

基于 Canny 优化的卡通视频分割与矢量化

李瑞龙 梁 缘 张松海

(清华大学计算机系 北京 100084)

摘 要 矢量化的视频图像相对于光栅化的视频图像具有储存容量小、缩放不失真等诸多优点。相对于真实视频,卡通视频因色块明显、线条清晰等特点更适合于进行矢量化处理。基于卡通的特性提出了一种基于 Canny 边缘检测的优化分割算法。主要针对 Canny 边缘提取不封闭的特点进行优化,并将其用于图像分割。提出了一种算法来提取卡通动画的素材,并为卡通动画构建素材库。通过素材重用的方式大大地缩小了卡通视频的储存空间,并且很好地解决了卡通视频矢量化问题中极易产生的帧间不一致的问题。实现了一个全自动地进行卡通视频矢量化的系统,其中包括卡通视频的镜头分割、素材库的构建等过程。该系统能够适应多种卡通视频,并能对视频中的细节区域产生较好的效果。

关键词 矢量化,图像分割,卡通视频,帧间一致性

中图分类号 TP37 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.08.005

Cartoon Animations Segmentation and Vectorization Based on Canny Optimization

LI Rui-long LIANG Yuan ZHANG Song-hai

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Vectorization of image/video has many potential advantages comparing to a raster format, such as higher compression ratios for storage and allowing display on devices with differing capabilities. Cartoon animations are more suitable for vectorizing than the videos from real world because of their clear edge and region. We proposed a new algorithm of image segmentation based on Canny operator, solved the problem of discontinuity of edge detection and created a material box for each cartoon animation. We proposed a way to low the compression ratio by reusing the material of cartoon in the material box, and also solved the problem of flicker during the vectorization with the material box. We made a system to automatically vectorize the cartoon animations including the shot segmentation, active region extraction and creating the material box. Our system can give good result on different kinds of cartoon, even those with complex texture in it.

Keywords Vectorization, Image segmentation, Cartoon animation, Frames coherence

1 引言

1.1 光栅图与矢量图

目前,图像的储存和传输格式主要为光栅化的位图格式。光栅格式的图像具有使用方便、易于处理等诸多优点。但这种图像表达方式也有明显的缺点——大尺度的缩放会导致边缘模糊等失真效果,因此矢量图被引入图像的表达方法之中。矢量图是一种根据基本的几何结构特征来绘制图形的表达方式,其基本结构为点、线、圆等基本的几何形状,所以矢量图具有与分辨率无关的特点,可以无极缩放,不变色,不模糊。

随着计算机技术的飞速发展,显示设备对分辨率的要求越来越高,导致越来越多的图片视频由于制作时期分辨率的限制不得不逐渐退出荧屏。因此,图片视频的矢量化在目前是一个非常有价值的问题。同时,矢量化表示的图片视频由

于可以仅由一些区域的边界以及一些简单的颜色模型来表示,因此通常比光栅图像视频有更大的压缩比和更小的储存空间。

1.2 卡通视频的矢量化

动画产业是互联网时代的一个蓬勃发展的产业,由于卡通视频相比于真实视频具有色块明显、线条清晰等诸多特点,因此卡通视频更加适合于矢量化表达。同时,参照于一般卡通视频的绘边、上色的制作过程,卡通视频的区域化表示也是一种相对于光栅化更科学的表示方式。此外,卡通视频的矢量化表示还可以使得其中的人物、素材得到复用,为未来卡通制作提供庞大的素材库支持。

基于目前的研究成果,卡通视频矢量化的主要难点在于对其中的纹理细节的处理。主要问题包括:1)纹理细节部分的提取与矢量化。简单地对全局进行细致分割确实是能够得

到稿日期:2016-06-11 返修日期:2016-07-13 本文受国家自然科学基金项目(61373069)资助。

李瑞龙(1994-),男,硕士,主要研究方向为图像/视频处理,E-mail:li-rl16@mails.tsinghua.edu.cn;梁 缘(1992-),男,博士,主要研究方向为图形学、可视分析,E-mail:liang1992.thu@gmail.com;张松海(1978-),男,博士,副教授,主要研究方向为图像/视频处理、图形学,E-mail:shz@tsinghua.edu.cn.

