

基于联合双边滤波器的 Kinect 深度图像滤波算法

李知菲*, 陈 源

(浙江师范大学 数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004)

(* 通信作者电子邮箱 zjnulzf@163.com)

摘 要:针对 Kinect 镜头采集的深度图像一般有噪声和黑洞现象,直接应用于人体动作跟踪和识别等系统中效果差的问题,提出一种基于联合双边滤波器的深度图像滤波算法。算法利用联合双边滤波原理,将 Kinect 镜头同一时刻采集的深度图像和彩色图像作为输入,首先,用高斯核函数计算出深度图像的空间距离权值和 RGB 彩色图像的灰度权值;然后,将这两个权值相乘得到联合滤波权值,并利用快速高斯变换替换高斯核函数,设计出联合双边滤波器;最后,用此滤波器的滤波结果与噪声图像进行卷积运算实现 Kinect 深度图像滤波。实验结果表明,所提算法应用在人体动作识别和跟踪系统后,可显著提高在背景复杂场景中的抗噪能力,识别正确率提高 17.3%,同时所提算法的平均耗时为 371 ms,远低于同类算法。所提算法保持了联合双边滤波平滑保边的优点,由于引入彩色图像作为引导图像,去噪的同时也能对黑洞进行修补,因此该算法在 Kinect 深度图像上的去噪和修复效果优于经典的双边滤波算法和联合双边滤波算法,且实时性强。

关键词:深度图像; Kinect; 联合双边滤波器; 快速高斯滤波器; 人体动作跟踪

中图分类号: TP391.413 **文献标志码:** A

Kinect depth image filtering algorithm based on joint bilateral filter

LI Zhifei*, CHEN Yuan

(College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang 321004, China)

Abstract: Usually the depth image obtained by Kinect camera contains noise and black holes, so the effect is poor if it is directly applied into human motion tracking and recognition system. To solve this problem, an efficient depth image filtering algorithm based on joint bilateral filter was proposed. The principle of joint bilateral filtering was used in the proposed algorithm, and the depth and color images were captured by Kinect camera at the same time as the input. Spatial distance weight value of depth image and grayscale weight value of RGB color image were computed by Gaussian kernel function. Then these two weight values were multiplied to get the weight value of joint bilateral filter. A joint bilateral filter was designed by replacing the Gaussian kernel function with fast Gaussian transform. Finally, this filtered result was convolved with the noisy image to filter the Kinect depth image. The experimental results show that the proposed algorithm can significantly improve the robustness to noise in the human motion tracking and identification system and increase the recognition rate by 17.3%. The average running time of the proposed algorithm is 371 ms, and is much lower than similar other algorithms. The proposed algorithm keeps the advantages of joint bilateral filter. Since the color image is introduced into the algorithm, the proposed algorithm can well repair the black holes while reducing the noise. The proposed algorithm is better than traditional bilateral filter and joint bilateral filter in denoising and repairing holes for the Kinect depth image, and it has higher real-time performance.

Key words: depth image; Kinect; joint bilateral filter; fast Gauss filter; human motion tracking

0 引言

微软公司的体感捕捉设备 Kinect 镜头可以同时捕捉 RGB 彩色图像和含有深度信息的深度图像,很多研究人员根据这一特征将其应用于运动目标识别^[1-2]和跟踪^[3]等计算机视觉领域中。但是作为较为廉价的深度信息采集设备, Kinect 镜头由于设备自身的原因以及周围环境的影响,采集的深度图像常常含有较多噪声。深度图像如果不经处理就直接应用,会导致目标提取失败,造成动作识别错误、目标跟踪丢失

和错误交互等问题,为此有必要设计适当的滤波器对其进行去噪处理。

本文研究 Kinect 深度图像滤波的目的是为了提高人体动作跟踪的准确性,要求滤波时不但平滑噪声,填充 Kinect 镜头形成的黑洞区域,同时必须保持边缘信息。当前的滤波算法大部分面向彩色图像,适用于深度图像的较少,很多研究者都是将一般图像的滤波算法如均值滤波^[4]、中值滤波^[5]、高斯滤波^[6]和小波算法^[7]等直接应用于深度图像,但前 3 种算法在平滑噪声的同时也造成边缘信息的损失,而文献[7]的算

