

文章编号:1007-2780(2016)08-0778-06

多尺度矩阵滤波的路面裂缝检测方法研究

杨会玲^{1*}, 崔洪恩², 孙慧婷¹, 何 昕³
(1.苏州科技大学, 江苏 苏州 215000; 2.白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001;
3.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了从复杂的路面环境中快速检测出路面裂缝并进行分类,提出一种多尺度矩阵滤波的路面裂缝检测方法。该方法基于 TI 公司 TMS642 DSP 平台,可以实现大量复杂数据的快速实时处理,通过多尺度滤波处理路面图像,有效进行图像预处理,消除噪声影响,突出路面裂缝特征。通过 Hessian 矩阵的特征值和特征方向提取裂缝特征,实现裂缝生长方向的跟踪,确定裂缝像素始末位置,从而确定裂缝大小,同时提出裂缝合并算法对小的不连续裂缝进行合并,最后根据裂缝曲率对裂缝进行快速分类。实验结果表明,该方法可以实现路面裂缝准确、快速的检测及分类,抗噪声能力强,图像分割精度高,漏检率和错检率很低,可以满足工程应用要求。

关 键 词:裂缝检测;滤波;曲率;图像分割

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163108.0778

Method for pavement cracks detection based on multi-scale matrix filtering

YANG Hui-ling^{1*}, CUI Hong-en², SUN Hui-ting¹, HE Xin³
(1. *Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, China*;
2. *Baicheng Ordnance Test Center, Baicheng 137001, China*;
3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: In order to quickly detect pavement cracks and classify them from complex pavement environment, a method based on multi-scale matrix filtering is proposed. The method which based on TMS642 DSP platform from TI can process a large number of complex data with high speed in real-time, and effectively process pavement images from multi scales to eliminate the noise, then highlights the characteristics of pavement cracks. Characteristics of pavement cracks can be extracted by analyzing the feature and feature direction of Hessian matrix, then growth direction can be traced and the size of it can be determined. At the same time, the small discontinuous cracks are combined through the crack combination algorithm. Finally, the cracks will be classified according to the crack curvature. Experimental results show that the method proposed in this paper can quickly detect and

收稿日期:2016-01-17; 修订日期:2016-03-08.
基金项目:国家自然科学基金(No.61472267); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No.KYLX15_1311)
Supporteel by National Natartal Science Foundation of China(No.61472267); Program for Postgraduates Research Innovation in University of Jiangsu Province(No.KYLX15_1311)
* 通信联系人, E-mail: wjyhl@126.com

classify the pavement cracks with high accuracy, it also has strong anti-noise capacity, high image segmentation accuracy and low miss rate and error rate, so it can meet the engineering application requirements.

Key words: crack detection; filtering; curvature; image segmentation

1 引 言

随着我国经济的蓬勃发展,人们消费水平大大提高,车辆数日益增多,公路的建设与维护面临着巨大考验。路面裂缝数量是路面检测的重要标准^[1],如何快速准确地获取路面裂缝特征并进行分类是路面检测的重要研究方向^[2]。

由于受到硬件条件限制以及环境因素的影响,路面图像采集系统采集到的路面图像并不是很清晰,噪声严重,造成裂缝特征提取困难。目前,裂缝目标的提取主要以目标灰度值以及形态特征作为判别裂缝的准则^[3-5],主要方法有利用数学形态学操作算子、统计滤波算法、人工种群算法等^[6-8],这些方法相比较于传统裂缝目标检测方法有一定程度的改进,但是在噪声严重的情况下,图像分割精度都很低,并且无法满足大量路面图像的处理,运算量过大,对复杂的路面情况无法进行准确的判断,因此无法实现裂缝目标的快速提取并分类。鉴于现有方法对路面图像的复杂程度评估不够,运算量大,且图像分割精度无法满足各种检测环境,本文提出一种多尺度矩阵滤波的路面检测方法。