到很好的纹理提取效果,但是由于噪声的存在,其他平滑的区域也会被分割成细碎的小块,从而破坏了分割的语义完整性。如何在保持图像区域的语义完整性的同时,又能较好地还原纹理区域的细节,是一个很有意义的研究课题。2)实际中的卡通视频往往经过了多次压缩,帧间噪声较大,如何使得纹理细节在帧间保持一致性。3)卡通视频中的语义表达,即能否比较好地重构卡通视频的前景背景素材库。

本文的贡献之一在于提出了一个新的基于 Canny 边缘优化的图像分割算法,其可以在较好地保持大块区域语义完整性的同时对细节部分进行更细致的分割。基于这种分割方法,可以在重构程度上得到任意尺度的矢量化结果,以满足不同情况下对“清晰度”的需求。本文另一个贡献在于提出了一种重建卡通视频前景背景素材库的方法,为卡通视频中的素材复用提供了一种可行且有效的方案。

2 相关工作

近几年,很多国内外学者致力于图像矢量化研究,提出了很多优秀的方法^[1-2]。2006年 Lecot 和 Levy 等人^[3]提出了“ARDECO”系统,这是进行图像矢量化研究的最早的工作之一。他们用3次样条曲线将图像分割成不同区域,并用3次颜色模型拟合区域以逼近原始图像,如图1所示,可以得到了很好的效果。

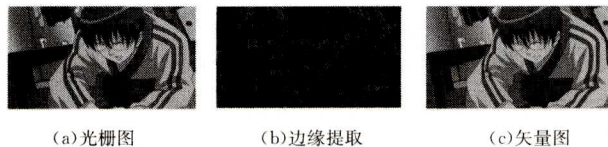


图1 光栅图与矢量图

Orzan 等^[4]于2008年提出了一种非常新颖的 Diffusion Curve 算法来进行图像矢量化。该算法使用 Canny 算子^[5]对图像进行滤波以及边缘检测,然后使用 Bezier 曲线拟合图像的轮廓。他们记录了控制点的颜色并通过迭代将颜色扩散到整个曲线,最后通过边缘扩散的方法重构区域,能够得到比较不错的效果。然而该算法严重依赖 Canny 算子的检测结果,只能处理色彩过渡均匀的图片区域,处理图片中的纹理细节时便会失效。

LAI Y K 等^[6]于2009年使用一种基于梯度网的算法进行图像矢量化。该算法可以保持图像的原有拓扑结构,允许图像中的物体存在一定数量的孔洞结构,并且是一种全自动的算法。但该算法依赖于高质量的图片以及前背景的明显边界。

有些矢量化方法在处理细节时能够得到很好的结果,比如 Kopf 等^[7]于2011年提出了一种在像素级图片上进行矢量化的方法,通过像素间的关系,找到像素级图片的边界。该方法虽然对纹理细节的处理效果不错,但是其对于噪声极其敏感,因此无法用于处理实际生活中经过压缩的图片。

Qu 等^[8]提出了一种非常适合漫画图片的矢量化方式。他们使用一种水平集的算法来分割漫画图片。漫画通常包含比较复杂的过渡色,比如阴影、轻描等;卡通动画则不然,其大多区域都是用比较单一的颜色来填充。该算法也遇到了分割时边界不闭合的问题,解决办法是通过先验知识进行人工调

整参数,以达到适合的、颜色泄露不严重的程度。

Sun 等^[9]曾提出了一种半自动的图像矢量化算法。该算法通过人工把复杂的图像分成几个独立的区域。然后,每个区域使用梯度网格进行颜色模型拟合。该算法能比较好地还原图像中的过渡色,但是对于拓扑结构复杂或有小孔洞的图像并不适用。

以上工作虽然都很有意义,但是对于卡通图像都不是很适用。目前也有对卡通视频进行矢量化的研究方法。Sykora 等^[10-12]于2005年提出了一种卡通矢量化的方法,基于卡通有明显的边缘这一假设进行逐帧边缘检测,并用图模型进行逐帧局部匹配。该算法的缺点在于对于边缘不明显的区域得不到很好的效果。与本文最接近的是 Zhang 等^[13]于2009年提出的算法,但是其由于使用了形态学的腐蚀膨胀等操作来进行区域分割,导致对纹理细节的丢失比较严重,因此对于不同种类的卡通视频不具有很好的鲁棒性。而本文提出的方法可以很好地保存卡通中的纹理细节。

