

文章编号:1001-9081(2009)12-3336-04

## 基于微型传感器驱动的三维实时运动人体模型

李 刚, 吴 政, 孟小利, 吴健康

(中国科学院研究生院 信息科学与工程学院, 北京 100049)

(ligang07@mails.gucas.ac.cn; jkwu@gucas.ac.cn)

**摘 要:**建立一种运用于人体运动捕获与再现系统的人体模型,实现人体运动实时控制模型的运动。根据微型传感器人体运动捕获与再现系统的特点,提出一种三维人体模型的层次化结构建模方法和多边形分组皮肤变形方法。该方法以生物动力学为基础,根据人体关节的运动特征进行分层表示,采用传感器数据驱动并控制人体骨架模型的运动以及皮肤模型的变形,实时再现真实人体运动。实验表明,新建模型方法适用于传感器数据驱动人体模型的实时运动再现,并能够逼真地体现人体运动的生物力学特征。

**关键词:**人体模型;四元数;微型传感器;实时动画;运动再现

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Micro-sensor driven human model for 3D real-time movement

LI Gang, WU Zheng, MENG Xiao-li, WU Jian-kang

(College of Information Science and Engineering, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A human model for the human motion capture and reconstruction was set up and the real-time movement of human model controlled by real people's movement was realized. According to the features of the system of the human motion capture and reconstruction, the authors proposed a method of constructing a sensor data-driven layered human motion model and a method of polygon grouping to achieve skin deformation. The methods are based on biomechanics. The joints of human body were categorized according to the motion characteristics. Motion parameters estimated from sensor data were used to control the movement of human skeleton model and the deformation of skin model, and consequently reconstruct the human body motion in real-time animation. The experimental results show that the proposed model is suitable for sensor data-driven virtual-human in real-time animation and has good biomechanics characteristics in representing human motion.

**Key words:** human model; quaternion; micro sensor; real-time animation; motion reconstruction

### 0 引言

随着计算机图形学技术和虚拟现实技术的日趋成熟,在三维空间中创建符合生物动力学的虚拟人技术已经广泛地应用到人们的日常生活中,例如:影视娱乐、动画卡通、新闻广告和电子游戏等领域。目前,人体模型主要分为四类:棒模型、实体模型、表面模型和多层次模型。然而,在这些人体模型当中:棒模型使用有限的刚体片段和关节链接组成,其逼真度较差;实体模型使用简单的实体集合(例如:圆柱体、椭球体、或球体等)模拟身体的结构与形状,需要大量几何图形,其计算量大、计算稳定性差;多层次模型由骨架层、肌肉层和皮肤层构成,模型的复杂度较高,变形时计算量很大;表面模型由骨架层和表面皮肤层两部分组成,易于实现,适合实时虚拟环境人体模型的建模。本文吸取了表面模型的建模思想,提出了一种三维人体模型的层次化结构建模方法。

为解决表面模型存在的问题,提高皮肤变形的逼真性,现在被广泛采用的变形算法有 SSD (Skeleton Subspace Deformation) 算法<sup>[1]</sup>,姿态空间变形(Pose Space Deformation, PSD)算法<sup>[2]</sup>,权值姿态空间变形算法(Weighted Pose Space Deformation)算法<sup>[3]</sup>。这些变形方法有效地解决了表面模型皮肤变形效果不理想的问题,但是随着运动关节数的增加,其运算复杂度成指数增长。为了提高皮肤变形的处理速度,本

文在 SSD 算法基础上,针对微型传感器人体运动捕获与再现的特点,提出了多边形分组方法,很好地实现了虚拟人运动状态下的皮肤实时变形。

### 1 微传感器人体运动捕获与再现系统

微型传感器人体运动捕获和再现系统包括运动捕获、信息处理和运动再现三个模块。运动捕获模块通过微型传感器采集人体每段肢体的运动参数,该运动参数包含三维加速度、角速度和磁场信息;信息处理是对获取的运动参数进行分析和处理,将其转化为人体模型相应骨骼和关节的局部运动参数;运动再现是根据获得的模型运动参数对人体运动进行实时模拟。在这个系统中,首先把微型传感器固定在人体的每一段肢体上,当肢体运动时,微型传感器就捕获这段肢体的三维加速度、角速度和磁场信息;再把获取的信息通过总控板传输到信息处理模块,信息处理模块采用卡尔曼滤波对获取的运动信息进行去噪和融合,从而获得四元数数据;然后把四元数数据输入运动再现模块,运动再现模块把四元数数据转换成旋转角度输入人体模型,实现人体运动再现。系统的结构如图 1 所示。

