

基于骨架的高效模型观察方法*

杨利明^{1,2}, 王文成¹⁺

¹(中国科学院 软件研究所 计算机科学国家重点实验室,北京 100190)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

Skeleton-Based Viewing Method for Efficient Understanding of 3D Models

YANG Li-Ming^{1,2}, WANG Wen-Cheng¹⁺

¹(State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: E-mail: whn@ios.ac.cn

Yang LM, Wang WC. Skeleton-Based viewing method for efficient understanding of 3D models. *Journal of Software*, 2010,21(Suppl.):86-93. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10010.htm>

Abstract: A new viewing method is proposed to automatically produce good viewpoints, to implement the progressive investigation from global to local for a 3D model. With hierarchical skeletons, the method can efficiently manage the global features, local features and details, and guided by the skeletons, produce good viewpoints to view these features with the interrelations among them represented well. In this way, the mechanism for human beings to understand a 3D model is well fitted, and many views can be reduced for promoting the understanding efficiency, in comparison with interactive selection of views. By experiments, compared with the general way to recognize a model through interactive selection of views, the new method can reduce the watching time by more than half, and reduce the recognition errors significantly.

Key words: view selection; skeleton; 3D model; high efficiency

摘要: 提出一种模型观察方法,可自动地生成观察序列,实现对模型的由全局到局部的优化观察.基于层次骨架树的建立,该方法将模型的全局特征、局部特征和细节特征进行层次化的有序组织.由此,可生成不同层次特征的观点,且有效表达它们之间的关联性,以较好地符合人脑对模型的认知方式,减少人工交互选择观点的盲目性,提高认知效率.实验表明,与人工交互的观点选择方法相比,该观察方法节约一半以上的时间,并显著地降低认知错误率.

关键词: 视点选择;骨架;三维模型;高效

根据人脑对三维模型认知方式的研究^[1-7],人们需要对一个三维模型的全局特征、局部特征以及细节特征进行全方位的观察并获致它们之间的关联性,才能对三维模型有较全面的了解和认识.由于模型的这些特征不能在一个视点的观察中全部看到,因此,往往要对模型进行多方位的观察.目前,关于模型观察观点的优化选择

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60773026, 60873182, 60833007 (国家自然科学基金)

Received 2010-05-15; Accepted 2010-08-16

已有不少的工作,但它们主要是将模型整体进行度量,以期找到一个视点能看到模型更多的特征,或是找到几个视点能看到模型的全貌,而缺乏对模型局部和细节特征的关注.这对于模型的全面了解是不利的,因为有些局部或细节特征对于模型的认知是很重要的.虽然这些方法也可将局部模型作为一个整体进行处理,但这样会割裂整体与局部的关联性了解,不利于高效的认知了解.

对此,本文提出一种模型观察方法,运用层次化骨架对模型的全局特征、局部特征和细节特征进行相应的表达并有效反映它们之间的关联性,然后对各个相应的部分选择优化的视点进行观察,以实现从全局到局部的有关联性的观察.这样,既便于各个特征的有效观察,又便于了解不同特征之间的关联性,比较符合人脑对模型认知的观察方式.这样自动选择视点的方式,将有效减少交互选择视点时的盲目性,可以很好地减少观察视点的数目,有利于观察效率的提高.实验表明:相比于常用的交互选择视点进行观察的方法,我们的方法可以减少一半以上的观察时间,并显著地降低认知的错误率.

本文第1节对相关工作进行简要的讨论.第2节介绍如何建立层次化的骨架,以有效反映模型的全局特征、局部特征、细节特征以及它们之间的关联性.第3节讨论不同层次特征的观察视点选取及关联.第4节对实验结果进行介绍与讨论.第5节对本文的方法进行总结.

