

[电力巡检]

一种基于视频序列的输电线跟踪技术研究

文/南方电网科学研究院有限责任公司 张贵峰 吴新桥 张 巍
天津航天中为数据系统科技有限公司 杨鹤猛 周筑博
广州科易光电技术有限公司 林良辉 王 锋 张 宁

针对直升机电力巡检拍摄到的实时视频序列，首先对其进行高斯滤波，有效地抑制了背景噪声杂波的影响。接着，对实时视频序列进行帧间差分，以获取目标轮廓。然后，利用Canny算子对差分图像进行边缘检测，接着进行Hough变换提取输电线。最后根据输电线的特征对检测结果进行进一步的合并和筛选，计算输电线间的中心位置并反馈给吊舱以控制俯仰角和水平角实现对输电线的实时跟踪。

电力巡检一直是关乎国计民生的重要问题，历经人工巡检、机器人巡检、直升机巡检到现在炙手可热的无人机电力巡检。人工巡检费时费力且效率低下，易受天气因素以及巡检人员的主观因素影响，难以准确地进行巡检；机器人巡检需要将机器人倒挂在输电线上，摩擦较大，且对于超高压线路，安全稳定性较低；无人机巡检由于磁场、天气等多方面的原因，尚不够成熟完备。而直升机巡检随着航空摄影和测量技术的快速发展，具有方便、高效、可靠、不受地理环境限制等众多优点。“直升机巡检为主，人工巡视为辅”是我国高压、超高压输电线路巡检的发展方向。且自20世纪50年代，欧美一些发达国家率先展开对架空输电线路巡检的航空作业；我国从20世纪80年代展开对直升机电力巡线的研究，到目前为止，南方电网、华中电网、华北电网公司等相继开展了直升机巡检的尝试，并取得了良好的巡检效果，积攒了宝贵的经验。然而，技术问题还存在着进一步发展和提升的需要，输电线路目标的检测与识别的主要难点有：复杂自然背景下的输电线提取、自动跟踪以及实时性能。本文以直升机搭载的可见光相机所拍摄的高分辨率图像为依据，开展对输电线检测、跟踪以及提高实时性问题的相关研究。

算法架构

1. 算法流程

算法流程图如图1所示。

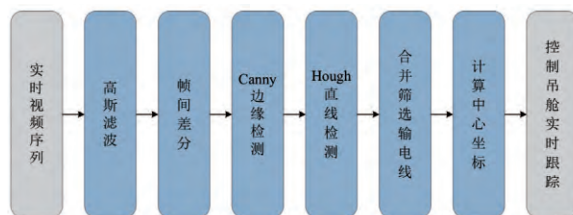


图1 算法流程图

本文算法的基本架构如图1所示，对直升机拍摄到的可见光视频序列首先进行高斯滤波，以降低背景噪声，对平滑滤波后的图像序列进行帧间差分运算，并对差分图像进行二值化以提取目标轮廓。接着，利用Canny算子进行边缘检测，由于输电线在图像中大多是平行的，利用这一特征对输电线进行Hough变换后合并斜率和截距在一定范围内浮动的直线。最后计算出两根输电线之间的重点位置并将其反馈给吊舱即可控制其对输电线进行实时跟踪。

2. 输电线路导线的识别

由第一步定位后摄像头开始采集图像，为了精准拍摄输电导线，需要在传输回的图像中识别

出导线。输电线一般具有以下特征：

- 1) 输电线比较长。
- 2) 输电线的像素宽度大致为一个像素。
- 3) 输电线由特定的金属材料制成，有特定的光谱属性。
- 4) 输电线在航空影像中通常类似于直线。
- 5) 输电线在高分辨率图像中的拓扑结构比较简单，基本贯穿整个图像，只有部分中间有杆塔分隔开。
- 6) 电力线之间基本是平行关系，两者之间不会相交，所以在航空影像中，电力线也基本是平行不相交。
- 7) 电力线背景是自然地物。

