

# 面向三维模型高效观察的视点选择技术综述

王文成<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(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)

<sup>2</sup>(中国科学院大学 北京 100039)

**摘 要** 高效的模型观察, 对提高生产实践工作效率具有重要的意义。为此, 视点选择技术在近些年得到了很大的发展, 是提高模型观察效果的重要技术之一。文章对视点选择技术进行了较系统的梳理, 重点讨论了视点度量技术及其发展现状, 并探讨了视点采样技术的发展及视点选择技术在多方面应用的情况。最后, 讨论了视点选择技术的发展趋势及其应用前景。

**关键词** 模型观察; 视点选择; 视点度量; 视点采样

**中图分类号** TP 391 **文献标志码** A

## Review on View Selection Techniques for Efficient Investigation of Three Dimensional Models

WANG Wencheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>2</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** Efficient investigation of models is important for promoting work efficiency in applications. As a result, view selection techniques play an important role, and have made substantial progresses in recent years. In this paper, we systematically survey the techniques for view selection, emphasizing on introduction of view evaluation techniques and their development states, and discussing the progress of view sampling strategies and the application of view selection in some areas. At last, the trends of view selection techniques and future applications were discussed.

**Keywords** model investigation; view selection; view evaluation; view sampling

## 1 引 言

在生产实践中, 如产品设计、虚拟现实、文物考古等, 要处理的三维模型越来越多。因此,

研究高效的模型观察方法以便捷地认知模型内容具有重要的意义, 将有力地提高工作效率。为此, 视点选择技术得到了相当的关注, 是提高模型观察效率的重要方法之一。通过对人的观察机制的研究<sup>[1-5]</sup>可知, 如果一个视点能稳定地观察

收稿日期: 2016-04-22 修回日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61379087); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目

作者简介: 王文成, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为计算机图形学、虚拟现实、可视分析、图像编辑等, E-mail: whn@ios.ac.cn.

到模型尽可能多的有意义内容，将能高效地认知模型，这样的视点称为“好视点”。其中，稳定观察是指相邻视点的观察内容不会变化很大，适于认知的稳定性。视点选择的目的，就是要找到观察模型的好视点。

视点选择一般按以下步骤进行。首先，在模型的周围采样一些视点位置，通常在模型的一个包围球的球面上进行视点采样，该包围球的半径是模型紧致包围球半径的 2 倍长度，称为“观察球面”；然后，为每个视点进行度量，考察其能观察到的模型内容的情况，在此，模型内容以一些几何特征或语义特征进行表达，视点度量就是考察这些特征能被有效观察认知的情况；最后，根据视点度量的结果，找到观察效果最好的视点。由于遮挡的影响，一个三维模型的内容很难在一个好视点中被全部看到，为此，许多工作研究如何找到尽量少的视点，形成视点集，以能较全面地认知模型的内容。这在场景检测、视频监控等方面有不少应用，比如对一个监控场景可布置尽量少的摄像镜头，节省人力物力。这方面的工作<sup>[6]</sup>，一般是先找到一个好视点，然后再逐渐地增加视点，且新增加的视点是最能有效观察已选取视点看不到的内容的视点，直至模型的所有内容均能得到观察。

在已有的视点选择技术研究中，大多是研究视点度量方法，即如何选择合适的特征、如何进行合适的度量，使得好视点能被高效地找到。这是因为人观察模型时的内容感知机制还不是很清楚，感知内容的有效确定还是一个很有挑战性的问题。这在下面将首先重点介绍和讨论。然后，我们将讨论视点采样方面的工作。视点采样对于视点选择的效率有很大的影响，过少的采样可能会遗漏好视点，过多的采样又会极大地增加计算开销。为此，一些工作探讨了视点采样的优化处理，我们最近也有一个工作能很好地节省采样视点<sup>[7]</sup>，并确保好视点不被遗漏。目前，视点选择

