

# 一种可迭代基于多向自相关的航拍电力线图像增强方法

曹蔚然<sup>1,2,3</sup>, 朱琳琳<sup>1</sup>, 韩建达<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 沈阳师范大学软件学院, 辽宁 沈阳 110034)

**摘要:** 针对无人机航拍电力线图像环境背景复杂、电力线目标细弱导致目标识别率低的问题, 提出了一种可迭代运行的多向自相关 (iterable multidirectional autocorrelation, IMA) 增强方法. 该方法根据航拍图像中电力线目标的局部纵向及横向灰度分布特征设计有效的滤波模板, 用方向滤波的结果进行自相关增强. 同时, 这种自我增强可以多次迭代运行以达到满意的图像增强效果. 通过一系列实验将 Canny、Hessian 与 IMA 方法的增强结果进行对比, 实验结果显示, 所提出的 IMA 方法比 Canny 和 Hessian 方法更适于无人机航拍电力线图像的增强操作. IMA 方法不但运算速度快, 而且能在大幅减弱航拍图像中复杂环境背景的同时增强电力线目标, 从而有效提高图像的电力线目标检测识别率.

**关键词:** 航拍电力线图像; 可迭代多向自相关; 图像增强; 灰度分布; 滤波

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2015)-06-0738-10

## An Iterable Multidirectional Autocorrelation Approach for Aerial Power Line Image Enhancement

CAO Weiran<sup>1,2,3</sup>, ZHU Linlin<sup>1</sup>, HAN Jianda<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Software, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

**Abstract:** A power line image photographed by UAV (unmanned aerial vehicle) has usually a complex background, wherein the thin power lines are so weak that the target lines detection rate is low. To solve this problem, an iterable multidirectional autocorrelation (IMA) approach is proposed to enhance image. Firstly, an effective filtering template is designed according to the local grey level distribution along longitudinal and lateral directions of a power line in a UAV aerial image, and the results of the directional filtering are used to perform an autocorrelational enhancement. The autocorrelational enhancement can be performed iteratively to get a satisfactory image enhancement result. Image enhancement results of IMA are compared with those of Canny, Hessian approaches in a series of experiments. Experiments results show that the proposed IMA approach is more suitable for UAV aerial image enhancement than Canny and Hessian approaches. The IMA approach is fast, and it can weaken complex background in aerial image dramatically while enhancing power line targets, which effectively improves recognition rate of power line targets in images.

**Keywords:** aerial power line image; iterable multidirectional autocorrelation (IMA); image enhancement; grey level distribution; filtering

## 1 引言 (Introduction)

近年来, 随着无人机技术的日趋成熟, 使用无人机航拍方法进行电力线巡检逐渐被广泛采用<sup>[1-4]</sup>. 无人机航拍方法具有应用方便、花费低廉、结果直观等优点, 可有效规避人工电力线巡检带来的野外巡检困难、劳动强度大、工作乏味易出错等问题<sup>[1]</sup>. 识别航拍图像中的电力线目标可以帮助无人机及时找到待检电力线并避免与之发生碰撞, 进而

达到安全沿线巡检的目的. 然而由于航拍图像背景为复杂多变的地面, 电力线目标相对细弱, 所以直接对航拍图像进行电力线检测极易由于背景的干扰而出现误检、漏检现象, 降低了电力线识别率, 使得视觉系统难以为无人机决策提供稳定有效的信息. 为了改善这种情况, 人们进行多种方法的研究. 2007 年, Yan 等人采用线模板和比率线检测算子技术来筛选电力线点, 然后再应用 Radon 变换和卡尔曼滤波方法检测出电力线, 取得较好效果; 但

其中线模板容易产生噪声, 而比率检测算子的效果则依赖于先验阈值的选择<sup>[2]</sup>. 2008 年, Li 等人采用 PCNN (脉冲耦合神经网络) 的方法去除航拍图像中的背景噪声并筛选出电力线目标取得较好效果<sup>[3]</sup>. 但 PCNN 方法运算效率较低, 实际应用时对无人机硬件性能要求较高. 2012 年, 赵利坡等人引入了方向约束来抑制复杂背景对电力线识别的干扰, 较好地识别了电力线目标. 但该方法约束条件较苛刻, 只能识别近似水平方向的电力线<sup>[5]</sup>. 为了进一步提高识别水平, 一种从图像四边开始搜索的策略被提出, 该方法放宽了对电力线位置的几何约束要求, 即不再要求电力线近似水平而可以是各种方向, 并沿图像边界搜索电力线. 这样不但可有效规避大多数航拍图像电力线目标不是全局占优而导致误检的情况, 而且增加了算法的并行性, 有效提高了电力线目标的识别率和检测速度<sup>[6]</sup>. 但该方法也有一定的几何约束要求, 并与算法的性能相耦合. 即若想获得最快效果, 需要预知电力线穿过图像的边界和角度, 这使得这种方法的应用也受到一定限制. 目前, 图像中线状目标的检测方法相对成熟、稳定. 在这一前提下, 对航拍图像进行适当处理, 以便增强电力线目标并减弱复杂背景干扰的高效、鲁棒的图像增强方法就成为提高航拍图像电力线目标识别率的一个重要研究课题. 2013 年, Zhu 等人使用双边滤波的方法对无人机航拍图像进行增强, 取得了不错的效果<sup>[7]</sup>. 双边滤波需要对电力线的两个边界进行计算, 所以在时间花费上有进一步提升的空间.

基于前人研究成果, 本文根据航拍电力线图像中电力线的截向灰度分布特征, 结合方向滤波, 提出一种可迭代多向自相关 (IMA) 增强方法. 该方法由多向自相关算法 (MA) 和迭代控制 (iteration control, IC) 组成. 实验表明 IMA 增强方法能有效抑制航拍电力线图像的复杂背景、增强电力线目标, 并能在算法效率和增强效果上进行调节、取舍, 以达到满意的增强效果和实时性要求.

## 2 相关研究 (Related works)

航拍图像中的电力线是一种线状目标, 人们已在图像线状目标增强领域做了大量研究, 提出了多种有效的增强方法.