1 相关工作

视点选择.目前,国际上已有大量的关于视点选择的工作,相关的综述,可见文献[8].在此,最重要的是关于视点观察效率的评价,因为其有效性对于视点选择的效率是至关重要的.视点评价的方法,可以大致分为两类,一类是利用几何特征进行度量的,而另一类是利用一些语义信息进行度量.前一类方法度量的几何特征很多,如:模型的曲率分布特征^[8,9]、投影面积^[10-12]、整体深度场信息^[13]等.一般地,这些度量的信息将与熵计算相结合,以比较不同视点观察模型的效率^[8-12].这类方法计算比较方便,大多能自动化地处理,但不利于处理几何特征简单但语义信息比较重要的模型.另一类方法^[14-16],一般是先通过机器学习或人工交互将语义信息与几何信息进行关联,然后再对各视点观察到的几何信息进行语义计算,以比较各个视点的观察效率.这类方法所选取的视点一般比较符合人的观察习惯,但操作比较复杂和烦琐.

已有的这些视点选择的方法,往往注重的是模型整体的观察效果,而忽略了模型局部和细节特征的观察.这是不利于模型的全面了解和认识的.我们的方法,是要对模型的各种特征进行全面的考察,并有效了解它们之间的关联性,以实现从全局到局部的逐步细化的认知.这样能更好地符合人对模型认知的方式,提高模型观察了解的效率.

骨架生成.三维模型的骨架生成,已有几十年的研究,在计算机动画、模型识别及匹配等方面有着广泛的应用.一般应用比较多的曲线骨架,是将模型的各局部中心点相连接而生成的一些曲线,以反映模型最基本的结构和拓扑关系,具有简单、易于理解、结构紧凑等特点.相关工作的综述,请见文献[17].利用骨架对模型进行分割计算,已有不少的工作.文献[18,19]提出了基于多层次模型骨架^[20]的层次分割方法,该方法先用文献[20]中的方法生成多层次模型骨架,再通过自动或者交互的方式在骨架上定义关键点,依据每个关键点在模型上对应的特征点之间的测地线,对模型进行层次化的分割.但是,该方法的多层次骨架生成方法要求模型必须是流形的且拓扑为 Genus-0,不适用于一般模型的处理.文献[21]中,作者采用模型表面逐步收缩的方法生成模型骨架,然后在各个骨架关键点生成截平面,由截平面对模型进行分割.但是,这样生成的骨架会丢失许多局部的细节特征,同时用截平面分割的方法会影响模型特征的反映,因为各个特征的边界一般不会像平面一样整齐.本文工作是要根据模型特征进行视点选择,并能对各种模型进行由全局到局部的逐步求精的观察.因此,我们要求骨架的层次与模型的全局特征有很好的对应关系.为此,我们将提出新的技术,以有效保持特征的完整性,并建立各类特征与骨架各个层次的高效对应关系.

模型分割.三维模型分割是图形学的一个重要研究方向,综述性的讨论可见文献[22-24].其中,有许多工作是关于层次化模型分割的.除上一节提到的基于骨架的层次化分割方法^[18,19,21]外,还有利用模糊聚类及 Graph-Cuts 方法生成边界光滑的层次分割方法^[25],基于层次聚类并自底向上进行层次分割的方法^[26].根据文

献[24]的讨论,文献[27]的分割方法所得的分割结果比较符合人对模型的分割习惯,这是有利于观察分析的.为此,本文将采用文献[27]的方法对模型进行层次化分割.由于层次骨架的生成与层次化模型分割的计算是不同的,它们之间的对应会有一些偏差,这会降低观察视点的选择效率.为此,我们将基于概率统计对它们之间的对应关系进行修正,使得所选择的视点能高效地观察相关的特征.