在许多方面已有很好的应用，本文将对这方面的情况进行一些介绍。最后，本文将总结视点选择技术的发展现状并展望其未来的发展。

## 2 视点度量

视点度量是评价一个视点能观察到的模型内容情况，是视点选择中最重要的工作。这涉及模型内容的有效表达、提取和度量计算，目前已有大量的相关工作<sup>[4,5,7-9]</sup>。

由于三维模型一般由拟合的几何面片表达，且几何内容也是感知模型的重要方面，因此，人们研究了许多检测几何特征进行视点度量的方法。如找到具有模型最大投影面积的视点，因为这很可能看到模型的更多内容<sup>[10]</sup>；相邻视点中面片的可见性变化能反映它们看到内容的变化情况，因此，可基于面片可见性的变化来进行视点度量<sup>[2]</sup>；其他用于视点度量的几何特征还有深度图<sup>[11]</sup>、轮廓线曲率<sup>[12]</sup>、平均曲率<sup>[13]</sup>、网格显著性<sup>[14]</sup>和兴趣区域<sup>[15]</sup>等。由于局部几何特征更多的是反映细节，不利于模型主要内容的度量，因此，许多方法根据信息论提出了一些度量方法，如视点熵 (Viewpoint Entropy)<sup>[16]</sup>、相对熵 (Relative Entropy)<sup>[17]</sup>、视点互应信息 (Viewpoint Mutual Information)<sup>[18]</sup>、视点显著性 KL 距离 (Viewpoint Saliency Kullback-Leibler Distance)<sup>[6]</sup>等，它们主要是基于局部几何特征进行检测进行全局性的度量，以更好地反映模型的主要内容。其中，Polonsky 等<sup>[7]</sup>和 Sbert 等<sup>[19]</sup>对这方面工作有较好的综述。

对于三维模型的认知，除了其几何内容外，还有一些其他方面的内容，如纹理、功能性等方面的内容，统称为语义性内容，以区别于几何内容。为此，需要检测模型上相关的语义性信息，以找到能高效认知这些信息的视点。这方面的信息有可辨性区域 (Distinctive Regions)<sup>[20]</sup>、摆正方

向(Upright Direction)<sup>[21]</sup>、蕴意分割(Meaningful Segments)<sup>[22]</sup>、代表性强的仙灵点(Schelling Points)<sup>[23]</sup>等。由于人们对一个模型的认知一般具有趋同性,因此,许多方法研究使用机器学习等建立模型的几何特征与语义性内容之间的关联性,由此便于语义性内容的检测以进行视点度量<sup>[8,24,25]</sup>,比如支持向量机(Support Vector Machine)就常用于这方面的处理<sup>[10,26]</sup>。

一般而言,基于几何特征检测的视点度量方法,操作方便,速度比较快,但度量的质量不是很好,与期望有较大的差距,因为具体的几何特征与可感知的模型内容之间并不是完全等同的;而基于语义性内容检测的视点度量方法,一般可得到较好的结果,但其操作不太方便,效率不高。比如,为提高机器学习的可靠性,Liu等<sup>[25]</sup>就提出在万维网上收集三维模型及其关联的图像以获得尽可能多的学习样本,但这是很麻烦且费时的。当样本不充分时,基于语义性内容检测的视点度量方法也难以得到较好的结果。Secord等<sup>[27]</sup>研究了許多几何特征和语义性内容对视点度量的影响,提出了一个视点度量的普适性模型,包括各种几何特征和语义性内容,并将它们的作用以加权的方式进行协调整合。该模型一般能得到较好的结果,但其计算开销比较大,协调各因素作用的权值要通过学习来获取,不便于实践应用。

为提高视点度量的有效性,我们提出一种度量方法<sup>[28]</sup>:不像已有方法那样在三维空间直接考察模型的特征,而是考察模型在视点关联的成像面上投影的曲率变化情况。如图1所示,首先将三维模型投影到成像面,在成像面上构建关联的法向场,然后根据这个法向场检测成像面上曲率的变化。这样,可自然过滤掉模型细节特征的影响,主要考察模型主要特征,并且透视变换对成像的影响也一并考虑,同时通过修改熵值计算,使得所找到的好视点确实能有效观察到模型