2 图像采集系统

路面裂缝检测逐渐智能化和自动化,实现车载式路面检测,采用分辨率为 1 024×1 024、最大帧速达到 50 Hz 的 Dalsa1M60 双目工业相机,如图 1 所示,与 GPS 定位系统配合,GPS 提供秒信号以及定位信息,DSP 根据秒信号提供 50 Hz 的相机外触发,在拍照的同时给出相应位置信息,可以实现后续的裂缝位置标记。本系统对相机拍摄帧率要求较高,同时短焦距相机可视范围大、空间纵感深度强,所以选择高精度短焦距工业相机,而采用双目相机,可以更准确地确定目标特征位置。

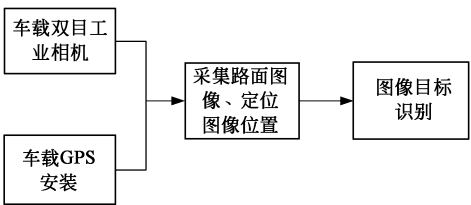


图 1 车载式图像采集系统框图
Fig.1 Block diagram of vehicle image acquisition system

3 裂缝目标检测

获取的图像由于相机投影时的失真或者路面油污的影响不能够直接准确检测出路面裂缝,需要对获取的图片进行预处理,正确检测出裂缝对应的覆盖区域。双目工业相机实时采集路面图像,多尺度滤波有效滤除噪声影响,突出路面裂缝特征,通过 Hessian 矩阵特征向量和特征值跟踪裂缝走向并进行分类和标记。实现过程如图 2 所示。

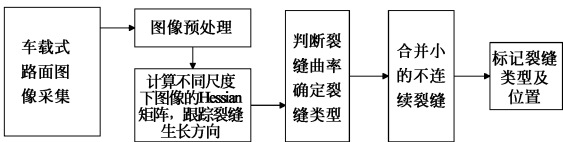


图 2 路面裂缝检测与分类结构框图
Fig.2 Structure of the detection and classification of pavement cracks

3.1 多尺度矩阵滤波裂缝检测

3.1.1 多尺度滤波

从不同尺度观察物体会产生不同的呈现形式,当对复杂路面图像进行分析时,为了获取路面裂缝特征,必须选取合适的尺度,但一开始无法确定路面图像中每个结构的合适尺寸,为了能够快速捕获所需结构,提出从多个尺度对图像进行表示。

不同尺度观察图像结构构成了图像的尺度空间。一个二维图像 $f(x,y)$ 它的高斯尺度空间表示是由 $f(x,y)$ 和高斯核函数卷积而得到的一组信号 $I(x,y;\sigma)$:

$$I(x, y; \sigma) = f(x, y) \otimes g(x, y; \sigma), \quad (1)$$

其中高斯函数 $g(x, y; \sigma)$ 的表达式为:

$$g(x, y; \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}. \quad (2)$$

式(1)中 I 仅仅与变量 x, y 有关, 尺度参数 σ 仅仅表示被定义的尺度级别。 σ 是高斯滤波器变量。

图 3 显示了一幅裂缝图像在不同的尺度 σ 下的表示。实验表明当取 $\sigma = 0$ 时, $I(x, y; 0) = f(x, y)$, 此时尺度空间即原图像。随着 σ 的增大, 滤波器也逐渐增大, 许多细节结构渐渐被去除, 抑制图像非重要的特征, 从而突出裂缝特征, 为路面裂缝特征的快速提取和识别提供了依据。