可借助这些特征，通过识别平行线来识别导线。

(1) 高斯滤波器

一般图像中的噪声多为高斯噪声，故采用高斯滤波器对图像进行滤波，抑制背景杂波和噪声的影响。高斯滤波器是一种线性、低通滤波器，主要用于消除高斯噪声，达到平滑图像的目的。高斯滤波就是对整幅图像进行加权平均的过程，具体操作为：用一个大小为 $n \times n$ 模板（或称卷积、掩模）遍历图像中的每一个像素，邻域内像素的加权平均灰度值替代模板中心像素点的值。常用的高斯滤波器模板如图2所示。

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{273} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 16 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

图2 常用高斯滤波模板

(2) 帧间差分

对于高斯滤波平滑后的可见光视频序列，采用帧间差分对其进行处理。帧间差分首先对视频序列中相邻两帧做差分运算，然后对差分图像进行二值化来获得运动目标的轮廓。第 k 帧和 $k+1$ 帧图像 $f_k(x, y)$ ， $f_{k+1}(x, y)$ 之间的变化用一个二值差分图像 $D(x, y)$ 可表示为

$$D(x, y) = \begin{cases} 1, & |f_{k+1}(x, y) - f_k(x, y)| \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

帧差法实现简单，运算速度快，对于动态环境自适应性较强的，对光线的变化不是十分的敏感。利用这一特性，对视频图像序列进行处理，极大地缩短了运算的时间，有效地提高了算法的实时性。

(3) Canny边缘检测

对图像进行高斯滤波之后，利用Canny算子对图像进行边缘检测。

为了对边缘检测的算法作出有效、合理的评价，John Canny于1986年研究出最优边缘检测效果的特征，给出了最佳边缘检测的三个准则。

- 1) 最大的输出信噪比。即信号与噪声的比率，非边缘点判定为边缘点和边缘点判定为非边缘点的概率都要低。
- 2) 精确的定位性能。极大地保证检测出的边缘点定位在实际边缘的中心。
- 3) 单边边缘响应。最大程度地抑制虚假边缘响应，并且对于单一边缘仅有唯一的响应。

总的来说，就是要求一个好的边缘检测算法在提取边缘的同时，既可以提高对目标边缘的敏感度，又能最大程度地抑制噪声。

由Canny推导出的最优边缘检测器的形状类似于高斯函数的一阶导数，因此，可以用高斯函数很好地逼近。Canny算子实际上是先高斯函数域图像卷积，然后求梯度，即先对图像进行平滑滤波消除噪声的影响，然后再对去噪后的图像进行锐化得到边缘细节。

二维高斯函数可表示为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

Canny算子的计算公式可表示为

$$(\nabla G(x, y))f(x, y) = \nabla(G(x, y)f(x, y)) \quad (3)$$

图像的边缘强度可表示为

$$|\nabla G(x, y)f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x}(G(x, y)f(x, y))\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y}(G(x, y)f(x, y))\right)^2} \quad (4)$$

边缘方向可表示为

$$\theta = \frac{(\nabla G(x, y))f(x, y)}{|\nabla G(x, y)f(x, y)|} = \left(\frac{\partial}{\partial x}(G(x, y)f(x, y))\right)\bar{x} + \left(\frac{\partial}{\partial y}(G(x, y)f(x, y))\right)\bar{y} \quad (5)$$

根据Canny的定义，在其梯度方向上的邻域的极大值为中心边缘点。满足以下条件的像素点即被认为是图像的边缘点：

- 1) 该点的边缘强度大于沿该点梯度方向的两个相邻像素点的边缘强度。
- 2) 与该点梯度方向上相邻两点的方向差小于某个阈值。
- 3) 以该点为中心的 3×3 邻域中的边缘强度极

大值小于某个阈值。条件1) 被称为非极大值抑制, 条件(2) 属于特征综合法。当同时满足条件1) 和条件2) 时, 梯度方向上的两个相邻像素点就可以从候选的边缘点中排除。条件3) 是将区域梯度最大值构成的阈值图像与边缘点进行匹配, 可消除许多虚假的边缘点。