### 2.1 增强方法

1998 年 Frangi 提出了一种利用图像本地结构多尺度 2 阶导数 (Hessian) 构建血管图像增强滤波器的方法, 利用 Hessian 矩阵的特征值间的大小关系

推出血管走向, 进而构造增强公式对 2 维及 3 维血管图像进行增强<sup>[8]</sup>. 之后, Hessian 方法在医学图像血管增强领域得到了广泛的应用. 如, 2003 年, 李光明等人利用 3 维 Hessian 矩阵特征值的几何意义找出人体内部管腔的中心线大致形状<sup>[9]</sup>; 2007 年, 许燕等人利用 Hessian 矩阵特征向量的方向解决了冠脉造影图像中曲率变化剧烈而跟踪不准确的情况<sup>[10]</sup>; 2009 年, Mirhassani 等人使用 Hessian 矩阵对图像中的血管结构进行分割<sup>[11]</sup>; 2010 年, Drechsler 等人比较了不同 Hessian 增强公式的效果<sup>[12]</sup>. 大量应用表明了 Hessian 方法对图像中管线目标增强的有效性, 而航拍图像中的电力线是一类典型的线状目标, 因此 Hessian 方法可以应用于航拍图像中电力线目标的增强.

线状目标增强的另一重要应用领域为指纹识别领域. 指纹图像正是由一圈圈线状纹路组成. 指纹图像背景虽相对单一, 但在指纹采集时由于采集设备以及被采集人自身等原因会导致指纹图像的失真、缺失、断续等问题, 进而影响指纹识别. 指纹图像增强对指纹识别是非常重要的. 一种称作方向滤波的增强方法通过计算图像在不同方向指定频带上的 1 维离散傅里叶变换并加以处理, 可以达到对指纹图像增强的目的<sup>[13-16]</sup>. 指纹图像增强的研究同样为航拍电力线图像增强提供了借鉴.

边缘检测方法将图像中的边缘部分加强或提取出来, 可视为对图像中物体目标的增强. 2001 年, Ali 等人把 Canny 边缘检测用于遥感图像的特征提取和增强<sup>[17]</sup>. 图像中的电力线目标具有明显的边缘特征, 所以边缘检测也可作为一种航拍电力线图像增强手段.

由于航拍电力线图像背景千变万化, 非常复杂, 传统的增强算法难以取得稳定的增强效果, 于是有人尝试使用神经网络方法. PCNN 是一种新型的神经网络算法, 由 Eckhorn 在 1990 年根据猫大脑皮层神经生理反应原理提出的展示脉冲发放现象的连接模型变形而来. 由于有生物学实验作为依据, PCNN 在包括图像处理等众多领域得到了广泛应用<sup>[3,18-20]</sup>.

除这些方法外, 还有人使用 steerable filter 以及 Gabor 方法对图像中的线状目标、边缘或纹理进行分析<sup>[21-23]</sup>. 这两种方法与方向滤波相似, 都是从多个方向对图像进行分析, 可以作为图像线状目标的增强方法. steerable filter 方法使用 2 维高斯函数的 1 阶导数来分析图像<sup>[24]</sup>, 而 Gabor 方法则以 2 维高斯函数被正弦平面波调制后的波形来分析图像, 其

过程符合哺乳动物视觉皮层细胞感光原理<sup>[25]</sup>。

上述的研究成果尽管应用背景及处理的图像与无人机航拍电力线图像及电力线增强有许多不同之处，如航拍电力线图像复杂的背景及处理算法的实时性和鲁棒性，但仍为无人机航拍电力线图像的增强起到指导、借鉴的意义。

无人机应用要求较高的实时性、准确性和鲁棒性，综合考虑前述各方法，在后面实验中将选用经典的 Canny 和 Hessian 方法作为参照。

## 2.2 Canny 算子

Canny 算子是一种理论完善的最优边缘检测算子，满足评价边缘检测性能的 3 个准则：(1) 应使信噪比最大化以保证好的检测条件；(2) 应该具有高的定位精度，使检测出的边缘点尽可能接近实际边缘；(3) 应该对一条边缘只检测出一条响应。Canny 算子的算法步骤<sup>[26]</sup>为：(a) 高斯平滑去噪；(b) 计算每点的梯度；(c) 非极大值抑制；(d) 双阈值处理及边缘连接。

Canny 算子的 3 大准则和相对简单的算法步骤使其得到了广泛的应用。算法运行时间短，鲁棒性高，边缘检测精确。

## 2.3 Hessian 增强

Hessian 增强是指利用 Hessian 矩阵的特征值和特征向量对图像进行增强的方法。Hessian 二维矩阵表述为

$$\mathbf{H}(x,y) = \begin{bmatrix} I_{xx}(x,y) & I_{xy}(x,y) \\ I_{yx}(x,y) & I_{yy}(x,y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $I_{xx}(x,y)$ 、 $I_{xy}(x,y)$ 、 $I_{yx}(x,y)$ 、 $I_{yy}(x,y)$  代表图像  $(x,y)$  点处在  $x$ 、 $y$  方向以及混合的 2 阶偏导数。

Hessian 矩阵的特征值和特征向量代表着图像曲率变化的强度和方向。采用的 Hessian 二维增强公式如下：

$$V = \begin{cases} 0, & \lambda > 0 \\ \exp(-\frac{R^2}{2\beta^2})(1 - \exp(-\frac{S^2}{2c^2})), & \lambda \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中  $V$  代表增强结果， $\lambda$  代表 Hessian 矩阵特征值的最大值， $R$  是团块度量， $S$  是平滑度量， $\beta$  是  $R$  的调整参数， $c$  是  $S$  的调整参数<sup>[27]</sup>。

## 3 可迭代多向自相关算法 (Iterable multi-directional autocorrelation approach)

无人机航拍电力线图像与普通图像相比有着其特有的特点，即相关局部背景较暗、目标较亮，背

景复杂，目标光滑，背景庞大、目标细弱。所以用普通的图像增强方法处理这类图像的结果并不总是理想。很多情况下复杂的背景特征超越了电力线目标的特征，使得图像在增强处理后，目标被减弱，背景反而得到增强，降低了后续电力线检测的成功率。IMA 方法借鉴已有图像线状目标增强的处理方法，有效利用航拍图像中电力线的灰度分布特征和局部范围内电力线与背景环境的相对关系，使图像通过 IMA 方法增强处理后电力线目标相对周围背景变得更加突出，并使分布在其上的能量在图像全局范围内占优。

### 3.1 基本算法流程

可迭代多向自相关算法的一次迭代算法，即基本算法，被称之为多向自相关算法 (MA)。其流程包括图像高斯滤波处理、灰度分布调整、滤波模板生成、多向滤波计算、自相关增强、增强结果整理等环节。流程示意如图 1 所示。