### 2 人体模型

在虚拟环境中,通常采用表面模型去实时模拟人体运动。

收稿日期:2009-06-03;修回日期:2009-08-12。

**作者简介:**李刚(1982-),男(土家族),湖北利川人,硕士研究生,主要研究方向:计算机图形学与动画、网络、信息系统; 吴政(1982-),男,山东聊城人,博士研究生,主要研究方向:无线自组织网络、无线多媒体通信、网络、信息系统; 孟小利(1985-),女,山东菏泽人,博士研究生,主要研究方向:人体运动分析、信息融合、网络、信息系统; 吴健康(1947-),男,江苏泰州人,博士生导师,主要研究方向:传感器网络应用平台、多传感器信息融合、贝叶斯网络动态系统。

表面模型包含骨架层和皮肤层两层。骨架层由骨骼和关节组成,是人体运动控制的基础,用于指定人体的精确运动,表示人体内部结构;皮肤层由多边形网格组成,用于描述人体的外部形状,刻画逼真的人物形象<sup>[4]</sup>。本文借鉴表面模型的建模思想,针对微型传感器提供的测量数据,提出一种用于人体运动获取和再现的层次化结构建模方法。

## 2.1 骨架模型

本文提出的骨架模型参照 H-Anim 标准。H-Anim 是一个关于虚拟人建模的标准,它使用三类节点表示一个虚拟人体模型:人体重心、人体关节和人体骨骼段。

本文根据运动捕获与再现需求,把整个人体分成 1 个重心、21 个骨骼段和 17 个关节。骨骼段之间由关节相连,人体重心、每个骨骼段以及关节的运动会影响到与它相连的其他节点的状态。骨骼的层次结构由嵌套的关节节点来实现,设定脊柱末端的骶骨节点为人体重心,作为整个人体的根节点,并由此分别向上、向下遍历整个骨架结构,将所有关节组织成树形的继承结构。除根节点以外,每个节点都是另一个节点的子节点。例如:肩关节定义中,把肘关节和上臂骨骼段作为它的子节点,而在肘关节的定义中又把腕关节和前臂骨骼段作为它的子节点等,从而形成了人体模型的骨架。人体模型树状层次结构如图 2。为了使用传感器数据驱动人体模型进行实时运动,将人体的各个骨骼段抽象为简单刚性几何体,用各个关节之间的相对位置描述人体的姿态变化。

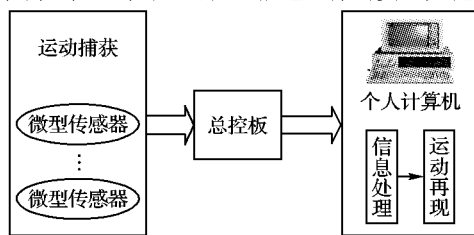


图 1 系统结构

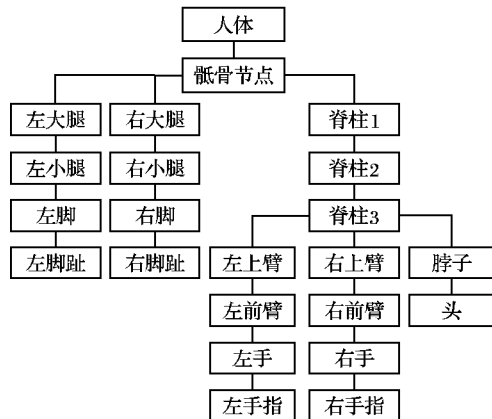


图 2 人体模型层次结构

人体骨架模型是人体模型运动的基础,微型传感器数据驱动人体模型实时运动,实际是驱动人体骨架模型运动,同时该运动能够带动皮肤模型的变形,进而实现人体模型的运动。为了实现微型传感器数据驱动人体模型实时运动,本文定义了一种数据结构用以表征骨骼的参数,数据结构中包含了位置、平移、旋转等参数。人体模型的骨骼的数据结构具体如下:

```
Segment_Joint Struct
{
    Bone ID;           //骨骼节点内部标识
    Bone Name;         //骨骼节点名称
    Bone Length;       //骨骼长度
    Bone Mass;         //骨骼质量,质心
    DOF Constraints;   //自由度
    Rotation Limits;   //关节旋转范围
    Mesh Elements;     //网格
    Parent Bone;       //父节点
    Child Bones;       //子节点
    Count of Child Bones; //子节点数量
    Base Scale/Rotation/ Translation Info.; //初始位置
    Current Bone Scale/Rotation/Translation Info.; //运动后骨骼位置
    Quaternion for Animation; //四元数
    Channel of Animation; //骨骼管道
    Current Frame of Animation; //显示模型姿态
    Playback Speed;     //动画播放速度
    Blending Info of Animation; //连续运动信息
}
```

