

高分辨率航空影像中高压电力线的自动提取

李朝阳¹⁾ 阎广建²⁾ 肖志强²⁾ 李小文²⁾ 郭 军¹⁾ 王锦地²⁾

¹⁾ (北京邮电大学信息工程学院模式识别实验室, 北京 100876)

²⁾ (遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学遥感与地理信息系统研究中心, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要 随着航空数字摄影测量技术和数字相机分辨率的提高, 数字摄影测量应用于电力线监测已成为可能。然而, 目前却很少有公开发表的关于从航空影像中自动提取电力线的文献见诸报道。为此, 提出了一种在复杂自然背景条件下, 从航空影像中自动提取 550kV 高压电力线的算法, 并设计了抗强噪声的线特征提取算子, 即首先用 Ratio 算子从遥感影像上提取电力线像素点, 然后采用分段 Radon 变换提取并连接各分段电力线, 再利用类似卡尔曼滤波技术跟踪连接电力线的断裂部分, 实验表明, 该方法能有效地自动提取复杂自然背景下的高压电力线。

关键词 高压电力线 高分辨率航空影像 自动提取 Radon 变换 卡尔曼滤波

中图法分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)06-1041-07

Automatic Extraction of Power Lines from Aerial Images

LI Chao-yang¹⁾, YAN Guang-jian²⁾, XIAO Zhi-qiang²⁾,

LI Xiao-wen²⁾, GUO Jun¹⁾, WANG Jing-di²⁾

¹⁾ (Laboratory of Pattern Recognition and Intelligent System, School of Information Engineering,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

²⁾ (State Key Laboratory of Remote Sensing Science; Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography,
Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract With the development of aerial photogrammetric technology and the digital camera's spatial resolution. It is possible to use photogrammetric technology in the inspection of power lines. However, there is little published method for automatic extraction of power lines from aerial images. In this paper, an algorithm of automatic extraction of 550kV power lines from complex background in aerial images is presented. Linear feature operators are designed to resist the strong noise and the potential power line pixels are acquired by Ratio operator. Part Radon transform is used to acquire and link the segments. The gaps of the power line segments are filled through similar Kalman filter tracing method. The proposed method is validated by the experimental images.

Keywords power lines, aerial image, linear feature operator, Radon transform, Kalman filter

1 引 言

随着航空摄影测量技术的快速发展和航空数字相机分辨率的极大提高, 使航空摄影测量技术应用于电力巡线成为了可能。然而目前还很少有公开发表的从航空影像中自动提取电力线的文献发表。长

期以来, 一般的观点^[1]认为, 传统的航空摄影测量无法应用于电力线的巡检, 因为航空摄影的影像分辨率太低, 无法检测到电力线, 也就无法精确计算电力线的高度。通常是使用激光雷达来进行电力线巡检, 但是激光雷达的成本很高, 且巡检覆盖范围也有限。随着传感器分辨率的提高和摄影测量方法的不断改进, 利用多角度信息的数字摄影测量则有可能

基金项目: 国家高技术发展研究“863”项目 (2003AA134040)

收稿日期: 2005-11-07; **改回日期:** 2006-01-11

第一作者简介: 李朝阳 (1971 ~), 男。2001 年获北京邮电大学通信与信息系统硕士学位, 现为北京邮电大学信息工程学院博士研究生。研究方向为遥感信息处理、图像处理。E-mail: chaoyanglee@263.net

进行大范围电力线的检测。目前国家高技术发展研究“863”项目“机载多角度多光谱成像技术在电力系统的应用的研究”课题的支持下研制了一种前、中、后 3 个角度的宽视场角的高分辨率成像系统,用于电力巡线。成像系统获取的影像分辨率约为 0.05m,电力线在图像上能呈现约一个像素左右的宽度。

如今,电力线的检测在从 3 维激光点云数据中提取特征方面已有相关研究^[2-4],相近的研究内容在直升机低空飞行躲避障碍物当中也有涉及。使用其他传感器检测电力线的有毫米微波雷达^[5-7]、被动式红外相机^[8]等。关于通过航空拍摄的可见光影像检测电力线的方式,其中背景复杂和有噪声的情况在文献[9]中涉及到,以上这些研究报道或者是关于激光 3 维点云数据的处理或者仅仅是检测和预警,其强调的是提前检测和可靠性,而不涉及电力线的完整提取。在复杂自然背景下,电力线的自动提取在国内和国际上是个新的课题,虽然可以直接参考的文献不多,但由于电力线提取和道路提取有着相类似的情况,因此可以参考道路提取方法,将该方法应用到电力线提取当中。本文参考道路提取的方法,首先分析了电力线在航拍图像中的主要特性,然后根据这些特性,设计了抗强噪声的线性特征提取算子,最后采用分段 Radon 变换和类似 Kalman 跟踪方式连接拟合电力线,实验证明,该方法能较完整且自动地提取电力线。