更多的主要内容。实验表明,我们的方法所得的好视点,与基于语义性内容检测的度量方法所得结果很接近,结果见图2。由于我们只检测几何特征,不检测语义性内容,因此我们方法操作方便,速度较快,便于实践应用。当然,当模型观察的语义性内容与其几何特征关联很弱时,我们方法就不便实施。比如:我们在日常生活中习惯从上方观察一张桌子,但我们这个方法所找到的好视点是从小方观察桌子,这是因为从小方观察能看到桌子更多的几何特征。

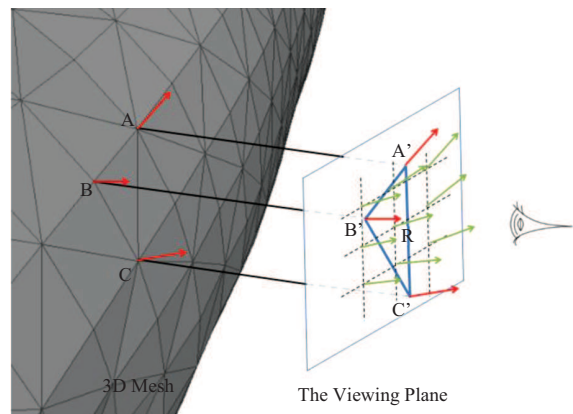


图1 构建成像面上的法向场

Fig. 1 Constructing the normal field on the viewing plane



图2 Wang等<sup>[28]</sup>方法所得到的好视点

Fig. 2 Good views obtained with the method in

Wang et al.<sup>[28]</sup>

视点度量,往往要对每个视点所看到的模型内容进行考察,计算复杂度较高。在最近的研究

中，我们提出基于代理信息的视点度量方法<sup>[29]</sup>，首先对模型进行分析以获取其用于视点度量的代理信息。具体地，首先根据其基于主元分析 (Principal Component Analysis) 所得包围盒的六个面，建立六个方位观察的模型代理信息，包括从这些方位观察的模型投影面积和可见面片数目。然后，在视点度量时，根据视线方向与代理信息关联方向的夹角，以加权的方式使用这些代理信息。实验表明，该方法所得好视点与人们的期望很接近。在计算效率方面，由于视点度量时只使用六个方位的代理信息，计算复杂度与模型的面片数无关，因此，该方法相比已有方法有 2 个数量级以上的速度提升，并且模型规模越大，速度提升越多，结果见图 3。

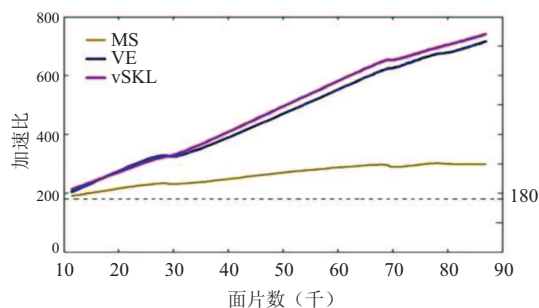


图 3 Gao 等<sup>[29]</sup>方法相比 ME<sup>[14]</sup>、VE<sup>[16]</sup>和 vSKL<sup>[6]</sup>方法的加速情况

Fig. 3 Acceleration times for the method in Gao et al.<sup>[29]</sup> against ME<sup>[14]</sup>, VE<sup>[16]</sup> and vSKL<sup>[6]</sup>

