

基于特征点检测的三维模型最佳视点选择

朱帆*, 杨风雷

(上海大学 计算机工程与科学学院, 上海 200072)

(* 通信作者电子邮箱 zhfan@shu.edu.cn)

摘要:针对三维模型最佳视点选择问题,提出了一种基表面特征点检测的视点选择算法。首先引入一种基于局部平均形心距离差的顶点显著性度量方法,认为三维网格模型表面某顶点的显著性是由该顶点与形心之间距离和该顶点邻域内的顶点与形心之间距离的平均差值来刻画,而不是该点所在位置的弯曲程度所决定;然后根据顶点的显著性大小进行三维模型表面特征点检测;最后针对视点球体上的每个候选视点分析该视点下可见特征点的几何分布和显著度大小计算视点质量,提取出最佳视点。实验结果验证了基于三维模型特征点的视点选择方法的有效性,在能够选择出质量较优的视点的同时保证算法的效率。

关键词:三维模型;顶点显著度;特征点检测;视点质量;最佳视点

中图分类号: TP391.412 **文献标志码:** A

Best viewpoints selection based on feature points detection

ZHU Fan*, YANG Fenglei

(School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper proposed a new best viewpoints selection approach that was capable of selecting best viewpoints for 3D models based on a feature points detection process. First, a new saliency measure was defined to compute the saliency of 3D meshes vertices, which assumed that the saliency of a given vertex on a 3D model could be described by its average difference of distances within a local space. Then, the effective feature points were promisingly able to be extracted based on vertices saliency. Finally, a simple selection strategy was adopted to determine the best viewpoints for 3D mesh models. The quality of viewpoints was a combination of the geometric distribution and the saliency of visible feature points. The experimental results validate the effectiveness of the proposed approach, which can measure viewpoint quality objectively and obtain the best viewpoints of good visual effect.

Key words: 3D model; vertex saliency; feature points detection; viewpoint quality; best view point

0 引言

现实世界是三维的,但由于人类视觉系统生物结构的原因,人眼得到的却是二维图像,只能对三维物体的可见部分进行感知。这一感知过程明显地具有主观性和视点依赖性,即从不同的视点位置观察同一三维物体,所获得的视图一般是不相同的,从而形成对该物体的认知也是不同的。关于最佳视点选择的讨论由来已久,一个好的视点应该具有易辨识性,符合人们的观察习惯且符合一定的美学标准^[1]。在计算机图形学领域,三维模型的形状分析与处理、场景理解、场景优化等,最佳视点选择是基本任务之一;在其他领域,如计算机辅助设计、医学图像处理,最佳视点选择也逐渐成为热门研究技术。

在计算机图形学领域,目前已出现多类算法用来处理三维模型最佳视点的自动选择问题。在三维模型分析、识别等处理过程中,视觉显著信息显然起到了至关重要的作用,基于三维模型视觉显著信息的视点选择方法也越来越多地呈现在大家面前,此类方法可大致分为两大步骤:1)首先检测三维模型的显著性信息;2)根据视点下显著性信息量的大小度量候选视点质量,质量最优的视点即为最佳视点。如:Lee等^[2]首先利用局部平均曲率来定义网格显著度(Mesh Saliency),视点质量的优劣即可用该视点下可见网格的显著度之和的大

小来评价;Sokolov等^[3]为每个顶点和每条边均定义一种曲率,然后观察视图中统计可见边与顶点的曲率和,曲率的大小作为观察视点的质量;杨利明等^[4]通过计算网格在视平面上的相关曲率及关于该曲率的一个熵函数值来计算视点质量。但是,上述方法主要存在以下两个方面的缺陷:1)这些方法所检测到的显著性信息均是以曲率计算为基础的,但曲率本身反映的是三维模型表面一个极小范围内的几何性质,只能反映某点所在位置的弯曲程度,而弯曲程度未必是一种理想的视觉显著性度量方法^[5];2)视点质量计算仅仅统计了视点下显著性信息量的大小,忽略了三维模型的几何信息。