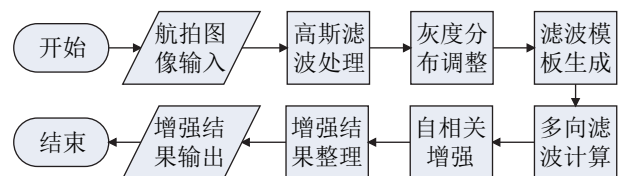


图 1 MA 算法流程

Fig.1 MA algorithm process

航拍图像输入后，高斯滤波处理可以有效去除图像中的高斯噪声，消除一些孤立点噪声对算法运行的不利影响。图像离散 2 维高斯滤波公式为

$$C(x,y) = \sum_{u=-c}^c \sum_{v=-c}^c I(x+u,y+v)G(u,v) \quad (3)$$

其中  $x$ 、 $y$  是图像中点的横、纵坐标， $c$  是正方形滤波模板长或宽的一半， $G(u,v)$  满足：

$$G_{2D}(u,v,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

式中  $\sigma$  是标准差，这里取  $u$  和  $v$  方向上的  $\sigma$  相同。

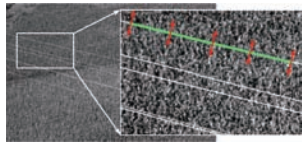
$$A(x,y) = \begin{cases} 0, & I(x,y) \leq a \\ \frac{C(x,y)-a}{b-a} \times 255, & a < I(x,y) < b \\ 255, & I(x,y) \geq b \end{cases} \quad (5)$$

$$I(x,y) \in [0,255], \quad a = 25.5, \quad b = 229.5$$

$$x \in [0,1,\dots,n], \quad y \in [0,1,\dots,m]$$

在高斯滤波之后，航拍图像虽然消除了孤立点噪声的不利影响，但由于光照、大气透光率等原因还可能出现图像偏暗，电力线与背景灰度接近难

于分辨的情况. 这时, 有必要对图像进行灰度分布调整, 适度拉伸图像的主要灰度可以增强图像对比度, 使灰暗的、与背景接近的电力线目标变得清晰起来, 有利于 IMA 算法的运行, 加强电力线目标的增强效果. IMA 方法使用简单地将图像灰度直方图中部 98% 的灰度拉伸到全部空间的办法, 即将直方图中两端各 1% 的灰度分别向两端合并, 然后将剩余的 98% 的灰度按比例拉伸到全部空间. 这种处理简单、有效, 可以在保证处理速度的同时取得较好的效果. 灰度拉伸情况如式 (5) 所示. 其中  $C(x,y)$  为图像高斯滤波后的灰度值, 取值在 0 至 255 之间;  $A(x,y)$  为图像灰度拉伸后的结果;  $m$ 、 $n$  为图像的尺寸;  $a$ 、 $b$  分别为灰度拉伸的起止值.



(a) method of getting transverse section grey level along power line

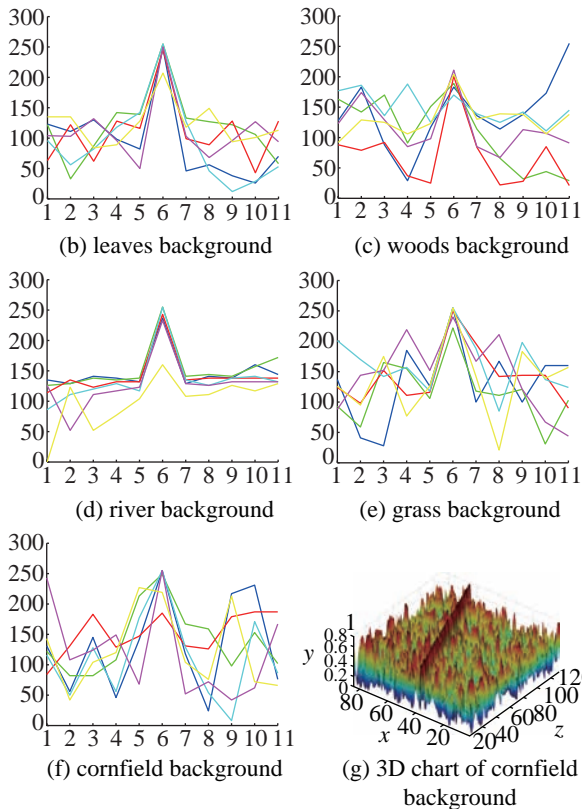


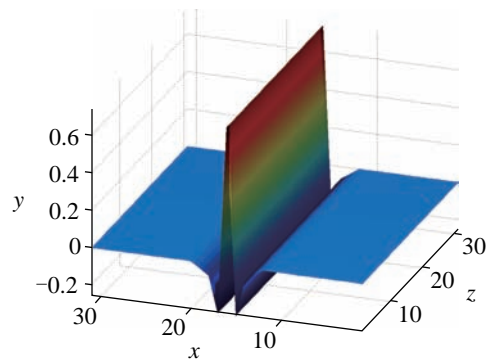
图 2 电力线两侧截向灰度分布

Fig.2 Transverse section grey level distribution along power line

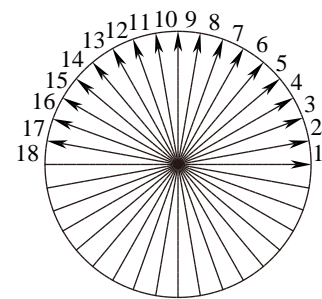
### 3.2 滤波

为了完成背景复杂、目标细弱的航拍电力线图像增强任务, 研究了图像中电力线的灰度分布特

征. 沿电力线纵向看, 航拍电力线图像中的电力线是一条或几条平行的比周围背景亮的线. 这些线在一个较小的局部范围内可看作直线, 呈现出长、直且亮的特征. 沿电力线横向看, 电力线大体呈现山峰状灰度分布. 为了仔细考察电力线纵横两个方向上的灰度分布情况, 提取一段电力线及其局部背景图, 如图 2(a) 所示. 在提取的图像上确定一段待考察电力线段, 如图中绿色线段所示, 则电力线的截向为图中红色箭头所指方向. 在绿色线段上确定 5 个等距离分布的点, 沿这 5 个点以垂直于绿色线段的方向 (红色箭头所示) 向电力线两侧各延伸 5 个像素, 提取这些像素的灰度值则得到电力线的 5 组截向灰度分布数据. 将这 5 组数据分别用不同的颜色画成线, 如图 2(b) 所示, 图中横轴为电力线截向像素点位置, 纵轴为该点的灰度值. 在不同背景的航拍电力线图像上进行考察, 得到多幅电力线截向灰度分布数据图, 如图 2(b) ~ (f) 所示. 为了更直观地表现航拍电力线截向灰度分布情况, 图 2(g) 给出了以麦田为背景的 3D 曲面示意图. 不难看出, 航拍电力线图像截向灰度分布类似脉冲尖波. 中间明亮, 两侧最暗, 相邻背景则亮度较暗且杂乱.