Canny算子的边缘检测结果如图3所示, 其噪声抑制性能较好, 边缘较为清晰明显。

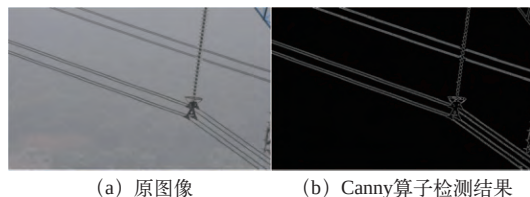


图3 Canny边缘检测

(4) Hough变换

在对图像进行边缘检测之后, 利用Hough变换检测输电线。

Hough变换(Hough Transform)是一种特种提取技术, 主要用于直线检测。Hough变换是一种从图像空间到参数空间的映射关系, 将图像空间中复杂的边缘特征信息映射为参数空间中的聚类检测问题。因此, 这使Hough变换方法具有明了的几何解析性、很强的抗干扰能力和易于实现并行处理等优点。Hough变换最大的优点是抗干扰性强, 即使曲线上有小的扰动、间隙, 甚至虚线, 经Hough变换后, 仍能在参数空间中形成明显的峰点。它是从图像中识别几何形状的基本方法之一。

Hough变换的原理可通过点-线对偶性来解释。在图像空间中, 所有过点 (x, y) 的直线都满足方程

$$y = px + q \quad (6)$$

式中, p 为斜率, q 为截距。如果对 p 和 q 建立一个参数空间 PQ , 则 (p, q) 表示参数空间 PQ 中的一个点。这个点和式(4)表示的直线是一一对应的, 即图像空间中一条直线对应参数空间 PQ 中的一个点。式(6)也可写成

$$q = -px + y \quad (7)$$

式(7)代表参数空间 PQ 中的一条直线, 此时对应图像空间中的一个点 (x, y) 。

从图4中不难看出, 图像空间过点 (x_i, y_i) 的通用直线方程按式(6)可写为 $y_i = px_i + q$, 也可按式(7)写成 $q = -px_i + y_i$, 表示在参数空间里的一条直线。同理可得到过点 (x_j, y_j) 的图像空间直线方程 $y_j = px_j + q$ 和参数空间的另一条直线 $q = -$

$px_j + y_j$ 。设这两条直线在参数空间 PQ 里相交于点 (p', q') , 该点表示图像空间中同时过点 (x_i, y_i) 和点 (x_j, y_j) 的一条直线。

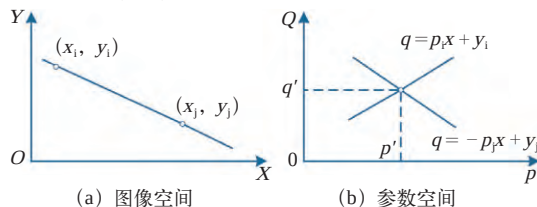


图4 图像空间和参数空间中点和线的对偶性

由此可知在图像空间中共线的点对应在参数空间里相交的线。反过来, 在参数空间里相交于同一个点的所有直线在图像空间都有共线的点与之对应。这就是点-线的对偶性。

Hough变换的检测步骤如下:

1) 对参数空间中参数 p 和 q 的可能取值范围进行量化, 根据量化结果构造一个累加数组 $A(p_{\min}:p_{\max}, q_{\min}:q_{\max})$, 并初始化为零。

2) 对每个图像空间中的给定点让 p 取遍所有可能值, 用式(7)计算出 q , 根据 p 和 q 的值累加 A , 即 $A(p, q) = A(p, q) + 1$ 。

3) 根据累加后 A 中最大值所对应的 p 和 q , 由式(6)定出图像空间中一条直线, A 中的最大值代表了在此直线上给定点的数目, 满足直线方程的点就是共线的。

Hough变换作为一种全局性的算子, 在知道有关图形的先验性准则下, 得到边界曲线而且可以将不连续的像素点连接起来, 具有很强的鲁棒性和抗干扰能力。利用Hough变换检测直线的结果如图5所示。

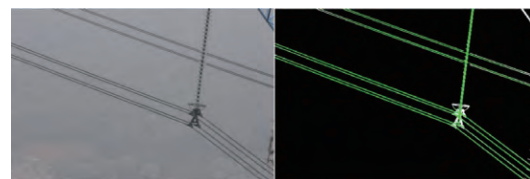


图5 Hough直线检测

(5) 吊舱实时跟踪

利用Hough变换检测出输电线后, 需要对斜率和截距相近的直线进行合并, 并对其进行筛选和分组。然后对输电线在每帧图像中的位置进行定位, 取两组输电线的中点位置, 同时通过优化算法提高精确度, 把误差控制在允许范围内。有了输电线的位置信息后, 反馈给吊舱以控制俯仰角度以及水平角度, 实现对输电线的跟踪。

