

高压输电线无人机巡检技术的研究 与软件实现

王雪



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现

- 1 课题研究意义与主要工作
- 2 整体研究思路
- 3 高压输电线提取算法的研究
- 4 高压输电线弧垂算法的研究
- 5 高压输电线巡检系统的软件实现
- 6 取得成果





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【1 研究意义与主要工作】

高压输电线巡检项目



杆塔



弧垂



绝缘子



输电线



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【1研究意义与主要工作】

“人工巡检为主，视频监测为辅”的巡检方式存在的问题

1. 无安全保障
2. 效率低下
3. 视频付出代价大

解决办法



无人机巡检

无人机巡检的现状

1. 2004年加拿大首创
2. 2010年我国试点
3. 无人机仅作为巡检图像和视频采集，无后续处理

解决办法

本文工作，
无人机巡检
高压输电线
图像的智能
分析处理和
软件实现



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【1研究意义与主要工作】

适用于该高压输电线图像的预处理操作：

- 图像灰度化
- 图像光学校正
- 自适应中值滤波法

复杂背景下的高压输电线识别算法：

- 基于牛顿迭代的自适应阈值Canny算子检测算法
- 先局域后全局的Hough变换输电线提取算法

主要工作

高压输电线弧垂测量算法：

- 基于三维立体重构的高压输电线弧垂测量方法

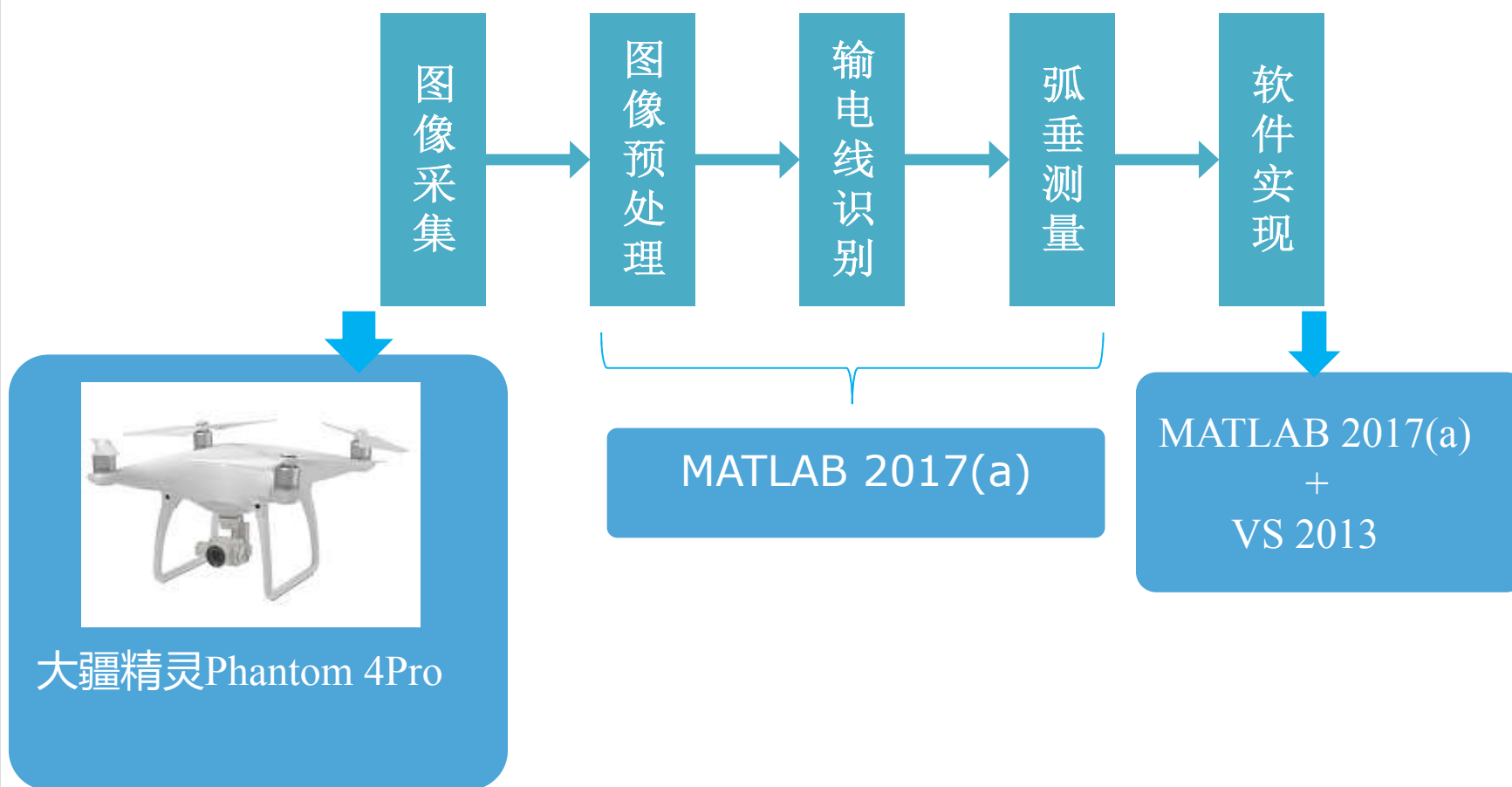
高压输电线无人机巡检系统的实现：

- 巡检视频的播放
- 巡检图像的查看
- 巡检高压输电线的识别
- 巡检高压输电线弧垂的测量





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【2 整体研究思路】





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3高压输电线提取算法】

图像预处理

1

图像灰度化

2

图像光学校正

3

图像降噪处理

1

彩色的JPG图像转化为灰度图像，方便后续函数的应用

2

基于灰度非线性变换的自适应直方图均衡算法——解决图像曝光问题

曝光不足



曝光过度





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3高压输电线提取算法】

图像预处理——光学校正

图像
灰度
化



图像
光学校
正





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3高压输电线提取算法】

3

图像降噪处理——自适应中值滤波算法



(a)→方法 1 去除高斯噪声



(b)→方法 1 去除椒盐噪声



(c)→方法 1 去除两种噪声

均值为0，
方差为0.02
的高斯噪声

噪声密度为
0.03的椒盐
噪声

方法1为邻
域均值滤波

方法2为中
值滤波



(a)→方法 2 去除高斯噪声



(b)→方法 2 去除椒盐噪声



(c)→方法 2 去除两种噪声



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3高压输电线提取算法】

3

图像降噪处理——自适应中值滤波算法



(a)→方法3 去除高斯噪声



(b)→方法3 去除椒盐噪声



(c)→方法3 去除两种噪声

方法3为改进中值滤波

噪声点基本上都是邻域内的极值点，而边缘点往往不是，中值滤波前，自动判断窗口下是否有极值点，若有，用一般中值滤波，若无，不处理

三种降噪方法图像的MMSE对比表

降噪图像		高斯噪声	椒盐噪声	椒盐+高斯噪声
MMSE	邻域均值法	446.7932	0.9863	518.6231
	中值滤波法	243.0938	0.6855	398.3758
	自适应中值滤波法	136.8214	0.5415	243.8452



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3高压输电线提取算法】



图像灰度化



自适应均衡



降噪处理





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3 高压输电线提取算法】

高压输电线提取算法——传统Canny算子边缘检测

$$\frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 2 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 2 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix}$$

高斯平滑滤波器平滑处理



$$f_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}, f_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$$

一阶偏导计算x, y方向的梯度



非极大值抑制：使用非极大值抑制细化平滑梯度，搜索图像中可能的边缘



滞后阈值化：用双阈值算法检测和连接边缘



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3 高压输电线提取算法】

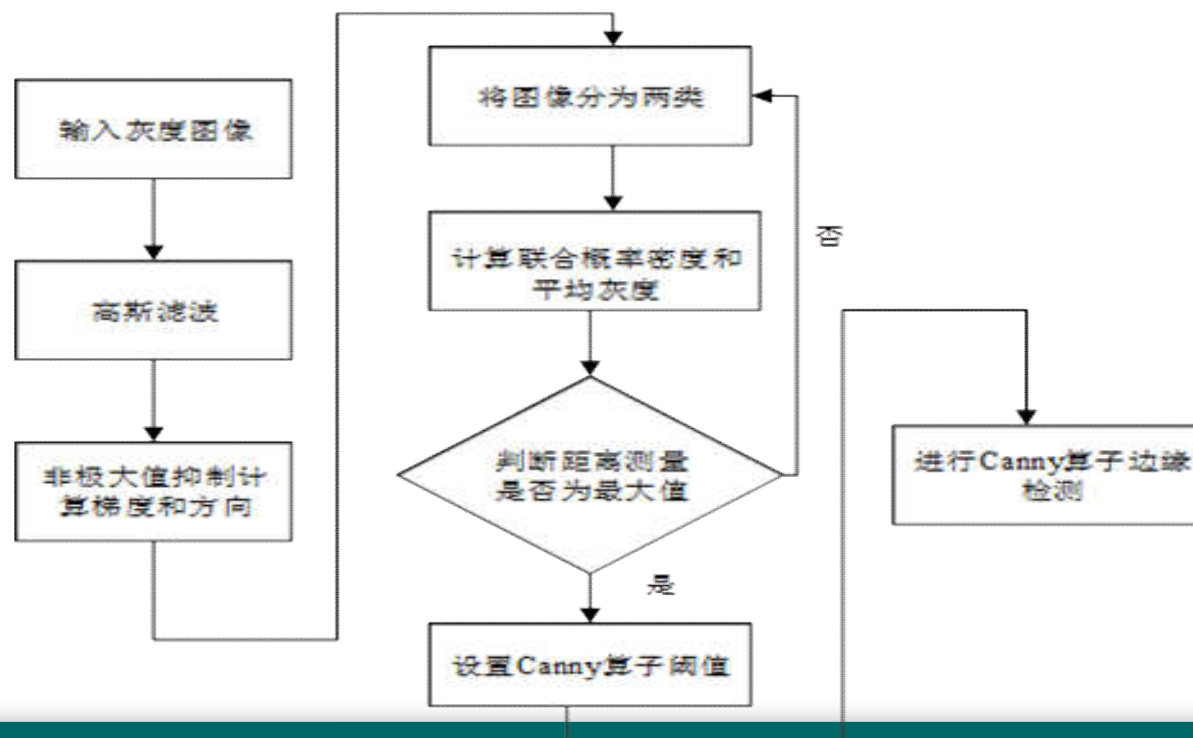
高压输电线提取算法——改进的Canny算子边缘检测算法

创新点

●梯度计算方法的改进

$$f_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}, f_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}, f_{45^\circ} = \begin{bmatrix} 0 & +1 & +1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}, f_{135^\circ} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & +1 \\ 0 & +1 & +1 \end{bmatrix}$$

