

# 基于 Hough 变换的显微图像测量系统标定算法<sup>①</sup>

高 飞<sup>1</sup>, 袁晓阳<sup>1</sup>, 严建军<sup>2</sup>, 陈德顺<sup>1</sup>, 肖 刚<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310003)

<sup>2</sup>(宁波市计量测试研究院, 宁波 315048)

**摘 要:** 针对显微图像测量系统的特点, 提出了一种结合标准显微标尺的标定方法. 该方法首先获取已知尺寸的显微标尺图像, 接着通过预处理及边缘检测分离出图像中的标尺刻度线, 然后基于 Hough 识别出长刻度线, 并计算刻度线对应的像素距离, 从而计算出标定系数. 标定过程中采用了现有的显微刻度尺, 使用方便. 实验结果表明, 该方法标定精度较高.

**关键词:** 显微测量; 图像标定; Hough 变换; 图像处理

## Camera Calibration Method for Micro-Image Measuring System Based on Hough Transform

GAO Fei<sup>1</sup>, YUAN Xiao-Yang<sup>1</sup>, YAN Jian-Jun<sup>2</sup>, CHEN De-Shun<sup>1</sup>, XIAO Gang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

<sup>2</sup>(Ningbo Institute of Measurement and Testing, Ningbo 315041, China)

**Abstract:** A camera calibration method for micro-image measuring system is presented. Firstly the micro image of known size microscopic scale is obtained. Followed by pre-processing and edge detection, ruler lines can be cut out from the image. Then based on Hough lines, the longer ruler lines can be identified. So the calibration factor can be calculated by the physical distance and the corresponding pixel distance of the lines. The calibration objects are existing microscopic scales, so this method is easily applied. The experimental results show that calibration precision is high.

**Key words:** microscopical measuring; camera calibration; Hough transform; image processing

基于摄像机的图像测量方法具有精度高、非接触、操作简单等优点, 因此在各个测量场景中得到广泛应用, 其中就包括显微图像的测量. 而相机标定是图像测量系统的基础. 相机标定就是确定相机的内外参数, 从而建立二维图像和三维空间之间距离位置的换算关系. 从而高精度的标定是高精度测量的基础. 相机的标定算法主要分为三类<sup>[1]</sup>: 传统相机标定方法<sup>[2,3]</sup>、相机自标定法<sup>[4-7]</sup>、主动视觉相机标定方法<sup>[8,9]</sup>. 其中, 传统相机标定方法需要特制的标定物, 如黑白方块构成的棋盘图; 若采用传统标定方法对显微图像进行标定, 则需要相应的微型特制标定物, 获取比较困难. 主动视觉方法对通过相机的移动来进行标定, 对机械机构的要求较高, 且该方法忽略了镜头的畸变, 只能获取

标定相机的内部参数, 对标定精度会有影响. 而相机自标定法不需要标定物, 是通过多幅图像对应点之间的关系直接进行标定, 但需要场景中有二次曲线或二次曲面, 这也限制了该方法的使用.

结合标准显微标尺, 本文给出了一种显微图像的标定方法. 该方法对已知最小度量值为  $K$ (单位:mm) 的标准显微标尺成像, 通过一系列处理得到该标尺  $W$  个刻度线之间占有的 CCD 像素个数  $N$ , 由此得到每个像素对应的实际物理距离, 即标定系数  $\lambda = W * K / N$ . 之后, 将被测物体置于相同位置时, 测算出被测物体的像素数, 然后就可通过  $\lambda$  得到被测物体的实际尺寸. 该方法使用现有标尺作为标定物, 简单实用, 且精度较高. 下面详细介绍算法流程.