收稿日期:2014-04-08;修回日期:2014-05-08。

基金项目:浙江省教育厅科研项目(Y201016478);浙江省科技计划一般科研项目(2009C31123)。

作者简介:李知菲(1978-),男,黑龙江哈尔滨人,讲师,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、模式识别、虚拟现实; 陈源(1989-),女,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、模式识别。

法对 Kinect 镜头采集的深度图像不适用。也有研究人员采用双边滤波器对深度图像进行滤波^[8-9]并应用在 Kinect Fusion 系统中,实现了三维场景重建。双边滤波器克服了前面几种滤波算法边缘信息丢失的缺点,但其核函数为高斯函数,算法速度较慢,每秒只能处理 2 帧左右,不具有实时性。

因此,本文提出一种基于联合双边滤波器的深度图像快速滤波算法,利用双边滤波器平滑保边的特点对深度图像进行处理。为了改进平滑效果,将 Kinect 镜头采集的 RGB 图像作为引导校正图像进行联合双边滤波,同时为了克服滤波使用的高斯核函数运算量大、耗时长的缺点,采用快速高斯变换降低滤波算法的计算复杂度。为了验证所提出方法的有效性,将本文提出的方法与传统的双边滤波器和联合双边滤波器进行对比实验和分析。实验结果表明,所提出的快速滤波算法综合性能优于上述两种传统的滤波算法,在有效去除深度图像中的噪声的同时又能修复其中的黑洞。本文将所提出的算法应用于人体动作跟踪和识别,在微软动作数据库和自采人体动作数据库上进行了指定动作的实验,结果表明所提出的算法能有效提高识别正确率和系统的鲁棒性。

1 基于 Kinect 镜头的深度信息提取

有效的深度信息提取一般需要借助专门设备,采用的方法有立体视觉法、表面阴影法、纹理梯度法、光带法和结构光法等。专门设备价格高昂,严重限制了应用范围。本文选用了微软公司 2010 年发售的 Kinect 镜头作为深度信息提取设备。Kinect 价格低廉,采用基于结构光方法的深度信息提取设备,其有效提取范围为 400 mm 到 3 000 mm 左右,帧速率可以达到 30 帧/s。由于有红外发射器和 RGB 彩色摄像头,可以同时采集 RGB 彩色图像和深度图像。Kinect 用红外投影机向空间发射结构光,同一般的周期变化的结构光不同的是其采用一种被称为光编码的技术。原理是将红外光透过毛玻璃形成衍射斑点,这些斑点通过散射器等设备的加工,使得空间中任意两个位置的图案都不同,在测量距离是只需要做某散斑图案与参考平面图案的相关度运算即可。其工作原理如图 1(a)所示,工作流程如图 1(b)所示。

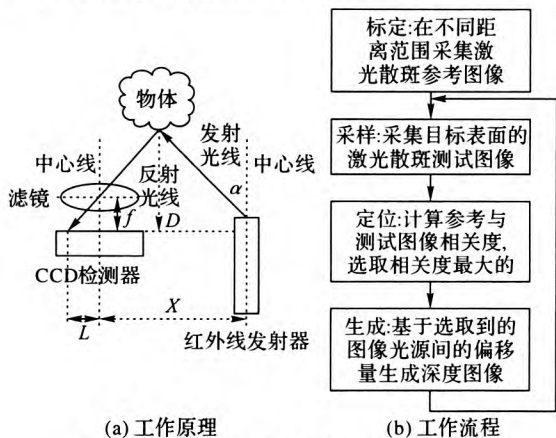


图 1 Kinect 深度信息提取的工作原理和流程

本文通过实验,证明在室内环境中 Kinect 镜头采集的深度图像经过有效的滤波和修补后可以准确地提取到深度信息,并应用到人体动作跟踪和识别系统中。Kinect 采集的

RGB 彩色图像和深度图像如图 2 所示。



图 2 Kinect 采集的 RGB 彩色图像和深度图像

2 Kinect 深度图像的快速滤波算法

从图 2(b)中给出的深度图像示例可以看出 Kinect 采集的深度图像中包含很多噪声和一些黑洞,这表明 Kinect 镜头在此位置无法采集深度信息。通过实验发现这些问题产生的主要原因如下。