●双阈值的确定方式





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3 高压输电线提取算法】

改进Canny算子边缘检测算法验证——传统算子边缘检测效果图



原始图像

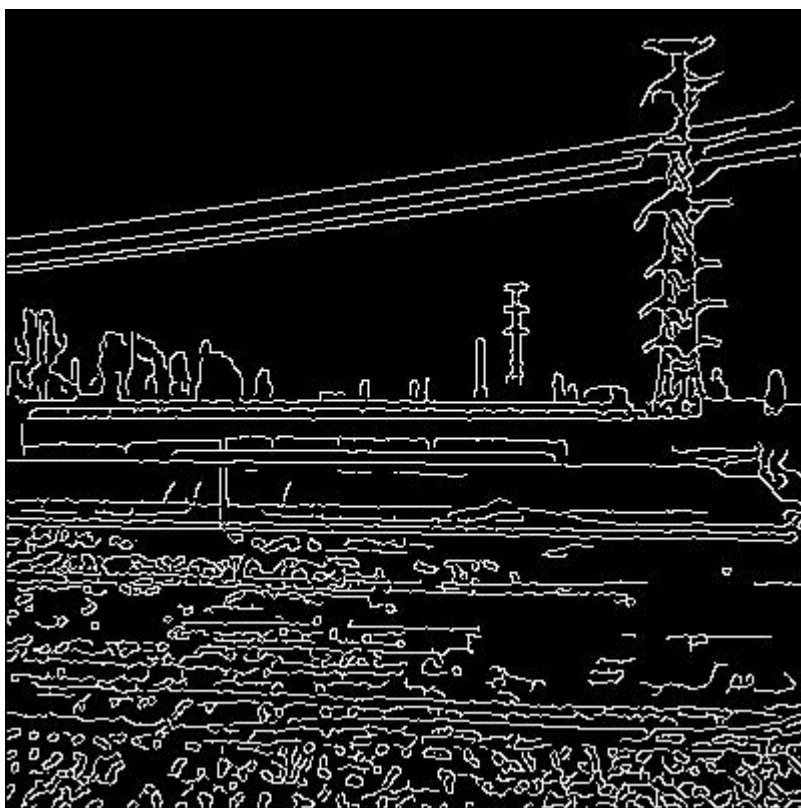


预处理后图像

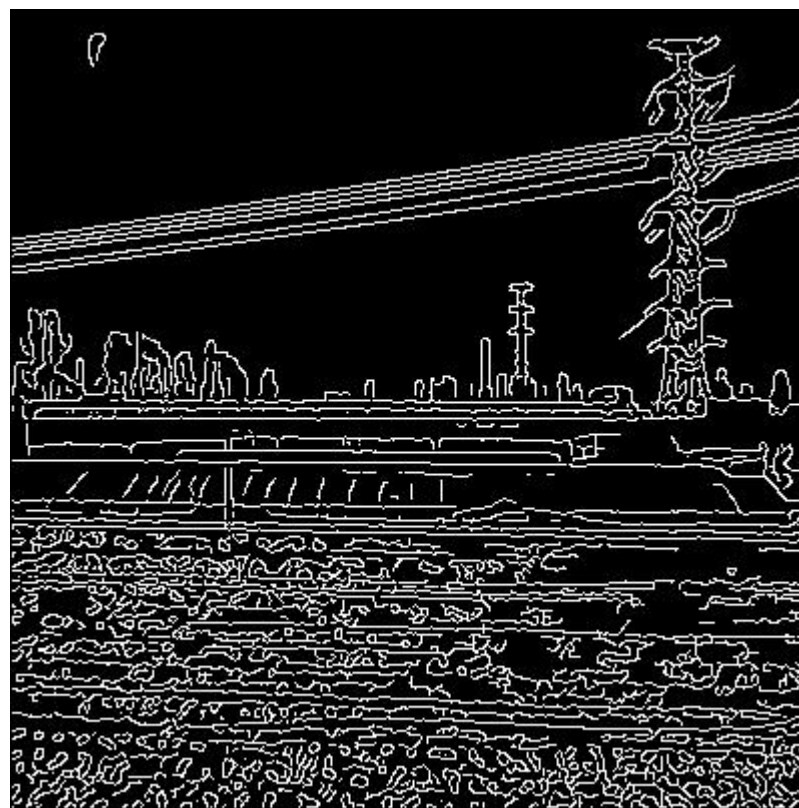


高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3 高压输电线提取算法】

改进Canny算子边缘检测算法验证——两种Canny算子对比



传统Canny算子边缘检测



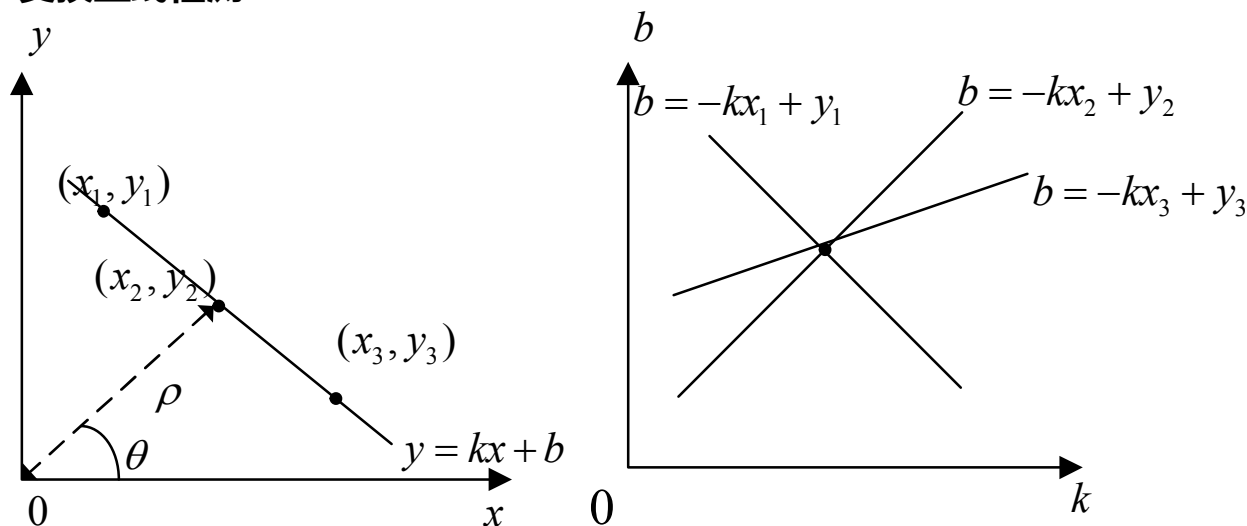
改进Canny算子边缘检测



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3 高压输电线提取算法】

高压输电线提取算法——Hough变换原理

•Hough变换直线检测



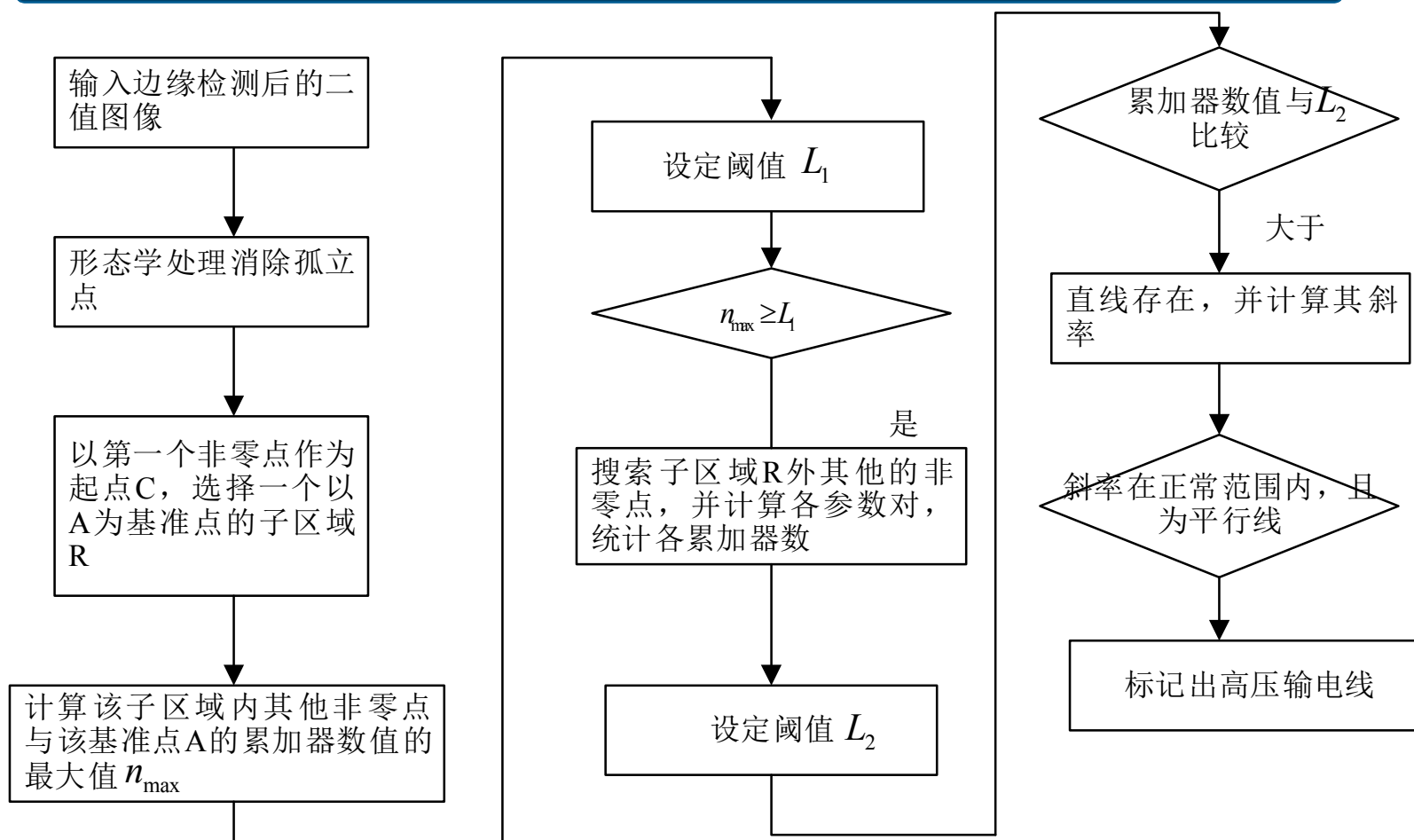
$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$$

在计算机编程中，把参数空间设计成一个累加器矩阵，累加器的数值代表图像空间中存在共线关系的离散点的个数，累加器数值越大，共线点离散点个数越多，超过一定门限，则代表它们构成一条直线。



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3 高压输电线提取算法】