视频矢量化的另一个问题在于不能简单地逐帧进行矢量化,这样会使得前一帧的结果与后一帧的结果不一致,连续放映视频时就会产生闪烁的问题,特别是在一些微弱的边缘上。针对这种帧间一致性的问题,也有一些研究成果^[2,14-16],他们都是通过优化的方式来保持帧间的一致性,但是其主要应用于真实视频,并没有考虑卡通动画的特点。

本文矢量算法的核心步骤是图像的分割算法。目前也有很多优秀的图像分割算法。Chang J 等^[17]于2013年提出了一种分割多帧图像序列的算法。他们将多帧图像序列表示成由多个与时间相关的超像素块组成的形式,不同帧的同一物体记录在同一个超像素块中。该算法对于多种真实视频都能给出稳定可信的分割结果,但缺点是十分耗时。由于该算法会控制超像素块的大小使其几乎一致,使得平滑区域被分割成多个超像素块,由此导致一个新的问题:各超像素块的聚类问题,即无法判断哪些超像素块应属于同一个平滑区域。而在卡通视频中,大部分的区域都是平滑区域,使得超像素块得到的结果并不理想。

3 本文方法

本文构建了一整套全自动算法流程来进行卡通视频的矢量化。输入是任意的一个卡通视频,算法自动进行矢量化处理,再对矢量化格式进行光栅化,得到展示结果。整个算法流程分成以下几个步骤。

(1)卡通视频的场景分割。本文采用 sift 特征点匹配,并使用 RANSAC 算法来计算帧间的单应矩阵。对于 RANSAC 之后的匹配点过少或者 RANSAC 之后得不到匹配点的帧间,我们认为这里是场景切换处。

(2)卡通视频的运动区域提取。本文中的运动区域是指后一帧相对于前一帧需要重绘的区域。提取的方法是使用帧间单应矩阵进行逐帧变换对准叠加,得到初始全景图。之后进行逐帧差分,即可得到每帧相对上一帧的运动区域标注。

(3)卡通视频素材库的建立。上一步得到的运动区域标注只是差分的结果,很有可能不能覆盖一个完整的区域。为了保持语义的完整性,采用一个包含标注的方形区域记录素材并存入素材库。最后,在素材库中找出所有匹配的素材并

进行合并,以便素材复用。

(4)对初始全景图与素材库中的图片进行矢量化。这里使用 Canny 进行边缘识别,但是 Canny 的结果具有不封闭的特点,于是提出了一种新的方法来优化 Canny 边缘使其封闭,得到区域分割结果。对每个区域做一阶的颜色拟合,并对其边缘进行 B 样条拟合,得到矢量化结果。

(5)对矢量化结果进行光栅化。首先光栅化初始全景图,然后逐帧寻找区域,寻找前景素材进行贴合,得到光栅化结果。下面对细节部分进行详细介绍。

3.1 单帧图像的矢量化与光栅化

卡通图像通常具有非常明显的区域特征与边缘特征。大多数卡通图像通常由一些线条、区域色块和纹理贴图构成。其中大多数区域色块的填充色都符合一次或者二次的颜色模型,而纹理图则无法用简单的颜色模型来描述。为了保持卡通图像的语义完整,要求卡通图像分割的结果既能尽量保持色块区域的完整性,又能细致地还原纹理区域。

首先对卡通图像进行边缘提取。这里选择使用 Canny 算子,因为 Canny 的优点在于其可以得到非常稳定的单像素清晰边界。但是 Canny 算子的缺点在于对于不能保证边界的连续性,边界提取的结果经常包含很多断边,特别是在一些拐点处,这是由于拐点处像素的梯度信息不明显导致的。针对这个问题,我们提出了一种基于 Canny 的优化算法使得边界封闭,从而将一个边界提取的结果转化为一个图像分割结果,如图 2 所示。算法的详细描述如算法 1 所示。