由于上述方法存在的这两大缺陷,本文提出了一种新基于三维模型表面特征点显著度和几何分布的视点选择算法。针对基于曲率的显著性计算方法所存在的缺陷,提出了一种基于顶点局部平均形心距离差的特征点检测方法,该方法通过选择适当的邻域范围,计算邻域内所有顶点与形心之间的欧氏距离,由于相邻近的顶点到形心之间的距离应是相近的,利用顶点与形心之间的距离与邻近顶点与形心之间距离的平均差值来描述该点的显著程度,而非它的弯曲程度来定义;针对视点质量计算过程中仅考虑了视点下三维模型显著性信息量的不足,提出了一种综合考虑三维模型表面特征点的几何分布和显著度的视点质量计算方法,首先根据视点下可见特征点在视平面上投影的最小包围盒面积初步度量视点质量,

收稿日期:2013-05-22;修回日期:2013-07-22。

作者简介:朱帆(1989-),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向:计算机视觉; 杨风雷(1976-),男,安徽宿州人,讲师,博士,主要研究方向:计算机视觉、机器学习、人工智能。

视点下可见特征点的投影分布面积越大,则表示该视点下三维模型的可见几何元素信息越多,根据包围盒面积大小从候选视点集合中选择一个较小但质量较优的视点集,再根据可见特征点的显著度之和的大小从较优的视点集合中快速选择出最佳视点,故所选择的最佳视点不仅能够观察到三维模型的较大的几何区域,而且该可见区域中所蕴含的显著性信息量也足够大。

本文所提出的最佳视点选择算法步骤如下:1)首先对三维模型表面进行特征点检测,先基于局部平均形心距离差的显著性度量方法计算顶点显著度,根据顶点显著度大小提取特征点;2)选择候选视点,在三维空间内采样合适的视点对三维模型进行观察;3)根据候选视点下三维模型可见的表面特征点的几何信息和视觉显著信息计算视点质量,即先计算视点下所有可见特征点的投影包围盒面积,根据面积大小从候选视点中筛选出较优的视点集合,再根据可见特征点的显著度之和的大小从较优的视点集合中选出最佳视点。

1 特征点检测

传统的二维图像处理技术中,认为图像灰度值剧烈变化或位于图像边缘中曲率极大值的点为图像中的显著性较高的点,即特征点。三维模型特征点是指表面几何属性变化比较大的那些点的集合,几何属性一般包括点的法向量和曲率。随着三维模型数据的广泛应用,三维模型表面特征点的检测得到了诸多研究学者的关注,但截止目前,三维模型表面特征点的检测还没有一种统一的方法。目前,大部分三维模型表面显著性点检测方法均是基于曲率为基础。如,Zou 等^[6]以曲率计算为基础,辅以平滑技术,然后把具有局部极值的网格顶点视为特征点,但曲率本身反映的是三维模型表面一个极小范围内的几何性质,对噪声不具有鲁棒性,未必是一种理想的视觉显著性度量方法;杨育彬等^[5]提出了一基于局部高度的三维模型显著性点检测算法,认为在三维模型表面某点的视觉显著性由它所在位置的凸起程度来刻画,这种算法能够检测到的三维模型较为显著性的凹凸点,但顶点局部高度的计算需要确定参考平面,这也正是该算法的难点之一。

基于上述思想的启发,本文定义了一种新的特征点检测算法,认为三维表面某点的视觉显著性是由它的局部平均形心距离差值来描述的。假设 V 为三维模型的顶点集合,其思想是:依次以顶点集合 V 中的每个顶点 v 为中心,通过选择适当的邻域范围,计算顶点 v 邻域内的所有顶点与形心之间的欧氏距离,由于相邻近的顶点到形心之间的距离应是相近的,利用顶点 v 与形心之间的距离与邻域内其他点与形心之间距离的平均差值来反映该点的显著程度,其计算公式如式(1)所示:

$$S(v_i) = \left(\sum_{j=1}^{N_{v_i}} |d(v_i) - d(v_j)| \right) / N_{v_i} \quad (1)$$

其中: $S(v_i)$ 表示顶点 v_i 的显著度, N_{v_i} 是以顶点 v_i 为中心邻域内除 v_i 外所有顶点总数目, $d(v_i)$ 是顶点 v_i 与形心之间的欧氏距离, $d(v_j)$ 是邻域内第 j 个顶点与形心之间的距离。局部平均距离差度量方法,如式(1)所示,可以为每个模型计算得到一个顶点显著度集合 S 。