1)设备本身。实验中发现即便是采集光滑平整的墙壁, Kinect 镜头生成的深度图像仍旧包含较多噪声。Kinect 镜头存在有效探测范围,本文通过反复测试发现如果超出 1 200 mm ~ 3 900 mm,则误差快速增加,因此采集时目标的运动范围应尽量保持在设备有效探测区域内。此外,较多噪声的产生也与设备使用前的标定有关,一般来说在光线较好的室内使用标定板按规定进行标定后会提高图像采集的质量,获得较大的亮度。

2)目标对象和采集环境。如果目标对象和采集环境中存在如玻璃等透明或镜面等高反射的物体,或者物理深度过大, Kinect 镜头采集得到的深度图像会出现黑洞现象,这是因为 Kinect 发射的散斑图案在这类区域无法形成。

无论是采集时设备产生的随机噪声还是采集目标或环境造成黑洞,都会影响深度图像中深度信息的准确提取,进而导致目标跟踪的失败。

注意到 Kinect 镜头可以同时采集彩色 RGB 图像和含有深度信息的深度图像,本文提出基于联合双边滤波器的改进算法,利用彩色图像信息对缺失的深度图像(如黑洞)进行补全,提高滤波质量,实现深度图像的快速有效滤波和修复。

2.1 双边滤波器

本文处理 Kinect 深度图像的目的是有效分割出人体目标,进而实现对目标的跟踪,因此在去除噪声的同时必须保留边缘信息。双边滤波器是 1998 年由 Tomasi 等^[10]基于高斯滤波器提出的一种改进算法^[11],可以看成是一种加权的非线性高斯滤波。双边滤波器有两个核函数,同时关注了像素在空间和幅度两个域上的相似性,具有平滑保边的优点。

图像滤波可用式(1)表示:

$$I(x,y) = \frac{1}{w_p} \sum_{i,j \in \Omega} w(i,j) * n(i,j) \tag{1}$$

其中: $I(x,y)$ 是滤除噪声后的清晰图像, $n(i,j)$ 是需要滤波处理的含噪声图像, Ω 是像素的邻域, $w(i,j)$ 是滤波器在点 (i,j) 处的权。 w_p 是一个标准量,可用式(2)表示:

$$w_p = \sum_{i,j \in \Omega} w(i,j) \tag{2}$$

那么,对于高斯滤波来说,权值 $w(i,j)$ 和像素的空间距离线性相关,距离越近相关性越大,权值也越大,其滤波核函数可以定义如下:

$$w_k(i, j) = \exp\left(-\frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (3)$$

其中 σ_k 是高斯函数标准差。

高斯滤波只关注像素的空间距离而忽略了像素值的变化(图像灰度的改变),滤除噪声的同时也平滑了边缘。双边滤波在上面权值的基础上增加了一个衡量像素值变化的权,计算公式如式(4):

$$w_h(i, j) = \exp\left(-\frac{(I(i, j) - I(x, y))^2}{2\sigma_h^2}\right) \quad (4)$$

其中 σ_h 也是高斯函数标准差。

双边滤波的权值 w 是 $w_k(i, j)$ 和 $w_h(i, j)$ 的乘积,图像边缘处像素值变化大, $w_h(i, j)$ 值较小,从而使得 w 也变小,滤波器在边缘处的滤波作用降低,从而在滤波的同时保持了边缘。

2.2 基于联合双边滤波器的 Kinect 深度图像滤波

联合双边滤波器是 Petschnigg 等^[12]在 2004 年提出一种双边滤波器改进算法^[13],双边滤波器的权值都是由一幅待处理图像得到的,如果能提供另外一幅信息丰富的图像计算出权值效果会更好。算法首先对同一场景拍摄两幅照片,其中一幅打开了闪光灯,另一幅没有;接着将闪光灯打开拍摄的图像高频部分求出权值,作为引导和校正图像;最后合成未开闪光灯拍摄的图像低频部分, Petschnigg 等^[12]的实验证明其算法比双边滤波效果更好。

Kinect 镜头同时采集 RGB 彩色图像和深度图像,完全可以利用彩色图像中完整的边缘信息对深度图像中缺失的部分进行补全,根据联合双边滤波的思想,本文将彩色图像作为引导图像,对深度图像进行校正补全,改进的公式如下:

$$w_g(i, j) = \exp\left(-\frac{(G(i, j) - G(x, y))^2}{2\sigma_g^2}\right) \quad (5)$$