改进的Hough变换高压输电线提取算法步骤





创新点

1 改进的Hough变换高压输电线提取算法原理

•Hough变换是一种全局坐标转换，可以根据局部预测出一些可能的直线，然后再针对性的检测，减少盲目性，降低运算量

2 与传统Hough变换算法的比较

比较层面 \ 算法	传统Hough变换	改进的算法
运算量	$O_1(M \times N \times m)$	$O_2(N_f(N_f - 1) + l_n N_f)$
空间复杂度	$D(2\sqrt{2} \times N \times m + I)$	$D_2(I + 3l_n + 3N_r - 3)$



N_f 为二值化图像中非零点数目， l_n 为图像中直线的数目， N_r 子区域R的非零点数



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3 高压输电线提取算法】

3

改进的Hough变换高压输电线提取算法演示图



原始图像



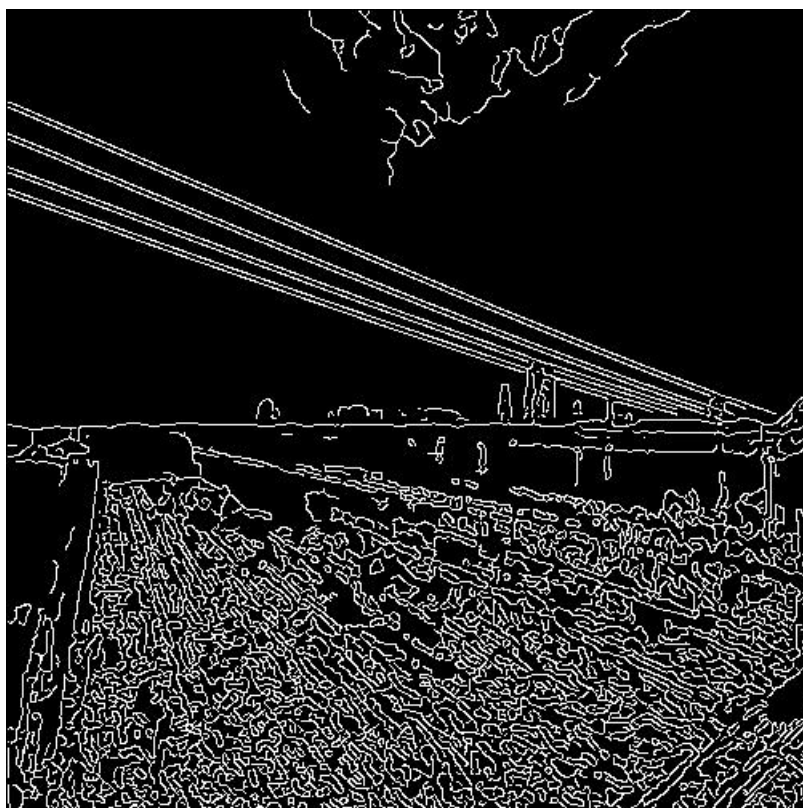
预处理后图像



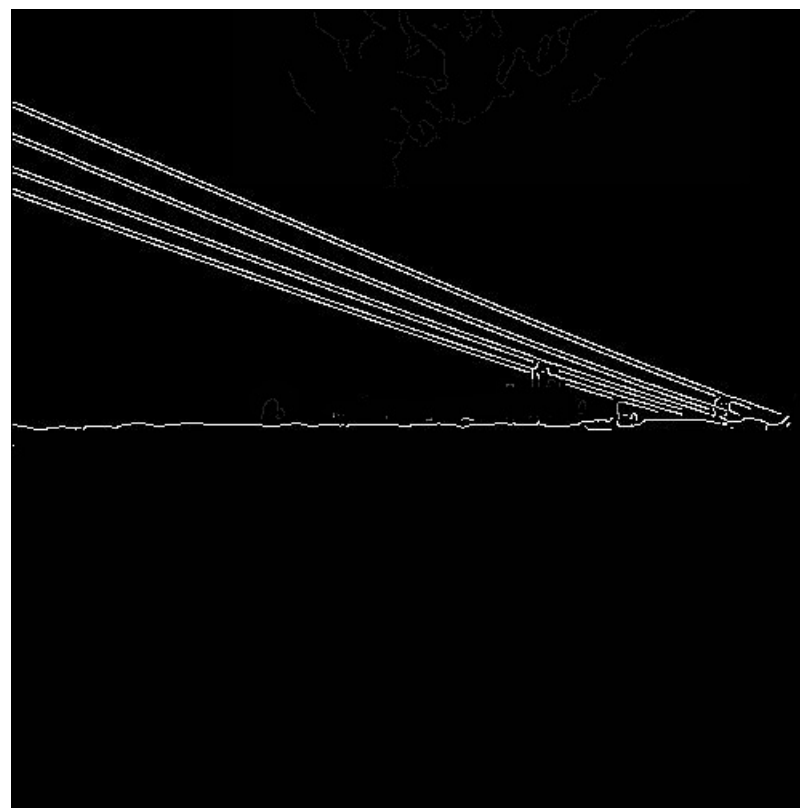
高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3 高压输电线提取算法】

3

改进的Hough变换高压输电线提取算法演示图



边缘检测后图像



形态学处理后图像



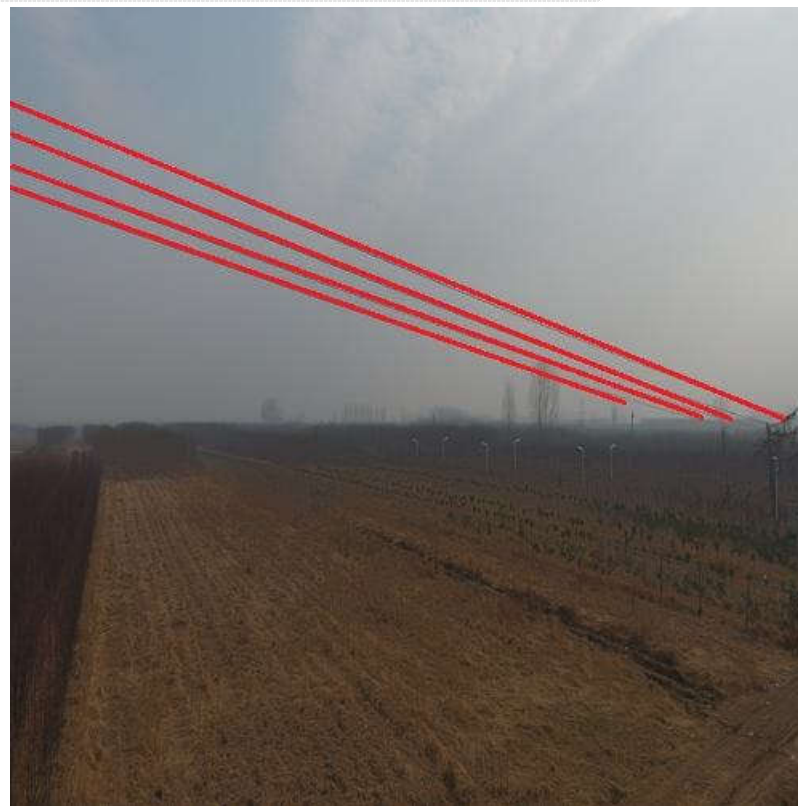
高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【3 高压输电线提取算法】