① 基金项目:浙江省自然科学基金(LY13F020029);宁波市重点科技计划项目(2013C11032)

收稿时间:2014-04-03;收到修改稿时间:2014-05-12

### 1 预处理

#### 1.1 裁剪及灰度化

裁剪主要是去除那些与标定无关的信息, 例如有些摄像系统所采集的图像包含日期等信息, 如图 1 所示, 它们将影响标定效率与效果, 需要通过裁剪操作去除. 然后根据式(1)进行灰度化处理, 如图 2 所示.

$$f_{ij} = \frac{299R_{ij} + 587G_{ij} + 114B_{ij}}{1000} \quad (1)$$

其中  $R_{ij}$ 、 $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别表示  $(i, j)$  处的像素的红、绿、蓝分量,  $f_{ij}$  表示像素  $(i, j)$  的灰度值.

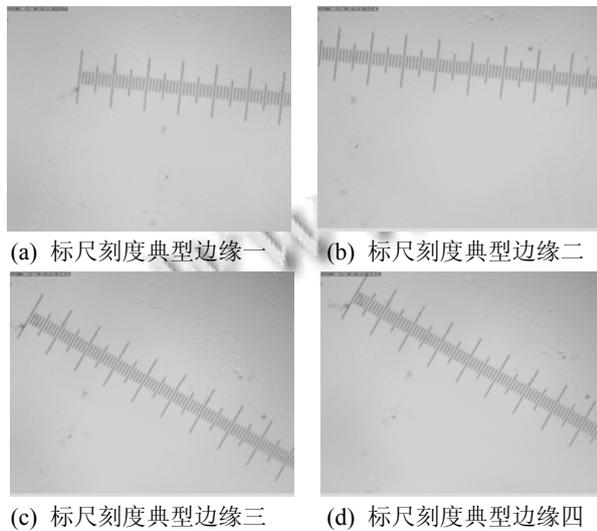


图 1 标准显微标尺图像

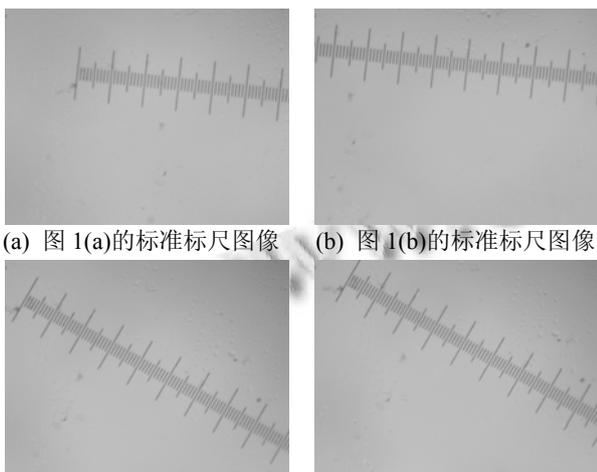


图 2 预处理后的标准标尺图像

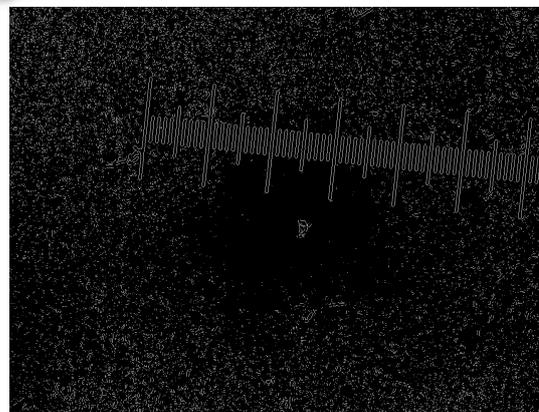
#### 1.2 边缘检测

图像的边缘是图像基本特征之一. 图像边缘是指图像周围像素灰度发生了显著变化的图像区域. 可以

观察到图 1 中标尺刻度是非常典型的边缘. 因此, 可对图像进行边缘检测, 分离出图像中的标尺刻度.

常用的边缘检测方法有基于一阶导数的梯度算子, 基于二阶导数的拉普拉斯算子和 Canny 边缘检测算法. 其中, 一阶梯度算子包括 Roberts, Prewitt, Sobel 等算子. 其中, 使用拉普拉斯算子进行边缘检测时, 常常遇到双边缘问题. 而这正是本文需要的, 本文图像中刻度线比较宽, 使用拉普拉斯算子正好可以识别出刻度线的轮廓, 便于精确定位刻度线.

