

# 构建三维头发造型的层次多阶约束域算法

韩翼 李康 耿国华 刘伦椿 尚鹏

(西北大学信息科学与技术学院 西安 710127)

**摘要** 现有头发建模方法通常使用相互孤立的造型约束生成整体发型,当面对较复杂的待建发型时往往无法建立有效的造型约束。针对真实头发造型的层次性和沿发丝逐阶段形变等特点,提出控制显式发丝形变的层次多阶约束域算法,以有效解决采用造型约束交互式构建复杂发型的问题。该方法通过建立分别作用于全局和局部发簇的层次约束域队列,使用多约束域逐阶段控制样例发丝产生复杂形变。此外,结合发丝曲线的最小旋转标架(RMF)和可自定义的空间螺旋线参数方程,为发丝添加细节效果。实验结果表明,与现有方法相比,该方法能够更加有效地构建出丰富、自然的头发造型。

**关键词** 发型建模,显式发丝,层次多阶约束域,最小旋转标架

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

## Hairstyle Modeling with Layered Multistage Constraint Domain

HAN Yi LI Kang GENG Guo-hua LIU Lun-chun SHANG Peng

(School of Information Science and Technology, The Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract** The isolated styling constraints are commonly used in existing hairstyle modeling, and these methods may not work when the hairstyle to be built is complicated enough. Due to the characteristic of layered and stage-by-stage deformation along hair strand, a method of hairstyle modeling with layered multistage constraint domain was presented, by which various of complicated hairstyles can be built with styling constraints interactively. Through the establishment of global and local styling constraint queue on hair wisp, more constraints can be used to generate complicated hair strand deformation properly. Moreover, the rotation minimizing frames (RMF) of hair strand and user-defined parametric equations of space spiral are combined to add more detailed appearance. The experiment result shows that rich and natural hairstyle can be built with the method proposed effectively.

**Keywords** Hairstyle modeling, Explicit hair strand, Layered multistage constraint domain, Rotation minimizing frames

## 1 引言

头发通常是外表释放给外界的第一印象,因此也成为影视动画制作中塑造虚拟人物角色的重要手段之一。然而迄今为止,真实感的发型建模仍是一项非常复杂的工作。

造成这项复杂工作的重要原因在于,发丝建模数量级达50k~100k,其几何表示和控制方法存在随着待建发型复杂程度增加,造型工作量大幅提升的问题。近年来,研究人员相继提出了多种发丝的几何表示方法,如参数曲面等<sup>[1]</sup>。而为了进一步增强发型的真实感,需要采用显式发丝进行发型建模。该方法的首要难点在于问题规模较大,难以针对发丝形态进行有效控制。Watanabe利用真实头发成簇相似的特点,提出发丝聚簇方法(即wisp)<sup>[2]</sup>,其将均匀数量的发丝划分成较少的发簇,使用三棱柱连杆构建表示发簇的样例发丝,通过簇内发丝的相似性来减少发丝形变计算的问题规模。文献[3-6]均涉及对wisp的进一步讨论,为面向显式发丝的发型建模提供了前提条件。目前,发型建模的主要研究工作集中在发型

建模控制和细节特征(风格化)处理方面。

在生成显式发丝聚簇的基础上,研究人员提出了控制发型生成的基本模型,如Anjyo的悬臂梁模型<sup>[7]</sup>、Hadap的流体模型<sup>[8]</sup>和Yu的向量场模型<sup>[9]</sup>等,这些方法在加强用户对整体发型的控制度方面起到了一定作用。然而如果仅采用上述基本模型,缺少交互性支持,用户很难通过直观交互达到控制整体发型的目的,间接导致建模工作成本的增加。结合向量场模型,Choe提出使用造型约束控制发丝形变<sup>[6]</sup>,快速构建出几类基于显式发丝的发型。进一步,Fu等<sup>[10]</sup>和王斌等<sup>[11]</sup>选择采用手绘曲线构建发型约束,再通过插值计算约束向量场,以此为基础生成整体发型。这两种方法都采用了造型约束控制发丝形变,并实现了良好的可交互性,但是缺少对具有更多发型外观和细节特征的造型的约束支持。当待建发型较复杂时,现有造型约束失效,进而造成用户交互量和设计难度大幅提高。