3

改进的Hough变换高压输电线提取算法演示图



传统Hough变换提取结果

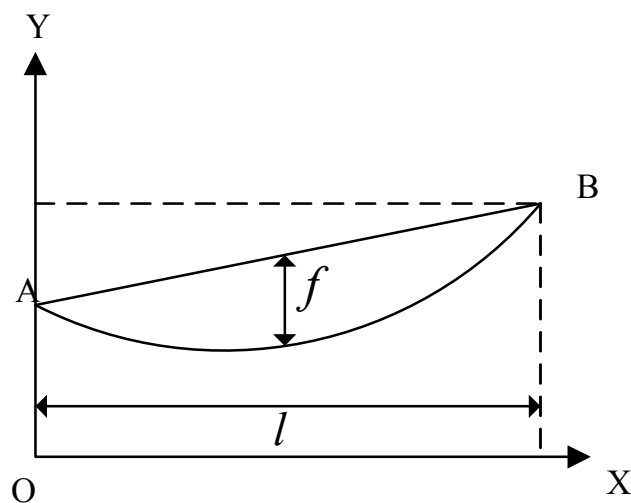
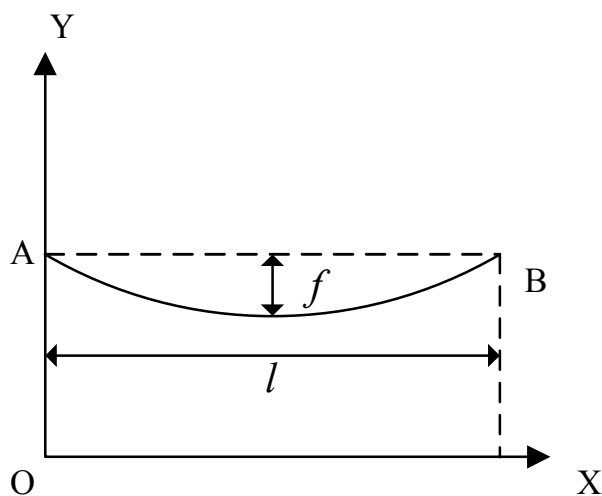


改进Hough变换提取结果



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

4.1 高压输电线弧垂测量算法概要——定义



架空导线等高和不等高时弧垂示意图



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

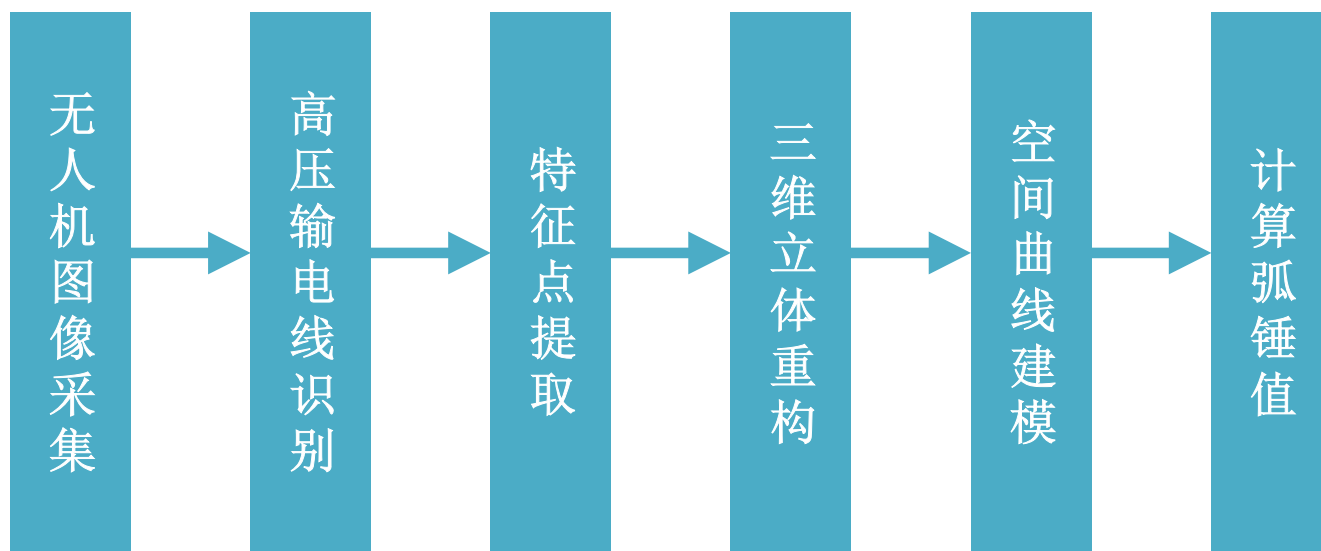
4.1 高压输电线弧垂测量算法概要——算法比较

弧垂测量算法	方法	算法特点
人工测量方式	经纬度仪进行测量	精度高，工作量大，条件艰苦时基本无法使用
搭载温度仪	实时观测设备的应力和温度数据，并建立对应的物理模型	需要在测量线路上安装探测设备，测量付出了很大的经济成本和维护成本
GPS漫游器	发射出输电线在不同位置的经纬度，从而计算弧垂大小	
架设红外摄像机	获得弧垂观测点附近的图像信息，以此对图像进行处理，从而判断弧垂的大小	
全景图像拼接算法	拼接多帧高压输电线图像，拟合出输电线弧垂	对高压输电线图像拍摄状态要求很高，必须在平视状态下，因此，该算法实用范围小，只能为其他方法提供补充参考



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

4.2 基于三维立体重构的弧垂测量算法流程图



创新点

本章提出一种基于三维立体重构的高压输电线弧垂测量算法，该方法不需要安装专门设备，对摄像状态无太多要求，同时，根据图像提取的特征点，直接进行建模，不受地域限制，在平时的巡检过程中就能计算出弧垂值，准确性较高