2 关联模型特征的层次骨架

为有效保持模型各类特征的完整,以利于视点的高质量选取,并使得各类特征的重要性层次得到有效反映,以便于由全局到局部的有效观察,我们采用如下方式对模型进行分割并建立骨架各部分与模型特征之间的对应关系.首先,使用文献[27]的方法对模型的特征进行分割,因为该方法的分割结果能较好地保持特征的完整性,并使得分割的各个部分比较符合人认知所需的语义要求^[24].然后,使用文献[28-30]的方法,基于电势场生成层次化的骨架.一般地,基于电势场的骨架生成方法对模型的几何和拓扑的要求比较宽松.因此,该方法可以有效处理多种类型的模型,比如有孔洞的模型.最后,根据生成骨架时的电势场种子点的运动轨迹,可方便地建立模型各分割部分与骨架各个层次部分的对应关系.

使用文献[27]的方法对模型进行分割时,随机选取模型中的两个位置作为种子点,然后采用文献[25]的 MinCuts 分割策略将模型分成两部分,并对分割边界上的边进行标记;然后,再反复选取随机种子点进行分割,并标记在分割边界上的边,直至可生成分割边界的区域没有太大变化.此时,就选取标记次数多的边形成分割边界,对模型分割.虽然,根据标记次数的多少,文献[27]也提出了层次化分割的处理.但其形成的层次化结果,不太符合人认识模型的语义要求.比如,人体模型中,相比于大腿和躯干连接的位置,膝关节位置的边被标记的次数将更多,因而会被置于比较高的层次;但按照语义要求,大腿和躯干连接的位置应该置于比较高的层次.为此,我们不使用文献[27]的方法进行分割部分的层次化处理,而是基于层次化骨架来进行这种处理,因为它可以更好地反映人认知需求的语义要求.

根据文献[28,29]的方法生成骨架时,先将模型的包围盒进行体素化,即将其划分成均匀的网格.然后,将包含模型表面的体素及附近的体素赋以正电荷,由此形成包围盒内的电势场.对于靠近模型表面的体素,设其为种子点,并沿着电势降低最大的方向运动,逐步地汇聚.当种子点不再运动时,它们的运动轨迹就形成了骨架的径干,多个径干的交点就形成骨架的分支节点.根据种子点运动时汇聚的情况,就得到了模型的层次化骨架^[29].

对于已经分割的模型表面,根据各个部分的种子点的运动轨迹,可知道这些种子点对应的骨架径干.对于一个分割部分,考察其种子点对应的径干情况,将其中大多数种子点对应的径干作为该分割部分对应的骨架部分.由此,就可建立层次化骨架与模型的不同特征区域的对应关系.

不失一般性,我们用图 1 中的二维例子进行说明.首先,将模型表面进行分割,形成 5 个部分 A,B,C,D,E.然后,根据种子点在电势场运动的轨迹形成骨架,并建立模型分割部分与层次骨架的对应关系,如图 1 右边的树结构所示.在此,对应全局的根节点覆盖模型的所有部分,而树结构的中间子节点则对应相关的部分,如节点(●4●5)就对应模型中分割的部分 D 和 E.

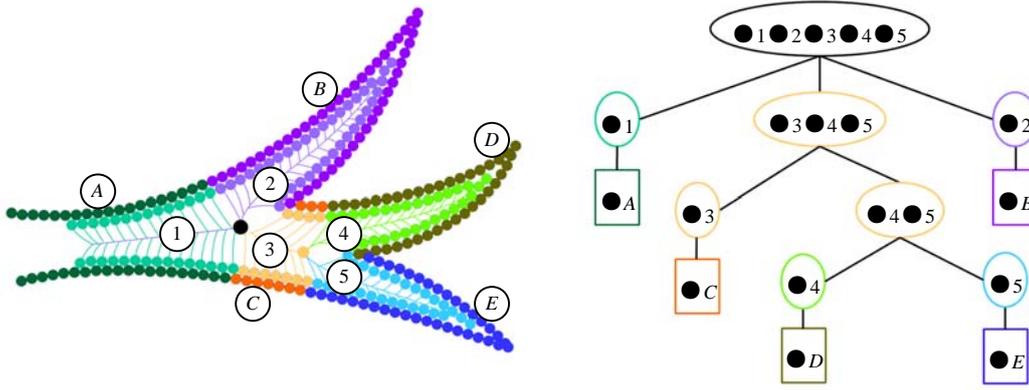


Fig.1 The constructed hierarchical skeleton, and their correspondence to the model features at various levels of details