在处理发丝细节特征方面,Choe采用基于样例的马尔可夫链模型<sup>[6]</sup>,提取手绘平面曲线的一段并将其还原至整根发

到稿日期:2012-03-06 返修日期:2012-06-24 本文受国家自然科学基金重点项目(60736008),国家自然科学基金项目(F010402)资助。

韩翼(1987-),男,硕士生,主要研究领域为计算机图形学、可视化技术,E-mail:hanystudy@gmail.com;李康(1980-),男,博士生,讲师,主要研究领域为可视化技术;耿国华(1954-),女,博士,教授,主要研究领域为智能信息处理、数据库与知识库、图形图像处理,E-mail:ghgeng@nwu.edu.cn(通信作者);刘伦椿(1988-),男,硕士生,主要研究领域为可视化技术;尚鹏(1986-),男,硕士生,主要研究领域为可视化技术。

丝,从而模拟出发波效果。王斌等则使用 Yu 提出的偏移函数方法模拟类似效果<sup>[11]</sup>。这两类方法都能够在一定程度上丰富发丝的细节特征。但是,一方面使用上述方法能够实现发丝细节效果比较单一,例如用户无法针对发丝的局部区间生成有效的细节效果;另一方面,除了生成二维意义上的波发以外,许多情况下还需要产生在三维空间发生扭曲的效果,例如“卷发”,而现有方法则未涉及这部分内容。

Yuksel 提出的表面网格方法是发型建模领域在近期的一项重要进展<sup>[12]</sup>,该方法将面向显式发丝的发型建模转化为表面网格建模问题,从而允许用户使用较为熟悉的表面网格建模接口构建头发造型。与此不同的是,本文选择在造型约束的基础上提出一种构造三维头发造型的层次多阶约束域算法。与已有方法相比,该方法允许用户建立从全局发簇到局部发簇的层次作用机制,在层内实现多约束域,目的是实现对发丝变形的多阶段形变控制,为发型建模提供可扩展能力。而为实现该目标,需首先建立不同于现有概念的造型约束表示,即约束域(2.1节)。使用更加贴近真实发型特征的等距和集簇约束域,模拟发丝的基本形变。此外,结合发丝曲线的最小旋转标架(RMF)和可定义的空间螺旋线参数方程,为发丝添加波发、卷发等细节效果。实验结果表明,该方法能够有效构建出丰富、自然的头发造型,进一步还支持面向约束域的发型快速编辑,提高了发型建模效率。

## 2 基本概念和方法流程

### 2.1 基本概念

现有造型约束仅包含对孤立的发型特征抽象表示,无法用于前文提出的多约束控制的情况。而要在发型建模中灵活结合多个约束,并给出明确的作用划分,需首先为每个约束指定相应的作用范围或条件,即带“域”的约束,因此本文将其称为约束域。而要仅通过少量具有代表性的约束域模拟出较复杂的发型,需进一步对现实世界的发型造型特征和抽象的约束域进行有效结合。

如图1所示,真实发型产生的原因一般可被看作是发丝受到外力和自身内力等两方面的作用,本文称其为发丝的受力形变和自然形变。通过分析更多但不限于图1给出的发型,把发丝受到的外力作用划分成等距约束域和集簇约束域两种基本形式(例如图1的实线箭条和虚线箭条),并认为仅使用这两种抽象约束即可构建现实中的大多数发型。自然形变会产生发丝的波发、卷发等细节效果,本文方法同样结合了自然形变和约束域,使用类似受力形变的约束域控制发丝的自然形变。



图1 实线箭条表示头发的“等距约束域”,虚线箭条表示头发的“集簇约束域”

### 2.2 方法流程

在发型建模的过程中,应首先建立虚拟人物头皮的全局

发丝和发簇分布图<sup>[5]</sup>,交互式构建控制发簇样例发丝的受力形变和自然形变约束域(3.2节、3.3节);然后使用层次多阶约束域算法计算样例发丝曲线(4.1节),调整发丝与躯体的碰撞交互,最终通过发簇成员插值生成全局发丝(4.2节)。

把发丝的受力形变看作是模拟发丝从发根开始持续生长的切向量变化过程,并在发丝的整个生长期内按照一定步长间隔计算当前生长末端的局部受力形变。发丝的生长期由所有约束域在世界坐标系中的作用范围及发丝自身的生长限值共同确定。本文方法通过使用处于不同作用层次的约束域队列,控制样例发丝发生多阶段形变,队列内部的约束域序列由用户指定的优先级排序确定,其中任意一个队列成员可同时包含多个约束域。处于队首元素中的约束域对样例发丝“可见”,否则认为是“不可见”。事实上,对多阶约束域进行可见性判定就是层次多阶约束域算法的核心。