2 高压电力线自动提取方法

2.1 高分辨率航空影像中电力线的特性

根据电力线的提取和航空影像道路的提取有相近之处,参考道路提取的方法^[10],电力线在高分辨率航空电力巡线影像中有以下主要特性:

- (1) 电力线比较长;
- (2) 电力线的像素宽度大致为一个像素;
- (3) 电力线由特定的金属材料制成,有特定的光谱属性;
- (4) 电力线在航空影像中通常类似于直线;
- (5) 电力线在高分辨率图像中的拓扑结构比较简单,其基本贯穿整个图像,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,但电力线高低不同会造成影像中部分电力线

的重合;

(7) 电力线背景是自然地物,如森林或其他建筑物,这种背景比道路提取还要复杂。

由此可以看出,电力线的自动提取相对于道路提取来说,其主要问题在于如何克服复杂的背景噪声,并有效地进行连接。航测中飞行路线是沿电力传输线飞行,由于航拍角度在电力线上方,因此电力线在影像中通常呈现直线,而电力线的背景则非常复杂,有房屋、山地、树木、河流等自然和人工背景。根据这些先验知识,本文综合了各种抗强噪声方法,使用分段直线提取,并根据一定的知识进行连接来提取电力线,实验表明,本文方法基本能实现电力线的自动精确提取。

2.2 电力线像素的自动提取

由于电力线在图像中背景复杂,且具弱信号特征,因此本文采用了抗强噪声的 Ratio 算子^[11]提取电力线像素。Ratio 算子是 Tupin 等人提出的一种利用中间区域和两边相邻区域灰度平均值的比值来进行线检测的方法,该方法能够充分利用线特征的灰度信息。

给定区域 $R_i (i=1,2,3)$,每个区域包含 n_i 个像素,其中每个像素的灰度为 p_k , k 代表像素序号,第 i 个区域的平均灰度为 $\mu_i = 1/n_i \sum_{k \in R_i} p_k$,对于一定的宽度,过中心像素 p_0 的区域 R_2 ,其两边的区域为 R_1, R_3 。检测方向为在 R_2 中过中心像素 p_0 将两边分成相近大小的直线的方向。本文以图 1 所示的垂直方向为例来加以说明。

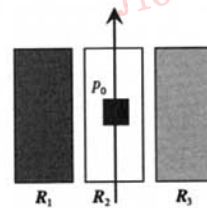


图 1 垂直方向 Ratio 检测模板

Fig. 1 Ratio detection model in vertical direction

定义区域 R_i 和区域 R_j 的边缘检测响应函数为

$$r_{i,j} = 1 - \min(\mu_i/\mu_j, \mu_j/\mu_i) \quad (1)$$

检测的线性特征响应函数为

$$r = \min(r_{2,1}, r_{2,3}) \quad (2)$$

当 r 大于某个阈值时,则认为检测到线的像素,当需要检测不同方向、不同宽度的线特征时,则需要先计

算过中心像素 p_0 不同宽度和不同方向的响应值,然后取响应最大的值为该像素的检测值。实际处理中,电力线在航空影像中所具有的不同宽度和不同方向,是通过飞行航拍实验来保证的,属于算法中的先验信息,这样就可以保证检测时只用一种宽度和方向的模板,以提高检测速度。

由于 550kV 电力线对光线的反射率较低,在图像中灰度值通常低于背景灰度,所以应加入下列条件:

$$\mu_1 > \mu_2, \mu_3 > \mu_2 \quad (3)$$

当满足式(3)时,则认为检测到电力线像素。

2.3 分段提取电力线

由于电力线在整个航空影像拍摄范围内有一定的弧度,因此只能近似为一条直线,另外因为背景也很复杂,所以本文在经过前面像素提取后得到的二值化图像的基础上,用分段 Radon 变换进行电力线的分段提取,每段先按照直线提取,然后各段之间再进行平滑连接。