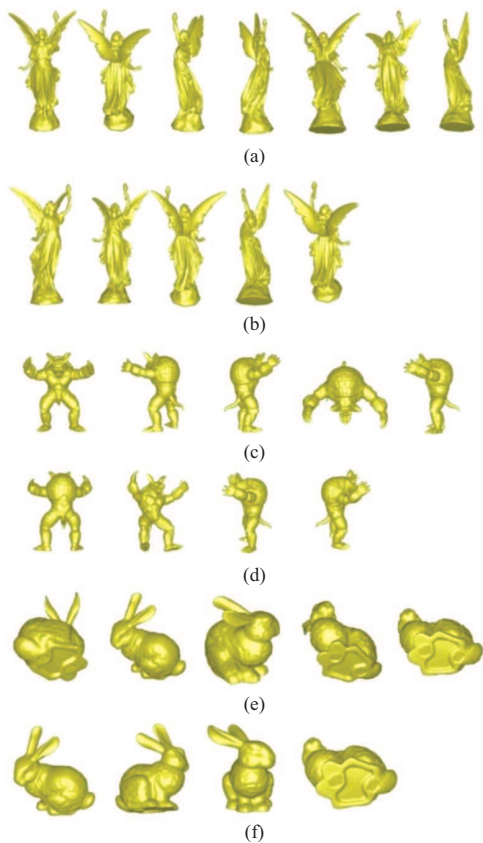
### 3 视点采样

由于视点度量的计算开销比较大，一些工作探讨了视点采样的优化处理，以节省要度量的视点数目。Polonsky 等<sup>[7]</sup>提出对模型进行主元分析形成模型的紧致包围盒，以该包围盒的 8 个顶点作为采样的视点。该方法对不少模型是有效的，但主元分析只便于反映模型的低频特征，使得该方法的适应范围有限<sup>[30]</sup>。Polonsky 等<sup>[7]</sup>还提出了基于法向聚类的采样方法，即沿着具有更多面片

的法向方向很可能看到更多的模型内容，因而可作为好视点方向的候选者；但这种处理有很大的局限性，如对于一个长方体，这样处理所得的观察方向就很难同时看到它的三个面，不符合好视点的要求。目前，使用比较多的一种采样方式是<sup>[6]</sup>：首先稀疏采样少量的视点，然后根据相邻视点的度量情况，以梯度下降优化方法，逐步地增加采样视点，直至收敛。但该方法要求视点度量的情况相对于采样视点位置的平滑移动而言不能有剧烈的变化，而这在实际处理中是很难保证的。因此，该方法很可能漏掉好视点。迄今为止，常用的采样方式是在观察球面上均匀而密集地采样，以防止漏掉好视点。显然，这样处理的计算开销很大。

关于视点采样，我们在 2016 年的研究中提出一个方法<sup>[31]</sup>：先在观察球面上找到很可能包含好视点的区域，然后再在这样的区域内进行均匀的视点采样。这样的区域只占观察球面上很小的面积，因此我们的采样方式可大幅节省采样视点，提高视点选择的效率。特别地，这样的区域确保了好视点的质量，避免了视点度量对一些差视点的误判，所得结果一般优于目前的视点选择方法。将该采样方法用于视点集的生成时，避免了已有方法的采样盲目性，提高了各采样视点的互补性，可有效减少视点集中所需视点的数目，并提高计算效率。该方法主要依据人们观察模型时的视觉感知机制<sup>[32-34]</sup>，即：人们在认知一个模型时，往往是将其分解成 10 个左右的部分，并了解这些部分之间的相关性。因此，我们先对模型进行蕴意分割，得到 10 个左右的分块，然后计算各个分块的好视点，并在观察球面上对这些好视点进行聚类，使得每个类中含有多个分块的好视点。这样，每个类中的视点均能有效观察多个分块以了解它们之间的相关性，各个类就形成了包含好视点的区域。在寻找各个分块的好视点时，我们提出了一种解析计算方式，可根据分

块的主元分析所得包围盒，快速计算其相关的好视点，避免了在其周围采样视点并度量的常用方法的麻烦。实验表明，该采样方法可将视点选择的效率提高 6~12 倍。当用于视点集生成时，与 Serin 等<sup>[6]</sup>和 Secord 等<sup>[27]</sup>的方法相比，我们提出的方法<sup>[31]</sup>可有效减少所需视点数量（见图 4）。