通过约束域控制样例发丝自然形变的计算方式与前者基本类似,主要区别是自然形变约束域队列的元素中一般只包含一个约束域,且约束域的作用范围一般不发生重叠,即不具备“层次性”(详见4.1节的算法描述)。

## 3 基于约束域的发丝形变控制

### 3.1 发丝曲线表示与计算

使用三维空间的单位切向量集合  $T = \{t_i\}$  表示样例发丝,其中  $t_0$  表示初始朝向。点集  $V = \{v_i\}$  中包含  $|T| + 1$  个发丝生长节点,其中  $v_0$  表示样例发丝在头皮上的发根位置。通过式(1)建立集合  $T$  和元素  $V$  之间的关系:

$$v_i = v_0 + \sum_{j=0}^{i-1} t_j \quad (i \geq 1) \quad (1)$$

假设样例发丝在三维空间  $v_i$  处受约束域  $f_i$  影响的受力方向为单位向量  $\alpha_i$ ,强度为  $E_i$ ,则样例发丝在  $v_i$  处受到的合力方向通过式(2)计算:

$$A = \frac{\sum E_i \alpha_i}{\|\sum E_i \alpha_i\|_2} \quad (i \geq 1) \quad (2)$$

从而得出样例发丝发生形变后的单位切向量:

$$t_i = \frac{s t_{i-1} + A}{\|s t_{i-1} + A\|_2} \quad (i \geq 1) \quad (3)$$

式中,  $s$  表示发丝的韧性系数,系数越小,说明发丝越易发生形变,其受力弯曲程度就越大,反之则越不易弯曲。

### 3.2 发丝受力形变的抽象约束域表示

为了建立多阶约束域队列,本文方法的约束域需要包含以下两个基本要素:(1)激活条件:随着样例发丝的生长,当  $f$  满足激活条件时,样例发丝的生长末端  $v_i$  被称为在  $f$  中的起始端点,样例发丝的形变计算将受  $f$  影响。把发丝受持续影响下的生长末端  $v_i$  称为发丝在  $f$  内的活动端点;(2)消隐条件:当  $f$  已被激活且发丝活动端点  $v_i$  满足  $f$  的消隐条件时,样例发丝在其剩余生长期内不再受  $f$  影响。下面给出等距和集簇约束域的定义:

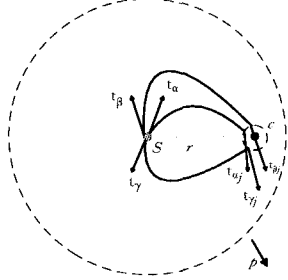
**等距约束域:**等距约束域的作用域是一个有限体积的长方体,当等距约束域对样例发丝“可见”且发丝生长末端处于其作用域内时,满足激活条件,处于作用域外时,则满足消隐条件。当等距约束域被激活时,样例发丝在其活动端点处的受力方向始终为  $v$ ,强度为  $E$ 。

**集簇约束域:**集簇约束域的作用域是一个球体。

如图2所示,作用域球以样例发丝在集簇约束域内的起

始端点  $s$  为球心,  $c$  表示集簇约束域的核心,  $r$  表示作用域球半径, 其数值等于  $s$  到  $c$  的距离; 样例发丝在集簇约束域中任意位置的受力方向始终从活动端点处指向  $c$ , 强度为  $E$ 。  $d$  表示集簇约束域的散射系数,  $p$  表示散射方向的单位向量。 当集簇约束域对样例发丝“可见”, 即满足激活条件时, 样例发丝生长末端被标记为起始端点; 样例发丝的活动端点  $\alpha$  满足下列条件之一时, 满足集簇约束域的消隐条件: (1)  $\alpha$  处于集簇约束域的作用域球外; (2) 用  $h$  表示以  $c$  为球心的核半径,  $\alpha$  处于该集簇约束域核内。 假设样例发丝在满足集簇约束域消隐条件处的切向量为  $t_j$ , 则按式(4)对  $t_j$  进行散射修正:

$$t_j = p + dt_j \quad (4)$$



$t_\alpha$ 、 $t_\beta$  和  $t_\gamma$  分别表示 3 根样例发丝在起始端点  $s$  处的不同切向量,  $t_\alpha'$ 、 $t_\beta'$  和  $t_\gamma'$  表示经过散射修正后的样例发丝切向量, 散射系数  $d = -0.5$ 。