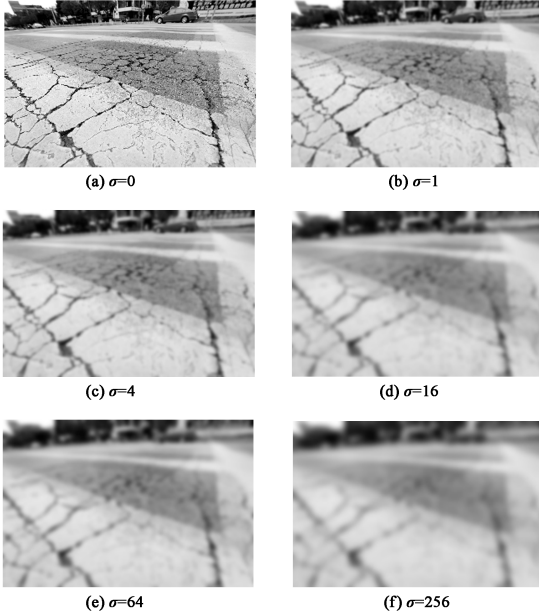


图 3 裂缝图像的多尺度滤波

Fig.3 Multi-scale filtering of crack image

3.1.2 多尺度 Hessian 矩阵法

Hessian 矩阵法利用高阶微分提取图像特征方向, 绝对值最大的特征值对应的特征向量垂直于图像特征方向, 与该方向垂直的特征向量则与图像特征方向平行, 因此可以根据 Hessian 矩阵的特性检测图像中的裂缝特征。

图像 $I = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n \dots a_N]$ 包含 N 个像素, 通过式(3)计算图像位置为 n 和尺度为 σ 时的 Hessian 矩阵。

$$H_{a_n, \sigma} = \begin{bmatrix} I_{xx}(a_n; \sigma) & I_{xy}(a_n; \sigma) \\ I_{yx}(a_n; \sigma) & I_{yy}(a_n; \sigma) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$I_{xx}(a_n; \sigma)$, $I_{yy}(a_n; \sigma)$, $I_{xy}(a_n; \sigma)$ 均为二

阶导数, x 和 y 各代表 X 轴、 Y 轴方向的梯度, 其中为了降低噪声的影响, 通过原始图像与尺度 σ 下的高斯滤波函数的相应二阶导数卷积, 变换公式如(4):

$$I_x(a_n; \sigma) = \frac{\partial I(a_n, \sigma)}{\partial x} = I(a_n) * \frac{\partial G(a_n, \sigma)}{\partial x}. \quad (4)$$

通过公式(3)计算出 Hessian 矩阵的特征向量和特征值, 绝对值大的特征值 λ_1 相应的特征向量代表给定像素在尺度 σ 下的最大曲率方向。特征值 λ_2 相应的特征向量代表曲率最小的方向。因此, 选取绝对值最小的特征值相应的特征向量作为裂缝的跟踪方向。

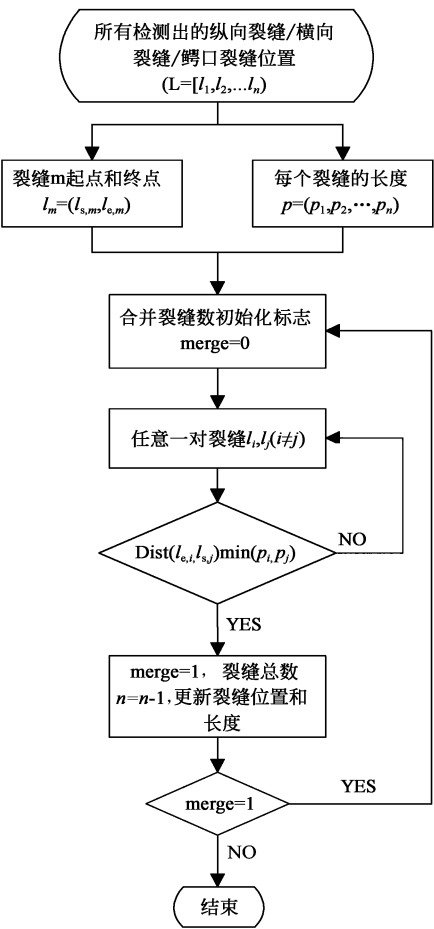
Hessian 矩阵的特征向量和特征值各表示为 $\nu_i(x, y)$ 和 $\lambda_i(x, y)$, 即 ν_i 和 $\lambda_i (i=1, 2)$ 。在路面图像中, 裂缝的灰度值明显低于周围像素, 并且也是曲率最大的, 假设 (x, y) 是裂缝中的点, 设特征值 $|\lambda_1| \leq |\lambda_2|$, 那么, 特征向量 ν_2 垂直于该裂缝像素处裂缝的走向, ν_1 所对应的方向沿着裂缝的走向。因此, 在裂缝检测中, 利用 ν_1 平行于裂缝走向的特征, 可以选作裂缝中心线跟踪方向, 跟踪到裂缝生长方向那么整条裂缝就识别出来了。

