图像的特征向量,再根据此特征向量计算图像之间的相似度进行检索。实验结果表明,多粒度属性函数合成的检索方法要明显优于单一属性函数下的检索方法;与 MTH 方法和颜色体积直方图方法相比,其能够更加准确和高效地查找出用户所需要内容的图像,明显地提高了检索精度。

关键词 商空间,属性函数合成,粒计算,图像检索
中图法分类号 TP391 文献标识码 A

Research on Multi-granularity Image Retrieval Method

GUO Qing-wen^{1,2} WANG Guo-yin^{1,2} ZHANG Qing-hua^{1,3}

(Chongqing Key Laboratory of Computational Intelligence, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)¹

(Institute of Computer Science & Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)²

(College of Mathematics & Physics, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)³

Abstract Based on the quotient space and granular computing theory, the image retrieval process was analyzed, and then the method of multi-granularity image retrieval based on quotient was proposed. With the proposed method, an image was divided into different regions based on the equivalent relation R (i. e., connectivity of image's dominant color) and features of different regions in different granularity levels of color, shape, spatial information were extracted respectively, and then the synthetic feature was obtained by composing the attribute functions in different granularity levels based on the theory of composing multi-granularity attribute functions in the quotient space. Finally, the images were retrieved images by the synthetic feature. Experimental results indicate that the proposed method is superior to the method based on single attribute, MTH and the color volume histogram method.

Keywords Quotient space, Composite attribute function, Granular computing, Image retrieval

1 引言

随着互联网信息迅速膨胀,图像数据量与日俱增,使得基于内容的图像检索成为当今计算机领域研究的热点。基于内容的图像检索主要根据图像的底层特征(如颜色、纹理、形状和空间分布信息等)来进行检索。颜色是彩色图像最显著的特征,能够提供丰富的信息,同时颜色特征稳定性好,对图像的缩放、平移、旋转均不敏感。所以颜色特征颇受研究者的青睐,是图像检索中应用最为广泛的视觉特征。常见的颜色特征描述方法主要有颜色直方图、颜色聚合向量、颜色相关图和颜色集^[1-5]。每种底层特征都有局限性,对某一类型图像有着较好的检索效果,而对其他类的图像检索效果未必理想。所以在图像检索中,需要将图像的多种底层特征融合在一起才

能得到更好的图像检索效果^[6,7]。

本文把商空间理论中粒度的选择与调整以及属性函数合成理论应用到图像检索过程之中,提出了多粒度的图像检索算法并取得了较好的检索效果,为图像检索提供了一个新的思路。

本文第 2 节介绍了商空间粒度计算理论;第 3 节用商空间理论对图像检索过程进行分析,并给出了基于商空间多粒度属性函数合成的图像检索算法;第 4 节中通过实验验证了多粒度检索的优势;最后对全文进行了总结。

2 商空间粒度计算理论

张铃、张钊在文献[8]中首次提出并全面系统地阐述了商空间理论。目前该理论已被成功地应用到图像分割、图像检

到稿日期:2012-04-11 返修日期:2012-07-18 本文受国家自然科学基金项目(61073146,61272060),重庆市教委科学技术研究项目(KJ110512),重庆市自然科学基金项目(cstc2012jjA40047)资助。

郭庆文(1986—),男,硕士生,主要研究方向为智能信息处理、图像检索等,E-mail:guoqingwen1011@163.com;王国胤(1970—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为智能信息处理、Rough 集理论、数据挖掘等;张清华(1974—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为 Rough 集理论、粒计算等。

索、路由规划、遥感图像分析等领域^[9-12]。许相莉等人^[10]首次将商空间理论应用到图像检索领域,他们分别提取图像的全局颜色特征和局部颜色特征,然后进行属性合成,利用合成后的属性函数完成检索。但是文献^[10]仅提取了不同粒度下的颜色属性,忽略了颜色的空间分布信息。本文首先在论域层次下定义了几种不同的粒度,然后从论域下的粒度世界跳到属性层次下的粒度世界,分别提取4种不同粒度下的颜色特征、形状特征、空间分布信息特征并进行属性合成。合成后的属性函数较全面地捕获了图像的信息,取得了比较理想的效果。下面介绍商空间理论中的一些重要概念。

2.1 商空间的定义

用三元组 (X, f, T) 描述一个复杂问题。其中 X 表示问题的论域; f 表示是属性函数,可以是单值也可以是多值的; T 表示论域的结构,即论域 X 中各元素的相互关系。