图 2 集簇约束域原理示意

散射修正对于集簇作用域非常重要, 它可以用于生成发束聚拢的效果, 如发辫等, 具体实验结果见第 5 节。

### 3.3 发丝自然形变的抽象约束域表示

自然形变要求能够以发丝曲线为轴线生成有效的三角函数曲线或螺旋线等效果, 其前提是建立发丝曲线的活动标架表示。 要确保生成曲线的正确性(例如生成类似等速圆柱螺旋线), 则需要生成的活动标架属于最小旋转标架(RMF), 本文方法采用 Wang 的双反射算法<sup>[13]</sup>生成样例发丝曲线的 RMF。 通过 RMF 我们实际上得到了以发丝曲线为轴的广义圆柱体, 然后使用可定义偏移半径和空间曲线类型(类似圆柱螺旋线、圆锥螺旋线或三角函数曲线)的参数方程, 按照约束域所影响的区间段, 将发丝曲线上的点移动至适当位置, 即可产生具有较高控制度的自然形变效果。

设样例发丝曲线的 RMF 主法线方向为  $N$ , 副法线方向为  $B$ , 对于发丝曲线  $[s_0, s_1]$  区间段, 应用式(5)表示参数方程:

$$\begin{cases} n(s) = A_n \cdot scale(s, \sigma) \cdot \sin\left(\frac{2\pi(s-s_0)}{T}\right) \cdot N \\ b(s) = fade(s) \cdot A_b \cdot scale(s, \sigma) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(s-s_0)}{T}\right) \cdot B \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $n(s)$  和  $b(s)$  分别表示沿  $N$  和  $B$  方向的偏移量,  $A_n$  和  $A_b$  表示  $N$  和  $B$  方向上的偏移常数。  $fade(s)$  用于将  $B$  方向上的起始偏移距离平滑降至 0, 其表达式如式(6)所示:

$$fade(s) = \begin{cases} 0, & s = s_0 \\ e^{-\frac{T}{s-s_0}}, & s > s_0 \end{cases} \quad (6)$$

式(5)中的  $scale(s, \sigma)$  用于满足发丝曲线区间两端的光滑性。 为了构造  $scale(s, \sigma)$ , 首先引入函数  $P(\beta)$ <sup>[14]</sup>, 如式(7)所示。

$$P(\beta) = \begin{cases} 0, & \beta \leq 0 \\ 2\beta^2, & 0 < \beta \leq 0.5 \\ 1 - 2(\beta - 1)^2, & 0.5 < \beta < 1 \\ 1, & \beta \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

函数在实数域上满足一阶导数连续, 定义平滑系数  $\sigma$  ( $0 < \sigma \leq 0.5$ ), 通过式(8)建立关于  $s$  和  $\sigma$  的平滑函数:

$$scale(s, \sigma) = \begin{cases} P\left(\frac{s-s_0}{\sigma(s_1-s_0)}\right), & s \leq \frac{1}{2}(s_0+s_1) \\ 1 - P\left(\frac{s-(s_1-\sigma(s_1-s_0))}{\sigma(s_1-s_0)}\right), & s > \frac{1}{2}(s_0+s_1) \end{cases} \quad (8)$$

函数式(8)在二维笛卡尔坐标系中的曲线如图 3 所示。

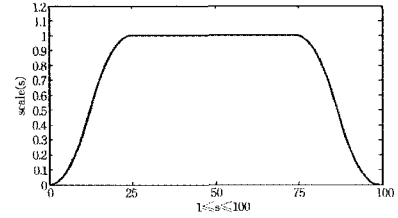
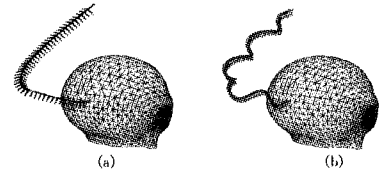


图 3 平滑函数  $scale(s, \sigma)$  示例(其中  $\sigma = 0.25$ ,  $s_0 = 1$ ,  $s_1 = 100$ )

使用式(5)能够在发丝曲线的任意区间内生成光滑的自然形变效果, 并以此为基础建立自然形变的约束域(注意该约束域也应具备 3.2 节的约束域要素), 允许用户采用与处理受力形变相同的交互方式控制发丝的自然形变。 同时, 自然形变约束域的作用范围与等距约束域类似, 即一个有限体积的长方体, 其激活条件和消隐条件也与后者基本一致。 图 4(a) 以均匀方式显示了样例发丝曲线的部分 RMF; 图 4(b) 给出了基于 RMF 的一种样例发丝自然形变结果。