3.1.3 裂缝检测和分类

在路面裂缝图像中, 根据裂缝的裂纹特征和分布范围, 可以分为鳄口式裂缝、横向裂缝和纵向裂缝。

纵向裂缝平行于路面中心线, 曲率方向近似 90 度, 检测时允许有 30° 的误差容忍度, 曲率 r 在 $60^\circ \leq r \leq 90^\circ$ 范围内表示检测到纵向裂缝。横向裂缝垂直于路面中心线, 曲率 r 在 $0^\circ \leq r \leq 30^\circ$ 范围内表示检测到横向裂缝, 其余情况则表示检测到的为鳄口裂缝。为了减少误差容忍度设置过高造成错检和容忍度过低造成漏检这两种情况的影响, 一般选择去除包含裂缝像素点很少的裂缝, 但是通常情况下, 裂缝是由很多不连续的裂缝组成, 利用这种方法来删除裂缝会造成诸多信息的丢失。于是, 本文提出了一种合并小的不连续裂缝的方法来消除噪声, 同时保留真实的纵向裂缝包括不连续的裂纹。当被检测图像中有 M 个独立的纵向裂纹, 它们各自的位置保存在变量 $L = [l_1, l_2, \dots, l_n]$, $l_m = [l_s, l_e]$ 对应了纵向裂缝 m 的起点和终点, $p = [p_1, \dots, p_m]$ 代表每个独立裂缝的长度,

合并裂缝的算法流程图如图 4 所示。



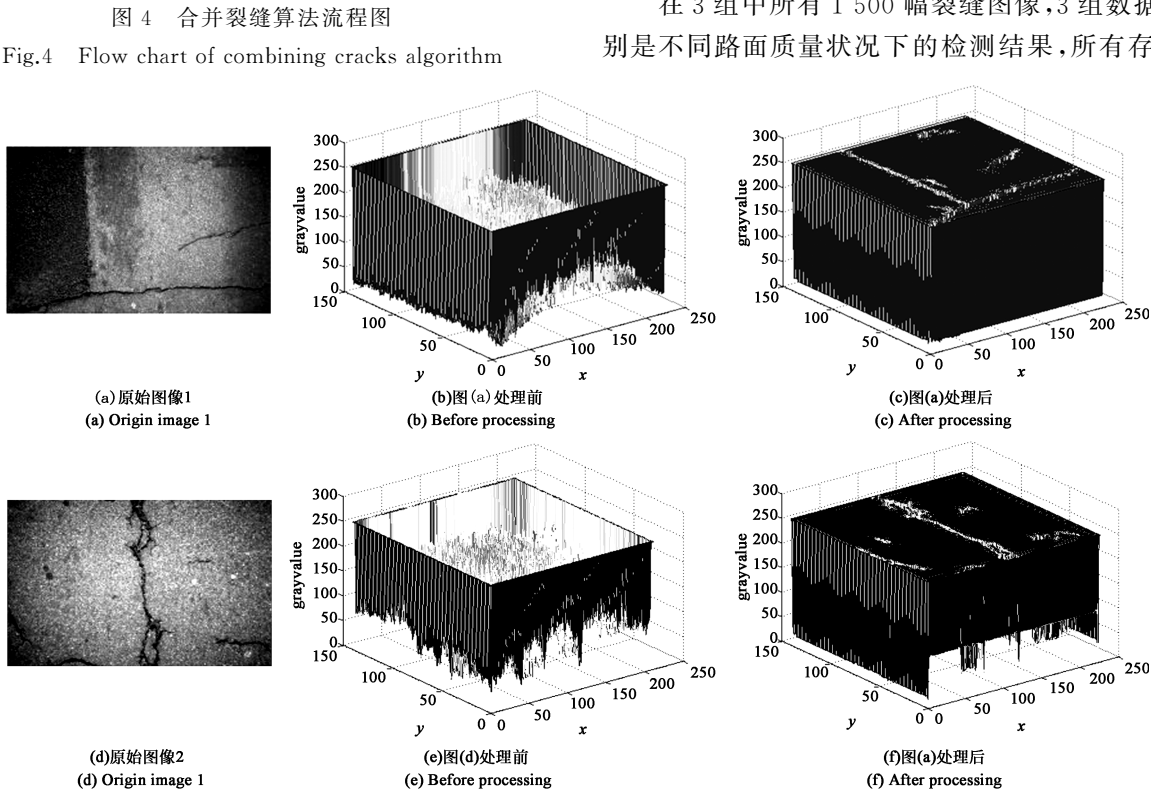
该算法确保由小的不连续裂缝组成的连续裂缝能够被检测为同一条裂缝。经过此算法检测后,独立裂缝中像素点数目少于所设定最少数目的会作为噪声被丢弃。