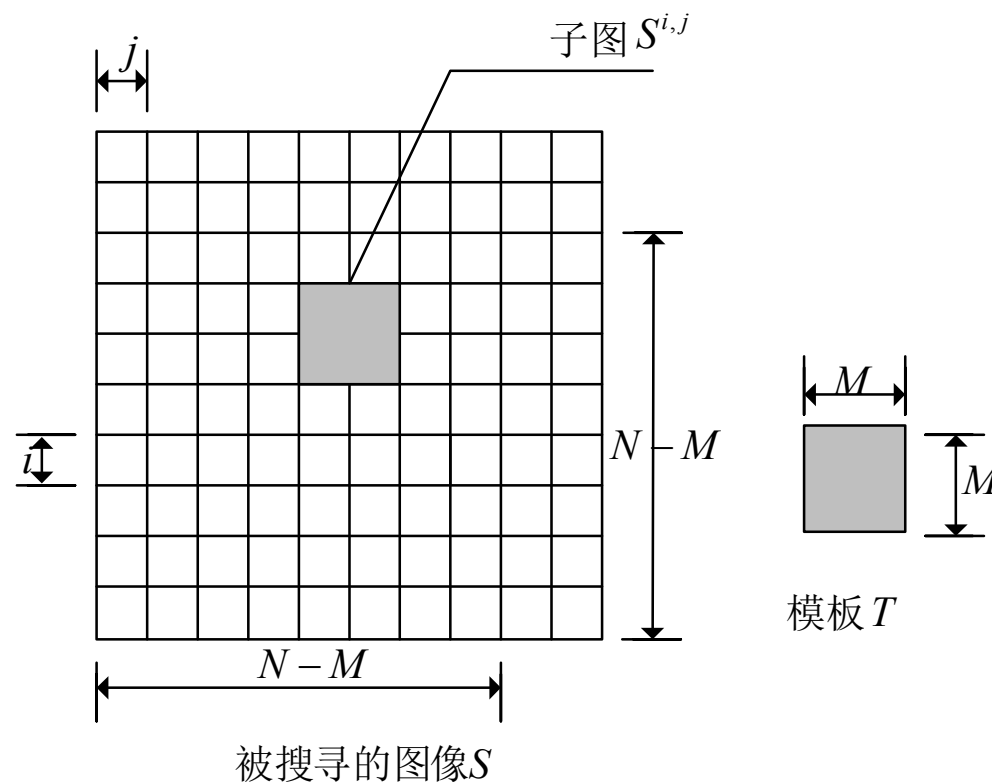


高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

4.2 基于三维立体重构的弧垂测量算法——间隔棒特征点提取



在高压输电线中，一个档距内一般有5-10个间隔棒，用来限制导线之间的相对运动，并保持分裂导线的几何形状。间隔棒称为输电线上一个重要标志，可以作为特征点来使用。



图像配准示意图

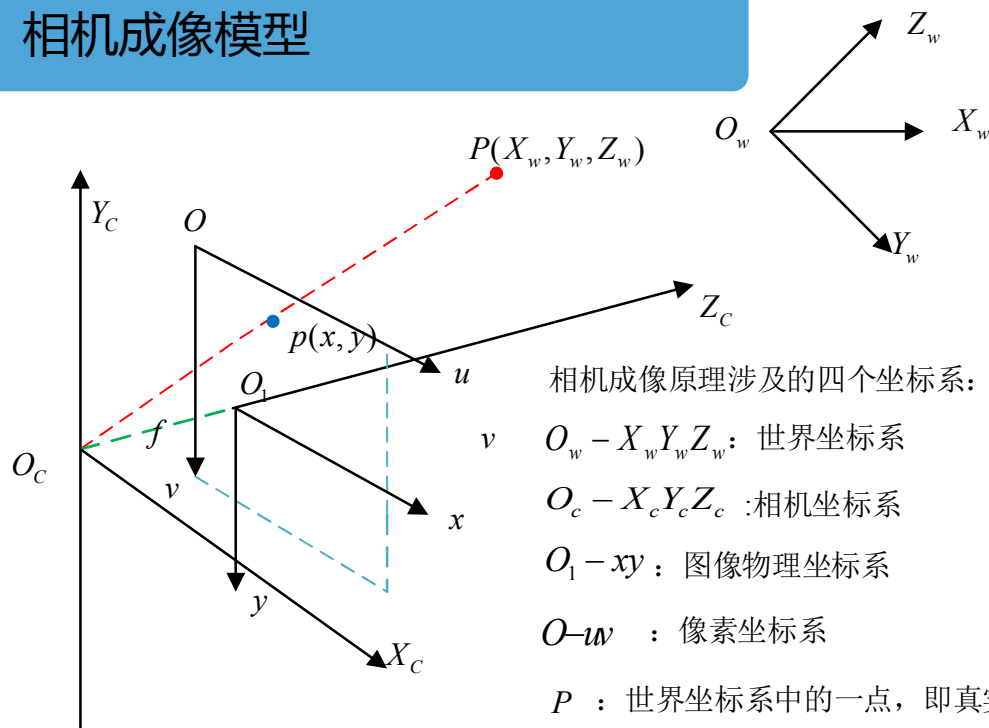


高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

4.2 基于三维立体重构的弧垂测量算法——三维立体测量方法

1

相机成像模型





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

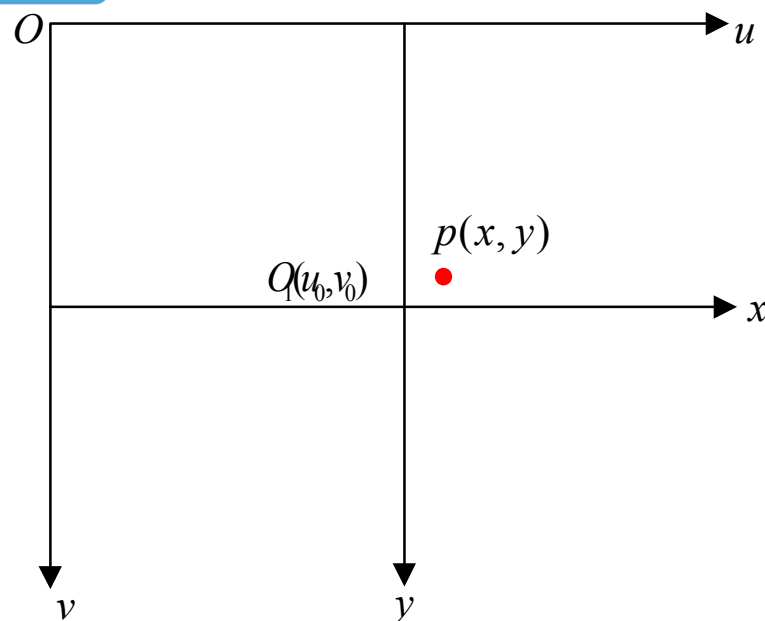
4.2 基于三维立体重构的弧垂测量算法——三维立体测量方法

2

像素坐标系转换与图像坐标系

$$\begin{cases} u = \frac{x}{dx} + u_0 \\ v = \frac{y}{dy} + v_0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



图像坐标系的单位是mm，属于物理单位，而像素坐标系的单位是pixel，我们平常描述一个像素点都是几行几列。所以这二者之间的转换如下：其中dx和dy表示每一列和每一行分别代表多少mm，即1pixel=dx mm



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

4.2 基于三维立体重构的弧垂测量算法——三维立体测量方法

3

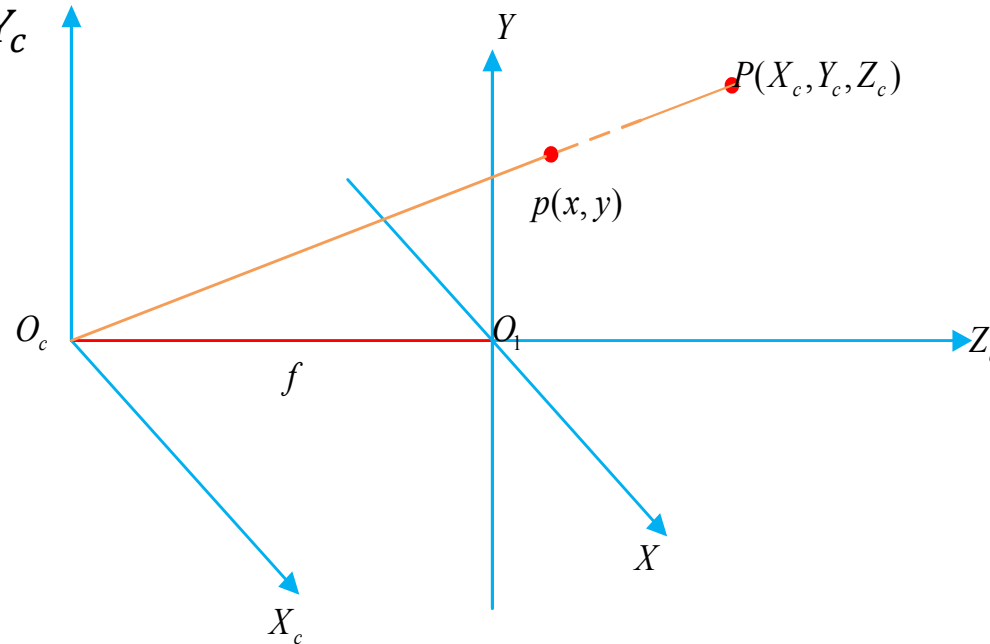
图像坐标系与相机坐标系转换

$$\begin{cases} \frac{x}{X_c} = \frac{f}{Z_c} \\ \frac{y}{Y_c} = \frac{f}{Z_c} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Z_c \cdot x = f \cdot X_c \\ Z_c \cdot y = f \cdot Y_c \end{cases}$$

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

相机坐标系: $O_c - X_c Y_c Z_c$

图像物理坐标系: $O_1 - XY$



f 是相机焦距



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4高压输电线弧垂测量算法】

4.2 基于三维立体重构的弧垂测量算法——三维立体测量方法

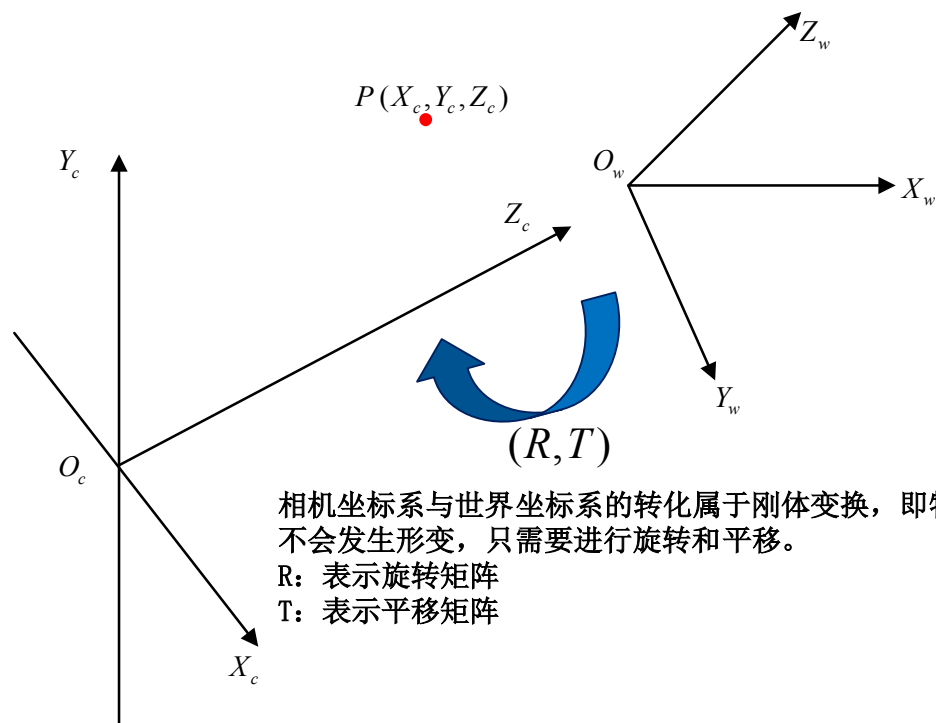
4

相机坐标系与世界坐标系转换

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T$$



$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$



相机坐标系与世界坐标系的转化属于刚体变换，即物体不会发生形变，只需要进行旋转和平移。

R: 表示旋转矩阵

T: 表示平移矩阵



4.2 基于三维立体重构的弧垂测量算法——三维立体测量方法

5

世界坐标系与其投影点在像素坐标系中的坐标转换关系


$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad M_2 = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

4.2 基于三维立体重构的弧垂测量算法——三维立体测量方法

6

假定高压输电线特征点P，在先后两幅图像中对应的像素点P1，P2的像素坐标值是 (u_1, v_1) 和 (u_2, v_2) 。已知投影矩阵M是4*3的矩阵，可得四个关于 x_w, y_w, z_w 的线性方程