(a) 是计算生成的样例发丝 RMF, 设  $T = 50$ ,  $A_n = A_b = 0.1$ , 在整条发丝曲线区间添加一个光滑螺旋约束域, 应用式(5)计算自然形变, 生成的发簇如图(b)所示。

图 4 样例发丝的自然形变

## 4 层次多阶约束域算法

### 4.1 算法描述

提供给用户的约束域队列按照作用层次分为两类, 一是作用于局部发簇的作用队列, 其中每根样例发丝只能受到一个局部作用队列的影响; 另一种是全局作用队列, 作用于全局发簇。 无论是全局作用队列还是局部作用队列, 队列之间拥有一致优先级。 也就是说, 当计算样例发丝形变时, 应同时考虑全局作用队列和局部作用队列对当前样例发丝的影响。 而对于样例发丝自然形变计算, 则只提供一个局部作用队列。 算法包含两个主要步骤: (1) 判断约束域对当前样例发丝生长末端的可见性, 即是否处于“队首元素”中; (2) 对于已被激活的约束域, 累加计算其对当前样例发丝活动端点的作用向量, 并依据式(3)或式(5)分别计算样例发丝的受力形变和自然形变。

为了描述层次多阶约束域算法, 需要首先定义算法所需

的变量,表 1 所列关键变量定义,其它变量将在算法描述中介绍。

表 1 算法 1 和算法 2 的关键变量定义

| 变量名          | 变量定义           |
|--------------|----------------|
| growEnd      | 发丝生长末端         |
| globalQueue  | 受力形变约束域的全局作用队列 |
| localQueue   | 受力形变约束域的局部作用队列 |
| naturalQueue | 自然形变约束域队列      |
| length       | 发丝的生长迭代次数      |
| G            | 发丝生长限值         |
| sampleStrand | 样例发丝的节点序列      |

使用下述算法判断约束域的可见性,并返回样例发丝在活动端点处的作用向量。作用向量  $tstreath$  在受力形变计算中表示样例发丝活动端点处的受力总和,在自然形变计算中表示用于空间螺旋线参数方程的参数列表:

```

1. vjudge(growEnd, fieldQueue)
2.  tstreath=0; //作用向量
3.  If fieldQueue.headlist=∅
4.      If fieldQueue ≠ ∅
5.          fieldQueue.getNext();
6.      Else
7.          return tstreath; //终止返回
8.      End If
9.  End If
10. For ∀ f ∈ fieldQueue.headlist
11.     If f.iscontain(growEnd)
12.         If f.isInactive()
13.             f.enactive();
14.         End If
15.         tstreath += f.calcDeform(growEnd);
16.     Else If Isactive(f)
17.         fieldQueue.headlist.remove(f);
18.     End If
19. End For

```

算法  $vjudge$  描述了约束域的可见性判定和作用向量的计算过程,其输入参数为样例发丝生长末端  $growEnd$  和当前约束域队列  $fieldQueue$ 。行 3-9 的作用是检查队首元素,如果为空则从  $fieldQueue$  中获取队列中下一个元素(行 5)。如果  $fieldQueue$  本身为空,则算法终止并返回作用向量(行 7);否则遍历队首元素  $fieldQueue$ . $fieldlist$  中的每个约束域(行 10-19),检查约束域针对样例发丝是否满足激活条件(行 11),对于已激活的约束域,使用  $calcDeform$  函数累计得作用向量(行 15),其原理基于 3.2 节的等距和集簇约束域定义。如果发丝生长末端满足约束域的消息条件,则将该约束域从队首元素中移除(行 17)。在算法 1 约束域可见性判定和作用向量计算的基础上,算法 2 给出了层次多阶约束域算法的基本描述:

```

1. While length < G
2.     &&& ( globalQueue ≠ ∅ || localQueue ≠ ∅ ) do
3.         tstreath=0; //作用向量
4.         tframe=0; //存储生长末端的 RMF
5.         tstreath += vjudge(growEnd, globalQueue);
6.         tstreath += vjudge(growEnd, localQueue);
7.         Normalization(tstreath);
8.         growEnd += calcNewEnd(growEnd, tstreath);