(a)



(b)

图 3 滤波模板和滤波方向

Fig.3 Filter template and filtering directions

综合多种电力线两侧截向灰度分布情况及其长直特点, 设计检测电力线的滤波模板如图 3(a) 所示. 模板沿  $x$  轴方向的取值为  $[0, \dots, 0, -0.0323,$

$-0.0645, -0.2581, 0.7419, -0.2581, -0.0645, -0.0323, 0, \dots, 0]$ . 模板尺寸应根据航拍图像中目标与背景相对情况而定, 一般来说模板尺寸越大, 增强效果越好. 考虑到算法运行时间, 后面实验中对  $800 \times 800$  的人工合成图像以及  $1080 \times 720$  的中距离无人机航拍电力线图像, 将模板尺寸选为  $31 \times 31$ .

考虑到图像中电力线走向可能有一定的角度变化, 为了尽可能少地遗漏图像的电力线部分, 选取  $5^\circ$  为模板的旋转步长, 这样所有的滤波方向如图 3(b) 所示. 这些不同方向的滤波模板将分别与航拍图像进行滤波以取得不同方向的滤波结果. 旋转前需要将坐标原点移至中心, 情况如图 4 所示.

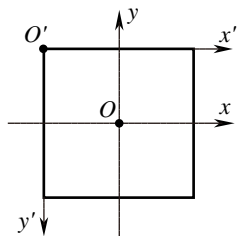


图 4 模板坐标系变换

Fig.4 Template coordinate transformation

模板 2 维旋转公式如式 (6) 所示. 其中  $(x_1, y_1)$  为点  $(x_0, y_0)$  逆时针旋转  $\theta$  后的坐标.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3.3 自相关增强

航拍电力线图像不同于指纹图像, 由于背景可能出现各种复杂情况, 不同方向的滤波结果并不能立即增强电力线. 需要对各向滤波结果做进一步处理以达到增强电力线的目的. 考察航拍电力线图像中电力线的灰度分布特征, 可归结为电力线在局部范围内呈现长、直且亮的特征. 即, 一条电力线在其局部范围内沿电力线走向方向的滤波结果应远高于其他方向的滤波结果. 由此, 本文提出一种航拍电力线自相关增强方法. 采用式 (7) 作为电力线的增强公式.

$$E(x, y) = \left( 1 - \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{i=-c}^c \sum_{j=-c}^c A(x+i, y+j) T_k(i, j)}{N \times \max \left\{ \sum_{i=-c}^c \sum_{j=-c}^c A(x+i, y+j) T_g(i, j) \right\}} \right)^p \quad (7)$$

$g = 1, 2, \dots, N$

其中  $E(x, y)$  为增强结果,  $N$  为滤波器个数.  $A$  为灰度拉伸处理后的图像.  $(x, y)$  代表图像里点的坐标,  $T$  为滤波模板,  $g$  为角度号, 表明滤波模板方向,  $p$  为增强系数. 这样, 当各向滤波结果相近时, 公式中的分式部分趋向 1, 整个公式结果趋向 0; 当各向滤波结果只有某一方向特别突出时, 公式中的分式部分趋向  $1/N$ , 这时, 当滤波器个数  $N$  取得较大时, 分式部分趋向 0, 从而整个公式结果趋向 1. 于是, 增强后的结果在  $[0, 1]$  间取值.

式 (7) 使得航拍图像电力线目标只在一个局部范围内与电力线周围的环境做比较, 利用比较的结果对自身进行增强, 达到了自我增强的目的. 这样经过式 (7) 的增强后, 在电力线的局部范围内, 一个方向的滤波结果比其他方向的滤波结果相差越大, 则得到的增强幅值越大. 图像所有部分都增强后, 从图像全局对增强结果进行归一化处理. 这样, 那些在全局上能量本不占优的电力线目标凭借其在自身局部占优的航拍图像电力线目标的固有特征, 经过增强处理后, 就比那些没有电力线通过的区域有更大的概率得到更大幅度的增强. 增强后的图像中由于每一区域只跟自己周围区域相关, 所以增强后的一条电力线可能会出现灰度上不同程度的变化, 出现明暗不均的现象, 同时图像中某些类似电力线的条状结构也可能被增强. 但由于电力线在长直方向的累积特性, 若干的明暗变化不会过度影响电力线结构的检测. 同时由于经过设计的滤波模板的制约, 非电力线结构被增强的概率要远低于电力线结构. 电力线在长直方向的累积情况可用 Radon 变换表示:

$$R(r, t) = \iint_D I(x, y) \delta(r - x \cos t - y \sin t) dx dy \quad (8)$$

其中  $R$  是累积结果,  $r$  是直线与原点垂直距离,  $t$  是垂线与  $x$  轴正向的夹角,  $D$  代表图像平面,  $I(x, y)$  代表图像上的点,  $\delta$  是 Dirac Delta 函数, 使累积沿直线进行.

### 3.4 时间复杂度

(1) IMA 基本算法有效利用滤波结果, 方便、高效. 其主要环节时间复杂度如下, 假设图像为  $M \times N$ , 滤波模板为  $n \times n$ , 滤波模板个数为  $s$ .

(2) 高斯滤波时遍历图像空间的时间复杂度为  $O(N^2)$  ( $M \approx N$ ). 单点滤波的时间复杂度为  $O(n^2)$ . 由于一般  $n$  远小于  $N$ , 所以此步的总时间复杂度可视为  $O(N^2)$ .

(3) 灰度分布调整主要是遍历整个图像空间,

其时间复杂度可视为  $O(N^2)$ .

(4) 滤波模板的生成主要涉及模板的旋转计算, 其时间复杂度可视为  $O(s \times n^2)$ . 由于  $s$  和  $n$  都比较小且模板可以事先生成, 所以此步总的时间复杂度视为  $O(1)$ .

(5) 多向滤波与高斯滤波相似, 总的时间复杂度可视为  $O(N^2)$ .

(6) 自相关增强的时间复杂度为  $O(1)$ .

可见 IMA 算法总的时间复杂度为  $O(N^2)$ , 与滤波处理同级, 说明 IMA 算法效率较高.

### 3.5 迭代控制

基本算法 MA 可以多次迭代运行, 形成迭代算法 IMA. 由于 MA 算法对原图像进行 1 次增强后, 背景已经大幅减弱, 电力线更明显地呈现局部方向性, 所以在增强后的图像上再次运行 MA 算法可以进一步提高增强效果, 为电力线检测提供更好的输入图像. 这在航拍图像中背景对电力线目标干扰较大时尤其有用, 通过多次迭代, 背景与电力线目标的差异被逐渐拉大, 达到进一步增强的目的.