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1)X_w + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1)Y_w + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1)Z_w = m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1)X_w + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1)Y_w + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1)Z_w = m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2)X_w + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2)Y_w + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2)Z_w = m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2)X_w + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2)Y_w + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2)Z_w = m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{cases}$$

$$(X_w, Y_w, Z_w)$$

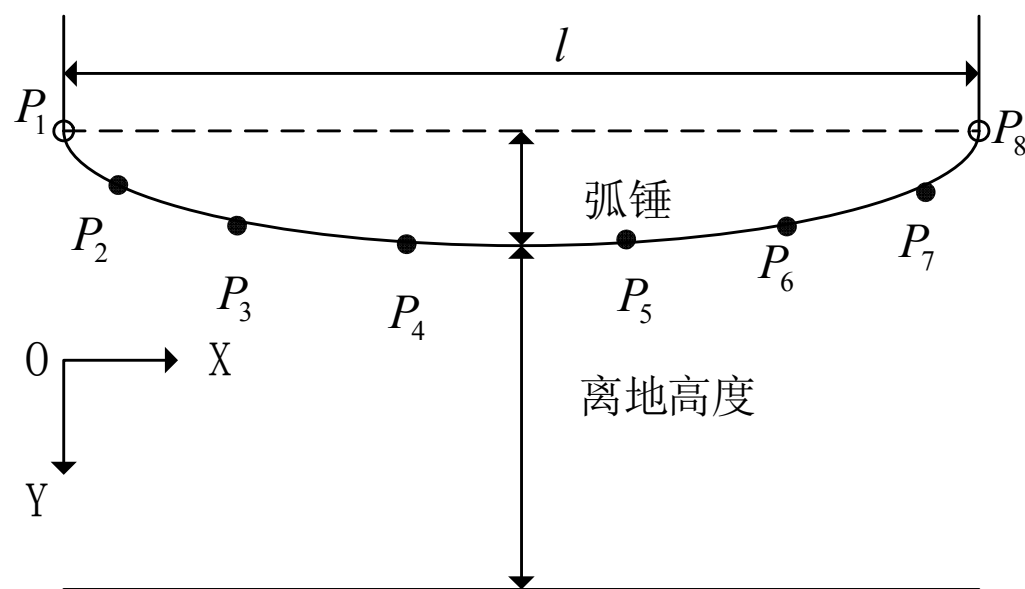


高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【5 高压输电线弧垂测量算法】

5.2 基于三维立体重构的弧垂测量算法——三维立体测量方法

7

将得出的特征点坐标利用回归分析算法拟合出一个档距内的高压输电线曲线



高压输电线曲线拟合示意图



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

4.3 基于三维立体重构的弧垂测量算法验证——特征点提取



间隔棒配准模板及原始图像

配准结果一览表

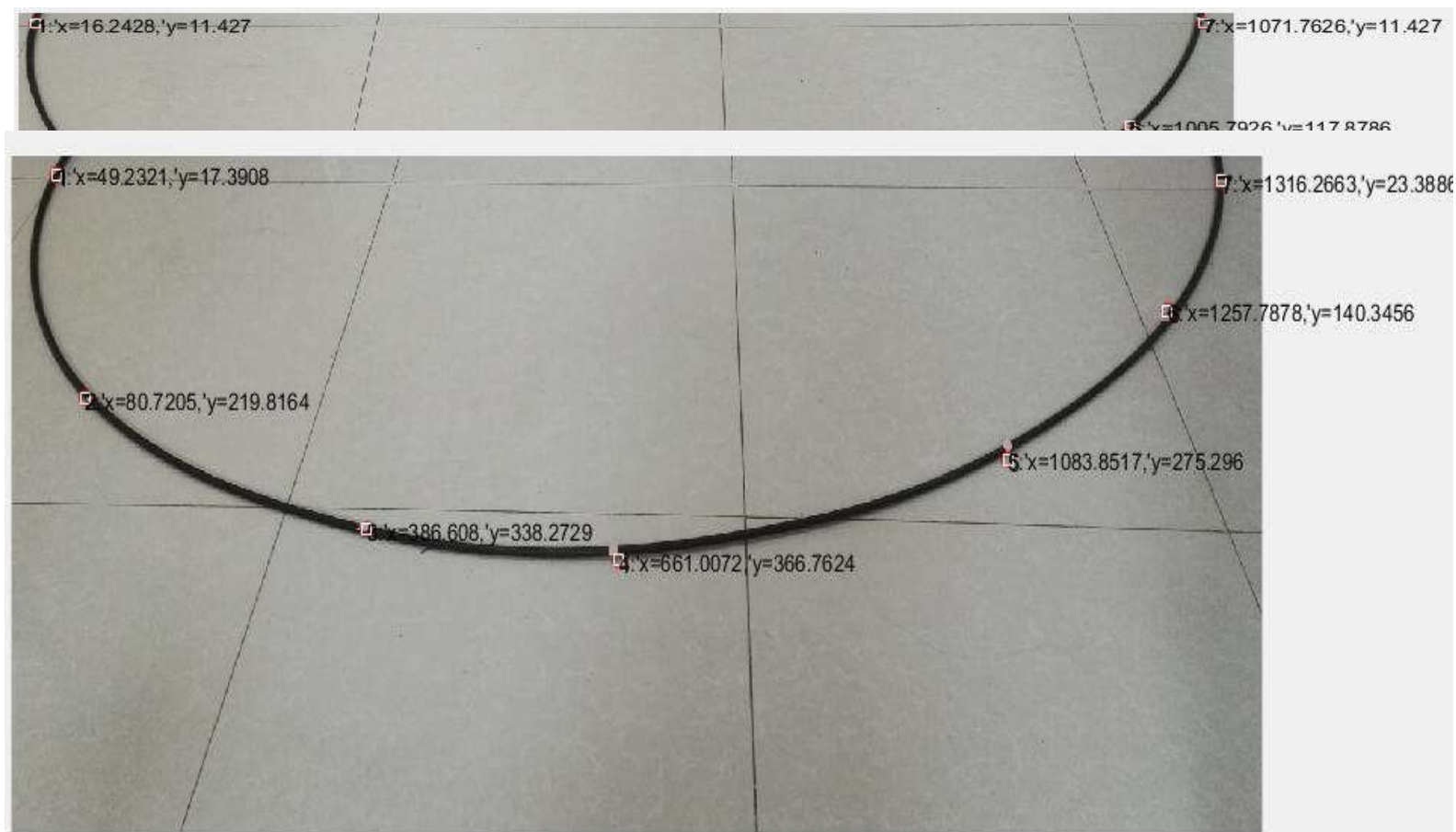
实验图像	间隔棒1配准结果，中心坐标 (35,108)	间隔棒2配准结果，中心坐标 (214,73)
待搜索图像(1)	(34,108)	(213,74)
待搜索图像(2)	(36,109)	(215,75)
待搜索图像(3)	(33,107)	(213,75)



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

1

4.3 基于三维立体重构的弧垂测量算法验证——仿真平台图像





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【4 高压输电线弧垂测量算法】

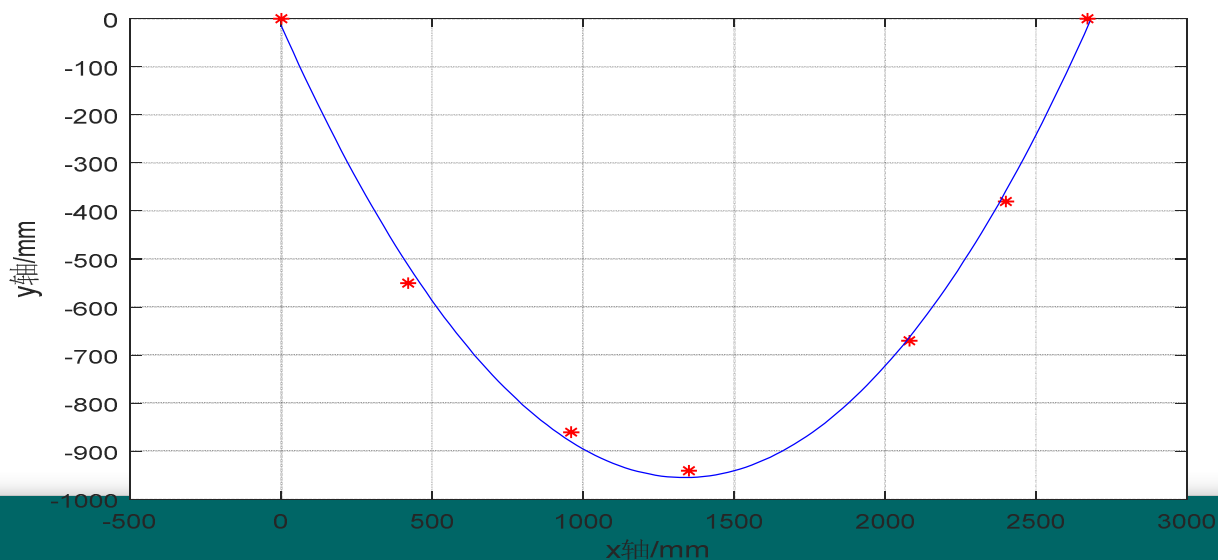
2

4.3 基于三维立体重构的弧垂测量算法验证——实验结果

图像标定 点	世界坐标系坐标 (实际)	计算出的世界坐标系坐 标值	误差 (%)
1	(0,0)	(0.63, 0.18)	0.70
2	(420,-600)	(420.65,-600.48)	0.81
3	(960,-860)	(960.85,-860.37)	0.93
4	(1350,-950)	(1350.69,-950.83)	1.08
5	(2080,-670)	(2080.29,-670.47)	0.51
6	(2400,-370)	(2400.89,-369.67)	0.95
7	(2670,0)	(2671.78,-0.09)	1.78

仿真的高压输电线空间曲线拟合

弧垂仿真实验结果表





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【5 高压输电线巡检系统实现】

5.1 高压输电线巡检系统实现——相关技术

1

软件平台开发参数

参数	说明
系统版本	Windows7 (64位)操作系统
处理器	Intel(R) i3-450(3.5GHz)
内存	4.0GB
MATLAB版本	MATLAB(R)2017(a)