一个问题 (X, f, T) 和一个等价关系 R 给定之后,如何定义商空间 $([X], [f], [T])$ ^[8]。

$[X]$: $[X]$ 定义为 X 对应等价关系 R 的商集。

$[T]$:设 T 是拓扑,则定义商拓扑 $[T]:\{u|p^{-1}(u) \in T, u \in [X]\}$, $p: X \rightarrow [X]$ 是自然投影。

$[f]$:设属性函数 $f: X \rightarrow Y$,定义 $[f]: [X] \rightarrow Y$ 。

这样就得到一个新问题 $([X], [f], [T])$,称 $([X], [f], [T])$ 是问题 (X, f, T) 对应等价关系 R 的商空间,其中 R 对应于一定的粒度。

这里一个很重要的概念就是粒度。不同的粒度对应不同的细节,包含了图像不同侧面的信息。论域 X 的不同粒度对应 X 上不同的划分,即 X 上不同的等价关系。

2.2 等价关系与划分

等价关系是拓扑学的基本概念,是商空间粒度计算的关键。

定义1^[9] 设 R 是 X 上的关系,并满足:

- (1) $\Delta(X) = \{(x, x) | x \in X\} \subset R$ (自反性);
- (2) $R = R^{-1}$ (对称性);
- (3) $R \circ R \subset R$ (传递性)。

称 R 是 X 上的一个等价关系, x 的一个等价类表示为 $[x]_R = \{y | yRx, y \in X\}$,等价类的集合构成 X 的一个划分。

一个等价关系 X 就对应论域中的一个粒度,不同的粒度反映了论域不同侧面的信息,为了获取论域更深刻的信息,必须对粒度进行调整。

2.3 粒度的调整

粒度的调整主要有两种方法:合并法和分解法。这里主要介绍粒度的合并法。

定义2^[13] 给定半序空间 (X, T) 及等价关系 R ,令 R 对应的商空间为 $([X], [T])$,若 $([X], [T])$ 也是半序空间,则称 R 是相容的。

合并法得到的等价关系 \underline{R} 满足(1) $\underline{R} < R$; (2) \underline{R} 是相容的; (3) \underline{R} 具有最大性,也即 \underline{R} 是把 R 的划分合并,达到对应的商空间是半序的、粒度最细的一个,即具有等价划分个数的最大性。

将粒度 G_1 和粒度 G_2 进行合并,得到一个较粗的粒度 G_3 ,虽然粒度 G_3 损失了粒度 G_1 和粒度 G_2 中的一些信息,但是粒度 G_3 却融合了粒度 G_1 和粒度 G_2 中的主要信息,具有更好的代表性,从而可以更全面地表示图像的特征。

2.4 合成技术

设 (X_1, f_1, T_1) 和 (X_2, f_2, T_2) 是对象 $A = (X, f, T)$ 的两个不同层次的了解,则 (X_1, f_1, T_1) 与 (X_2, f_2, T_2) 的合成定义为 (X_3, f_3, T_3) ,它是 A 的某个层次,且满足如下条件^[8]:

- (1) X_1, X_2 是 X_3 的商空间;
- (2) T_1, T_2 是 T_3 对应于 X_3 上的商结构;
- (3) f_1, f_2 是 f 在 X_1, X_2 上的投影,且 (X_3, f_3, T_3) 满足一些最优准则。

合成的最优准则往往与所涉及的领域有关,在许多实际问题中,这种衡量最优的原则很难确定,所以通常情况下要求其解大体满意就行了^[8]。

合成技术主要包括:论域的合成、拓扑结构的合成和属性函数的合成。在图像检索领域中,属性函数的合成具有更强的直观性和实用性。下节介绍基于商空间的图像检索方法。

3 基于商空间理论的图像检索

基于内容的图像检索过程主要分为图像预处理、特征矩阵的提取、相似性度量等阶段。本节首先介绍图像的预处理,然后用商空间理论对图像检索过程进行描述并将商空间理论应用到特征矩阵的提取,提出了基于商空间的多粒度图像检索算法。图1所示为多粒度图像检索算法流程图。