使用高斯-拉普拉斯算子对图 2(a)进行边缘检测得到的效果如图 3 所示, 其中, 图 3(b)是图 3(a)的局部放大图. 根据图 3 可观察到, 刻度边缘非常清晰, 但是存在很多噪声.



(a) 针对图 2(a)的边缘检测效果



(b) 图 3(a)局部放大

图 3 边缘检测效果图

#### 1.3 噪声去除

为了去掉边缘检测后图像中的噪声, 首先检测图像中的联通区域, 去掉图像中长度较小的联通区域, 最终得到刻度图, 如图 4 所示, 从效果图中可以看到

每根刻度线都呈现空心杆状。算法伪代码如下所示:

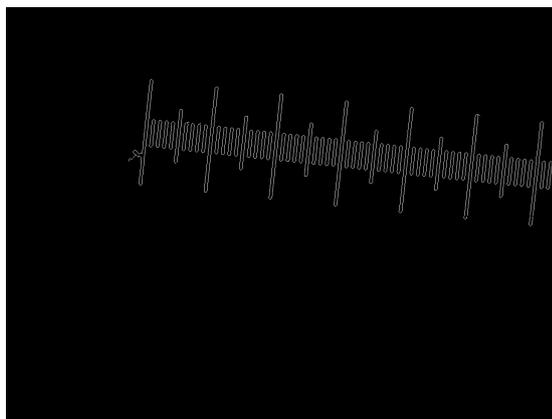


图 4 刻度图

//去除噪声区域

```
void RemoveNoise(I,T){
    初始化 pVisited 数组(存放联通区域包含的点);
    for(i = 0;i<I.Height;i++){//图像中某一行
        for(j = 0;j<I.Width;j++){//图像中某一列
            pixel = I(i,j) //获取像素值
            if(pixel = 255 且点(i,j)未访问)
                if(!TestConnRgn(I,i,j, pVisited, T))
                    //是噪声区域
                    Remove(pVisited); //清除噪声
            初始化 pVisited;
        }
    }
}
```

//递归检测点(i,j)所在联通区域面积是否小于 T

```
bool TestConnRgn(I,i,j, pVisited,T){
    pVisited[i,j] = true; // 点(i,j)加入 pVisited
    if(pVisited 联通区域面积≤T)
        return false;
    if(i-1>=0) //上面点
        pixel = I(i-1,j); //获取像素值
        if(pixel = 255 且点(i-1,j)未访问)
            TestConnRgn(I,i-1,j, pVisited);
    if(i-1>=0 且 j-1>=0 //左上角点
        .....
    if(j-1>=0) //左边点
        .....
    if(i+1<=I.Height 且 j-1>=0) //左下角点
        .....
}
```

```
if(i+1<=I.Height) //下面点
    .....
if(i+1<=I.Height 且 j+1>=0) //右下点
    .....
if(j+1>=0) //右边点
    .....
if(i-1>=0 且 j+1>=0) //右上点
    .....
if(pVisited 组成的联通区域面积>T)
    return true;
}
```

## 2 标定算法

### 2.1 Hough 变换

Hough 变换就是一种检测间断点边界的方法。它通过将图像坐标系下各个像素点变映射到参数坐标系,实现了直线和曲线的拟合<sup>[10]</sup>。

$$y = kx + b \quad (2)$$

这条直线在极坐标系中可用  $\rho$ ,  $\theta$  两个参数表示,  $\rho$  代表原点到直线的距离,  $\theta$  代表  $x$  轴逆时针旋转到直线垂线的角度, 如图 5(a)所示。通过推导, 可得极坐标系中直线的参数方程, 如式(3)所示:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3)$$

其中, 可认为  $(x, y)$  是常量, 而  $\rho$ ,  $\theta$  是变量。这对于图像二维直角坐标系中的两点  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$ , 分别对极坐标系中的两条曲线, 且相较于点  $(\rho_0, \theta_0)$ , 如图 5(b)所示。因此, 给定图像坐标空间中的一些点, 就可以通过 Hough 变换确定连接这些点的直线方程。