2.3.1 Radon 变换

Radon 变换^[12]是计算图像在某一指定角度射线方向上投影的变换方法,其与 Hough 变换有很密切的关系,可以使用 Radon 变换实现某一种 Hough 变换,以便检测图像中的直线。由于 2 维函数 $f(x, y)$ 的投影是其在确定方向上的线积分,因此可以沿任意角度 θ 计算该函数的投影。图 2 说明了 Radon 变换的几何原理。

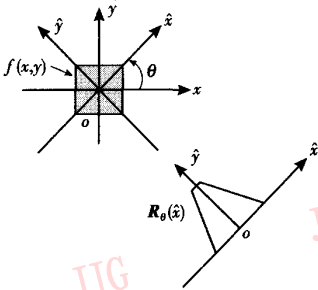


图 2 Radon 变换的几何原理示意图

Fig.2 Geometric principle for Radon transformation

通常情况下, $f(x, y)$ 的 Radon 变换是一个平行于 y 轴的线积分,即

$$R_\theta(\hat{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\hat{x}\cos\theta - \hat{y}\sin\theta, \hat{x}\sin\theta + \hat{y}\cos\theta) d\hat{y} \quad (4)$$

其中

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过 Radon 变换可以得到一个变换角度和沿 x 轴的坐标的 2 维矩阵,矩阵的值对应各个旋转角和 x 轴上的像素的累积值。

2.3.2 分段 Radon 变换提取电力线

分段 Radon 变换是先将整个图像沿电力线的走向进行等分,然后分段提取电力线。利用 Radon 变换,电力线走向就可在全图范围进行提取,每份大小根据电力线的弧度曲率情况确定,以保证每段内基本可按照直线提取。本文在进行分段提取时,先将图像沿电力线走向分成 10 份,然后分别进行线性线像素提取,去除短线和进行 Radon 变换后,即得到一个变换矩阵,Radon 变换的角度抽样就是在电力线走向方向角度的一定范围内搜索最大的 n 个值。在每个分段内,先得到提取的线段的斜率和旋转的横轴上的截距,再根据电力线的先验知识,加入各种约束,并除去杂线和干扰线,即可以得到分段提取的电力线。分段 Radon 变换的连接示意图如图 3 所示。

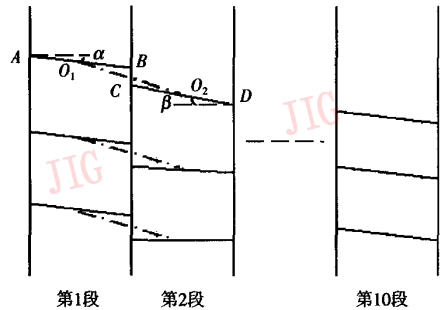


图 3 分段 Radon 变换示意图

Fig.3 Segmented Radon transformation

提取电力线时,加入的约束为:

(1) 两条线间不相交;

(2) 同一个分段内,两条线之间在 x 轴的截距大于一定阈值,以去除峰值附近的干扰线。

在得到分段的电力线后,再将相邻两段的电力线根据一定的原则进行匹配,然后将符合匹配的两段电力线用各自的中点进行平滑连接。

匹配的原则为:

(1) 前后两段提取直线斜率相近,即

$$|\alpha - \beta| \leq T_{\text{angle}} \quad (6)$$

(2) 两段线段在相邻的界限端点处的距离小于一定阈值,即

$$BC \leq T_{\text{distance}} \quad (7)$$

当上述条件满足时,则连接各自的中点 O_1, O_2 ,即

$$AD = AO_1 + O_1O_2 + O_2B \quad (8)$$

再依次连接其他各段。

分段 Radon 变换的优点如下:

(1) 可在分段内按直线处理,这不仅符合电力线的特点,并且在分段内由于电力线之间几乎平行,因此可以用作提取的约束条件;

(2) 能充分利用 Radon 变换的抗强噪声能力和提取不连续像素线段的能力;

(3) 可利用提取线段斜率大致一致的特点,在预估计的角度范围内做坐标轴的旋转变换,以进一步消除干扰噪声。

通过分段 Radon 变换连接,基本上就能将各个分段电力线连接起来,当存在有些部分线段没有提取出而使连线中断时,则需采取类似卡尔曼滤波跟踪方式进行中断处的连接。

2.4 类似卡尔曼滤波方式跟踪连接

由于卡尔曼滤波器具有很好的跟踪和滤波性

能,因此被用来做道路的匹配跟踪^[10]和提取像素的直线跟踪^[13]。这里也利用卡尔曼滤波跟踪来连接线段,与卡尔曼滤波不同的是没有利用滤波,而是根据实际情况大大简化了算法。这样每一分段内每个电力线被看成是一个匀速直线运动的轨迹,当出现有分段内的电力线没有提取出而中断时,类似卡尔曼滤波方式即可用来跟踪到下一分段,当下一分段出现符合匹配条件的线段时,就进行连接,具体方法如下:

先在经过分段 Radon 变换和平滑连接后的线段中,顺序选择最长的线段,并选择线段的中点坐标作为起始点;然后向两边进行匀速直线运动跟踪连接,当跟踪到断点时,则继续预测跟踪一定步长数,这种步长数保证能继续跟踪超过下一个分段的边界处,以便使跟踪过程中能搜索一定邻域内的线段像素,当搜索到线段像素即可进行连接。

详细流程如图 4 所示。

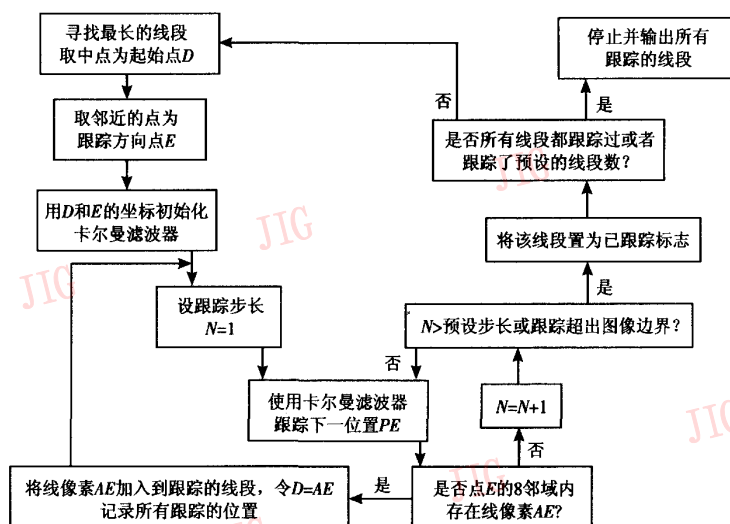


图 4 类似卡尔曼滤波器跟踪连接线段流程

Fig. 4 Sketch for Kalman filter to tract and link segments

图 4 中卡尔曼滤波器设定为一个在水平和垂直方向上无扰动匀速直线运动的模型,并只应用了跟踪部分,没有考虑滤波,因为经过分段 Radon 变换连接后,基本上没有留下无用的杂线,所以卡尔曼滤波器可以大大简化。

以水平方向为例,垂直方向类似考虑进行说明,卡尔曼滤波器^[14]由状态模型、测量模型、递归迭代方法组成,令 $X(t)$ 表示运动状态向量, $x(t)$ 为位移量, $x'(t)$ 为速度量, $y(t)$ 为测量量, D 为提取的线段

点, T 为时间间隔,一般取为常数, t 为跟踪时刻(从起始点开始)。点 D 的匀速运动状态方程为

$$X((t+1)/t) = AX(t) \quad (9)$$

式中,

$$X = \begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

而测量方程,当认为运动轨迹是无噪声污染的,则简化为

$$Y(t) = CX^T(t) \quad (11)$$

式中,

$$C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y \\ \hat{y} \end{bmatrix} \quad (13)$$

一次预测方程为

$$\hat{X}((t+1)/t) = A\hat{X}(t) \quad (14)$$

则滤波方程简化为

$$\begin{aligned} \hat{X}(t+1) &= \hat{X}((t+1)/t) + K(t+1)(Y(t+1) - \\ &\quad C\hat{X}^T((t+1)/t))) \\ &= \hat{X}((t+1)/t) \end{aligned} \quad (15)$$

即认为测量值是无噪声污染的,滤波器输出可直接使用预测值。经过卡尔曼滤波器跟踪连接,即可将提取

当中的断线连接起来,以形成完整提取的电力线。

3 实验结果和分析

为验证本文方法的提取效果,先从大约 35m 高的高压电力线上垂直向下模拟拍摄了 10m 高的细电力线图像,然后用该图像进行了电力线提取实验。电力线为 1pixel 宽,地面是复杂的自然背景(如图 5 所示)。

从图 5 可看出,利用该算法提取的电力线不仅完整,而且提取位置精度高、抗噪声性能强。同时可用通常的启发式连接方法^[15]来进行电力线的连接,并进行比较。启发式连接提取的结果如图 6 所示。