算法的迭代次数由迭代控制掌控. 迭代控制可使用多种方法控制迭代的进行与否, 如, 固定计数控制、经验计数控制、增强效果控制等. 固定计数控制直接给出迭代次数值, 方法最简单; 经验计数控制则根据航拍图像的背景特征 (如麦田、森林等) 给出以往结果较好的迭代次数经验值; 增强效果控制则根据当前增强结果, 采用增强效果评价函数来判断是否进行下次迭代. IMA 迭代算法流程如图 5 所示.

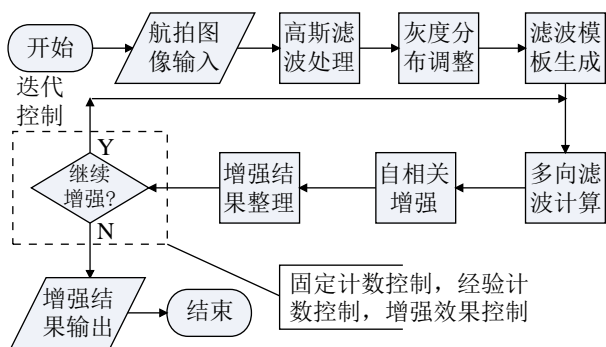


图 5 IMA 算法流程

Fig.5 IMA algorithm process

图 5 中, IMA 迭代算法利用迭代控制将 MA 算法迭代运行, 在每次迭代增强结束时根据选用的迭代控制方法判断是否继续增强. 若为是, 则重新进入到多向滤波环节进行增强; 若为否, 则将增强结果输出并结束.

## 4 实验及分析 (Experiment and analysis)

为了衡量 IMA 方法的有效性, 选用 Canny 边缘检测和 Hessian 增强作为对比方法. 用 Radon 变换对增强后的图像进行电力线检测, 并用其识别结果来衡量图像增强的效果.

实验首先用 IMA 方法的基本算法 MA 和 Canny 及 Hessian 方法进行对比, 之后对 IMA 方法的迭代效果进行了进一步实验并简单分析了算法效果与效率的关系以及两者的取舍原则.

### 4.1 MA 基本算法实验

所有实验都在 2.5 GHz 双核 CPU, 4 GB 内存机器上运行. 实验图片采用  $800 \times 800$  的人工合成图像和  $1080 \times 720$  的实际航拍图像. 为将比较重点放在 MA 自相关增强环节的有效性上而不受图像本身拍摄质量影响, 实验中对 3 种方法输入的图片都经过了高斯滤波和灰度调整, 以让 3 种方法在相同的图像质量条件下运行.

图 6 是  $800 \times 800$  的高斯白噪声背景人工合成图. 不难看出, Canny 结果将背景噪声绝大部分都去掉了, 但余留的少数噪声点与边缘线混在一起, 同时其对线状目标生成了 2 个边缘, 对 3 个实体目标生成了较清晰的边缘线; Hessian 结果则对线状目标清晰增强, 但背景噪声遗留得较多, 同时 3 个实体目标的边缘也被强烈增强; MA 方法将背景噪声基本完全清除, 线状目标得到较好增强, 3 个实体目标被大幅减弱的同时生成了较暗的边缘. 从 (e) 中可以看出 MA 方法让所有线状目标, 除少数点外, 都得到了增强, 实体目标虽留有边缘痕迹, 但已被大幅减弱.

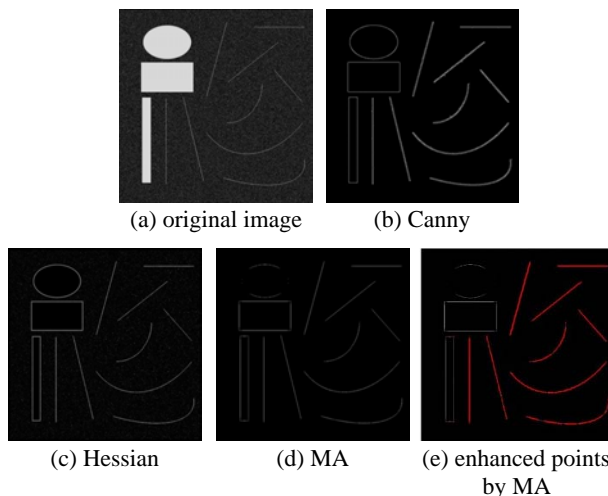


图 6 人工合成图像上的增强效果 ( $800 \times 800$ )

Fig.6 Enhancement on a synthetic image ( $800 \times 800$ )

图 7 是一张无人机航拍电力线图像, 电力线检

测方法使用 Radon 变换. 从原图 (a) 中可以明显看到电力线的存在, 但 (b) 却显示检测结果十分不理想, 所有电力线都未能检测出来. 这是因为此图像中存一些较亮的背景区域, 如房顶和道路. 这些高亮的背景区域使得电力线目标的能量在图像全局并不占优, 从而影响了 Radon 变换的检测效果, 产生了错误的检测结果. 同时, 图中的电力线在左上角处实际上存在一个小角度的偏转, 即电力线并非全部近似直线, 这种情况也会导致 Radon 变换检测结果产生一定偏差.

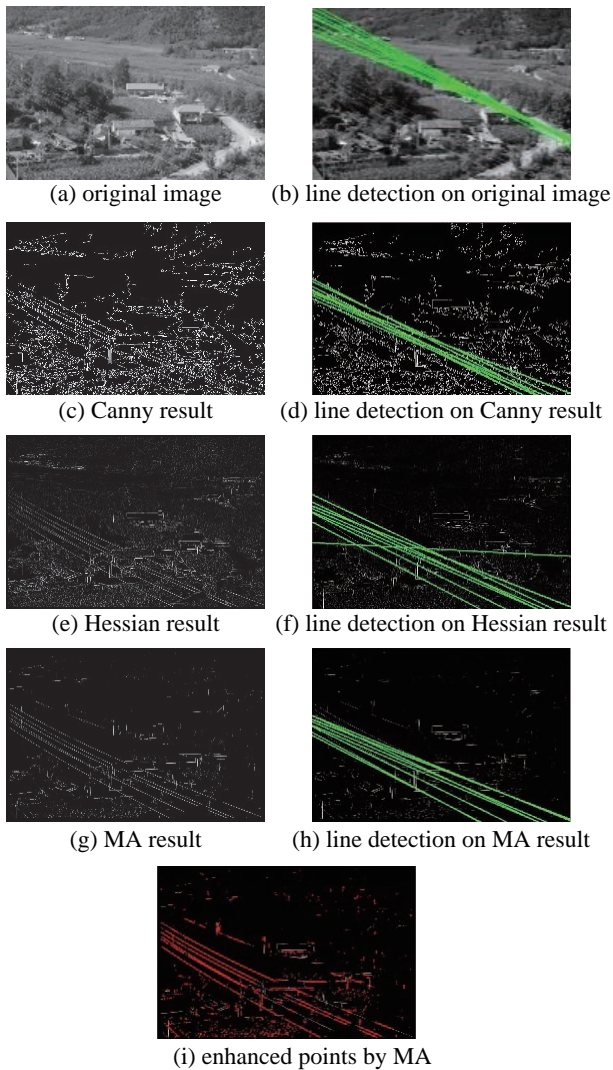


图 7 航拍图像电力线增强效果对比 1 (1080 × 720)