具体计算时, 可以将极坐标参数空间离散化。建立一个二维累加数组  $A(\theta, \rho)$ , 第一维的范围是图像坐标空间中  $x$  轴逆时针旋转到直线垂线的角度  $\theta$  可能取值, 第二维的范围是图像坐标空间中直线到原点的距离  $\rho$  的可能取值。开始时,  $A(\theta, \rho)$  全部初始化为 0, 然后对图像空间中的每个前景点  $(x_i, y_i)$ , 将离散空间中的每个  $\theta$  的离散值带入式(3), 计算出对应的  $\rho$  值。每计算出一对  $(\theta, \rho)$ , 都将累加数组中的对应元素  $A(\theta, \rho)$  加 1。所有计算都结束后, 在离散的参数空间中找到  $A(\theta, \rho)$  的最大峰值, 所对应的  $(\rho_0, \theta_0)$  就是原图像中共线点数目最多的直线方程的参数; 接下来可以

继续寻找其他峰值, 他们对应原图像中其他的直线, 只是共线点数目略少一些. 上述的二维累加数组  $A$  也常常被称为 Hough 矩阵.

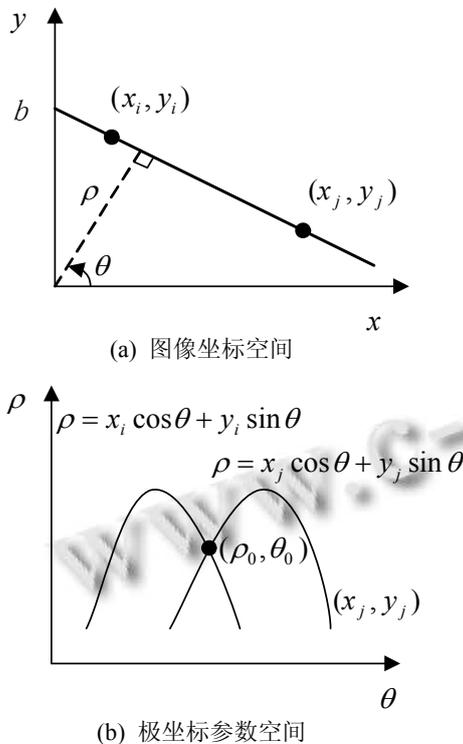


图 5 直角坐标系到极坐标系的 Hough 变换

### 2.2 图像标定

经过前述处理得到的刻度线经常会出现间断, 不连续. 因此需要对这些间断的刻度线进行连接. 由此, 基于上述 Hough 变换进行刻度线的检测, 并给出标定方法, 步骤如下:

- 1)Hough 变换: 对图 4 进行 Hough 变换, 得图 6 所示 Hough 矩阵, 横纵坐标分别为  $\theta, \rho$ .
- 2)Hough 矩阵峰值筛选: 挑选 Hough 矩阵中值大于一定阈值的峰值, 采用如图 6 的白框标示.
- 3)刻度线平行性筛选: 由于所有刻度线都是平行的, 所以接着对上步获得的峰值按照平行性进行筛选. Hough 变换后, 平行的直线对应的  $\theta$  相同, 即它们的峰值应在 Hough 矩阵的同一列上. 首先将获得的峰值按照  $\theta$  进行分组, 然后选中这些分组中数目最大的一组. 针对图 4, 则选出的峰值是图 6 中所示的那一列  $\theta$  值在 0 附近的用白框标示的峰值.
- 4)线段拼接, 线段长度筛选: 找到峰值对应的线段, 并对间隔小于一定距离的, 并且在同一条直线上

的线段进行拼接. 然后再对得到的线段按长度进行筛选, 即剔除长度小于一定阈值的线段, 以此去掉短刻度线而保留长刻度线. 标定效果如图 7 所示.

5)寻找相距最远的刻度线: 即寻找得到的直线中对应的  $\rho$  最大的两条线段,  $\rho$  值最小的两条线段. 并统计所有长刻度线的数量  $N$ .