## 2.2 皮肤模型

为了利用传感器数据驱动并控制人体骨架模型的实时运动以及皮肤模型的实时变形,本文在 SSD 算法基础上,针对微型传感器人体运动捕获与再现的特点,提出了多边形分组方法。此方法把组成人体皮肤模型的多边形网格分成平面多边形和曲面多边形,并按照人体生理结构将平面多边形网格附属于人体的某段骨骼上,它将跟随骨骼的运动而运动,但不产生变形,如:手指、脚趾和头等没有用传感器数据驱动其皮肤变形的部位;曲面多边形网格采用 SSD 算法的要求进行建模,跟随骨骼的运动而变形,如上臂和前臂等部位会跟随相应关节的运动产生变形。从而在保证运动再现效果的前提下,提高人体模型的处理速度。生成的皮肤模型如图 3(a)。虚拟人体模型运动时,传感器提供当前时刻人体骨架各个关节的运动参数,驱动骨架至某一姿态,再由骨架上的各个骨骼带动相应部位的人体表面皮肤运动。该模型运算复杂度低,可以表示任意的拓扑结构,适用人体这种复杂的带分支的结构,不同的部位之间可以方便地连接在一起,提供一种高效、逼真的皮肤变形方法,真实地再现运动状态下人体皮肤的变形效果。最终生成的人体模型如图 3(b)。

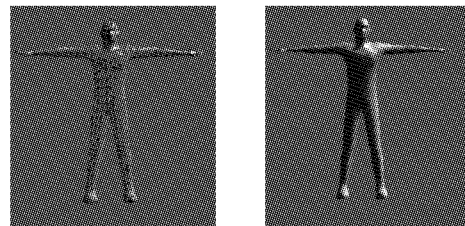


图 3 虚拟人皮肤模型和人体模型

## 3 运动再现

### 3.1 运动参数转换

微型传感器实时捕获的人体运动原始信息经过信息处理模块预处理,转化为实际人体运动参数信息,并输入虚拟人体模型。在模型中每个人体骨骼都有一个管道,实时接收传感器提供的人体运动参数信息,并将这些参数信息转化为模型运动时所需要的角度旋转参数信息和位置移动参数信息。

经过信息处理模块预处理后,输入虚拟人体模型的运动参数是四元数数据序列,四元数数据序列在骨骼管道中转换成角度旋转参数信息。转换方法如下。

设输入骨骼管道的四元数数据是  $Q = (q_1, q_2, q_3, w)$ , 其中  $(q_1, q_2, q_3)$  是旋转轴,  $w$  是旋转角度。

四元数归一化:

$$Norm(Q) = \sqrt{w^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} \quad (1)$$

$$\text{Normlize}(Q) = Q/\text{Norm}(Q) \quad (2)$$

四元数转换为人体模型的旋转参数。

令归一化后的四元组  $\text{Normlize}(Q) = (x, y, z, w)$ , 则有下面的转换公式:

$$\theta = 2\arccos w \quad (3)$$

$$\alpha_x = x/\sin(\theta/2) \quad (4)$$

$$\alpha_y = y/\sin(\theta/2) \quad (5)$$

$$\alpha_z = z/\sin(\theta/2) \quad (6)$$

其中:  $\theta$  表示旋转角度,  $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $\alpha_z$  表示旋转矢量。

### 3.2 运动姿态再现

#### 3.2.1 肢体运动

人体运动姿态的实时再现,本质上是虚拟人体模型的坐标转化。人体模型的运动再现模块定义了三个彼此嵌套的坐标系:世界坐标系、人体坐标系和关节局部坐标系。世界坐标系的定义与显示坐标系一致。人体坐标系的定义:取人体重心为原点,  $x$  方向指向人体背对方向,  $y$  方向指向人体头部,  $z$  方向指向人体左侧方向。关节坐标系的定义:  $x$  方向指向的是上一关节与该关节的连线方向,  $y$  方向指向关节的轴线方向,  $z$  方向按照右手准则确定。