图 1 基于电势场的层次骨架生成,及与模型特征的自适应对应

3 观察视点选择

根据人的认知方式,人们总是先对整体进行大致的了解,然后分析研究各个局部的情况,并在这个基础上综合地、具体地认识整体^[31].为此,本文提出一种模型观察方法,以利于对模型从全局到局部的优化观察,并便于高效反映它们之间关联性.首先,找到便于模型全局观察的好视点,然后,在所建立的层次化骨架的指导下,逐步地对各个局部以至细节部分进行各自优化视点的选择.具体计算时,我们用文献[32]的方法对所需考察的部分进行处理,即在模型包围球上均匀分布一定数量的视点,并对每个视点观察到的模型内容及其重要程度(也就是视点的好坏)给出一个量化的度量标准,以找到观察该部分的好视点.在度量一个视点的好坏时,我们将模型可见顶点的法向投影到该视点对应的视平面上,依此计算一个视点相关曲率,再根据该曲率的分布特征计算一个熵值以进行度量.

由于模型不同部分对认知的作用不同,我们将度量各个部分的重要性,并由此在观察模型的局部时,优先观察重要性高的部分,提高模型观察认识的效率.为此,我们采用文献[33]中的“Mesh Saliency”方法对模型分割的各个部分进行重要性度量,即:对模型的每个顶点,为其计算多个尺度范围内的高斯加权平均曲率,并进行加权求和,以得到重要性度量值.为避免各个部分的面积差异对度量的影响,我们在对一个部分度量时,先将它各个顶点的度量值求和,再除以该部分的面积.对于骨架树结构中的各个子节点,其重要性度量值,就是它所对应模型的各部分的重要性度量值的总和.据此,根据骨架树生成观察视点序列时,我们从根节点开始,以深度优先的方式遍历树结构,直至叶子节点.而在处理一个中间节点的多个子节点时,就按照它们的重要性度量值进行排序.这样,就可生成从全局到局部的多个观察序列,便于对模型进行从全局到局部的全方位展示.这也符合人脑对三维模型认知的过程,即人对模型的认识是将三维模型分解成层次式的三维组件,通过这些组件及其三维关系来表达一个物体^[1-4],或者是将观察所得的一系列二维图像连接而成的方位图^[4-7].图 2 显示了观察一个人体的两个观察序列.它们是比较符合人的认知过程的.



Fig.2 Two series of views to show the man model. They are displayed orderly from global to local, with features and the relations between the features represented well.

This is very fitted to the viewing preferences of human beings to understand a model

图2 该人体模型的两个观察序列.根据这样序列生成的图像,我们很容易对模型进行全面的了解

如果用户对这样自动生成的模型观察序列不满足,可以通过我们提供的简单而有效的交互工具进行调整.如图3所示,我们先给出模型整体优化观察的情况,然后由用户用方框确定感兴趣的区域,比如图中所示的右手部分,我们的方法就能将这部分的优化观察序列图像进行展示.这样可更方便地满足用户的认知需求.