Fig.7 Contrast of aerial image enhancement effects of power lines: 1 (1080 × 720)

图 7(c) 是采用 Canny 边缘检测得到的原图像的边缘信息图, 由于电力线的两侧存在明显的边缘, 所以从中可以看到较明显的电力线边缘. 但由于原图像背景复杂, 所以边缘信息众多. 故而在 (d) 中可见, 检测结果并不准确, 存在丢失图中主要电力

线和错误检测的现象. (e) 是 Hessian 增强的结果. 从 (f) 检测结果不难看出, 虽找到了图中主要电力线, 但背景的减弱还不够理想, 图像的能量有一部分分散于背景处, 导致出现一条错误检测线. (g) 是 MA 方法的检测结果, 从图中可清晰地看到电力线, 同时杂乱的背景大部分被剔除. 检测结果如 (h) 所示, 原图中近处主要的电力线都被检测到, 总体能量较集中, 结果较理想. 将检测结果与原图作对比, 得到 MA 方法处理后被增强的点, 用红色标出增强点, 如 (i) 所示. 可见, 主要几条电力线上的大部分点都得到了增强, 同时图像中部一条极弱的电力线上的许多点也得到了增强, 但由于原目标过于细弱而未能后续检测中被检出. 背景中某些线状目标也被增强, 但数量较少, 其余点都被保持或减弱, 从而在整体上取得了明显的电力线目标增强效果.

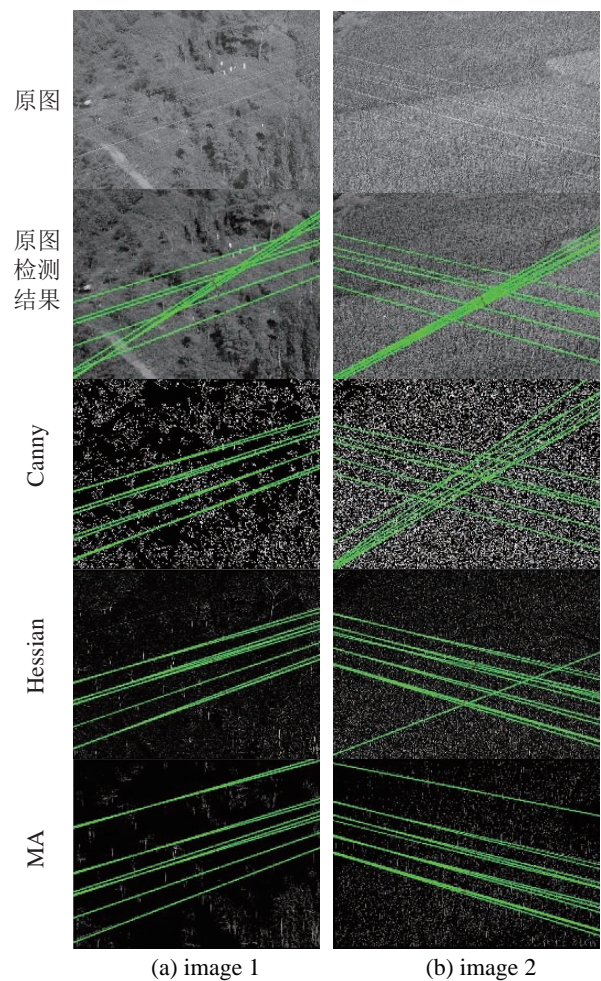


图 8 航拍图像电力线增强效果对比 2 1080 × 720)

Fig.8 Contrast of aerial image enhancement effects of power lines: 2 (1080 × 720)

图 8(a)、(b) 两列分别是另 2 幅无人机航拍电力线图像原图及增强后的检测结果的对比图. 从上到

下分别是原图、原图检测结果、Canny 检测结果、Hessian 检测结果、MA 检测结果。从检测结果不难看出, 只有 MA 方法增强后检测出了所有电力线, 在其他方法的结果上都没有能检测出最弱的一条电力线。再次说明 MA 方法在航拍电力线图像的增强上效果优良。

为了得到 3 种算法增强效果更普遍的对比结论, 在更多的航拍电力线图像上进行了实验, 所选图片中电力线都近似呈直线。增强效果以线检测的识别结果作为衡量标准。一条电力线只要 Radon 检测结果线的原始点距离真实电力线最近处小于 5 个点, 角度与真实电力线角度偏差小于 5° 就算增强算法成功增强出一条电力线。漏检的电力线记为错误增强。所有图片的 Radon 结果取原始点相距 3 个点上或角度相差 3° 以上的约束下的前 10 条线。增强率公式为

$$P = \frac{\max(T - F - L, 0)}{W} \times 100\% \quad (9)$$

式中  $P$  为增强率,  $T$  为正确识别线数,  $F$  为错误识别线数,  $L$  为漏检线数,  $W$  为图中真实线数。

增强效果的对比见表 1。可见, MA 在航拍电力线增强效果和稳定性上要高于 Canny 和 Hessian 方法。

表 1 3 种算法增强率对比表  
Tab.1 Enhancement rate of three algorithms

| 编号 | Canny | Hessian | MA   |
|----|-------|---------|------|
| 1  | 20%   | 33%     | 73%  |
| 2  | 60%   | 50%     | 100% |
| 3  | 0%    | 60%     | 100% |
| 4  | 20%   | 80%     | 100% |
| 5  | 50%   | 60%     | 100% |
| 6  | 0%    | 30%     | 80%  |
| 7  | 56%   | 80%     | 100% |
| 8  | 50%   | 100%    | 100% |
| 9  | 0%    | 80%     | 80%  |
| 10 | 30%   | 60%     | 100% |