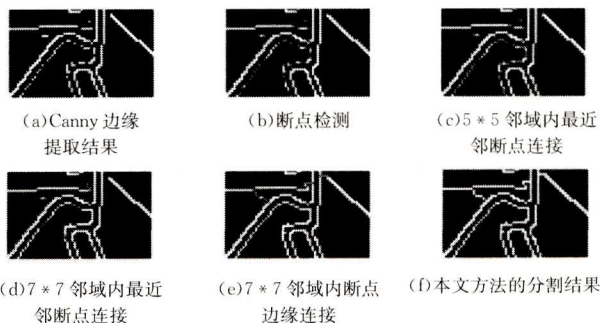


图 2 基于 Canny 优化的图像分割算法

算法 1 基于 Canny 优化的图像分割算法

输入: Canny 边界提取结果,优化范围 n

输出: 图像分割结果

通过对 Canny 边缘的断点检测与连接,优化 Canny 边缘,通过邻域放大进行迭代,得到收敛的结果;完成图像的区域分割。

Step 1 断点检测

对 Canny 结果的每个边缘像素进行判断,若其八邻域内有少于两个边缘像素,则此点为断点;若其八邻域内只有两个边缘像素,仅当这两个像素为相邻像素时认为此点为断点;其他情况下该点不是断点。

Step 2 最近邻断点间连接

对于所有检测出的断点,首先在 $n \times n$ 的邻域内搜索最近不连通断点,若两断点互为最近邻断点,则将其连接;之后更新断点序列,重复本过程,直至收敛。

Step 3 最近邻断点边缘连接

对于断点序列中的剩余断点,在 $n \times n$ 的邻域内搜索最近不连通边缘,将其连接。

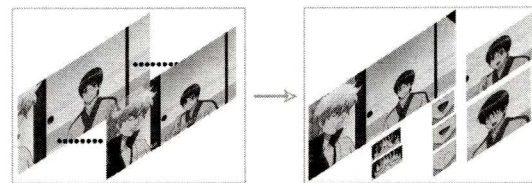
在图像的纹理区域以及细节区域,Canny 算子会得到很

多密集的边缘,从而会产生很多的断点;而在平滑的色块区域,Canny 算子得到的边缘较为清晰简单,断点较少。因此本算法实际上是依据断点密度进行细化分割,对断点较少的平滑区域产生的作用较小,很好地维持了其色块的完整性;对于纹理细节区域,由于其颜色梯度不明显,Canny 算子通常会得到很多断断续续的边界信息以及边缘断点,因此这样的区域会得到更细致的区域分割。使用本算法分割图像能够比较好地保持图像的语义信息。然后,根据图像分割的结果,提取区域与边缘;对边缘进行细化拆分,做 B 样条拟合;再对区域做线性的颜色拟合,得到与边缘匹配的颜色模型,至此便完成了整张图像的矢量化过程。

对矢量图光栅化的过程比较简单:首先重绘出边缘,再对各区域做颜色填充,最后取各边缘的双侧区域颜色均值为边缘上色,得到光栅化结果。

3.2 卡通视频中运动素材的提取与复用

在制作卡通视频时,为了降低制作成本,通常并不是每一帧绘一张图,而是重复利用其他帧的素材,仅重绘那些与其他帧不同的区域。因此在卡通视频中就有比较清晰的“前景”和“背景”的概念。在连续多帧中重复出现的区域可以认为是背景;在帧间需要被重绘的区域,也就是帧间不同的区域就是前景。而大多数卡通视频也并不是对每次出现的前景都重新绘制。他们大多在制作时期都维护一个素材库,其中包含了可以被重复利用的背景图和在某些场合可以被复用的前景图。因此当某一前景在相隔的帧上多次出现时依然不需要重绘。图 3 所示为一个视频的素材表达式。



左图表示一个帧序列,右图为使用本文方法将其重新表示为一个初始全景图和一个素材库的形式。

图 3 视频中的素材提取与素材库的建立

提取素材库的另一个优势在于完美地解决了保持卡通视频矢量化结果帧间一致性的问题。现实生活中的卡通视频在保存和传输过程中被反复压缩和解压缩,产生了很多噪声。如何避免这种噪声导致的帧间矢量化结果不一致、边缘闪烁等问题也是卡通视频矢量化中的一个难点。通过从卡通视频中提取运动区域、维护素材库的方式,在帧间复用一些素材的矢量化结果,可以很好地解决帧间一致性的问题。下面详细介绍该方法。