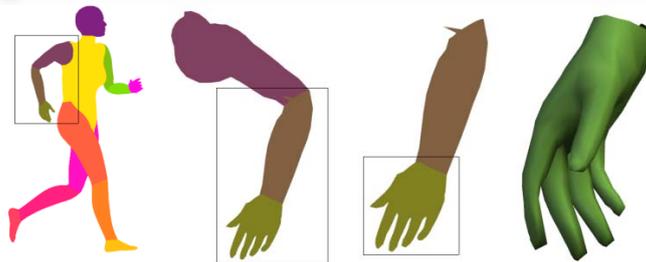


Fig.3 The views for displaying the right hand that the user selects to watch

图3 根据用户的交互选择所生成的优化观察序列

4 实验与讨论

我们在一台 PC 上实现了本文的方法,用户界面及交互工具用 Qt 库来完成.该微机配备了一个 Intel E8400 CPU 及 3G RAM.在对一个模型进行观察时,先对其进行特征分割以及层次骨架树的建立,然后生成优化的观察视点序列.虽然特征分割及层次骨架的建立比较费时,但其结果可反复使用,因此我们一般将其作为预处理结果保留,以备后续的观察使用.对模型的视点选择一般比较快,生成一个视点序列一般在 1 分钟左右.

为检验我们的观察方法对认知效率提高的作用,我们针对 3 个模型进行了对比实验,如图 4 中所示.一方面,运用本文的方法自动生成一系列图像来展示模型的全局及局部的情况;另一方面,在生成了模型的全局好视点的图像后,由用户交互地选择观察视点去了解模型.我们将测试者分成 2 组,每组 10~12 人.然后,让一组观察我们

方法自动生成的图像,去回答 12 个关于模型内容的问题;而让另一组交互地选择视点去观察,然后回答同样的问题.通过比较他们完成这些问题的时间,我们可评测我们方法的效率.因为模型观察是要尽可能全面地认识模型,因此,我们根据回答问题的正确率对时间进行了加权处理,即将完成问题的实际时间除以正确率,以得到用以比较的统计时间.换句话说,如果全部回答正确,用于统计的时间就是实际时间,回答错误越多用于统计的时间就越长.表 1 中列出了相关统计数据,其中也包含了实际观察了解模型所用的时间.从实验结果看,相比于人工交互选择视点的观察方法,我们的方法可将加权时间平均减少 52.7%,而将错误率从 22.2%降低到了 4.6%,即便是实际的观察时间,我们的方法也有大幅的降低.这表明,我们的观察方法是很有利于观察效率提高的.

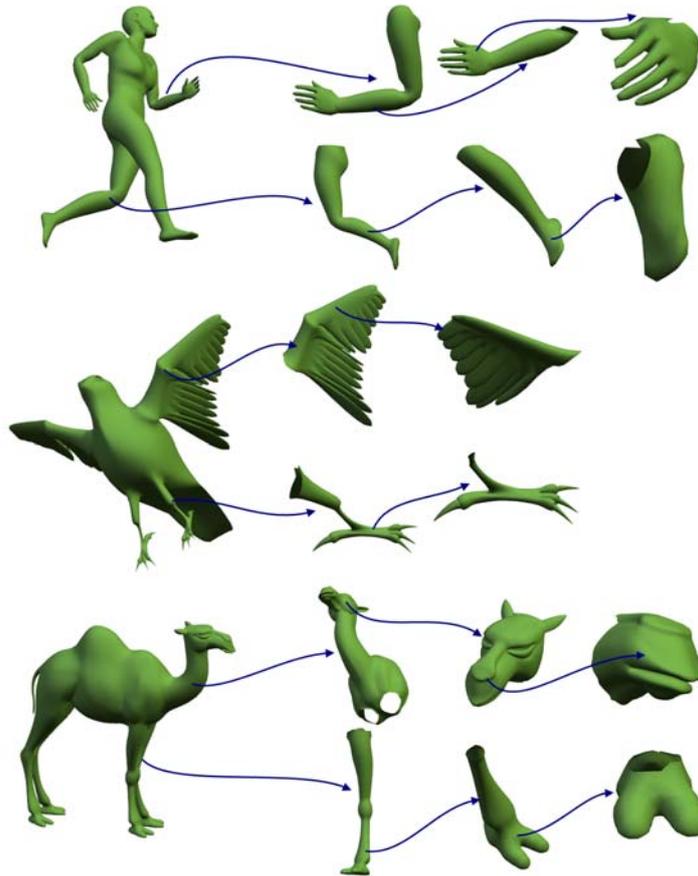


Fig.4 The three models for the comparison tests, and some series of views for watching them by our method
图 4 用于对比实验的 3 个模型及对应的优化观察序列