3 种增强算法在 10 张无人机航拍图片上的运行时间对比如表 2 所示, 图像尺寸为 1080 × 720, 时间单位为 s。

不难看出, Canny 方法最快, Hessian 方法最慢, MA 方法比 Canny 慢, 但比 Hessian 方法快, 运行时间缩短将近一半。这使得 MA 方法在取得较好的增强效果的同时又有着较短的运行时间, 适合满足无人机航拍巡线的实时性、鲁棒性要求。

表 2 3 种算法运行时间对比表

Tab.2 Run time of three algorithms

| 输入: 无人机航拍图像 |        | 图像尺寸: 1080 × 720 |        |
|-------------|--------|------------------|--------|
| 输出: 算法运行时间  |        | 单位: s            |        |
| 编号          | Canny  | Hessian          | MA     |
| 1           | 0.1232 | 0.3479           | 0.2004 |
| 2           | 0.1587 | 0.4463           | 0.2753 |
| 3           | 0.1369 | 0.3869           | 0.2223 |
| 4           | 0.1415 | 0.4002           | 0.2527 |
| 5           | 0.1528 | 0.4414           | 0.2446 |
| 6           | 0.1367 | 0.3946           | 0.2550 |
| 7           | 0.1226 | 0.3494           | 0.2167 |
| 8           | 0.1317 | 0.3797           | 0.2377 |
| 9           | 0.1457 | 0.4219           | 0.2555 |
| 10          | 0.1520 | 0.4386           | 0.2435 |

### 4.2 IMA 迭代算法实验

为了显示迭代的效果, 迭代实验在图 8 和图 9 中给出的航拍电力线图像上进行。在每个图像上运行 IMA 增强方法, 迭代控制采用固定计数控制, 迭代次数取值 2。图 9 分别给出了这些图像上 IMA 增强方法的 1 次和 2 次迭代增强结果。

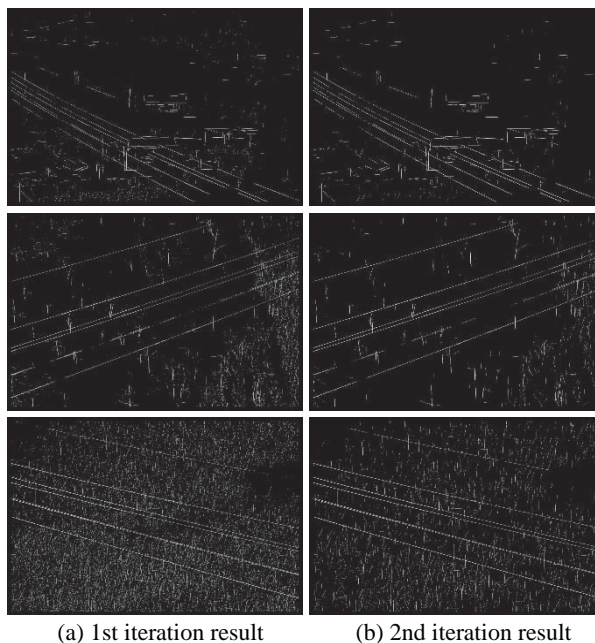


图 9 IMA 迭代增强

Fig.9 IMA iteration enhancement

图 9 中每行 1 张图像, (a) 列是 1 次迭代增强结果, (b) 列是 2 次迭代增强结果。不难看出, (b) 列图像比 (a) 列图像的电力线目标更明亮, 背景去除得更干净。(a) 列图像中存在的一些细小的背景杂点在 (b) 列中已经由于电力线目标的进一步增强而



被丢弃了。但需要注意的是,在(a)列图像中电力线目标上的一些较弱的点,在对应的(b)列图像中也由于跟电力线目标上较强的点的差距进一步拉大而减弱甚至消失,导致所在电力线目标出现明亮分段甚至断续现象。

在其他图片上的实验也表明,在某些情况下,一些背景点被强烈增强,可能在迭代过程中超过电力线目标而令图像增强效果变差。另一些情况中,由于局部背景沿电力线方向灰度分布的不均匀而导致的电力线增强后出现分段明暗不均的现象可能被进一步扩大,甚至使电力线目标的部分片段被严重削弱甚至消失,从而使电力线出现断续现象。同时,迭代过程会成倍地增加算法运行时间,所以迭代不能无限制地进行下去。

考虑到无人机航拍巡线应用的实时性、鲁棒性要求,综合权衡算法运行效率及增强效果,本文仅在1次迭代结果不能满足要求时采用2次迭代结果作为下一步电力线检测环节的输入图像,更多次的迭代将仅在实验或离线应用中用于研究,在线应用中则不予考虑。

## 5 结论 (Conclusion)

综上所述,本文提出的可迭代基于多向自相关(IMA)的无人机航拍电力线图像增强方法具有计算快速,电力线目标增强明显,环境背景减弱显著等特点。通过迭代运行,IMA方法可以对图像进一步增强。控制迭代次数,可以对IMA方法在算法效率和增强效果上进行调整以满足具体应用的需要。实验证明,IMA方法适合无人机在野外复杂地形、地貌下采用可见光视觉方法进行电力线巡检,为后续视场中电力线目标的识别提供了比原始图像更优的输入图像,提高了航拍图像电力线目标的识别率,具有实用性。