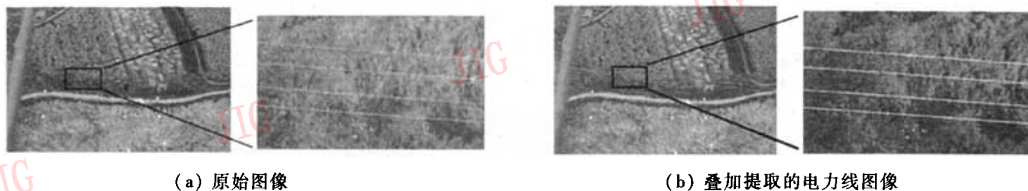


图 5 模拟实验图像的电力线提取结果

Fig. 5 Power lines extracted from simulated images

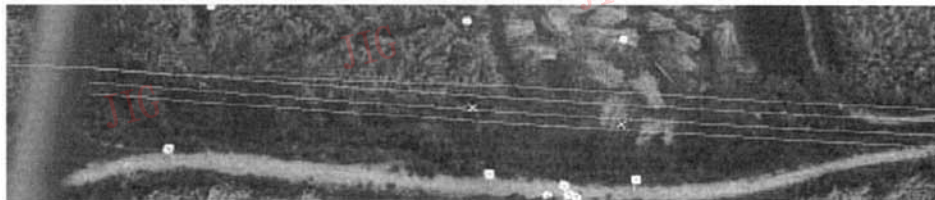


图 6 启发式连接方法提取的电力线

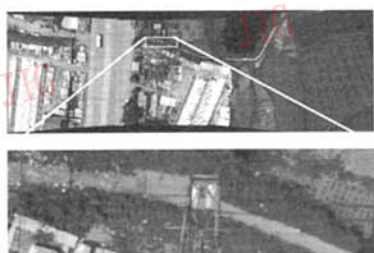
Fig. 6 Power lines extracted by heuristic linking method

从提取结果的比较可以看出,启发式连接由于是逐点像素连接,因此容易受噪声影响而产生连接偏离。分段 Radon 变换由于利用了 Radon 变换的强抗噪声性及充分利用了电力线的分段直线特性,因此比通常采用逐点连接的启发式连接有更强的抗噪声性能。

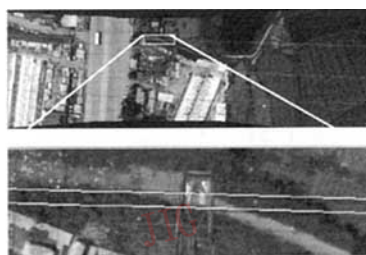
2005 年 5 月,国家高技术发展研究项目“机载多角度多光谱成像技术在电力系统的应用的研究”在湖北省进行了一次实际飞行航拍实验,获取了高分辨率的航空影像,飞行高度在 100m,图像分辨率约为 0.05m。电力线高度为 50m。由于检测的 550kV 高压传输线,其直径为 0.04m,所以在图像中,电力线粗细只有约 1pixel 宽度,从拍摄的图像中

也证实了这一点,同时,由于飞行线路沿着电力走廊,电力线在图像中基本上呈同样的方向,因此在实验中,对电力线的提取只进行单像素宽和单方向的线检测,以提高检测效率。下面给出了部分实验图像的处理结果。

图 7 和图 8 给出了用实际飞行图像提取的 550kV 高压电力线,其中电力线在图像中的宽度为 1pixel,方向为水平方向。在有杆塔及无杆塔背景的影像中,从 3 组电力线中每组分别提取出 1 根或者 2 根电力线,所提取的电力线基本准确,除个别噪声较大的地方外,平均偏差均小于 1pixel。提取的结果证明,在非常复杂的背景条件下,该算法至少能从一组电力线中提取一条完整的电力线,这对于