首先进行场景分割。一段卡通视频通常由多个场景组成,每个场景对应一个镜头,镜头之间是硬切换的方式,几乎没有联系,所以要为每一个镜头单独维护一个素材库。而在同一个镜头内,帧间一般存在平移或缩放的变换关系。本文采用 sift 特征点匹配,并使用 RANSAC 方法计算帧间的单应矩阵,对于 RANSAC 之后匹配点过少或者 RANSAC 之后得不到匹配点的帧间,我们认为其是场景切换处,以此分割出每一个镜头下的帧序列。然后对于每一个场景使用帧间单应矩阵进行逐帧变换对准叠加,得到初始全景图。之后进行逐帧差分,即可得到每帧相对于上一帧的运动区域标注。为了保

持语义的完整性,采用一个包含标注的方形区域记录图像并存入素材库。最后,在素材库中找出所有匹配的素材并进行合并。至此,我们为每一段场景创建了一个初始的全景图和对应的素材库,其中包含了所有前景运动物体,从而整段视频就可以简单地用一张初始全景图和一个素材库来表示。在还原视频时,只需要按照素材对应的坐标 (x, y, t) 逐帧将素材库中的素材帖回全景图,并将这一帧的对应镜头区域裁出,就可以重构整个视频帧序列。

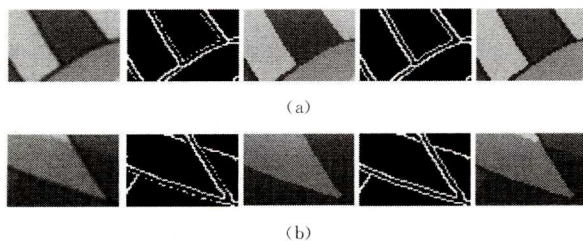
本文基于这样的表示方式对卡通视频进行矢量化,即分别对全景图和素材库进行矢量化,然后进行逐帧贴合。在贴合的过程中,为了保持帧间一致性,仅对与上一帧色差较大的像素点进行更新,使色差较小的像素点保持上一帧的像素值。因为人眼对色差的辨识度大概在 20 左右,所以这里采用 10 作为色差的阈值,以保证可以得到一个视觉效果较好的贴合结果。

4 实验结果与讨论

4.1 优点

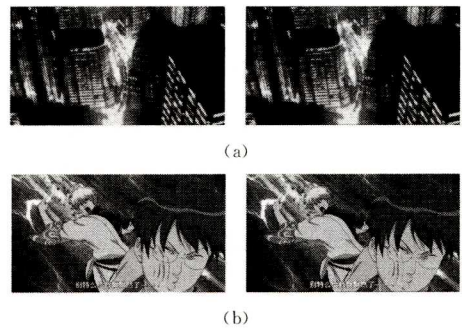
对于卡通视频,本文提出了一种新的表达方式,即通过运动素材的提取与素材库的建立,使得其中的人物形象等能够在不同帧之间得到复用,为卡通视频提供了一个很好的压缩方式,而压缩比取决于不同卡通视频的素材重用度。对于大多数卡通视频,本方法能给出 90%左右的素材重用度,即可以得到 10:1 左右的压缩比。同时,通过素材复用的方式,很好地解决了在卡通视频矢量化过程中的帧间一致性问题。

图 4 给出了提出的基于 Canny 优化的图像分割算法的更多结果。卡通图的线稿通常在图像中以黑色的粗边呈现, Canny 对图像中的线稿通常能够给出两条边的结果。但是如果线稿的一侧是阴影或一些色调较暗的区域,由于 Canny 是基于图像梯度的一种算子,会使得 Canny 的提取结果并不理想,存在很多断点。通过优化边缘进行断点连接,使得 Canny 算法可以用于图像分割。我们基于这种算法进行卡通矢量化,可以得到非常好的重构效果。图 5 给出了对卡通矢量化的更多结果,本文方法能够很好地适应复杂的纹理细节,甚至对字幕都可以得到很好的效果。图 6 给出了本文算法与 Zhang 等^[13]的矢量化方法的结果对比。对于第一个例子, Zhang 等的算法在进行矢量化背景时失效;而本文算法可以得出很好的结果。对于第二个例子, Zhang 等的算法在图中的人物头发处失效,本文算法则可以很好地处理这种类似纹理的光照效果。