4 实验结果与分析

为了充分验证提出方法的有效性和准确性,实验进行了大量的数据分析,分析了 3 组分别在不同的环境和检测条件下的每组 500 张路面图像的数据组。采用多尺度矩阵滤波检测路面裂缝并进行分类,如图 5 是其中一组数据,为了更加清晰地看出裂缝检测效果,原图和处理结果都采用三维图像表示, x 轴和 y 轴代表图像像素点的位置坐标信息, z 轴为各点的灰度值信息。

多尺度矩阵滤波处理后的路面图像结果如图 5 所示,其中(a),(d),(g)是相机采集的路面原图像,(b),(e),(h)是路面图像的三维图,(c),(f),(i)是经过算法处理后的裂缝图像三维图。经多尺度矩阵滤波算法处理后得出图像中裂缝的数量、鳄鱼口裂缝所覆盖的范围以及纵向和横向裂缝的长度和宽度更加清晰,裂缝图像得到了增强,噪声也得到了很好的滤除,裂缝因此可以被准确检测和分类。

在 3 组中所有 1 500 幅裂缝图像,3 组数据分别是不同路面质量状况下的检测结果,所有存在



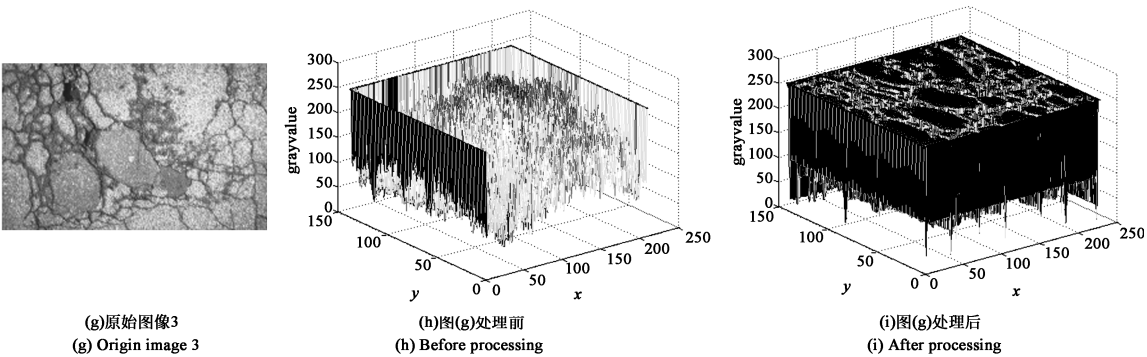


图 5 Hessian 矩阵多尺度滤波处理后的路面裂缝图像结果

Fig.5 Processing results of the Hessian matrix multi-scale filtering for pavement cracks images

裂缝的图像对它们进行分类统计的结果如表 1 所示。每一组的裂缝图像的漏检率和错检率统计如

表 1 裂缝的分类结果

Tab.1 Classification results of cracks

	横向裂缝	纵向裂缝	鳄鱼裂缝
总幅数	251	198	158
分类正确	234	186	147
正确率	93.2%	93.9%	93.0%

表 2 所示,A 代表路面质量良好,B 代表路面质量一般,C 代表路面质量较差(路面质量人工初步判断)。表 3 是每组路面图像的裂缝合并结果以及合并后最小裂缝长度。

由表 1 统计结果可以看出,3 组不同路面环境下的裂缝分类结果正确率都达到 93% 及以上,说明该算法可以实现路面裂缝的准确分类。由表 2 统计结果可以看出,裂缝漏检率和错检率都低于 5%,无论是质量良好的路面还是质量较差的