(a) 为 Secord 等<sup>[27]</sup>方法；(c)、(e) 为 Serin 等<sup>[6]</sup>方法；(b)、(d)、(f) 为 Wang 等<sup>[31]</sup>方法

图 4 相比于 Serin 等<sup>[6]</sup>和 Secord 等<sup>[27]</sup>的方法，Wang 等<sup>[31]</sup>的视点采样方法减少了视点集所需的视点数量

Fig. 4 Compared with the methods in Serin et al.<sup>[6]</sup> and Secord et al.<sup>[27]</sup>, the method in Wang et al.<sup>[31]</sup> can reduce the required views for comprehensive investigation of models

## 4 相关应用

视点选择技术除了用于提高三维模型观察

认知效率外，还在许多方面有拓展应用，如在三维数据场体绘制中将透明度和色彩信息引入视点度量中，能使所得的可视化图像更好地展示数据场中的内容<sup>[35,36]</sup>；在蛋白质模型的检索比对时，找到具有最大和最小横截面的视点，将有助于减少比对的工作难度<sup>[37]</sup>。在此，我们介绍使用视点选择技术提高模型摆正方向检测效率的一个应用。

近些年来，关于模型摆正方向探测的工作很多，因为这有利于模型对齐、功能探测等应用。这方面的工作主要是针对人造模型进行探讨<sup>[21,38-41]</sup>，以方便利用人造模型的几何规整、对称性强、具有明显底座等特点提高检测成效。对于非人造模型，如人体、树木等，则缺乏相关研究。在 2015 年的研究中，我们提出一种模型摆正方向检测方法<sup>[42]</sup>，可有效处理多种模型，包括人造和非人造的自然模型。其出发点是：无论是人造模型还是自然形成的非人造模型，其底部往往是表面内容很贫乏的区域，而这样的区域对应视点的度量评价会很差。因此，我们可使用视点选择技术找到视点度量较差的一些视点方向作为摆正方向候选者，然后再根据摆正稳定性、支撑性等方面的检测来确定摆正方向，在此，好视点与摆正方向一般具有 45° 夹角的先验知识<sup>[7]</sup>也用以提高检测的有效性。实验表明，我们的方法能够高效地处理不同种类的模型，包括一些已有方法难以处理的情况（见图 5），并具有很好的计算效率（见表 1），因为我们减少了要检测的候选摆正方向。

## 5 结 语

面向三维模型高效观察的视点选择技术已有很多的研究，并在一些实践工作中发挥了积极的作用。但模型的视觉感知机制还是一个有待深入研究的问题，目前还缺少鲁棒的可计算模型，需

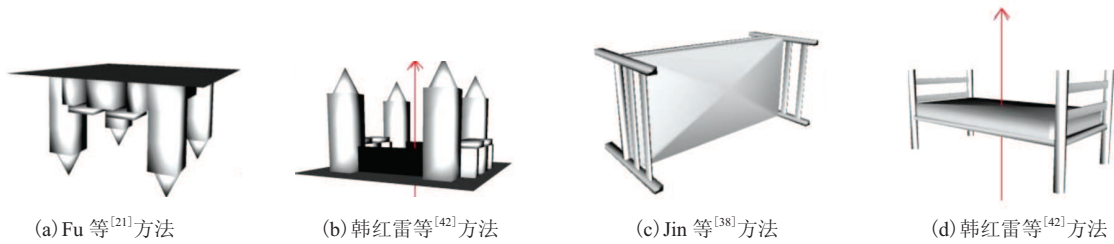


图 5 Fu 等<sup>[21]</sup>和 Jin 等<sup>[38]</sup>方法难以处理的模型，韩红雷等<sup>[42]</sup>方法可得到正确的摆正结果

Fig. 5 For the models that are difficult to treat with the methods in Fu et al.<sup>[21]</sup> and Jin et al.<sup>[38]</sup>, the method in Han honglei et al.<sup>[42]</sup> can get their right upright orientation