为了刻画人体姿态变化,人体关节运动分解成相对身体局部坐标系的旋转和平移,其旋转、平移通过一个旋转角度和一个平移矢量来表示,基于以上运动分解,可以将人体姿态变换细化为关节运动积累变换的计算。图 4 是相邻关节坐标系之间的变换示意图。

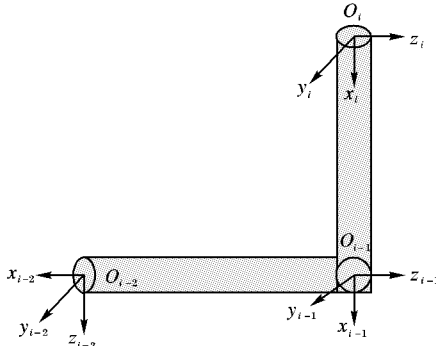


图 4 相邻关节坐标系变换示意图

对于任何一个关节,根据该关节局部坐标系中的位置,求出关节运动之后在世界坐标系下的新位置,其变换方法如下。

设关节  $O_i$  是关节  $O_{i-1}$  的子节点,关节  $O_i$  在关节  $O_{i-1}$  坐标系下的旋转矩阵为  $R_i^{i-1}$ ,在  $O_{i-1}$  下的位置为  $P_i^{i-1}$ ,则关节  $O_i$  在关节  $O_{i-1}$  坐标系中的变换矩阵可表示为:

$$M_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & P_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

关节  $O_i$  在世界坐标系下的变换矩阵可以表示为:

$$M(i) = \prod_{j=1}^n M_j^{i-1} \quad (8)$$

关节  $O_i$  从微型传感器获取的旋转角度用  $R_{\text{local}}(i)$  旋转矩阵表示,驱动关节  $O_i$  运动的变换矩阵可表示为:

$$M_{\text{local}}(i) = \begin{bmatrix} R_{\text{local}}(i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

微型传感器数据驱动关节  $O_i$  运动变化后在世界坐标系的位置可以表示为:

$$P_{\text{final}}(i) = M(i) M_{\text{local}}(i) P_{\text{initial}}(i) \quad (10)$$

其中:  $n$  表示该关节  $O_i$  到根节点的关节数量,  $P_{\text{initial}}(i)$  表示关节  $O_i$  在变换前在世界坐标系下的位置。由式(7)~(10)可以计算出关节  $O_i$  在世界坐标系下的位置。

人体模型关节的运动带动与其相连的肢体末端执行器运动,其肢体末端执行器的速度与关节的速度成线性关系<sup>[5]</sup>。已知连接肢体末端执行器的旋转角度和位置,可以采用正向运动学求出末端执行器的运动速度。肢体末端执行器

的速度与关节位移成微分关系。设  $S$  为肢体末端组成的目标空间,且为  $m$  维变量;  $\theta$  是关节空间的  $k$  维变量。肢体末端的空间瞬时速度用运动螺旋表示如下:

$$dS = J_s(\theta) d\theta \quad (11)$$

其中:  $J_s(\theta)$  为  $m \times k$  空间雅可比矩阵,对于任一位  $\theta$ ,它将关节速度矢量映射为对应肢体末端速度。

在三维空间中,  $dS$  是 6 维速度矢量,包含 3 个方向的线速度和 3 个方向的角速度,  $\theta$  是  $k$  个关节的旋转角度,每一个关节包含 3 个方向的角速度矢量。肢体末端在世界坐标系下的雅可比矩阵可以表示为:

$$J_s(\theta) = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3 \quad \cdots \quad \xi_n] \quad (12)$$

$$\xi_i =$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_i \times (M(i) P_n^i) & \beta_i \times (M(i) P_n^i) & \gamma_i \times (M(i) P_n^i) \\ \alpha_i & \beta_i & \gamma_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中:  $n$  表示根节点到肢体末端执行器的关节数量,  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$  分别为第  $i$  个关节在世界坐标系下的变换矩阵  $M(i)$  的列向量,  $P_n^i$  为连接肢体末端执行器的关节在第  $i$  个关节局部坐标系下的位置矢量。由式(11)~(13)可计算出肢体末端的速度矢量。