接下来要运用顶点的显著度对顶点进行聚类,提取三维模型表面的特征点。由于顶点的显著度是和邻域半径相关的,在这里,本算法分别采用不同的邻域半径,设网格顶点之间的平均距离为 d ,则邻域半径 R 分别取 $d, 2d, 3d, 4d$,根据式(1)分别计算不同邻域半径下顶点的显著度 $S_d, S_{2d}, S_{3d}, S_{4d}$ 。根据

4个不同的显著度集合可以提取4个不同的特征集合 $FP_d, FP_{2d}, FP_{3d}, FP_{4d}$ 。再提取所有邻域半径下所检测到的特征点集合的交集,则该交集即为模型的特征点集合 FP 。

针对某一具体的三维模型,其特征点提取的步骤如下:

- 1) 输入三维模型顶点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。
- 2) 计算网格顶点之间的平均距离 d 。
- 3) 确定邻域半径, $R = nd, n$ 初始值为 1。
- 4) 搜索每个顶点的 R 邻域,统计其 R 邻域内的顶点数。
- 5) 使用式(1) 计算 R 邻域内每个顶点的显著度 $S_R(v_i)$ 。
- 6) 利用给定的阈值 δ 判断顶点是否为特征点,提取该邻域内下的特征点集 FP_R 。
- 7) 当 n 小于 4 时, $n = n + 1$, 转到第 3) 步; 否则转到第 8) 步。
- 8) 特征点集 $FP = \cap FP_R, R$ 分别取 $d, 2d, 3d, 4d$ 。

2 最佳视点选择

2.1 候选视点选择

一个模型可以从无数个视点对它进行观察,能够得到无数个视图,但是提取过多的视点会增加计算量,降低算法效率。另一方面,算法又要必须从足够多的视点取得视图,如果候选视点数目不够多,模型上的一些重要细节就可能因被遮蔽而丢失,从而影响选择的最佳视点的效果。权衡这两点,本算法所选择的候选视点如文献[7]中所采用的候选视点一致,对一个八面体进行迭代网格细分,最终得到一个含有 258 个顶点的视点球体。假设 VP 为候选视点集合,则 $VP = \{vp_1, vp_2, \dots, vp_{258}\}$ 。

2.2 视点质量计算

到目前为止,何为最佳视点并没有确切的定义,但普遍接受的一种说法是:从该视点观察,所获得的信息量最多,则该视点即为最佳视点。基于几何元素,如视点下可见顶点数目、可见面片数目、面片投影面积等因素的视点质量计算^[8-13] 执行效率高,能够观察到特定的几何信息,但是忽略了三维模型的几何元素的视觉显著性;而基于视觉显著性,如曲率、网格显著度等因素的视点质量计算^[2,14-15] 虽然能够较好地捕捉到视点观察到的视觉信息,但是却忽略了三维模型的几何信息。综合以上两类方法的优点,本文提出了一种综合特征点几何分布和显著度的视点质量计算方法,不直接依赖于网格模型的顶点与面片,而是基于特征点所蕴含信息量的大小来度量视点质量。该方法的基本思想是,若视点下可见特征点的几何分布越广且显著度越大,则该视点质量越优。这样视点质量评价不仅考虑了视点下的三维显著性信息量的大小,也综合考虑了三维模型的几何分布信息。该方法的主要步骤如下:特征点的可见性判断;特征点显著度计算;根据特征点的在视平面上的几何分布初步计算视点质量,提取较优的视点集合;对所有可见特征点的显著度进行累和,显著度之和最大的视点即为最佳视点。