表 1 关于摆正方向检测效率的对比

Table 1 Efficiency comparison on upright orientation

detection		
摆正方法	平均耗时	CPU 频率(GHz)
Fu 等 <sup>[21]</sup>	十几秒	2.13
Jin 等 <sup>[38]</sup>	十几秒	2.5
Lin 等 <sup>[39]</sup>	上百秒	2.33
姜玻等 <sup>[40]</sup>	几十秒	2.6
Wang 等 <sup>[41]</sup>	几十秒	3.3
韩红雷等 <sup>[42]</sup>	小于 8 秒	2.0

注：韩红雷等<sup>[41]</sup>的方法实验所用 CPU 能力弱于其他方法所用的 CPU。

要进一步的努力。实践应用中对模型认知的需求会有不同，因此，结合具体的实践任务需求，探索与任务相关的感知特征进行优化的视点度量，特别是研究与任务需求相关的语义性内容度量技术及方法，是今后一段时间内的主要研究内容。这对于促进视点选择技术的发展，并提高实践应用的工作水平，具有重要的意义。在此，拓展视点选择技术的应用领域具有重要的意义。为便于视点选择技术的实践应用，研发一些便捷的工具和系统，也是今后发展的重要方面。本文对视点选择技术进行了一些简略介绍，管中窥豹，希望对这方面的相关工作者有所裨益。

## 参考文献

- [1] Palmer SE, Rosch E, Chase P. Canonical perspective and the perception of objects [J]. *Attention & Performance*, 1981, 1: 135-151.
- [2] Kamada T, Kawai S. A simple method for computing general position in displaying three-dimensional objects [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, 41(1): 43-56.
- [3] Weinshall D, Werman M. On view likelihood and stability [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(2): 97-108.
- [4] Blanz V, Tarr MJ, Bülthoff HH. What object attributes determine canonical views? [J]. *Perception*, 1999, 28(5): 575-599.
- [5] Tarr MJ, Kriegman DJ. What defines a view? [J]. *Vision Research*, 2001, 41(15): 1981-2004.
- [6] Serin E, Sumengen S, Balcişoy S. Representational image generation for 3D objects [J]. *The Visual Computer*, 2013, 29(6-8): 675-684.
- [7] Polonsky O, Patané G, Biasotti S, et al. What's in an image? [J]. *The Visual Computer*, 2005, 21(8-10): 840-847.
- [8] Varhaníková I, Hučko M, Černeková Z, et al. Study of the best view selection based on a human observer [C] // 2013 XXIV International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies, 2013: 1-7.
- [9] Dutagaci H, Cheung CP, Godil A. A benchmark for best view selection of 3D objects [C] // *Proceedings of the ACM Workshop on 3D Object Retrieval*, 2010: 45-50.
- [10] Plemenos D, Benayada M. Intelligent display in