其中 $G(i, j)$ 为彩色图像灰度化后的像素值。本文的联合双边滤波器权值 $w(i, j)$ 就可用式(6)得到:

$$w(i, j) = w_k(i, j) \times w_g(i, j) \quad (6)$$

2.3 算法的提速

上面滤波器的核函数直接使用了高斯函数,如果有大小是 $M \times N$ 的图像,滤波器半径为 r 的话,其算法复杂度为 $O((M \times N \times r)^2)$,当滤波窗口很大时其计算时间是不能接受的。针对这一情况,引入快速高斯变换^[14]降低联合双边滤波器的计算复杂度,主要简化算法中 $\exp(-(t-s)^2)$ 类型的运算。

根据快速高斯变换的过程,定义 Hermite 函数 $h_n(x) = (-1)^n \frac{d^n}{dx^n}(e^{-x^2})$,则进行 Hermite 展开如下:

$$\exp(-(t-s)^2) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{s^n}{n!} h_n(t) \quad (7)$$

对式(7)进行平移和尺度变换可有:

$$\exp\left(-\frac{(t-s)^2}{\sigma}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{t-t_0}{\sqrt{\sigma}}\right)^n h_n\left(\frac{s-t_0}{\sqrt{\sigma}}\right) \quad (8)$$

则一维高斯核函数可表示为:

$$G(t_i) \approx \sum_{n=0}^{p-1} c_n h_n\left(\frac{t_i-s_0}{\sigma}\right); \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

$$c_n = \sum_{j=1}^N f_j \frac{1}{n!} \left(\frac{s_j-s_0}{\sigma}\right)^n \quad (10)$$

其中: s_0 为 Hermite 函数的展开中心, t 为源, s 为目标结果。对于本文的二维图像而言,需要将其分解为两个一维快速高斯

变换的乘积,将 $I(x, y)$ 和 $n(i, j)$ 代入式(9)进行卷积运算即可。由于每次一维 Hermite 展开都取 p 项,则总的时间复杂度为 $O((M+N) \times p^2)$,因此改进后的滤波器运算时间远小于改进前的联合滤波器。

3 实验及结果分析

为了验证本文提出算法的性能,在自采数据库和 Berkeley 的 3D Object 公开数据库上用不同算法与本文算法进行了对比实验。同时,也在自采人体运动数据库上进行了指定动作的人体运动识别的实验,以期证明本文算法能提高原系统的鲁棒性,增加识别正确率。

实验在 Intel Core i3 CPU 550 3.20 GHz 四核 CPU, 4 GB 内存的 Windows 7 计算机上进行,软件选用 Matlab 2013a 平台。实验用图像包含同时刻的 RGB 彩色图像和深度图像,大小都为 640×480 像素。