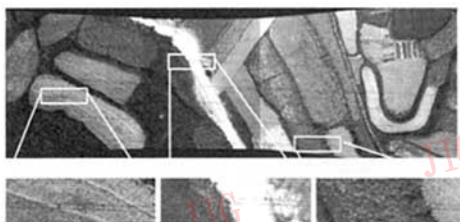
(a) 原图



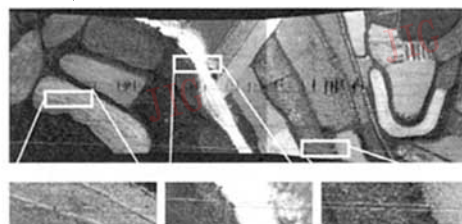
(b) 提取的电力线叠加图

图 7 有杆塔背景影像的电力线提取结果

Fig. 7 Power lines extracted from images with pole towers



(a) 原图



(b) 提取的电力线叠加图

图 8 无杆塔背景影像的电力线提取结果

Fig. 8 Power lines extracted from images without pole towers

高压线的高度估算已经足够了。

4 结 论

从具有复杂自然背景的航空影像中完整地提取高压电力线,在国内和国际上都鲜有文献涉及,而随着航空遥感和摄影测量技术在电力巡线中的应用和推广,需要从高分辨率航空光学影像中完整准确地提取电力线,为此,本文采用各种综合知识,从实际出发,通过归纳提出了一些准则和方法。该方法由于充分利用了电力线平行、近似直线、横贯图像、没有中断、有恒定光学属性等特点,同时利用了 Radon 变换的抗强噪声提取直线的特点,提出通过分段 Radon 变换提取电力线的方法,并结合类似卡尔曼滤波跟踪连接电力线,从而取得了很好的提取效果,并通过实验证明了这些准则和方法的有效性和实用性,对提取航空遥感影像中的电力线有重要的实际参考价值。

致 谢 感谢国家高技术发展研究“863”项目“机载多角度多光谱成像技术在电力系统应用的研究”课题组全体成员的共同协作和支持,感谢华中

电网公司卓有成效的组织及为实验所提供的宝贵实验数据。

参考文献 (References)

- Emmanuel P, Baltsavias. A comparison between photogrammetry and laser scanning [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2-3): 83 ~ 94.
- Unnikrishnan R, Hebert M. Robust extraction of multiple structures from non-uniformly sampled data [A]. In: Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C], Las Vegas, USA, 2003: 1322 ~ 1329.
- Medioni G, Lee M S, Tang C K. A computational framework for segmentation and grouping [M]. Amsterdam, Holland: Elsevier, 2000.
- Melzer T, Briese C. Extraction and modeling of power lines from ALS point clouds [A]. In: Proceedings of 28th Workshop [C], Hagenberg, Austria, 2004: 47 ~ 54.
- Kim Y H, Kang G S. Multi-wire detection and image reconstruction using 27 ghz isar [A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Hamburg, Germany, 1999: 538 ~ 541.
- Sarabandi Kamal, Park Moonsoo. Extraction of power line maps from millimeter-wave polarimetric SAR images [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(12): 1802 ~ 1809.

- 7 Sarabandi K, Pierce L, Oh Y, *et al.* Power lines: Radar measurements and detection algorithm for polarimetric SAR images [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(2): 632 ~ 643.
- 8 Yamamoto K, Yamada K. Analysis of the infrared images to detect power lines[A]. In: Proceedings of IEEE TENCON[C], Brisbane, Australia, 1997: 343 ~ 346.
- 9 Kasturi Rangachar, Camps Octavia I. Wire Detection Algorithms for Navigation[R]. Philadelphia Penn., USA: Department of Computer Science and Engineering, The Pennsylvania State University, 2002.
- 10 Vosselman G, de Knecht J. Road tracing by profile matching and Kalman filtering[A]. In: Greun A(eds), Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images[C], Birkhauser, Germany, 1995: 265 ~ 275.
- 11 Florence Tupin, Henri Maître, Jean-Fran, *et al.* Detection of linear features in SAR images: application to road network extraction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(2): 434 ~ 453.
- 12 Matlab6.5 help. Radon Transform[EB/OL]. <http://eivind.imm.dtu.dk/staff/ptoft/Radon/Radon.html>.
- 13 Wen Gong-jian, Wang Run-sheng. A robust approach to extraction straight line[J]. Journal of Software, 2001, 12(11): 1660 ~ 1666. [文贡坚, 王润生. 一种稳健的直线提取算法[J]. 软件学报, 2001, 12(11): 1660 ~ 1666.]
- 14 Zhang You-wei. Theory on Viener and Kalman Filter[M]. Beijing: People's Education Press, 1980: 234 ~ 236. [张有为编. 维纳与卡尔曼滤波理论导论[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980: 234 ~ 236.]
- 15 Wang Run-sheng. Image Understanding[M]. Changsha: National University of Defence Technology, 1995: 69 ~ 73. [王润生编. 图像理解[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995: 69 ~ 73.]