## 参考文献 (References)

- [1] Golightly I, Jones D. Visual control of an unmanned aerial vehicle for power line inspection[C]//12th International Conference on Advanced Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 288-295.
- [2] Yan G J, Li C Y, Zhou G Q, et al. Automatic extraction of power lines from aerial images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(3): 387-391.
- [3] Li Z R, Liu Y, Hayward R, et al. Knowledge-based power line detection for UAV surveillance and inspection systems [C]//IEEE 23rd International Conference on Image and Vision Computing. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 1-6.
- [4] 薛岚. 基于 GIS 的直升机输电线路巡检系统的研究与设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008.  
Xue L. Research and design of patrol inspection system of transmission lines with helicopter based on GIS[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2008.
- [5] 赵利坡, 范慧杰, 朱琳琳, 等. 面向巡线无人机高压线实时检测与识别算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(4): 882-886.  
Zhao L P, Fan H J, Zhu L L, et al. Research on real-time detection and recognition algorithm of high-voltage transmission line for inspection with unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2012, 33(4): 882-886.
- [6] Cao W R, Zhu L L, Han J D, et al. High voltage transmission line detection for UAV based routing inspection[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 554-558.
- [7] Zhu L L, Cao W R, Han J D, et al. A double-side filter based power line recognition method for UAV vision system[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 2655-2660.
- [8] Frangi A, Niessen W, Vincken K, et al. Multiscale vessel enhancement filtering[M]//Wells W, Colchester A, Delp S. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998: 130-137.
- [9] 李光明, 田捷, 赵明昌, 等. 基于 Hessian 矩阵的中心路径提取算法 [J]. 软件学报, 2003, 14(12): 2074-2081.  
Li G M, Tian J, Zhao M C, et al. Centerline extraction based on Hessian matrix[J]. Journal of Software, 2003, 14(12): 2074-2081.
- [10] 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 and Technology, 2007, 47(6): 889-892.
- [11] Mirhassani S M, Hosseini M M, Behrad A. Improvement of Hessian based vessel segmentation using two stage threshold and morphological image recovering[C]//International Conference on Innovations in Information Technology. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 50-54.
- [12] Drechsler K, Laura C O. Comparison of vesselness functions for multiscale analysis of the liver vasculature[C]//IEEE International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [13] Sherlock B G, Monro D M, Millard K. Fingerprint enhancement by directional Fourier filtering[J]. IEE Proceedings on Vision Image and Signal Processing, 1994, 141(2): 87-94.
- [14] Sarbadhikari S N, Basak J, Pal S K, et al. Noisy fingerprints classification with directional FFT based features using MLP[J]. Neural Computing & Applications, 1998, 7(2): 180-191.
- [15] Khan M A, Khan M K, Khan M A. Improved fingerprint identification using directional filter banks[C]//IEEE 7th International Multi Topic Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2003: 49-54.
- [16] Tantachun S, Pintavirooj C, Sangworasil M, et al. Directional filter bank: An enhancement for fingerprint feature detection[C]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 1-5.
- [17] Ali M, Clausi D. Using the Canny edge detector for feature extraction and enhancement of remote sensing images[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol.5. Piscataway, USA: IEEE, 2001: 2298-2300.

- [18] 顾晓东, 余道衡. PCNN 的原理及其应用 [J]. 电路与系统学报, 2001, 6(3): 45-50.  
Gu X D, Yu D H. Theory and application of PCNN[J]. Journal of Circuits and Systems, 2001, 6(3): 45-50.
- [19] 马义德, 戴若兰, 李廉. 一种基于脉冲耦合神经网络和图像熵的自动图像分割方法 [J]. 通信学报, 2002, 23(1): 46-51.  
Ma Y D, Dai R L, Li L. Automated image segmentation using pulse coupled neural networks and image's entropy[J]. Journal on Communications, 2002, 23(1): 46-51.
- [20] 苗启广, 王宝树. 基于局部对比度的自适应 PCNN 图像融合 [J]. 计算机学报, 2008, 31(5): 875-880.  
Miao Q G, Wang B S. A novel image fusion algorithm based on local contrast and adaptive PCNN[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(5): 875-880.
- [21] Simoncelli E P, Farid H. Steerable wedge filters for local orientation analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(9): 1377-1382.
- [22] Jacob M, Unser M. Design of steerable filters for feature detection using canny-like criteria[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(8): 1007-1019.
- [23] Fogel I, Sagi D. Gabor filters as texture discriminator[J]. Biological Cybernetics, 1989, 61(2): 103-113.
- [24] Freeman W T, Adelson E H. The design and use of steerable filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(9): 891-906.
- [25] Tai S L. Image representation using 2D Gabor wavelets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(10): 959-971.
- [26] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [27] 曹蔚然, 朱琳琳, 韩建达. 面向旋翼无人机的高压输电线在线检测方法 [J]. 计算机应用研究, 2014, 31(10): 3196-3200.  
Cao W R, Zhu L L, Han J D. Fast line detection method applied in UAV high voltage line inspection[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(10): 3196-3200.

### 作者简介:

- 曹蔚然 (1974-), 男, 博士生, 讲师. 研究领域: 图像处理, 网络工程.
- 朱琳琳 (1982-), 女, 博士. 研究领域: 目标识别与跟踪.
- 韩建达 (1968-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 无人机控制, 智能机器人.

(上接第737页)

- [1] 袁胜发, 褚福磊. 支持向量机及其在机械故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2007, 26(11): 29-35.  
Yuan S F, Chu F L. Support vector machines and its applications in machine fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(11): 29-35.
- [2] 杨锡运, 孙宝君, 张新房, 等. 基于相似数据的支持向量机短期风速预测仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 32(4): 35-41.  
Yang X Y, Sun B J, Zhang X F, et al. Short-term wind speed forecasting based on support vector machine with similar data[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2013, 32(4): 35-41.
- [3] 苟斌, 刘作军, 赵丽娜, 等. 基于相关性分析的下肢假肢步行模式预识别方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(S1): 192-196.  
Gou B, Liu Z J, Zhao L N, et al. Walking mode pre-judgment of lower limb prosthesis based on correlation analysis[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(S1): 192-196.
- [4] 唐小我, 王景, 曹长修. 一种新的模糊自适应变权重组合预测算法[J]. 电子科技大学学报, 1997, 26(3): 289-292.  
Tang X W, Wang J, Cao C X. A new fuzzy adaptive variable weighting algorithm for combination forecasting[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1997, 26(3): 289-292.
- [5] 何晓庆, 蔡娜. 基于模糊自适应变权重的经济时间序列组合预测模型研究[J]. 软科学, 2013, 27(1): 141-144.  
He X Q, Cai N. Research on combined estimation model construction of economic time series based on the method of fuzzy adaptive variable weight[J]. Soft Science, 2013, 27(1): 141-144.
- [6] 孙广强, 姚建刚, 谢宇翔, 等. 基于新鲜度函数和预测有效度的模糊自适应变权重中长期电力负荷组合预测[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 103-107.  
Sun G Q, Yao J G, Xie Y X, et al. Combination forecast of medium- and long-term load using fuzzy adaptive variable weight based on fresh degree function and forecasting availability[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 103-107.
- [7] 姚成玉, 赵佳伟, 陈毅强. 基于嵌入式系统的室内人体跌倒行为检测方法的实现[J]. 燕山大学学报, 2008, 32(6): 507-511.  
Yao C Y, Zhao J W, Chen Y Q. Realization of the detection method for human falling action in room based on embedded system[J]. Journal of Yanshan University, 2008, 32(6): 507-511.
- [8] 石欣, 熊庆宇, 雷璐宁. 基于压力传感器的跌倒检测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(3): 715-720.  
Shi X, Xiong Q Y, Lei L N. Research on the fall detection system based on pressure sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(3): 715-720.

### 作者简介:

- 陈国兴 (1990-), 男, 硕士生. 研究领域: 模式识别, 故障检测.
- 耿艳利 (1982-), 女, 博士, 讲师. 研究领域: 康复辅具, 模式识别.
- 刘作军 (1971-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 康复辅具, 智能机器人, 模式识别.