对于特征点的可见性判断,先用特征点的法向与视线的夹角来去掉不可见的特征点,再根据遮挡算法计算可见性。特征点的显著度量采用融合不同邻域下显著度的方法,其计算公式如式(2)所示:

$$S(fp) = \sum_{R=d}^{4d} S_R(fp) \quad (2)$$

视点的初质量以该视点下可见特征点在视平面上投影分布的最小包围盒的面积来度量,面积较大的视点即为质量较

优的视点,从而得到一个较优的视点集合 $OPT_VP = \{ovp_1, ovp_2, \dots, ovp_n\}$, n 表示较优的视点数目 ($n < 258$)。对 OPT_VP 中的所有视点统计每个视点下可见特征点的显著度之和,其计算公式如式(3)所示:

$$Q(ovp_i) = \sum_{j=1}^{N_i} S(fp(j)) \quad (3)$$

其中: ovp_i 表示 OPT_VP 集合中的第 i 个视点; $Q(ovp_i)$ 表示第 i 个视点 ovp_i 的质量; $fp(j)$ 表示该视点下可见的第 j 个特征点; $S(fp(j))$ 代表该特征点的显著度,其计算方法如式(2)所示, N_i 表示第 i 个视点下可见特征点的总数目。根据式(3)的计算,可以为较优候选视点集合 OPT_VP 中每个视点统计该视点下可见特征点的显著度之和,显著度之和最大的视点即为最佳视点。

针对某一具体的三维模型,其最佳视点选择过程如下:

- 1) 输入视点集合 $VP = \{vp_1, vp_2, \dots, vp_{258}\}$, 三维模型特征点集合 $FP = \{fp_1, fp_2, \dots, fp_m\}$;
- 2) 根据式(2) 计算每个特征点的显著度;
- 3) 判断每个视点下的可见特征点集合 $VFP = \{vfp_1, vfp_2, \dots, vfp_p\}$;
- 4) 计算每个视点下可见特征点的投影分布最小包围盒面积;
- 5) 利用包围盒面积的大小判断视点是否为较优的视点,提取较优视点集合 OPT_VP ;
- 6) 根据式(3) 计算较优视点集合中每个视点下可见特征点的显著度之和;
- 7) 最佳视点即为显著度之和最大的视点。

3 实验结果

本文所使用的模型均是三维形状分析研究中所广泛应用的模型,实验中使用的这些模型均来自于 The Stanford 3D Scanning Repository^[16] 和 AIM SHAPE 的 Watertight Track of SHREC 2007^[17] 数据库。

顶点显著度是基于顶点与形心之间的局部平均距离差计算得到的,邻域半径的大小决定了在计算某顶点的局部平均距离差值时需要搜索的邻居范围,因此利用不同的邻域半径所计算得到的顶点显著度大小也会有所差异。本文第 1 个实验即用来验证邻域半径对顶点显著度大小的影响,设 d 为网格模型顶点之间的平均距离,图 1(a) ~ (d) 表示的是不同模型当 R 取 $d, 2d, 3d, 4d$ 时顶点显著度分布情况。由图 1 可知,当 R 取值较小时,所考虑的范围较小,局部平均形心距离差值也较小,如图 1(a) ~ (d) 中第 1 列图像所示,大部分顶点的显著度都偏小。当随着 R 取值的增大,顶点的平均形心距离差值会越来越大。不管在何种邻域半径下,视觉显著度高的部分所计算得到的显著度都是对应比较大的,如图 1(b) 中的 bunny 模型耳部和尾部, horse 模型的头部和腿部等始终是显著度较大的部分;而视觉显著度性不高的部位,如马的中间身段,所计算得到的显著度则始终较小。

第 2 个实验将局部平均形心距离差与曲率进行比较。其中图 2 中的(a)、(c)表示平均曲率,而(b)、(d)是用本文所提出的方法来进行表示的。由图可以看出,平均曲率错误地将一些非显著性区域判断为显著性区域,如图 2(a) 中 horse 模型的身体中段。这本身是由于曲率是表示一个极小范围内的极值,且弯曲程度与视觉重要性未必一致,而本文所提出的