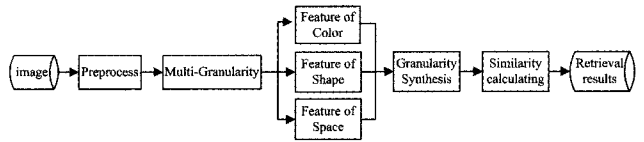


图1 算法的流程图

3.1 图像的预处理

颜色有很多种表示方式,其中最常用的有RGB颜色模型和HSV颜色模型。与RGB颜色模型相比,HSV颜色模型更符合人眼感知特性,所以文中把图像转化到HSV颜色空间上进行特征提取。

颜色的种类不计其数,而人类眼睛能分辨的颜色种类是有限的,所以我们把颜色从细粒度量化到粗粒度,这样可以减少颜色的种类,从而可以节约存储空间,同时提高计算效率。本文将HSV颜色空间非均匀量化成72维,即色调(H)8维,饱和度(S)和亮度(V)各3维,最后将3个分量合成到1维特征矩阵:

$$G = \delta_s * \delta_v * H + \delta_v * S + V$$

式中, δ_s 和 δ_v 分别是分量S和V的量化级数,本文中 $\delta_s = 3$, $\delta_v = 3$,所以有 $G = 9H + 3S + V$ 。

一幅图像一般都是由几种主要颜色构成,对上面合成的1维特征矩阵进一步取粗粒度,提取图像的主色调^[14]。在特征提取阶段只考虑图像的主色调值,这样就节省了图像特征矩阵的存储空间和检索时间。

3.2 图像检索的商空间描述

设集合 X 代表图像库, X_q 代表示例图片,并且 $X_q \in X$ 。图像检索的实质就是由 X_q 构造等价关系 R ,然后根据 R 将图片库 X 划分成2个满足下面条件的子集 X_r, X_{nr} :

- (1) $X = X_r \cup X_{nr}$;
- (2) $X_r \cap X_{nr} = \emptyset$;
- (3) $X_r = \{y | yRx, y \in X\}$ 。

其中, X_r 是与 X_q 相关的图片集合,即我们检索时返回的

图像。

用三元组 $A=(X, f, T)$ 表示图像库, 用 $([X], [f], [T])$ 描述一次检索的结果。图像检索过程就是实现粒度 $(X, f, T) \rightarrow ([X], [f], [T])$ 的变换, 这个过程对应的等价关系就是图像特征矩阵的相似性。

3.3 不同粒度下的图像特征提取

首先构造一个等价关系 R , 我们认为像素的颜色值相等并且 8-邻域下相邻就构成一个等价关系 R 。等价关系 R 将图像由细粒度转化到粗粒度, 即图像的特征矩阵被划分成不同的区域块, 区域块内像素点的颜色值相同并且在 8-邻域下相邻。假设 (X_i, f_i, T_i) 表示图像库中任意一幅图像, 则 $(X_i, f_i, T_i) \rightarrow (X_i', f_i', T_i')$, 其中粒度 X_i' 为图像中颜色值相等并且在 8-邻域下相邻的连通区域, f_i' 为连通区域的颜色值, T_i' 为连通区域之间的位置关系。

针对某个区域块, 从属性层面下不同的粒度考虑, 区域的特征可分为颜色特征、形状特征、空间分布信息特征等。颜色特征是由区域的颜色值和像素个数决定的; 区域块的离心率在在一定程度上可以反映出区域的形状特征; 区域的质心坐标和质心角度代表了区域的空间分布信息。

(1) 离心率^[15]: $e = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}$, 离心率是连通区域最适椭圆的短、长轴之比。

(2) 质心坐标: 连通区域质心的归一化坐标表示为: $\bar{X}_i = \frac{\sum_{x \in X_i} x}{N_i}$, $\bar{Y}_i = \frac{\sum_{y \in Y_i} y}{N_i}$, 其中 X_i, Y_i 是颜色值为 C_i 的像素点的坐标, N_i 是颜色值为 C_i 的像素总数。

(3) 质心角度: 质心角度就是连通区域的质心和图像质心所在直线与起始直线之间的角度, 可以表示为: $A_i = \arctan\left(\frac{\bar{X}_i - \bar{X}}{\bar{Y}_i - \bar{Y}}\right)$, (\bar{X}, \bar{Y}) 是图像的质心坐标。

商空间 (X_i', f_i', T_i') 的论域 X_i' 中的某个元素 (即特征矩阵 G 中的某个区域) 的属性特征可以进一步细化为颜色特征、形状特征和空间位置特征。区域的各个属性特征 (即属性函数) 在不同的侧面表达了区域的特征, 为了获得区域较全面的信息, 需要对区域的属性函数进行合成。