图 3 分别给出了本文算法、双边滤波和联合双边滤波的对比实验结果。

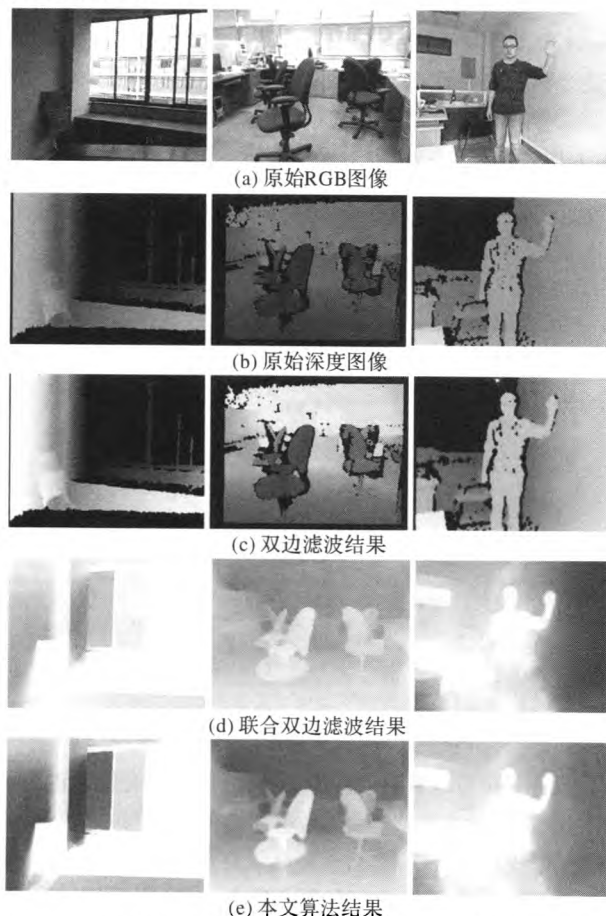


图 3 3 种算法的深度图像滤波结果比较

从实验结果可以看出,双边滤波器能在去除噪声方面取得一定效果,同时又防止了单纯的高斯滤波造成边缘模糊的现象,对实验图像中物体和人体边缘能有效保持,但是对于深度图像中的黑洞则无能为力。联合双边滤波利用彩色图像的完整边缘信息对深度图像进行校正,能够恢复缺失的深度信息,其补充的深度值和实际值非常接近,同时对 Kinect 镜头的深度抖动也有一定的抑制作用,也能较好地去除黑色斑点噪声。本文提出的算法的去噪效果与联合双边滤波类似,都能有效去除噪声,补全缺失的深度信息,去除黑洞现象,并能很

好地保持目标对象的边缘信息。

通过对 7 段采集视频的 37 250 帧图像进行处理,记录 3 种算法运算的总时间,然后计算得出处理每帧图像的平均近似时间,如表 1 所示。

表 1 不同滤波算法的运算时间比较 ms	
算法	每帧运算时间
双边滤波算法	3 712
联合双边滤波算法	1 920
本文算法	371

本文算法选取的滤波窗、联合滤波权值和快速高斯变换相关参数均经过反复实验及优化,3 种算法的实验图像均进行了统一的预处理。从表 2 可看出,本文提出的算法的实时性较好,滤波后的深度图像质量优于传统的双边滤波法,与联合双边滤波器相比,在获得相当深度图像质量的基础上又能较大幅度降低其计算复杂度,基本可以满足动作识别等系统的要求。

本文算法在自采的人体运动 Kinect 数据库和微软的 Kinect 数据库上进行了动作识别和跟踪实验,自采数据库中指定手臂运动为跟踪动作,微软数据库中指定坐下和站起为跟踪动作。图 4 给出了本文算法应用在人体运动识别系统后,系统对指定动作的跟踪结果。

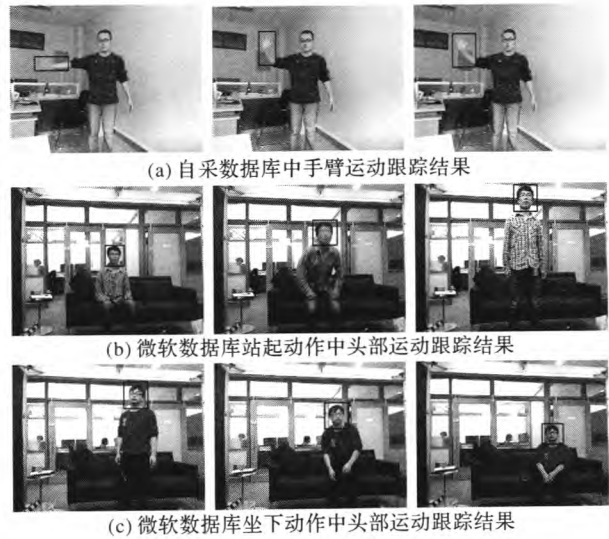


图 4 本文算法在动作跟踪中的应用

从图 4 中可以看到:对于指定的运动能够有效地进行识别并跟踪,通过在微软与自采数据库的 42 段视频中进行对比实验,发现应用本文算法后能提高识别正确率 17.3%。特别是当系统在采集环境中存在深度过大对象(深度超过边缘,如柜子的深格子、桌椅下方的空洞处等,如图 4(a)),玻璃、光滑平面等反光物体(如图 4(b)、(c))时,Kinect 镜头不能有效形成散斑图案,本文算法能有效填充上述情况造成的深度图像空洞,提高深度信息提取的精度,进而增强整个系统的鲁棒性。

4 结语

本文针对 Kinect 镜头采集的深度图像存在噪声和黑洞影响深度信息的正确提取这一问题,提出了一种基于联合双边滤波器的快速深度图像滤波算法。算法利用 Kinect 镜头采集