度量方法更加符合人的视觉特性。

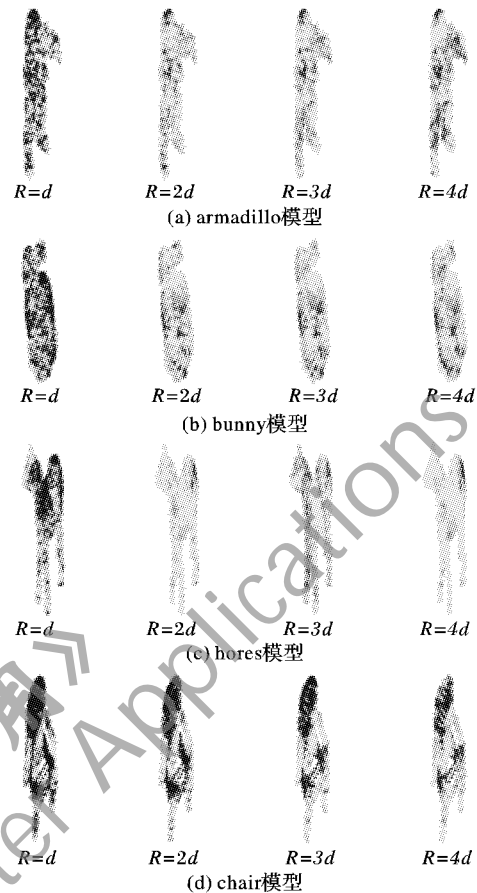


图 1 邻域半径 R 对顶点显著度大小的影响

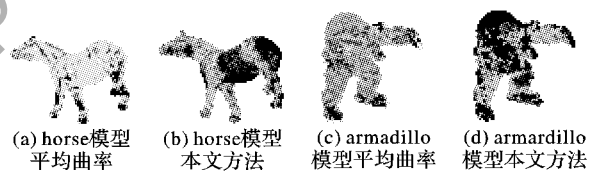


图 2 曲率与本文方法的比较

从第 2 章的描述可知,顶点显著度集合 S 中根据一定的阈值 δ 提取出显著度较大顶点作为特征点,故阈值的大小会影响最终所提取的特征点集合。当 δ 设置过大时,所提取的特征点集合会很小,因此不具有全面性;若阈值 δ 设置过小时,所提取的特征点集合又会偏大,增加后续最佳视点选择算法的计算负担。实验 3 即用来验证阈值 δ 大小对于特征点提取的影响,图 3(a) ~ (d) 中第 2 ~ 4 列图像分别给出了当 δ 分别取值为 $0.6maxS, 0.7maxS, 0.8maxS$ 时所提取的各个模型表面特征点的分布情况,其中 $maxS$ 是顶点显著度集合 S 中的最大值。由于本文所提取的特征点要用于后续的视点选择过程中,由实验结果可知,阈值取 $0.7maxS$ 时比较合适。

根据视点下可见特征点的投影最小包围盒面积能够初步计算候选视点的质量,提取包围盒面积较大的视点作为较优的视点集合。图 4(b) ~ (d) 中视点球上的黑色实心视点即为算法所提取的较优的视点集合,其中 armadillo 模型、bunny 模型、human 模型所提取的较优视点个数分别是 62, 25, 55。bunny、armadillo、human 模型的部分较优视点下的视图分别如图 5(a) ~ (c) 所示(其中:从左到右为该模型较优候选视点集合 OPT_VP 中的排名前 6 的视图)。从图 5 可知,算法所得到的较优视图能够观察到较大的投影面积且对模型的重要区域的观察也够充分。