3.4 多粒度合成

首先从论域层面定义几种粒度。

(1) 1_粒度: 论域 $X^1 = \{x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1\}$, 其中 n 的值是主色调的种类, x_i^1 表示第 i 种主色在等价关系 R 下的最大连通区域。

(2) k _粒度: 论域 $X^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k\}$, 其中 n 的值是主色调的种类数, k 为正整数, x_i^k 表示第 i 种主色在等价关系 R 下的前 k 个连通区域的集合。

人工智能的一个公认特点, 就是人们能从极不相同的粒度上观察和分析同一个问题。人们不仅能在不同粒度的世界上进行问题求解, 而且能够很快地从一个粒度世界跳到另一个粒度世界, 往返自如, 毫无困难。这种处理不同粒度世界的的能力, 正是人类问题求解的强有力的表现^[8]。下面从论域层面的粒度世界跳转到属性层面的粒度世界, 分别对上述论域层面的粒度从属性层面 (如颜色, 形状, 空间位置信息等) 进行进一步的细化, 具体划分过程如下。

(1) 按颜色特征粒度进行商空间划分, 得到对应的商空间为 (X_1, f_1, T_1) , 其中 X_1 为图片中的连通区域, T_1 为连通区

域间主色相似性关系结构, f_1 为连通区域的颜色和所包含的像素个数。

(2) 按形状特征粒度进行商空间划分, 得到对应的商空间为 (X_2, f_2, T_2) , 其中 X_2 为图片中的连通区域, T_2 为连通区域间形状相似性关系结构, f_2 为连通区域的离心率。离心率可以反映连通区域的大致形状, 并且具有旋转不变性。

(3) 按空间分布特征粒度进行商空间划分, 得到对应的商空间为 (X_3, f_3, T_3) , 其中 X_3 为图片中的连通区域, T_3 为连通区域间位置的相似性关系结构, f_3 为连通区域质心的位置。连通区域质心的位置是由质心坐标和质心角度共同决定的。

不同的粒度从不同的角度反映了图像的特征, 仅仅从单个粒度去分析图像获取的特征不够全面, 通用性不好。对图像进行基于商空间的多粒度属性函数合成, 可以更大程度地、全面地获取图像自身提供的信息。

本文中对不同粒度下的属性函数加权求和, 得到合成后的属性函数 $f_4 = \omega_1 * f_1 + \omega_2 * f_2 + \omega_3 * f_3$ 。针对不同类型的图像库, 可以灵活改变 ω 的值, 为用户提供了更大的查询灵活性, 同时可以与相关反馈技术^[16,17] 结合起来, 进一步提高查询精度。在基于内容的图像检索领域, 目前为止没有标准的图像库^[18], 不同类型的图像库千差万别, 很难给出统一的合成最优准则。针对 Corel 标准图片库, 本文实验中取 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \frac{1}{3}$ 。下面介绍图像间的相似性度量方法。

3.4 相似性度量

令 C_q 为示例图像的主色集合, 即 $C_q = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, n 为示例图片的主色总数; C_d 为图像库中任意一幅图像的主色集合, 即 $C_d = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, m 为图片的主色总数。对于 $\forall C_i \in C_q, i=1, 2, \dots, n, C_k \in C_d, k=1, 2, \dots, m$, 令 C_{k_i} 是 C_d 中与 C_i 差值最小的主色值。

相似性度量函数 $S(Q, D) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_4(i) - f_4(k_i)|$, 其中 $f_4(i)$ 表示示例图像的第 i 种主色的连通区域的合成属性函数, $f_4(k_i)$ 表示图像库中图像的第 k_i 种主色的连通区域的合成属性函数, n 为示例图像主色的个数。一般 $S(Q, D)$ 与 $S(D, Q)$ 的值是不同的, 最终的相似性度量函数为 $S_{q,d} = \frac{S(Q, D) + S(D, Q)}{2}$ 。