的 RGB 彩色图像对深度图像进行了修复,校正了深度信息。通过与双边滤波器和联合双边滤波器的比较实验,证明了本文算法的滤波效果较好且实时性更高。通过在人体动作识别系统对指定动作的跟踪实验,证明了本文算法能有效地提升系统在背景复杂场景中的抗噪能力,提高识别正确率,减少或避免动作跟踪失效的情况。在进一步的研究计划中,本文算法可进行 GPU 优化,以期在速度方面得以进一步提升。此外,算法对户外光学变换快速剧烈的环境适应能力仍然较弱,虽然此问题的主要原因是 Kinect 镜头的工作原理造成的,但在算法上可以进行一定程度的补足,以扩展应用范围。

参考文献:

[1] SHEN X, ZHANG H, GAO Z, *et al.* A robust behavior recognition algorithm based on sole depth information [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(8): 1613 – 1618. (申晓霞, 张桦, 高赞, 等. 一种鲁棒的基于深度数据的行为识别算法[J]. 光电子·激光, 2013, 24(8): 1613 – 1618.)

[2] ZHENG L, LUO J, XU K. Implementation on mocap system based on Kinect [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(S1): 249 – 255. (郑立国, 罗江林, 许舸. 基于 Kinect 的动作捕捉系统的实现[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(增刊 1): 249 – 255.)

[3] YANG X, ZHANG Q, ZHOU Y. Human motion tracing algorithm based on Kinect depth information [J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University, 2013, 28(1): 33 – 37. (杨晓敏, 张奇志, 周亚丽. 基于 Kinect 深度信息的人体运动跟踪算法[J]. 北京信息科技大学学报: 自然科学版, 2013, 28(1): 33 – 37.)

[4] WANG K, XIONG X, REN Z. Highly efficient mean filtering algorithm [J]. Application Research of Computers, 2010, 27(2): 434 – 438. (王科俊, 熊新炎, 任桢. 高效均值滤波算法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(2): 434 – 438.)

[5] LEI C, LIU J, ZHANG M. New median filter algorithm based on a daption [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(2): 60 – 62. (雷超阳, 刘军华, 张敏. 一种基于自适应的新型中值滤波算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(2): 60 – 62.)

[6] DARIBO I, TILLIER C, PESQUET-POPESCU B. Distance dependent depth filtering in 3D warping for 3DTV [C]// MMSP 2007: Proceedings of IEEE 9th Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2007: 312 – 315.

[7] EDELER T, OHLIGER K, HUSSMANN S, *et al.* Time-of-flight depth image denoising using prior noise information [C]// ICSP2010: Proceedings of IEEE 10th International Conference on Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2010: 119 – 122.

[8] NEWCOMBE R, HILLIGES O, KIM D, *et al.* Kinect fusion: real-time dense surface mapping and tracking [C]// Proceedings of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Piscataway: IEEE Press, 2011: 127 – 136.

[9] IZADI S, KIM D, HILLIGES O, *et al.* Kinect fusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera [C]// Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York: ACM, 2011: 559 – 568.

[10] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1998: 839 – 846.

(下转第 2242 页)

谱分配问题的 Pareto 最优解集。表 1 列出了在节点数分别为 10,25,50,可用频谱数为 20,60,120 的情况下,算法求得的部分 Pareto 最优解。

表 1 部分 Pareto 最优解

节点数	可用频谱数	系统总带宽/(MB·s ⁻¹)	占用频谱数
10	20	8.7	5
		9.0	6
25	60	8.5	5
		9.2	7
50	120	9.5	6
		9.2	5

因此,可以根据认知用户偏好信息和需求,运用层次分析法等策略从最优解集中选择相应的满意解,增强了算法的灵活性。

由于认知用户属于机会接入,通信中一旦主用户出现,认知用户必须退出正在使用的频谱,自适应地平滑移动到其他空闲频谱继续完成通信。因此,频谱切换效率影响认知用户的频谱分配效果。本文实验主要考虑拓扑结构不变的情况下,即不发生频谱切换的场景下的频谱分配效果。频谱切换效率对频谱分配结果的影响是下一步需要继续研究的内容。

4 结语

本文提出了一种基于免疫的多目标优化算法求解认知 Mesh 网络中的频谱分配问题,优化最大化系统总带宽和最小化频谱占用率两个目标,实验结果表明了算法的有效性。不同于已有研究,本文求出了频谱分配的 Pareto 最优解集,提高了求解效果和灵活性。频谱分配是个较复杂的问题,会受到主用户活动模型、频谱切换效率等的影响,这也是下一步将继续深入研究的内容。

参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, *et al.* Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127 – 2159.