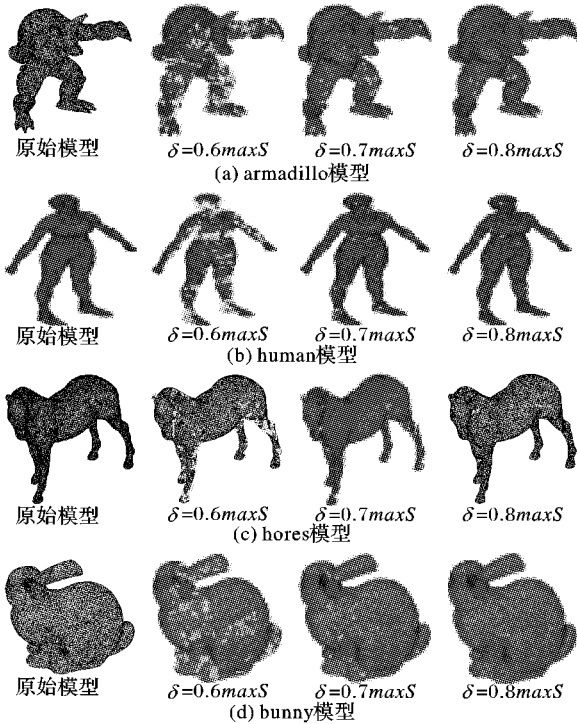


图 3 阈值大小对特征点提取的影响

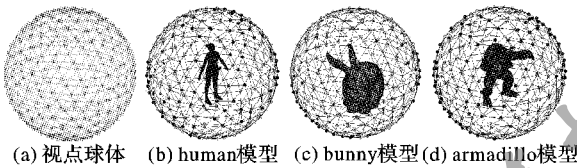


图 4 视点球体与模型的较优视点集(黑色实心视点)

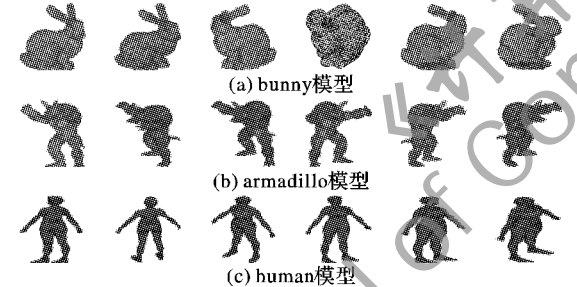


图 5 部分较优视图

图 6 给出了根据式(3)计算所得到的最佳视点所对应的视图。视点下可见特征点的显著度之和越大视点质量越好。由于所提取的较优视点集已经保证了视点下的几何信息量,故本文提取的最佳视点综合考虑了视点下可见的几何信息和显著性信息,如图 6(c)中 bunny 模型和 6(g)中的 head 模型的最佳视图中不仅能够观察到视觉显著性信息,还能观察到模型底部分的部分结构。

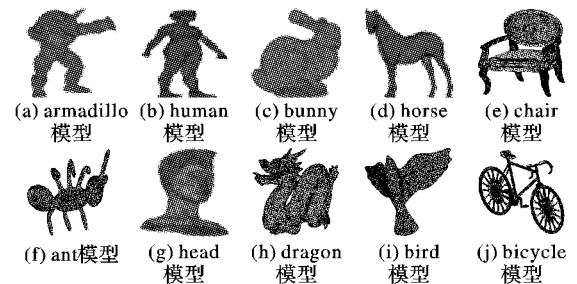


图 6 最佳视图

4 结语

本文借助于三维模型表面特征点检测来进行最佳视点选

择。视点质量综合考虑了模型特征点的几何信息量和显著性信息量,从算法所选择的最佳视点观察得到的视点在能够观察到显著性区域的同时能够保证观察到的三维模型几何信息。该方法与其他方法相比较,其主要优点在于:特征点的提取依赖于顶点的局部平均形心距离差,而非传统顶点的曲率或法向量;视点质量计算仅仅依赖于所提取的特征点,而不是直接依赖于三维模型的顶点和面片,故视点质量计算效率较高,视点质量综合考虑了特征点的几何信息和视觉特性,能够更加客观地度量视点质量。

但是,本文所提出的方法还存在一定的局限性与不足之处。如,提取特征点过程中的阈值的选取需要根据不同模型的复杂程度和应用需求来自适应地选择,而且所提取的部分特征点可能集中一个小的区域范围内,降低了后续视点质量计算过程的效率,可采取邻域内非极大值抑制方法进一步精确特征点的位置。这也是后述的研究工作之一,而且该方法是基于三维模型的特征点的检测进行视点质量评价,将来的研究可以从以下几个方面考虑:一方面可以考虑采用其他的显著性度量方法进行三维模型表面特征点检测;另一方面,可以考虑利用三维模型其他特征信息,如特征线、显著性区域等来进行最佳视点质量;视点质量的计算可以综合多种不同的特征信息的显著性度量。

参考文献:

- [1] BLANZ V, TARR M J, BULTHOFF H H, *et al.* What object attributes determine canonical views? [J]. Perception, 1999, 28(5): 579 - 599.
- [2] LEE C H, VARSHNEY A, JACOBS D W. Mesh saliency [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 659 - 666.
- [3] SOKOLOV D, PLEMENONS D. Viewpoint quality and scene understanding [C]// Proceedings of the 6th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage. Aire-la-Vile: Eurographics Association Press, 2005: 67 - 73.
- [4] 杨利明, 王文成, 吴恩华. 基于视平面上特征计算的视点选择 [J]. 计算机辅助设计与学报, 2008, 20(9): 1097 - 1103.
- [5] 林金杰, 朱代辉, 杨育彬. 3 维模型局部高度研究 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(10): 1841 - 1849.
- [6] ZOU G, HUA J, DONG M, *et al.* Surface matching with salient keypoints in geodesic scale space [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2008, 19(3/4): 399 - 410.
- [7] DUTAGACI H, CHEUNG P C, GODIL A. A benchmark for best view selection of 3D objects [C]// 3DOR' 10: Proceedings of the ACM Workshop on 3D Object Retrieval. New York: ACM Press, 2010: 45 - 50.
- [8] VAZQUEZ P P, FEIXAS M, SBERT M, *et al.* Viewpoint selection using viewpoint entropy [C]// Proceedings of the 2001 Vision Modeling and Visualization Conference. Stuttgart: AKA GmbH, 2001: 273 - 280.
- [9] VAZQUEZ P P, FEIXAS M, SBERT M, *et al.* Viewpoint entropy: a new tool for obtaining good views of molecules [C]// Proceedings of the 2002 Symposium on Data Visualization. Aire-la-Vile: Eurographics Association Press, 2002: 183 - 188.
- [10] VAZQUEZ P P. On the selection of good views and its application to computer graphics [D]. Barcelona: Technical University of Catalonia, 2003.
- [11] SBERT M, NEUMANN L, GOOCH B, *et al.* Viewpoint quality: measures and applications [C]// Proceedings of the 1st Eurographics Conference on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging. Aire-la-Vile: Eurographics Association Press, 2005: 185 - 192.

表 2 多种噪声密度下各类算法的 NMSE 比较

处理方法	噪声密度			
	3%	8%	16%	32%
本文算法	0.0071	0.0076	0.0095	0.0117
MDDF ^[17]	0.0092	0.0097	0.0113	0.0133
DDF	0.0604	0.0639	0.0746	0.0860

分析表 3 可知:本文算法的均方误差明显低于其他两种方法,峰值信噪比高于其他两种方法,故本文的算法是最优的。

表 3 多种噪声密度下各方法 MAE 和 PSNR 比较

滤波方法	评价标准	噪声密度		
		8%	16%	32%
DDF	MAE	3.3728	3.9676	4.4719
	PSNR/dB	42.8509	42.1455	41.6259
MDDF ^[17]	MAE	0.5120	0.5995	0.6996
	PSNR/dB	51.0381	50.3529	49.6823
本文算法	MAE	0.4021	0.4914	0.6003
	PSNR/dB	52.0875	51.2165	50.3471

4 结语

本文对 RGB 非均匀色彩空间的三基色的视觉灵敏度值做了估计,并将其应用于彩色图像滤波。根据图像被噪声污染的程度,综合考虑算法复杂度,适当地选取噪声检测窗口大小,防止了因窗口内全为噪声点而无法检测的情况。本文算法用粗糙集理论对噪声点做初步判断后,结合视觉灵敏度对噪声点再次进行了判断,提高了检测准确度。滤波窗口越小,滤波效果越好,算法的迭代形式让选择 3×3 大小窗口成为可能。同时本文对现有的 DDF 进行了更合理的改进,算法以迭代的形式只对噪声像素进行滤除,非噪声像素保持不变,且只让非噪声像素作为滤波器的输入,有效地防止了噪声点的传播。实验结果表明,本文提出的算法可得到很好的滤波效果,且可很好地保持图像色彩及边缘。该非均匀色彩空间的视觉灵敏度还可以应用于图像处理的其他领域。

参考文献:

- [1] 吕玮阁,徐海松,汪哲弘,等.基于不同颜色方向和空间频率的彩色对比灵敏度特性研究[J].光学学报,2011,31(1):293-298.
- [2] 曾旺,徐海松,汪哲弘,等.基于不同颜色背景的人眼辨色阈值特性研究[J].光学学报,2011,31(1):287-292.
- [3] 付忠良.基于图像差度量度的阈值选取方法[J].计算机研究与发展,2001,38(5):563-567.
- [4] 张光玉,解梅,马争.一种新的彩色图像边缘检测算法[J].电子科技大学学报,2005,34(2):164-167.
- [5] 王晓飞,杨翠容,杨勇,等.基于 HSI 空间彩色差的快速水平集分割方法[J].计算机应用研究,2012,29(3):1135-1137.
- [6] 徐云生.基于 Contourlet 变换的图像质量评价方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
- [7] 高玉祥,程正方,郑日昌.心理学[M].北京:北京师范大学出版社,1996:4-51.
- [8] KOSCHAN A, ABIDI M. Digital color image processing [M]. New York: Wiley, 2009: 4-49.
- [9] MACADAM D L. Visual sensitivities to color differences in daylight [J]. Journal of the Optical Society of America, 1942, 32(5): 247-273.
- [10] 蔡建超,刘超.一步异相关与最相关矢量的彩色图像滤波方法[J].计算机应用,2012,32(2):517-520.
- [11] LIU C, ZANG X H, SHI B. Application of one-step singular correlation in random-across probability modeling [C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Electronics and Optoelectronics. Piscataway: IEEE Press, 2011: 422-425.
- [12] TSAI H H, CHANG B M, LIN X P. Using decision tree particle swarm optimization and support vector regression to design a median-type filter with a 2-level impulse detector for image enhancement [J]. Information Sciences, 2012, 195(7): 103-123.
- [13] 毕国堂,王晓辉,周艳,等.基于粗集的图像混合噪声滤波算法[J].计算机工程与设计,2009,30(21):4898-4900.
- [14] ASTOLA J, HAAVISTO P, NEUVO Y. Vector median filters [J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(4): 678-689.
- [15] TRAHANIAS P E, VENETSANOPOULOS A N. Vector directional filters—a new class of multichannel image processing filters [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, 2(4): 528-534.
- [16] KARAKOS D G, TRANHANIAS P E. Combining vector median and vector directional filters: the directional-distance filters [C]// ICIP'95: Proceedings of the 1995 International Conference on Image Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1995: 171-174.
- [17] 李岳阳,孙俊.彩色图像迭代滤波算法[J].计算机工程与应用,2011,47(28):12-16.
- [18] MAJID A, LEE C H, MAHMOOD M T, et al. Impulse noise filtering based on noise-free pixels using genetic programming [J]. Knowledge and Information Systems, 2012, 32(3): 505-526.
- [19] ESKICIOGLU A M, FISHER P S. Image quality measures and their performance [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(12): 2959-2965.
- [20] PLATANIOTIS K N, SRI V, ANDROUTSOS D, et al. An adaptive nearest neighbor multichannel filter [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(6): 699-703.
- [12] KOSCHAN A F, SUKUMAR S R, ROUI-ADIDI B, et al. Shape analysis algorithm based on information theory [C]// Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Image Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 229-232.
- [13] FEIXAS M, SBERT M, GONZALEZ F. A unified information-theoretic framework for viewpoint selection and mesh saliency [EB/OL]. [2013-03-20]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.77.4610&rep=rep1&type=pdf>.
- [14] YANG Y B, LU T, LIN J J. Saliency regions for 3D mesh abstraction [C]// PCM'09: Proceedings of the 10th Pacific Rim Conference on Multimedia: Advances in Multimedia Information Process- ing. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 292-299.
- [15] LEIFMAN G, SHTRUM E, TAL A. Surface regions of interest for viewpoint selection [C]// Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 414-421.
- [16] Stanford Computer Graphics Laboratory. The Stanford 3D scanning repository [EB/OL]. [2012-07-11]. <http://www.Graphics.Stanford.edu/data/3Dscanrep/>.
- [17] AIM SHAPE. Watertight track of SHREC 2007 [DB/OL]. [2012-05-09]. <http://watertight.ge.imati.cnr.it/>.

(上接第 3175 页)