- scene modeling: new techniques to automatically compute good views [C] // 1996 International Conference on Computer Graphics & Vision, 1996.
- [11] Vázquez PP. Automatic view selection through depth-based view stability analysis [J]. *The Visual Computer*, 2009, 25(5-7): 441-449.
- [12] Vieira T, Bordignon A, Peixoto A, et al. Learning good views through intelligent galleries [J]. *Computer Graphics Forum*, 2009, 28(2): 717-726.
- [13] Meyer M, Desbrun M, Schröder P, et al. Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds [J]. *Mathematics & Visualization*, 2014, 6(8-9): 35-37.
- [14] Lee CH, Varshney A, Jacobs DW. Mesh saliency [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 659-666.
- [15] Leifman G, Shtrom E, Tal A. Surface regions of interest for viewpoint selection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016.
- [16] Vázquez PP, Feixas M, Sbert M, et al. Viewpoint selection using viewpoint entropy [C] // *Proceedings of the Vision Modeling and Visualization Conference*, 2001: 273-280.
- [17] Sbert M, Plemenos D, Feixas M, et al. Viewpoint quality: measures and applications [C] // *Proceedings of the First Eurographics Conference on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging*, 2005: 185-192.
- [18] Feixas M, Sbert M, González F. A unified information-theoretic framework for viewpoint selection and mesh saliency [J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2009, 6(1): 1-23.
- [19] Sbert M, Feixas M, Rigau J, et al. Applications of information theory to computer graphics [C] // *International Conference on Artificial Intelligence and Computer Graphics*, 2002.
- [20] Shilane P, Funkhouser T. Distinctive regions of 3D surfaces [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(2): 7.
- [21] Fu HB, Cohen-Or D, Dror G, et al. Upright orientation of man-made objects [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 42.
- [22] Mortara M, Spagnuolo M. Semantics-driven best view of 3D shapes [J]. *Computers & Graphics*, 2009, 33(3): 280-290.
- [23] Chen XB, Sapiro A, Pang B, et al. Schelling points on 3D surface meshes [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 29.
- [24] Laga H. Semantics-driven approach for automatic selection of best views of 3D shapes [C] // *Proceedings of the 3rd Eurographics Conference on 3D Object Retrieval*, 2010: 15-22.
- [25] Liu H, Zhang L, Huang H. Web-image driven best views of 3D shapes [J]. *The Visual Computer*, 2012, 28(3): 279-287.
- [26] Lienhard S, Specht M, Neubert B, et al. Thumbnail galleries for procedural models [J]. *Computer Graphics Forum*, 2014, 33(2): 361-370.
- [27] Secord A, Lu JW, Finkelstein A, et al. Perceptual models of viewpoint preference [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(5): 1317-1329.
- [28] Wang W, Yang L, Wang D. Finding canonical views by measuring features on the viewing plane [C] // *Asia-Pacific Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, 2012.
- [29] Gao TH, Wang WC, Han HL. Efficient view selection by measuring proxy information [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2016, 27(3-4): 351-357.
- [30] Kazhdan M, Funkhouser T, Ruisinkiewicz S. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors [C] // *Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium*

- on Geometry Processing, 2003: 156-164.
- [31] Wang W, Gao T. Constructing canonical regions for fast and effective view selection [C] // The 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2016), 2016.
- [32] Biederman I, Gerhardsteinb PC. Viewpoint-dependent mechanisms in visual object recognition: reply to tarr and bülthoff [J]. *Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1995, 21(6): 1506-1514.
- [33] Tarr MJ, Bülthoff HH. Image-based object recognition in man, monkey and machine [J]. *Cognition*, 1998, 67(1-2): 1-20.
- [34] Tarr MJ, Williams P, Hayward WG, et al. Three-dimensional object recognition is viewpoint dependent [J]. *Nature Neuroscience*, 1998, 1(4): 275-277.
- [35] Bordoloi UD, Shen HW. View selection for volume rendering [C] // IEEE Conference on Visualization, 2005: 487-494.
- [36] Ji G, Shen HW. Dynamic view selection for time varying volumes [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2006, 12(5): 1109-1116.
- [37] Au CK, Cai YY, Zheng JM, et al. Orienting a protein model by crossing number to generate the characteristic views for identification [J]. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2010, 68(3): 221-237.
- [38] Jin Y, Wu Q, Liu L. Unsupervised upright orientation of man-made models [J]. *Graphical Models*, 2012, 74(4): 99-108.
- [39] Lin CK, Tai WK. Automatic upright orientation and good view recognition for 3D man-made models [J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(4): 1524-1530.
- [40] 姜玻, 曾鸣, 刘新国. 利用形状特征的三维人造物体模型正朝向识别算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(8): 1099-1106.
- [41] Wang W, Liu X, Liu LG. Upright orientation of 3D shapes via tensor rank minimization [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(7): 2469-2477.
- [42] 韩红雷, 王文成, 华淼. 基于视点评分的三维模型摆正 [J]. *软件学报*, 2015, 26(10): 2720-2732.