Table 1 The statistics data about the time to watch the models and the understanding errors

表 1 对比实验的统计数据

	观察时间(秒)		加权观察时间(秒)		问题回答错误率(%)	
	交互选择观察视点	自动视点序列生成	交互选择观察视点	自动视点序列生成	交互选择观察视点	自动视点序列生成
最差情况	611	368.7	1222.0	368.7	50.0	25.0
最好情况	200.9	150.5	129.2	150.5	8.3	0
平均值	320.0	210.2	465.7	220.4	22.2	4.6

5 结 语

为全面地了解模型的情况,需要对模型的全局特征、局部特征以至细节特征进行全面的观察.为此,本文利用层次化骨架对模型的各类特征进行相应的表达,并在骨架的指导下自动地生成一系列的观察视点,实现模型的全局到局部的逐步观察,并有效反映它们之间的关联性.这样的过程,是比较符合人脑的认知方式的.由于自动的优化视点选择,可减少人工交互选择的盲目性,因此可有效减少观察视点,提高观察质量.实验表明,本文方法可将观察时间缩短一半以上,并大幅降低模型认识的错误率.

致谢 感谢本文工作中对比测试的参加者以及对文章修改提出建议的审稿专家.

References:

- [1] Marr D. Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information. New York: Henry Holt and Co., Inc., 1982.
- [2] Biederman I. Recognition-by-Components: A theory of human image understanding. *Psychological Review*, 1987,94(2):115-147.
- [3] Biederman I, Gerhardstein PC. Viewpoint-Dependent mechanisms in visual object recognition: Reply to Tarr and Bülthoff (1995). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1995,21(6):1506-1514.
- [4] Tarr MJ, Bülthoff HH. Image-Based object recognition in man, monkey and machine. *Cognition*, 1998,67(1-2):1-20.
- [5] Koenderink JJ, van Doorn AJ. The internal representation of solid shape with respect to vision. *Biological Cybernetics*, 1979, 32(4):211-216.
- [6] Tarr M, Williams P, Hayward WG, Gauthier I. Three-Dimensional object recognition is viewpoint dependent. *Nature Neuroscience*, 1998,1(4):275-277.
- [7] Bülthoff HH, Edelman SY, Tarr MJ. How are three-dimensional objects represented in the brain? *Cerebral Cortex*, 1995,5(3): 247-260.
- [8] Polonsky O, Patane G, Biasotti S, Gotsman C, Spagnuolo M. What's in an image? *The Visual Computer*, 2005,21(8):840-847.
- [9] Page DL, Koschan AF, Sukumar SR, Roui-Abidi B, Abidi MA. Shape analysis algorithm based on information theory. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Image Processing 2003*. New York: IEEE Computer Society, 2003. 229-232.
- [10] Vázquez PP, Feixas M, Sbert M, Heidrich W. Viewpoint selection using viewpoint entropy. In: *Proc. of the Vision Modeling and Visualization Conf. 2001*. Stuttgart: Aka GmbH, 2001. 273-280.
- [11] Vázquez PP, Feixas M, Sbert M, Heidrich W. Automatic view selection using viewpoint entropy and its application to image-based modelling. *Computer Graphics Forum*, 2003,22(4):689-700.
- [12] Feixas M, Sbert M, González F. A unified information-theoretic framework for viewpoint selection and mesh saliency. *ACM Trans. on Applied Perception*, 2009,6(1):1-23.
- [13] Vázquez PP. Automatic view selection through depth-based view stability analysis. *The Visual Computer*, 2009,25(5):441-449.
- [14] Sokolov D, Plemenos D. Virtual world explorations by using topological and semantic knowledge. *The Visual Computer*, 2008, 24(3):173-185.
- [15] Vieira T, Bordignon A, Peixoto A, Tavares G, Lopes H, Velho L, Lewiner T. Learning good views through intelligent galleries. *Computer Graphics Forum*, 2009,28(2):717-726.
- [16] Fu H, Cohen-Or D, Dror G, Sheffer A. Upright orientation of man-made objects. *ACM Trans. on Graphics*, 2008,27(3):1-7.
- [17] Cornea ND, Silver D, Min P. Curve-Skeleton properties, applications, and algorithms. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2007,13(3):530-548.
- [18] Reniers D, Telea A. Skeleton-Based hierarchical shape segmentation. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Shape Modeling and Applications 2007*. New York: IEEE Computer Society, 2007. 179-188.
- [19] Reniers D, Telea A. Hierarchical part-type segmentation using voxel-based curve skeletons. *The Visual Computer*, 2008,24(6): 383-395.
- [20] Reniers D, van Wijk J, Telea A. Computing multiscale curve and surface skeletons of genus 0 shapes using a global importance measure. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2008,14(2):355-368.