2

应用的相关技术

Visual Studio 2013下C++语言	与OPENCV、MATLAB、MYSQL语言融合
MATLAB	可以编译为DLL库供其他语言调用
JavaScript语言	EasyUI插件和Masonry插件



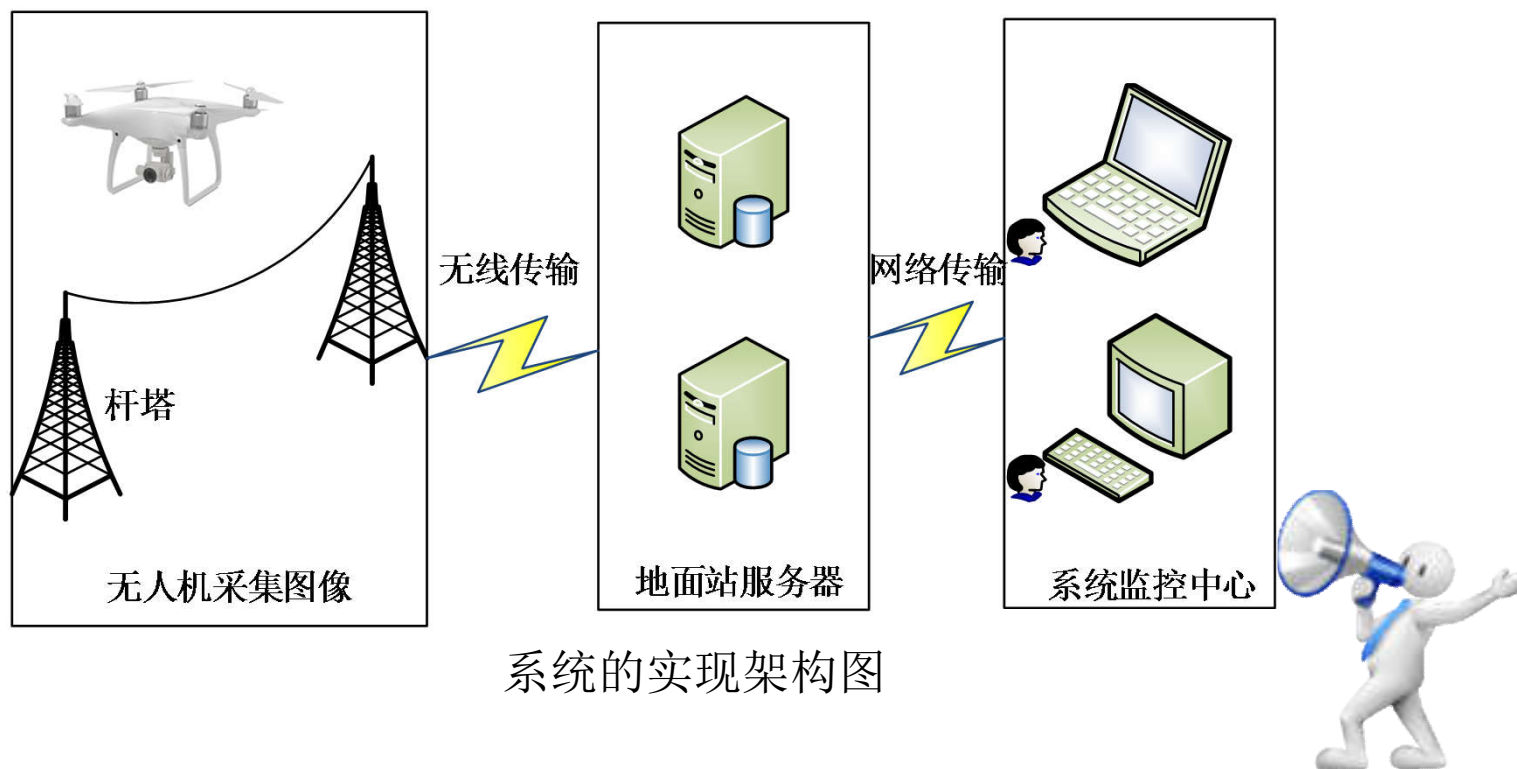


高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【5 高压输电线巡检系统实现】

5.2 高压输电线巡检系统实现——系统的实现与效果展示

1

系统架构





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【5 高压输电线巡检系统实现】

5.2 高压输电线巡检系统实现——系统的实现与效果展示

2

系统实现的主页面

实际
运行
效果

高压输电线无人机巡检系统

登出系统 密码修改 添加设备 服务配置 下载插件

导航

设备列表

设备查询

无人机1 视频播放
无人机2 线路识别
无人机3 弧垂测量
功能项 修改
删除

最新图片

查询

 2018-03-12 16:00:11 删除	 2018-03-12 16:00:10 删除	 2018-03-12 16:00:10 删除	 2018-03-12 16:00:09 删除	 2018-03-12 16:00:08 删除	 2018-03-12 16:00:07 删除
 2018-03-12 16:00:07 删除	 2018-03-12 14:00:07 删除	 2018-03-12 14:00:07 删除	 2018-03-12 14:00:05 删除	 2018-03-12 14:00:05 删除	 2018-03-12 14:00:05 删除
 2018-03-12 14:00:03 删除	 2018-03-12 14:00:02 删除	 2018-03-12 14:00:02 删除	 2018-03-12 12:00:09 删除	 2018-03-12 12:00:08 删除	 2018-03-12 12:00:07 删除

巡检工作人员能够便捷地进行观测巡检现场的状况，主要包括用户验证、服务器配置、设备列表、设备最新图像展示等部分。



高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【5 高压输电线巡检系统实现】

5.2 高压输电线巡检系统实现——系统的实现与效果展示

3

系统视频监控的实现

实际
运行
效果



系统的视频监控实现是在OPENCV库中调用VideoCapture类的对象，对服务器中采集的视频信息用一个循环将每一帧图像显示出来的



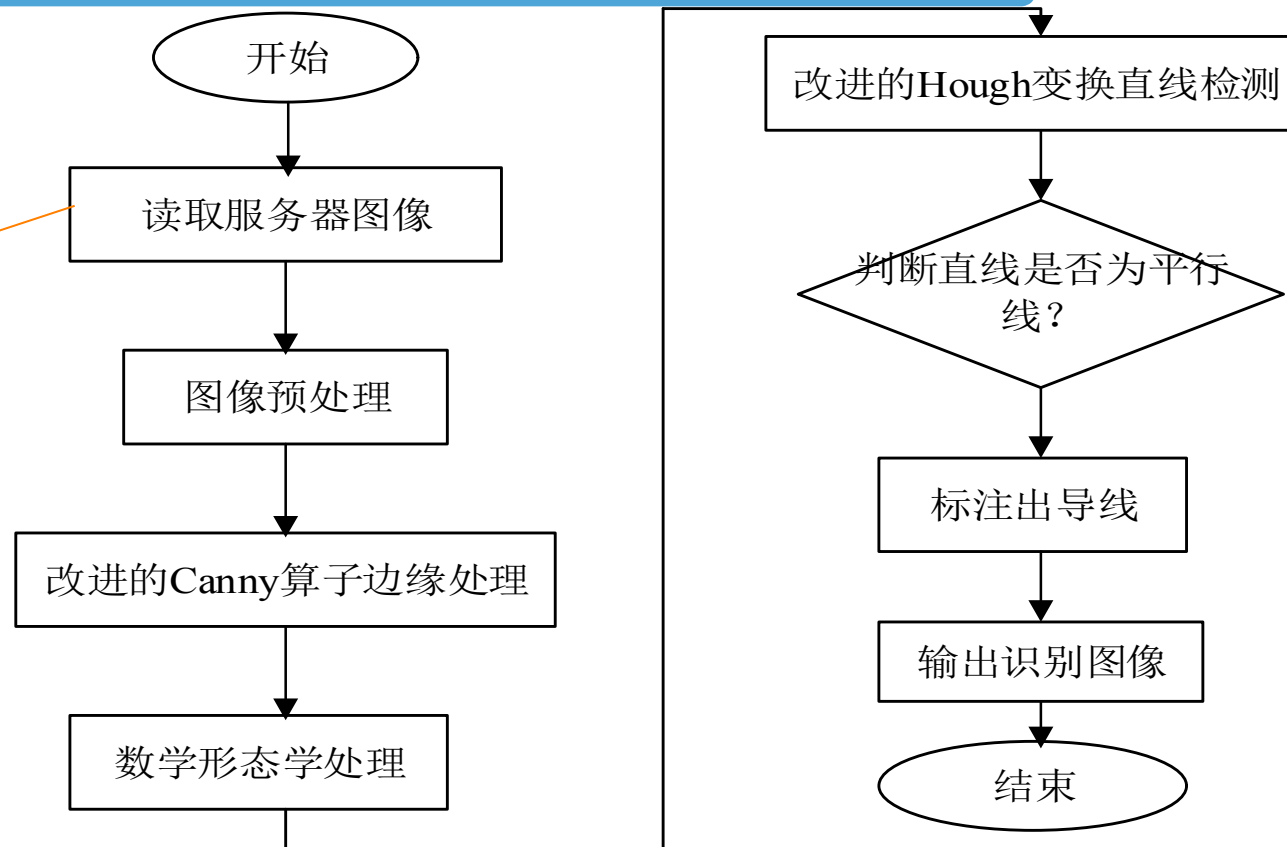
高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【5 高压输电线巡检系统实现】

5.2 高压输电线巡检系统实现——系统的实现与效果展示

4

高压输电线识别功能的实现——算法流程

系统调用OPENCV库中cv::imread对象读入服务器中的图像





高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【5 高压输电线巡检系统实现】

5.2 高压输电线巡检系统实现——系统的实现与效果展示

4

高压输电线识别功能的实现——页面效果

实际
运行
效果

The screenshot displays the software interface for high-voltage power line inspection. On the left, a sidebar contains navigation options: '退出系统' (Exit System), '密码修改' (Change Password), '添加设备' (Add Device), '设备列表' (Device List), and '设备查询' (Device Query). Below these, there are buttons for '无人机1' (Drone 1), '无人机2' (Drone 2), and '无人机3' (Drone 3). A red arrow points from '无人机1' to a context menu that includes '视频播放' (Video Playback), '线路识别' (Line Identification), '弧垂测量' (Sag Measurement), '修改' (Modify), and '删除' (Delete). The main area shows a '历史图片' (History Images) table with columns for ID, Time, File, and Size. The table lists two images: ID 001 (2018-03-13 10:57:07, /001/20180313/105707.jpg, 165.0KB) and ID 002 (2018-03-13 09:57:03, /001/20180313/095703.jpg, 165.0KB). A red arrow points from the '线路识别' option in the context menu to the '高压输电线识别' (High Voltage Power Line Identification) window. This window shows a photo of a power line with red lines overlaid, indicating the identified power line. The window title is '高压输电线识别' and it includes fields for '无人机:' (Drone: 001) and '图片:' (Image: 2018-03-13 10:57:07).