```

```

9.     sampleStrand.add(growEnd);
10.    tstreath=vjudge(growEnd, naturalQueue);
11.    tframe=dfm(growEnd);
12.    sampleStrand.modify(
13.        calcNewNaturalEnd(tstreath, tframe));
14.    length++;
15. End While

```

该算法给出了层次多阶约束域算法的主要流程。当样例发丝的生长迭代次数达到生长限值  $G$ ,或作用于该样例发丝的约束域队列均为空时,算法终止(行 1-2)。行 5-6 计算样例发丝生长末端处受到全局和局部作用队列影响下的作用向量。行 7-9 的作用是将作用向量单位化,计算样例发丝在  $growEnd$  处的受力值,行 8 的  $calcNewEnd$  函数作用是使用式(3)计算受力发丝形变,并更新新一轮  $growEnd$  和样例发丝曲线的节点序列。行 10-13 处理样例发丝的自然形变,其中行 10 计算产生自然形变的作用向量,行 11 的  $dfm$  函数用于计算样例发丝在当前  $growEnd$  处的 RMF,行 13 的  $calcNewNaturalEnd$  函数即使用式(5)计算新的  $growEnd$  坐标。

#### 4.2 发丝形变的平滑和扰动处理

对于生成的样例发丝曲线,需要避免其生长至虚拟人物的躯体模型内。本文方法首先针对当前样例发丝生长末端遍历躯体模型的层次轴对齐包围盒(层次 AABB 包围盒),如果找到一个发生碰撞的网格三角形,则将该端点向着网格三角形的法线方向移动一段距离,避免发生穿透。实验表明,基于层次包围盒的碰撞检测方法在样例发丝规模为 1000、发丝生长迭代总次数约为 200k 的情况下依然能保证实时的性能。由于碰撞处理可能会影响发丝曲线的平滑性,还需要在后期对样例发丝进行均匀重采样,使用 Catmull-Rom 样条插值生成光滑发丝曲线。

最后通过对样例发丝切矢进行插值,生成发簇的成员发丝,进一步生成整个发型。为了使发型更加真实、自然,在计算发丝形变的关键阶段都引入高斯噪声扰动,如样例发丝的受力形变(3.2 节)、自然形变(3.3 节)以及成员发丝插值等,具体实验结果见第 5 节。

## 5 实验结果

使用 Qt 和 OpenGL 构建了一个基于本文方法的交互式发型建模工具,运行平台为 Intel Core i5 处理器和 4G 内存,本节所使用的虚拟人物模型均来源于 Poser 4/Pro。最终的头发造型结果需要采用特殊的局部光照渲染以保证其真实感。考虑到发丝对入射光的散射特性<sup>[15]</sup>,实验采用 Anjyo 在文献[15]的基础上改进的光照算法<sup>[7]</sup>对结果进行了局部光照渲染。

图 5(a)和图 5(b)构建的“马尾辫”造型主要部分包含了两对分别作用于对称子区域的集簇约束域集合  $A$  和一个全局作用的等距约束域集合  $U$ ,其优先关系为  $A > U$ 。在等距约束域作用的发丝生长区间内添加自然形变约束域,生成的样例发丝如图 6(a)所示;对样例发丝进行发簇成员插值,其全局发丝的渲染结果如图 5(b)所示;接下来对当前头发模型进行保留局部特征的快速编辑,将  $A$  中的两个集簇约束域分别向其对称位置移动,添加一个新的等距约束域到  $U$ ,并分别将  $U$  中的等距约束域移动至集簇约束域的所在方向,保持自然形变约束域不变,生成的样例发丝如图 5(c)所示,其全局

发丝的渲染结果如图 5(d)所示。

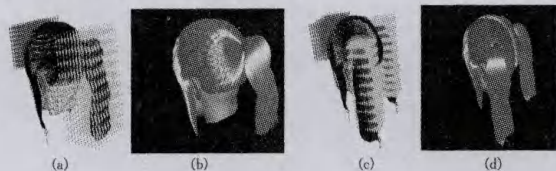


图 5 基于约束域的头发表建模和编辑

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。

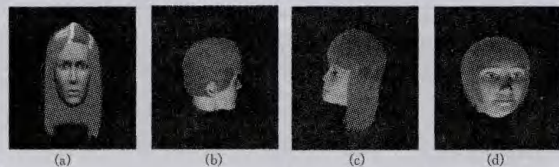


图 6 使用本文方法生成的多种头发造型

**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发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