#### 3.2.2 皮肤变形

依附于骨骼层的表面皮肤层的变化遵循骨骼驱动变形的原则。在表面模型中,皮肤层的变形通常采用 SSD 算法<sup>[1]</sup>,原理是让组成皮肤的多边形网格的每个顶点附属在一组运动关节上,并对每个顶点设定相应的权值。当关节运动时,通过权值的影响,产生多边形顶点的运动,从而实现皮肤模型的变形。对于每一关节,都存在着一个参考姿态下的关节点初始逆变换与之相关联,其作用是将参考姿态下与该关节相关节点的世界坐标系转换成关节的局部坐标系。皮肤表面的变形方法如下。

设曲面多边形网格顶点  $P$  附属在  $n$  个关节上,第  $i$  个关节在初始姿态下的变换逆矩阵为  $M_{\text{ref}}^{-1}(i)$ ,第  $i$  个关节的变换矩阵为  $M_{\text{quat}}(i)$ ,则顶点  $P$  在第  $i$  个关节下的变换矩阵可以表示为:

$$M(i) = w(i) M_{\text{quat}}(i) \cdot M_{\text{ref}}^{-1}(i) \quad (14)$$

所有影响顶点  $P$  的关节的影响权值之和等于 1,可以表示为:

$$\sum_{i=1}^n w(i) = 1 \quad (15)$$

关节的运动带动顶点  $P$  位置发生变换,变换后在世界坐标系下的位置可以表示为:

$$P_{\text{final}} = \sum_{i=1}^n M(i) P_{\text{initial}} \quad (16)$$

其中:  $n$  表示影响皮肤顶点的关节数量,  $w(i)$  表示第  $i$  个骨骼段对顶点的影响度,  $P_{\text{initial}}$  表示顶点  $P$  在变换前在世界坐标系下的位置。

## 4 实验分析与性能评估

在运动捕获与再现系统中,在 VC++ 6.0 平台上通过编程建立一个人体模型,该模型的初始姿态为:两臂张开平伸,两眼平视前方,双腿微放松站立。在捕获运动信息时,真实人体的初始姿态与人体模型的初始姿态需要保持一致。在实验过程中,采用 10 个微型传感器对人体上半身运动进行捕获与再现。在实验对象的左右上臂、前臂、手背和头部各放置一个微型传感器,躯干上放置 3 个微型传感器。传感器的采样频率为 50 Hz。各个微型传感器采集对应肢体的运动信息,如:上臂传感器采集上臂的运动信息,前臂传感器采集前臂运

动信息。然后把所采集的运动信息输入人体模型,实现了人体模型的实时运动再现。将人体模型的动画与拍摄的视频进行比较,发现人体模型动画能够很好地跟踪真实人体的运动。图 5 是对人体上半身的运动捕获与再现过程的截图。实验结果说明,微型传感器数据驱动的人体模型能够实时精确地再现真实人体运动。实验是在 AMD Athlon 64 TK55 的 CPU,1 GB 内存的台式机上实现,系统以 30 fps 的速度实时运行,其延时为 23 ms。

## 5 结语

针对微型传感器人体运动捕获与再现的特点,本文借鉴了表面模型的建模思想,提出一种层次化

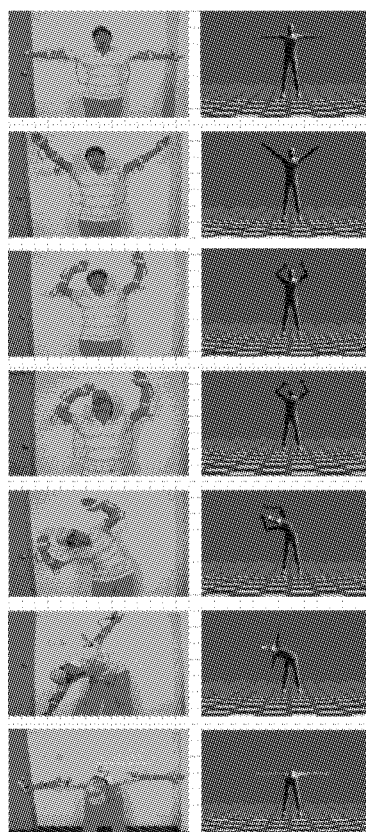


图 5 人体上半身的运动捕获与再现过程

结构建模方法。该方法适用于微型传感器的运动获取和再现系统,并能够很好地体现人体运动的生物动力学特征。同时针对表面模型未考虑人体解剖结构的缺陷,在 SSD 算法的基础上,提出了多边形分组方法,提高了运动再现的处理速度,实现了人体运动状态下的皮肤实时变形。实验证明本文采用的方法在处理速度和皮肤变形方面具有较好的性能,能够准确再现人体运动姿态。在今后的研究中,我们将进一步提高运动捕获与再现系统的处理速度和精度,深入了解人体解剖特性及皮肤变形规律,建立更为真实准确的皮肤变形模型。