4 实验结果及分析

实验使用 Corel 标准图片库, 该图像库共计 1000 幅图像 (编号分别为 0~999), 共包含非洲、海滩、建筑、公共汽车、恐龙、花、大象、马、食物和山脉 10 个语义类, 每个类别包含 100 幅图片。本文采用查准率和查全率来衡量图像检索的性能。查准率 (precision) 是相似图片数目与检索出的所有图片数目的比率, 查全率 (recall) 是相似图片数目与图像库中相似图像总数的比率, 它们的定义如下:

$$P(N) = \frac{I_N}{N}, R(N) = \frac{I_N}{M}$$

式中, I_N 是界面上相似图片的总数, N 是界面返回的图像数目, M 是图像库中相似图像的数目。目前的搜索引擎系统都非常关心查准率, 即是否为用户提供了相关度高的、高质量的导航信息。

图2—图5中的第一个图像(标号为‘query’的图像)为示例图像,其余的是检索返回的图像。图2所示内容是在1粒度下颜色特征属性的检索结果,称为单一颜色特征粒度的检索结果;图3—图5所示内容分别是在上文所提到的论域层面上的1、2、3粒度对颜色特征粒度、形状特征粒度、空间信息分布粒度合成后的检索结果,文中分别用1_粒度检索结果、2_粒度检索结果、3_粒度检索结果表示。可以看到,图2中有6幅不相关的图片;图3中有3幅不相关的图片;图4中有2幅不相关的图片;图5中全部为相关图片。从图3—图5中可以直观地看出多粒度图像检索效果比单一粒度下的检索效果要好。这是因为多粒度图像检索融合了图像不同粒度的信息,能够更全面、客观地代表图像的特征。

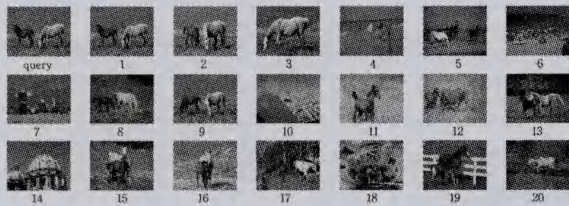


图2 单一颜色特征粒度的检索结果

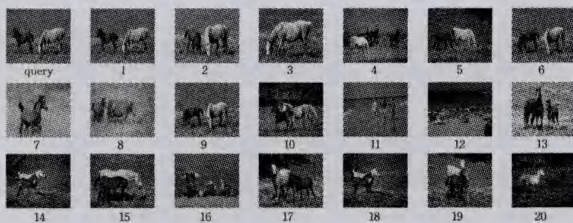


图3 1_粒度的检索结果

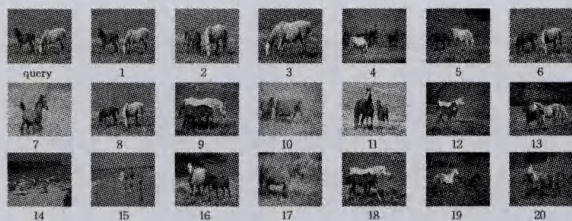


图4 2_粒度的检索结果

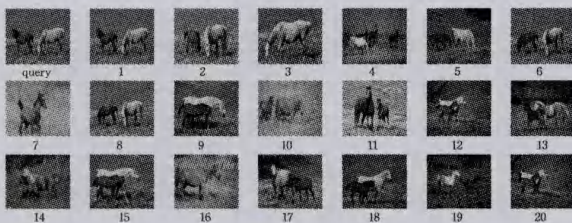


图5 3_粒度的检索结果

为了进一步证明本算法的有效性,将多粒度检索方法与MTH方法^[19]、颜色体积直方图方法^[20]进行了比较。实验中界面返回的图像数目 $N=30$, 图像库中相似图像总数 $M=100$ 。表1的实验数据显示了上文提到的几种粒度和MTH方法、颜色体积直方图方法的检索性能。表1中的数据显示,4粒度的检索效果最好,4粒度与MTH方法颜色体积直方图相比,查准率分别提高了5.67%和7.54%。MTH方法和颜色体积直方图方法在一定程度上捕获了图像的颜色和空间分布信息,是对传统颜色直方图的改进,但无法充分表达彩色图

像的局部信息。而多粒度图像检索方法不仅在属性层面上融合了图像颜色、形状、空间特征,而且在论域层面上融合了不同的粒度,更好地捕获了图像的全局和局部特征,取得了较好的检索效果。

表1 检索性能数据

方法	查准率	查全率
颜色体积直方图	49.13%	14.74%
MTH	51.00%	15.30%
单一颜色粒度	33.70%	10.11%
1_粒度	54.53%	16.36%
2_粒度	56.03%	16.81%
3_粒度	56.47%	16.94%
4_粒度	56.67%	17.00%