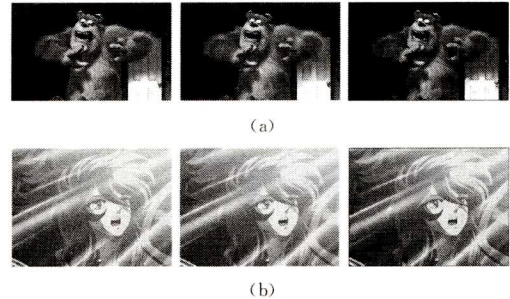
第一列为原图,第二列为 Canny 边缘,第三列直接使用 Canny 边缘矢量化的结果,第四列是本文方法的边缘优化结果,第五列是本文方法的矢量化结果。

图 4 基于 Canny 优化的图像分割算法的更多结果



第一列为原图,第二列为本文方法的矢量化结果。

图 5 更多矢量化结果



第一列为原图,第二列为 Zhang 等^[13]的结果,第三列为本文算法的结果。

图 6 与其他矢量化方法的对比

4.2 不足

本文的分割算法基于 Canny 算子的边缘提取结果。在一些情况下,区域色差比较小, Canny 算子在这些地方进行边缘检测所得的边缘结果不连续,本文算法可以将其优化为连续的边缘。但是如果图像本身因经过量化等压缩处理后存在较大噪声,使得边缘梯度不明显,会导致 Canny 边缘检测完全失效,本文的分割算法在这样的区域也会失效。

对于素材的提取与素材库的建立,本文算法使用一个包含帧间运动区域的方形框来提取素材,虽然能够完整地保存所有的帧间运动信息,但也囊括了很多非运动区域。目前还无法做到从语义级别上提取卡通视频中的素材。

结束语 本文提出的系统主要用于对卡通视频进行无极缩放,针对目前显示器分辨率要求越来越高而老旧卡通视频的分辨率过低的问题,通过对老旧卡通视频进行矢量化,不仅可以对多年反复压缩产生的噪声进行平滑,还提供了一种方式来实现视频的超分辨率显示。同时,采用素材库的表示方式也可以减少视频的储存空间并减小传输量,这种方式可以为动漫产业制作卡通素材,便于重新利用。

参考文献

[1] SUN J, LIANG L, WEN F, et al. Image vectorization using optimized gradient meshes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 59-82.
 [2] ZITNICK C L, JOJIC N, KANG S B. Consistent Segmentation for Optical Flow Estimation[C] // IEEE International Conference on Computer Vision, 2005: 1308-1315.
 [3] LECOT G, LEVY B. Ardeco: automatic region detection and conversion[C] // Eurographics Symposium on Rendering Techniques, Nicosia, Cyprus, 2006: 349-360.