表 2 漏检率和错检率统计结果

Tab.2 Statistical results of miss rate and error rate

检测前提条件	存在裂缝的图像/幅	不存在裂缝图像/幅	漏检图像/幅	错检图像/幅	漏检率/%	错检率/%
A	157	343	6	4	3.8	1.2
B	202	298	8	6	4.0	2.0
C	248	252	9	7	3.6	2.8

表 3 裂缝合并结果

Tab.3 Cracks combination results

检测前提条件	检测到裂缝总数/个	合并后裂缝数/个	合并后最小裂缝长度/cm
A	470	300	12
B	623	480	18
C	780	645	25

都可以有效检测出路面裂缝,说明该算法可以适应各种复杂路面环境并实现准确检测。由表 3 实验结果可知,该算法可以有效合并小的不连续裂缝,避免阈值的设置对裂缝的误删除,实现路面裂缝的真实保留,合并后最小裂缝长度在 12 cm 左

右,可根据合并后的结果设置合理的阈值。由此可以证明本文提出的检测方法准确有效,可以满足实际工程要求。

5 结 论

传统的路面裂缝检测方法在不同程度上反映了路面复杂程度评估不够、运算量大,抗噪声能力弱等问题,不能够实现路面裂缝目标的快速提取和分类,本文通过不同尺度的选择,有效突出路面裂缝特征,Hessian 矩阵的特征值和特征向量有效跟踪路面裂缝生长方向,对小的不连续裂缝进行了合并,有效提取了噪声环境中微弱裂缝信号,实现了路面裂缝特征的快速提取及分类。

参 考 文 献:

- [1] 孙朝云,赵海伟,李伟,等.基于双相扫描检测的路面三维裂缝识别方法[J].中国公路学报,2015,28(2):26-32.
SUN Z Y, ZHAO H W, LI W, *et al.* 3D pavement crack identification method based on dual-phase scanning detection [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(2): 26-32. (in Chinese)
- [2] 唐磊,赵春霞,王鸿南,等.基于图像三维地形模型的路面裂缝自动检测[J].计算机工程,2008,34(5):20-21,38.
TANG L, ZHAO C X, WANG H N, *et al.* Automated pavement crack detection based on image 3D terrain model [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(5): 20-21, 38. (in Chinese)
- [3] 郝雪丽,孙朝云,沙爱民,等.水泥混凝土路面刻槽磨损程度三维检测方法[J].仪器仪表学报,2015,36(8):1767-1773.
HAO X L, SUN Z Y, SHA A M, *et al.* 3D detection of the groove wear degree on cement concrete pavement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(8): 1767-1773. (in Chinese)
- [4] HUANG Y C, TSAI Y. Crack fundamental element (CFE) for multi-scale crack classification [C]. *Proceedings of the 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, Netherlands: Springer, 2012: 419-428.
- [5] 田浩南,张叶.基于边缘及特征点匹配的立体图像质量评价[J].液晶与显示,2015,30(4):666-672.
TIAN H N, ZHANG Y. Quality evaluation of stereo image based on edge and characteristic point matching [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 666-672. (in Chinese)
- [6] 乌旭,胡家升,梁殿亮.基于区域分割的指纹奇异性检测及中心点计算[J].光学精密工程,2006,14(2):229-235.
WU X, HU J S, LIANG D L. An algorithm for singularity detection and center point calculation based on fingerprint segmentation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 229-235. (in Chinese)
- [7] 许燕,胡广书,商丽华,等.基于Hessian矩阵的冠状动脉中心线的跟踪算法[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(6):889-892.
XU Y, HU G S, SHANG L H, *et al.* Adaptive tracking extraction of vessel centerlines in coronary arteriograms using Hessian matrix [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2007, 47(6): 889-892. (in Chinese)
- [8] TAO J Y, AUER S, PALUBINSKAS G, *et al.* Automatic SAR simulation technique for object identification in complex urban scenarios [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(3): 994-1003.

作者简介:杨会玲(1976—),女,河南开封人,讲师,硕士,主要研究方向:光电测控技术与仪器。E-mail:wjyhl@126.com