本实验的硬件配置为 AMD 2.61GHz 的双核 CPU, 2G 内存, 操作系统为 Windows XP 的台式机, 检索系统采用 MATLAB 2009 开发。

结束语 本文立足于图像检索中的商空间属性合成原理,对多粒度下的属性函数进行合成,提出了多粒度图像检索方法,并在 corel-1000 图像库上进行实验。实验结果表明,多粒度检索能够更好地返回用户所需要的图像。为了进一步验证本算法的有效性,与 MTH 方法、颜色体积直方图方法进行了比较,实验结果表明,本文方法的检索性能优于 MTH 方法和颜色体积直方图。我们将在下一步工作中研究属性粒度上合成的最优化准则问题。

参考文献

- [1] Swain M J, Ballard D H. Color Indexing[J]. International Journal of Computer Vision, 1991, 7(1): 11-32
- [2] Pass G, Zabih R. Histogram refinement for content-based image retrieval[C]// Applications of Computer Vision, 1996. WACV'96. Proceedings 3rd IEEE Workshop. 1996: 96-102
- [3] Huang J, Kumar S R, Mitra M, et al. Image indexing using color correlograms[C]// Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceeding 1997 IEEE Computer Society Conference. 1997
- [4] Smith J R, Chang S. Tools and Techniques for Color Image Retrieval[C]// SPIE. 1996
- [5] Manjunath B S, Ohm J, Vasudevan V V, et al. Color and Texture Descriptors[J]. IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology, 2001, 11(6): 703-715
- [6] 李向阳, 庄越挺, 潘云鹤. 基于内容的图像检索技术与系统[J]. 计算机研究与发展, 2001, 38(3): 344-354
- [7] 茹立云, 彭潇, 苏中, 等. 基于内容图像检索中的特征性能评价[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(11): 1566-1570
- [8] 张铃, 张钺. 问题求解理论及应用(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007
- [9] 刘仁金, 黄贤武. 图像分割的商空间粒度原理[J]. 计算机学报, 2005, 28(10): 1680-1685
- [10] 许相莉, 张利彪, 于哲舟, 等. 基于商空间粒度计算的图像检索[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(Suppl.): 337-342
- [11] 李旻, 刘建中, 丁仁源, 等. 基于商空间粒度计算的 OSPF 网络路由仿真研究[C]// Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008: 5348-5353
- [12] Guan Ze-qun. Study on the Theory of Remotely Sensed Imagery Analysis Based on Quotient Space Description[D]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1995

(下转第 310 页)

发丝的渲染结果如图 5(d)所示。

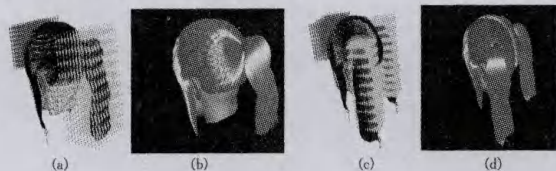


图 5 基于约束域的头发表建模和编辑

整个发型建模过程中,当生成发丝数为 40000,使用规模为 50 的发簇簇,即解决 800 根样例发丝的问题时,本文方法的发丝形变计算和全局发丝插值的过程几乎都是实时的。与现有方法,特别是采用表面网格方法相比,本文方法所提供的交互方式更加简单直观,面对复杂发型建模时省却了构建表面网格所花费的额外工作。面对任意用户(无论是否熟练),采用本文给出的实验工具进行发型建模时所花费的平均时间约为 3~5 分钟。层次多阶约束域的支持为构建更加丰富的发型提供了有效途径,同时允许用户采用约束域灵活生成头发的“波发”和“卷发”等自然形变效果。此外,本文方法允许用户针对现有发型直接进行面向约束域的发型快速编辑,进一步提高了工作效率。图 6 展示了使用本文方法构建的更多种类的发型。