[2] WU G, JI Z, ZHANG J, *et al.* Cognitive wireless mesh networks [J]. *Journal of Information Engineering University*, 2010, 11(4): 429 – 433. (作国锋, 季仲梅, 张静, 等. 认知无线 Mesh 网络[J]. 信息工程大学学报, 2010, 11(4): 429 – 433.)

[3] BOUABDALLAH N, ISHIBASHI B, BOUTABA R. Performance of cognitive radio based wireless mesh networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(1): 122 – 135.

[4] JIA J, LI Y, CHEN J, *et al.* Channel allocation and power control based on differential evolution algorithm in cognitive radio mesh network [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 31(1): 15 – 20. (贾杰, 李燕燕, 陈剑, 等. 认知无线网状网中基于差分演化的功率控制

与信道分配[J]. 电子学报, 2013, 31(1): 15 – 20.)

[5] JIA J, LIN Q, CHEN J, *et al.* Joint power control and channel assignment for congestion avoidance in cognitive radio mesh network [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(5): 1122 – 1129. (贾杰, 林秋思, 陈剑, 等. 认知无线 Mesh 网络中联合功率控制与信道分配的拥塞避免[J]. 计算机学报, 2013, 36(5): 1122 – 1129.)

[6] DING Y, XIAO L. Channel allocation in multichannel wireless mesh networks [J]. *Computer Communications*, 2011, 34(7): 803 – 815.

[7] CHAI Z, LIU F. Spectrum allocation of cognitive wireless network based on immune clone selection optimization [J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(11): 92 – 100. (柴争义, 刘芳. 基于免疫克隆选择优化的认知无线网络频谱分配[J]. 通信学报, 2010, 31(11): 92 – 100.)

[8] TANG J, HINCAPIÉ R, XUE G, *et al.* Fair bandwidth allocation in wireless mesh networks with cognitive radios [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(3): 1487 – 1496.

[9] ZHANG J, ZHANG Z, LUO H. Joint subchannel, rate and power allocation in OFDMA based cognitive wireless mesh network [J]. *Wireless Personal Communications*, 2009, 58(3): 1478 – 1487.

[10] KUANG Z, CHEN Z. An effective multi-objective optimization spectrum allocation algorithm in cognitive wireless mesh networks [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(6): 2346 – 2353. (邝祝芳, 陈志刚. 认知无线 Mesh 网络中一种有效的多目标优化频谱分配算法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(6): 2346 – 2353.)

[11] GONG M, CHEN X, MA L, *et al.* Identification of multi-resolution network structures with multi-objective immune algorithm [J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(4): 1705 – 1717.

[12] GONG M, ZHANG L, MA J, *et al.* Community detection in dynamic social networks based on multi-objective immune algorithm [J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2012, 27(3): 455 – 467.

[13] MUMEY B, TANG J, JUDSON I R. On routing and channel selection in cognitive radio mesh networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(9): 1487 – 1498.

[14] KUANG Z, CHEN Z, LIU H. A load-balanced multicast routing algorithm in cognitive wireless mesh networks [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(3): 521 – 531. (邝祝芳, 陈志刚, 刘蕙. 一种认知无线 Mesh 网络中负载均衡的组播路由算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 521 – 531.)

[15] LAM A Y S, LI V O K, YU J. Power-controlled cognitive radio spectrum allocation with chemical reaction optimization [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(7): 1234 – 1241.

(上接第 2234 页)

[11] ZHANG Z, WANG W. A modified bilateral filtering algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(3): 443 – 447. (张志强, 王万玉. 一种改进的双边滤波算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(3): 443 – 447.)

[12] PETSCHNING G, SZELISKI R, AGRAWALA A, *et al.* Digital photography with flash and no-flash image pairs [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 664 – 672.

[13] WANG X, JIN X, XU X, *et al.* Joint bilateral image interpolation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(12): 2117 – 2123. (王孝通, 金鑫, 徐晓刚, 等. 联合双边图像插值[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(12): 2117 – 2123.)

[14] YOSHIZAWA S, BELYAEV A, YOKOTA H. Fast Gauss bilateral filtering [J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(1): 60 – 74.