硬件系统集成

以上算法均是在FPGA环境下实现的。使用FPGA进行图像处理时，首先安装Matlab和由MathWorks公司和Xilinx公司联合推出的System Generator，在Simulink中添加一些Xilinx公司提供的模块搭建图像处理算法，可以进行仿真、硬件协仿真、直接生成HDL代码、生成TestBench等操作。

在Simulink环境中实现定点算法，根据系统设计功能将Xilinx模块连接成设计系统，并定义合适的系统参数；而后利用System Generator将Simulink模型转换为可执行的硬件模型，将系统定义的参数对应到硬件实现的模块、输入/输出端口等属性；再借助于ModelSim软件验证相应的设计是否和Simulink输出一致，否则需要重新修改设计；最后将设计生成可对器件编程的比特流文件，将其下载到目标芯片中。

System Generator最大的特点就是可利用Simulink建模和仿真环境来实现FPGA设计，无需了解和使用RTL级硬件语言，让DSP设计者能够发挥基于FPGA的DSP的最大性能和灵活性，并缩短整个设计的周期，极大地提高了开发的效率。

检测结果和分析

如图6所示，分别为同一视频序列的第114、267和300不同三帧图像的检测结果。不难看出，在不同复杂背景下均能有效检测出输电线，实现输电线的实时跟踪，并能准确定位和计算出输电线之间的重点位置。



图6 检测结果

本次测试的主要飞行线路有220 kV 新临线和500 kV 博墨I回线。直升机在两条线路飞行时均距离输电线40~50 m，输电线结构均为四分裂。两条

线路飞行测试的数据结果分别如表1和表2所示。

表1 220 kV新临线巡检数据

	背景	飞行速度	帧率	错检率/%	漏检率/%	识别率/%
220 kV 新临线	树林	25~30 km/h	3	8.55	30.18	61.27
	树林	20~25 km/h	3	8.16	26.53	65.31
	树林	15~20 km/h	3	4.49	27.32	68.19
	建筑物	25~30 km/h	3	11.79	84.68	3.53
	建筑物	20~25 km/h	3	24.15	70.16	5.69
	建筑物	15~20 km/h	3	28.51	65.37	6.12
	黄土	2~30 km/h	3	7.58	78.58	13.84
	河流	25~30 km/h	3	1.40	86.64	11.96

表2 500 KV博墨 I 回线巡检数据

	背景	飞行速度	帧率	错检率/%	漏检率/%	识别率/%
500 kV 博墨 I 回线	树林	25~30 km/h	2	11.33	15.32	73.35
	树林	20~25 km/h	2	6.99	13.33	79.68
	树林	15~20 km/h	2	6.85	9.69	83.46

从表1和表2中可以看出无论是220 kV还是500 kV 的输电线路，树林背景下的识别率明显均较高；对于两种输电线路，以树林为背景的前提下，飞行速度越慢，识别率越高；对于220 kV输电线路，背景为黄土或河流的明显干扰时，识别率骤然降低，很难识别出导线。故本文算法主要适用于背景是树林、飞行速度相对较低（一般在20 km/h左右）的环境，识别率可达70%左右。

结束语

本文通过对直升机拍摄到的可见光图像首先进行灰度变换后对其进行高斯滤波，以降低背景杂波和噪声的影响。接着利用Canny算子进行边缘检测，对于边界存在的高频噪声，利用二值化抑制其对目标区域的影响。输电线在图像中大多是平行的，利用这一特征对输电线进行Hough变换后合并斜率和截距在一定范围内浮动的直线。最后计算出两根输电线之间的中点位置并将其反馈给吊舱即可控制其对输电线进行实时跟踪。Visual Studio 2010环境下编程实现后，又集成到FPGA硬件实现，有效增强了系统的稳定性。对220 kV新临线和500 KV博墨 I 回线巡检结果证明了本文算法简单、有效，且对于不同复杂背景下的输电线检测具有良好的鲁棒性，可以很好地应用到实际工程中。EA

(收稿日期：2016.12.18)

(编辑：白文亭)