- [16] LEVERICH J, KOZYRAKIS C. On the energy (in) efficiency of hadoop clusters[J]. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2010, 44(1): 61-65.
- [17] KAUSHIK R T, BHANDARKAR M. GreenHDFS: Towards an energy-conserving, storage-efficient, hybrid hadoop compute cluster [C]// *Proceedings of the 2010 International Conference on Power Aware Computing and Systems*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1-9.
- [18] KAUSHIK R T, BHANDARKAR M, NAHRSTEDT K. Evaluation and analysis of GreenHDFS: A self-adaptive, energy conserving variant of the hadoop distributed file system [C]// *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 274-287.
- [19] LANG W, PATEL J M. Energy management for mapreduce clusters[J]. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 2010, 3(1/2): 129-139.
- [20] WIRTZ T, GE R. Improving MapReduce energy efficiency for computation intensive workloads[C]// *2011 International Green Computing Conference and Workshops (IGCC)*. IEEE, 2011: 1-8.
- [21] GOIRI Í, LE K, NGUYEN T D, et al. GreenHadoop: leveraging green energy in data-processing frameworks[C]// *Proceedings of the 7th ACM European Conference on Computer Systems*. ACM, 2012: 57-70.
- [22] CARDOSA M, SINGH A, PUCHA H, et al. Exploiting Spatio-Temporal Tradeoffs for Energy Efficient MapReduce in the Cloud[R]. Department of Computer Science and Engineering, University of Minnesota, 2010.
- [23] CHEN Y, GANAPATHI A, KATZ R H. To Compress or Not to Compress-Compute vs. IO Tradeoffs for Mapreduce Energy Efficiency[C] // *Proceedings of the First ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking*. ACM, 2010: 23-28.
- [24] SONG J, LI T T, ZHU Z L, et al. Benchmarking and analyzing the energy consumption of cloud data management system[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(7): 1485-1499. (in Chinese)
宋杰, 李甜甜, 朱志良, 等. 云数据管理系统能耗基准测试与分析[J]. *计算机学报*, 2013, 36(7): 1485-1499.
- [25] LIAO B, YU J, SUN H, et al. Energy-efficient algorithms for distributed storage system based on data storage structure reconfiguration[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(1): 3-18. (in Chinese)
廖彬, 于炯, 孙华, 等. 基于存储结构重配置的分布式存储系统节能算法[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(1): 3-18.
- [26] LIAO B, YU J, ZHANG T, et al. Energy-efficient algorithms for distributed file system HDFS[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(5): 1047-1064. (in Chinese)
廖彬, 于炯, 张陶, 等. 基于分布式文件系统 HDFS 的节能算法[J]. *计算机学报*, 2013, 36(5): 1047-1064.
- [27] LIN J C, LEU F Y, CHEN Y P. Impact of MapReduce Policies on Job Completion Reliability and Job Energy Consumption[J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2015, 26(5): 1364-1378.
- [28] LIAO B, YU J, ZHANG T, et al. Energy-Efficient Algorithms for Distributed Storage System Based on Block Storage Structure Reconfiguration[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 48(2): 71-86.
- [29] YANG X Y, YU J, IBRAHIM T, et al. Collaborative filtering model fusing singularity and diffusion process[J]. *Journal of Software*, 2013, 24(8): 1868-1884. (in Chinese)
杨兴耀, 于炯, 吐尔根·依布拉音, 等. 融合奇异性和扩散过程的协同过滤模型[J]. *软件学报*, 2013, 24(8): 1868-1884.

(上接第 30 页)

- [4] ORZAN A, BOUSSEAU A, WINNEM, et al. Diffusion Curves: A Vector Representation for Smooth-Shaded Images[J]. *Communications of the ACM*, 2008, 56(7): 101-108.
- [5] CANNY J. A Computational Approach to Edge Detection-Readings in *Computer Vision* [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2010, PAMI-8(6): 679-698.
- [6] LAI Y K, HU S M, MARTIN R R. Automatic and Topology-Preserving Gradient Mesh Generation for Image Vectorization [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3): 341-352.
- [7] KOPF J, LISCHINSKI D. Depixelizing pixel art [C]// *ACM SIGGRAPH Conference*. 2011: 76-79.
- [8] SUN J, LIANG L, WEN F, et al. Image vectorization using optimized gradient meshes[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 59-82.
- [9] QU Y, WONG T T, HENG P A. Manga colorization[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 1214-1220.
- [10] S ÝKORA D, BURIÁNEK J, ŽÁRA J. Colorization of black-and-white cartoons[J]. *Image & Vision Computing*, 2005, 23(9): 767-782.
- [11] S ÝKORA D, BURIÁNEK J, ŽÁRA J. Sketching cartoons by example[OL] <http://dx.doi.org/10.2312/SBM/SBM05/027-033>.
- [12] S ÝKORA D, BURIÁNEK J, ŽÁRA J. Video Codec for Classical Cartoon Animations with Hardware Accelerated Playback[M]// *Advances in Visual Computing*. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 43-50.
- [13] ZHANG S H, CHEN T, ZHANG Y F, et al. Vectorizing Cartoon Animations [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2009, 15(4): 618-629.
- [14] KUMAR M P, TORR P H S, Zisserman A. Learning Layered Motion Segmentations of Video[C]// *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision*. 2005: 33-40.
- [15] XIAO J, SHAH M. Motion Layer Extraction in the Presence of Occlusion Using Graph Cut[C]// *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2004: 972-979.
- [16] RRBIN J M, RICHARDS W A. Color vision and image intensities: When are changes material? [J]. *Biological Cybernetics*, 1982, 45(3): 215-226.
- [17] CHANG J, WEI D, III J W F. A Video Representation Using Temporal Superpixels[C]// *IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition*. IEEE, 2013: 2051-2058.