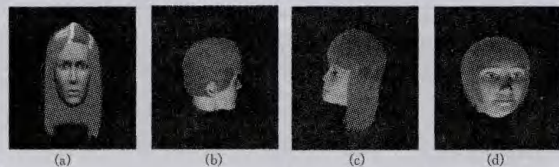


图 6 使用本文方法生成的多种头造型

结束语 本文在基于造型约束的发型建模方法的基础上,进一步提出了构建三维头造型的层次多阶约束域算法。与其它造型约束方法相比,该方法通过建立层次作用的约束域队列逐阶段控制发丝形变,提高了发型建模的速度和多样性;在建立发丝曲线 RMF 的基础上,添加了更加真实的“波发”和“卷发”等发丝细节效果。其支持面向约束域的发型快速编辑,使发型建模的工作效率得到显著提升。

值得注意的是,针对目前已经建立的真实感发型模型,尚无有效的跨模型移植方法。而本文提出的层次多阶约束域算法实际上给出了一种模块化的发型建模思路,为进一步实现发型的跨模型快速移植提供了可能。此外,尽管本文的实验结果最终都进行了简单的局部光照渲染,但其与现实世界的头发外观相比仍存在一定差距,因此进一步生成更加真实的头发渲染将是我们今后工作的一个重要方向。

参考文献

(上接第 301 页)

[13] 张燕平,张铃,吴涛. 不同粒度世界的描述法-商空间法[J]. 计算机学报,2004,27(3):328-333

[14] 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,1996,36(1):96-100

[15] Wang Tao, Rui Yong, Sun Jia-guang. Constraint Based Region Matching for Image Retrieval[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004

[16] 张磊,林福宗,张钺. 基于前向神经网络的图像检索相关反馈算法设计[J]. 计算机学报,2002,25(7):673-630

[1] Ward K, Bertails F, Kim T Y, et al. A survey on hair modeling, styling, simulation, and rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(2): 213-234

[2] Watanabe Y, Suenaga Y. A trigonal prism-based method for hair image generation[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1992, 12(1): 47-53

[3] Chen L, Saeyor S, Dohi H, et al. A system of 3d hairstyle synthesis based on the wisp model[J]. The Visual Computer, 1999, 15(4): 159-170

[4] Yang Xue-dong, Xu Zhan, Yang Jun, et al. The cluster hair model[J]. Graphics Models and Image Processing, 2000, 62(2): 85-103

[5] Kim T Y, Neumann U. Interactive multiresolution hair modeling and editing[C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2002. New York: ACM Press, 2002: 620-629

[6] Choe B, Ko H S. A statistical wisp model and pseudophysical approaches for interactive hairstyle generation[J]. IEEE Transaction Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(2): 160-170

[7] Anjiyo K, Usami Y, Kurihara T. A simple method for extracting the natural beauty of hair[C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH 1992. New York: ACM Press, 1992: 111-120

[8] Hadap S, Magnenat-Thalmann N. Interactive hair styler based on fluid flow[C]// Proceedings of the EUROGRAPHICS 2000 Workshop on Computer Animation and Simulation. New York: Springer-Verlag, 2000: 87-100

[9] Zhou Yu-yi. Modeling realistic virtual hairstyles [C]// Proceedings of the 9th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. 2001: 295-304

[10] Fu H B, Wei Y C, Tai C L, et al. Sketching Hairstyles[C]// Proceedings of the EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-based Interfaces and Modeling. Riverside, 2007: 31-36

[11] 王斌,张岩,孙正兴. 采用手绘曲线的交互式发型生成方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(11): 1569-1574

[12] Cem Y, Scott S, John K. Hair Meshes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): 1-7

[13] Wang Wen-ping, Bert J, Zheng Da-yue, et al. Computation of Rotation Minimizing Frame [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(1): 1-7

[14] Museth K, Breen David E, Ross Whitaker T, et al. Level set surface editing operators [C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2002. New York, USA: ACM Press, 2002: 330-338

[15] Kajiya J T, Kay T L. Rendering fur with three dimensional textures[C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH 1989. New York, USA: ACM Press, 1989: 271-280

[17] 吴洪,卢汉清,马颂德. 基于内容图像检索中相关反馈技术的回顾[J]. 计算机学报, 2005, 28(12): 1969-1979

[18] Liu Ying, Zhang Deng-sheng, Lu Guo-jun, et al. A survey of content-based image retrieval with high-level semantics[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(11): 262-268

[19] Liu Guang-hai, Zhang Lei, Hou Ying-kun, et al. Image Retrieval Based on Multi-Texton Histogram [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(7): 2380-2389

[20] 刘广海,吴璟莉. 基于颜色体积直方图的图像检索[J]. 计算机科学, 2012, 39(1): 273-280