- [21] Li X, Woon TW, Tan TS, Huang Z. Decomposing polygon meshes for interactive applications. In: Proc. of the 2001 Symp. on Interactive 3D Graphics. New York: ACM, 2001. 35–42.
- [22] Agathos A, Pratikakis I, Perantonis S, Sapidis N, Azariadis P. 3D mesh segmentation methodologies for CAD applications. Computer-Aided Design and Applications, 2007,4(6):827–841.
- [23] Shamir A. A survey on mesh segmentation techniques. Computer Graphics Forum, 2008,27(6):1539–1556.
- [24] Chen X, Golovinskiy A, Funkhouser T. A benchmark for 3D mesh segmentation. ACM Trans. on Graphics, 2009,28(3):Article 73.
- [25] Katz S, Tal A. Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts. In: Proc. of the SIGGRAPH 2003: ACM SIGGRAPH 2003 Papers. New York: ACM, 2003. 945–961.
- [26] Attene M, Falcidieno B, Spagnuolo M. Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives. The Visual Computer, 2006, 22(3):181–193.
- [27] Golovinskiy A, Funkhouser T. Randomized cuts for 3D mesh analysis. ACM Trans. on Graphics, 2008,27(5):1–12.
- [28] Ahuja N, Chuang JH. Shape representation using a generalized potential field model. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997,19(2):169–176.
- [29] Chuang JH, Tsai CH, Ko MC. Skeletonization of three-dimensional object using generalized potential field. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22(11):1241–1251.
- [30] Cornea ND, Silver D, Yuan X, Balasubramanian R. Computing hierarchical curve-skeletons of 3D objects. The Visual Computer, 2005,21(11):945–955.
- [31] Liao GL, Sun LC, Chen YJ. Cyclopedic Survey of Marxism. Beijing: People's Daily Press, 1993 (in Chinese).
- [32] Yang LM, Wang WC, Wu EH. Viewpoint selection by feature measurement on the viewing plane. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2008,20(9):1097–1103 (in Chinese with English abstract).
- [33] Lee CH, Varshney A, Jacobs DW. Mesh saliency. In: Proc. of the SIGGRAPH 2005: ACM SIGGRAPH 2005 Papers. New York: ACM, 2005. 659–666.

附中文参考文献:

- [31] 廖盖隆,孙连成,陈有进.马克思主义百科要览.北京:人民日报出版社,1993.
- [32] 杨利明,王文成,吴恩华.基于视平面上特征计算的视点选择.计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(9):1097–1103.



杨利明(1981—),男,湖南南县人,博士生,主要研究领域为计算机图形学.



王文成(1967—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,科学计算可视化,虚拟现实.