ID	时间	文件	大小
001	2018-03-13 10:57:07	/001/20180313/105707.jpg	165.0KB
002	2018-03-13 09:57:03	/001/20180313/095703.jpg	165.0KB

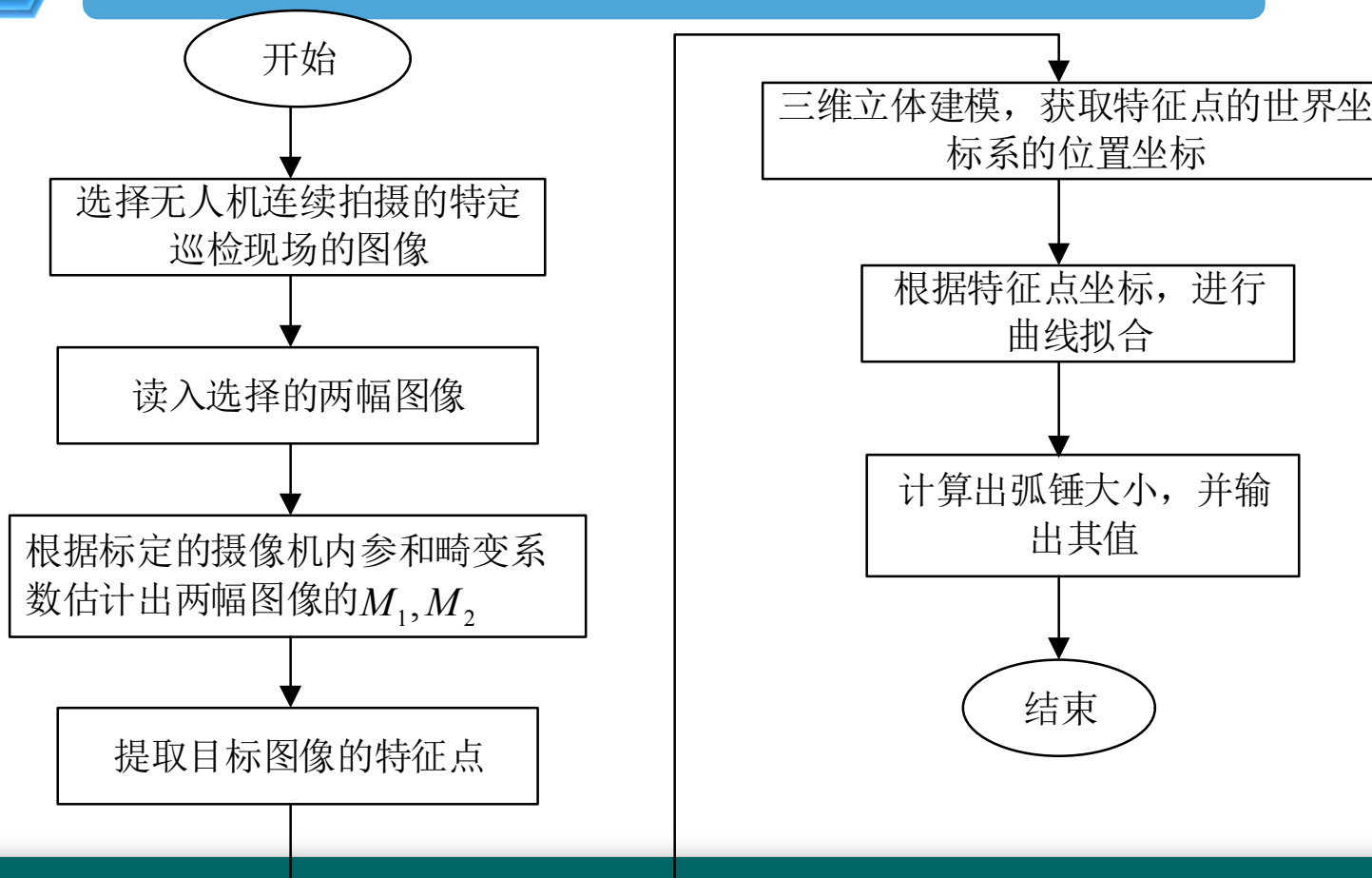


高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【5 高压输电线巡检系统实现】

5.2 高压输电线巡检系统实现——系统的实现与效果展示

5

高压输电线弧垂测量的实现——算法流程





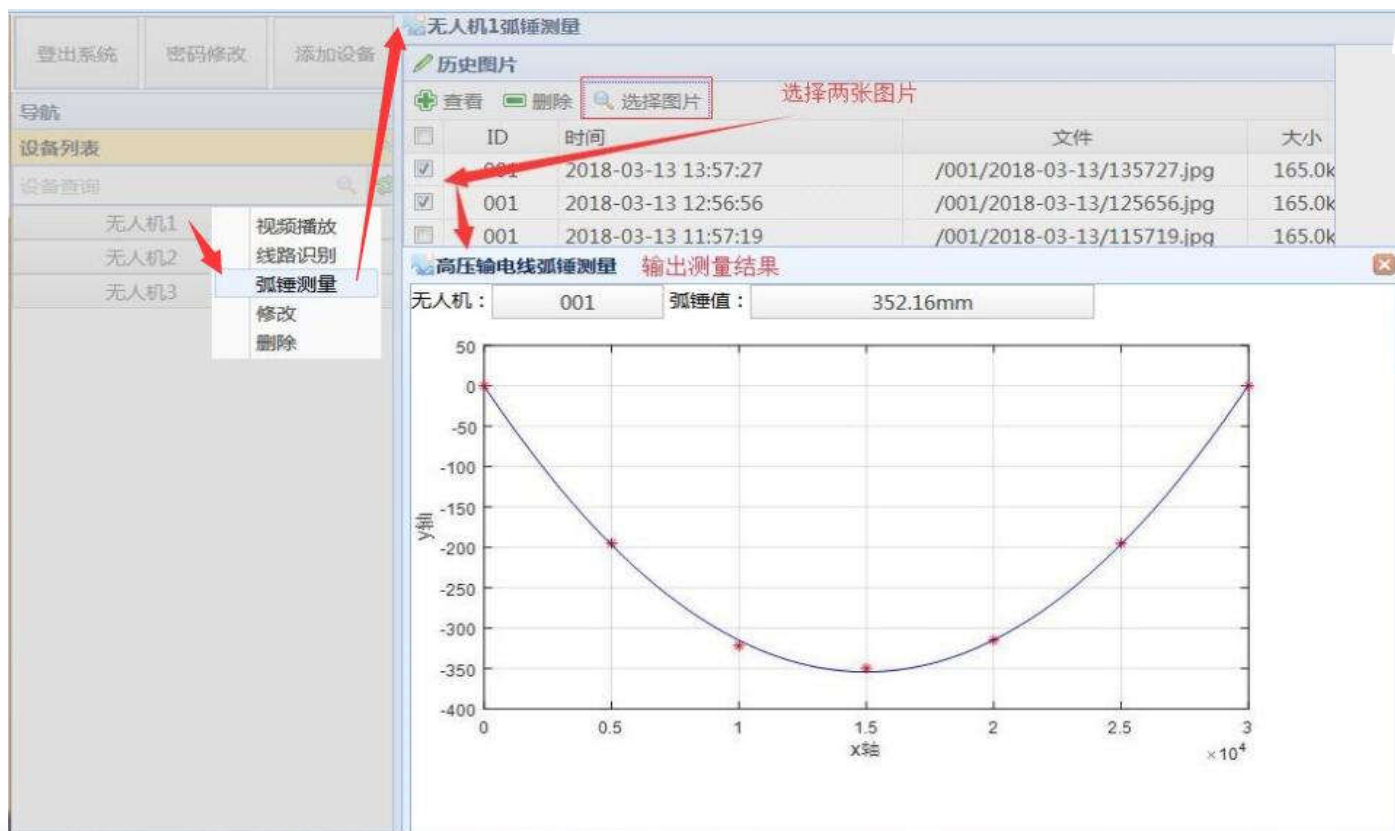
高压输电线无人机巡检技术的研究与软件实现【5 高压输电线巡检系统实现】

5.2 高压输电线巡检系统实现——系统的实现与效果展示

5

高压输电线弧垂测量的实现——页面效果

实际
运行
效果





The End !