志谢:非常感谢传感网络应用与研究中心所有工作人员对我工作的支持与帮助。同时特别感谢陈江同学为我提供硬件平台,张志强同学给予我工作的指导,陶冠宏同学给予我宝贵的意见。

## 参考文献:

- [1] JEFF L. Skin them bones: Game programming for the Web generation [J]. Game Developer, 1998, 5(5): 10-18.
- [2] LEWIS J P, CORDNER M, FONG N. Pose space deformation: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation [EB/OL]. [2009-04-10]. <http://scribblethink.org/Work/PSD/PSD.pdf>.
- [3] RHEE T, LEWIS J P, NEUMANN U. Real-time weighted pose-space deformation on the GPU [J]. Computer Graphics Forum, 2006, 25(3): 439-448.
- [4] 吕志国, 李焱, 贺汉根. 基于 Poser 模型的三维人体建模方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(13): 256-258.
- [5] MURRAY M, LI ZE-XIANG. 机器人操作的数学导论[M]. 徐卫良, 钱瑞明, 译. 北京: 机械工业出版社, 1998.

(上接第 3321 页)



(a)肝CT分割后图像 (b)脑CT分割后图像  
图 3 肝、脑 CT 采用本文算法分割后图像

## 4 结语

不同对象的分割结果表明,本文提出的引入二阶矩图像信息熵的 C-V 模型分割算法,在分割不同对象时具有较强的自适应能力,其实际应用意义是在计算机医学辅助诊断过程中降低了人工干预的成分。

## 参考文献:

- [1] CHAN T F, VESE L A. Active contour without edges for vector-valued image [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 10(2): 266-277.
- [2] 徐旦华, 鲍旭东, 舒华忠. 基于区域划分和改进 C-V 法的医学图像分割方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36(5): 863-868.
- [3] 蔡超, 周成平, 丁明跃, 等. 基于 C-V 方法改进的红外图像自动分割[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 62-64.
- [4] CHARTRAND R, STANEVA V. A faster-converging algorithm for image segmentation with a modified Chan-Vese model [C]// IPCV 2008: Proceedings of the 2008 International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition. Las Vegas Nevada: CSREA Press, 2008: 212-216.
- [5] 李俊, 杨新, 施鹏飞. 基于 Mumford-Shah 模型的快速水平集图像分割方法[J]. 计算机学报, 2002, 25(11): 1175-1183.

- [6] 李钊, 唐庆玉. 一种基于水平集的医学图像分割算法[J]. 北京生物医学工程, 2005, 24(5): 370-372.
- [7] 贾迪野, 黄凤岗, 文小芳. 一种全局优化的水平集图像分割方法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(1): 25-30.
- [8] 孙君顶, 丁振国, 周利华. 基于图像信息熵与空间分布熵的彩色图像检索方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 135-139.
- [9] 洪清启, 王备战, 史亮, 等. 基于二维直方图信息熵的图像检索方法[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2007, 25(4): 265-268.
- [10] 何娜, 郭宝龙, 洪俊标. 基于区域熵的图像检索[J]. 计算机工程, 2006, 32(18): 214-216.
- [11] 凌建国, 刘小军, 徐心和, 等. 基于熵的变分辨率彩色图像分割[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(12): 1975-1978.
- [12] 宋家慧. 基于遗传算法的最大熵阈值的图像分割[J]. 电子工程师, 2005, 31(2): 60-63.
- [13] MUMFORD D, SHAH J. Optimal approximation by piecewise smooth functions and associated variational problems [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1989, 42(5): 577-685.
- [14] EVANS L C, GARIEPY R F. Measure theory and fine properties of functions [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1992.
- [15] 张宪民, 欧阳高飞. 水平集方法及其在柔顺机构拓扑优化中的应用[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(10): 26-36.
- [16] 章晋毓. 图像处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [17] 赵军阳, 张志利. 基于最大互信息最大相关熵的特征选择方法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 232-235.
- [18] 周小舟, 张加万, 孙济洲. 基于互信息和 Chan-Vese 模型的图像分割方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(22): 220-222.
- [19] CHEN Y F, ZHAO W D, WANG Z C. Level set segmentation algorithm based on image entropy and simulated annealing [C]// ICBBE 2007: 2007 1st International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Washington, DC: IEEE, 2007: 999-1003.