6)计算标定系数: 令  $\rho_1^{\max}, \rho_2^{\max}, \rho_1^{\min}, \rho_2^{\min}$  分别表示计算  $\rho$  最大的两条线段和最小的两条线段长度, 则标定系数可由式(4)计算:

$$\lambda = \frac{N/2 - 1}{(\rho_1^{\max} + \rho_2^{\max})/2 - (\rho_1^{\min} + \rho_2^{\min})/2} \quad (4)$$

7)判断系数是否满足要求: 针对同一摄像头, 在同一焦距下, 通过多次的标定可知标定系数  $\lambda$  的值只会在一个小的范围  $[p, q]$  内波动. 对  $\lambda$  进行判断, 若在范围之内则结束, 反之, 则报错, 重新标定.

整体的算法流程如图 8 所示. 对图 2 进行标定, 计算得到的标定系数  $\lambda = 6.554 \times 10^{-4}$ , mm/pixel(毫米每像素, 保留三位小数).

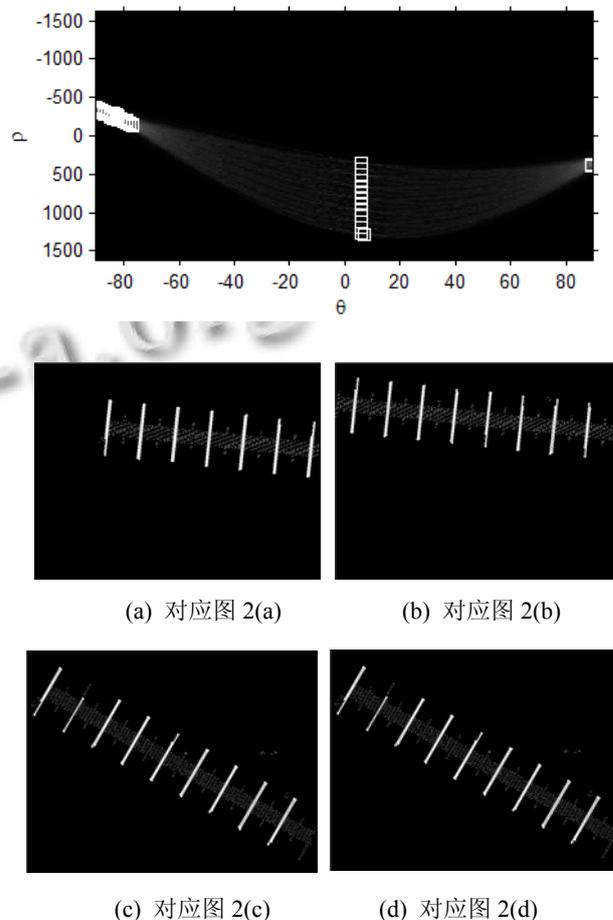


图 7 标定效果图

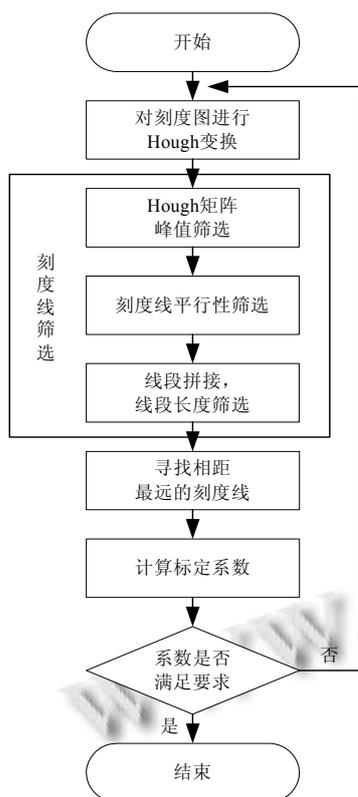


图 8 基于 Hough 变换的标定算法流程

### 3 实验结果与分析

为了分析本标定方法的误差, 在同等条件下拍摄了 10 张标准标尺图, 使用刚才测得的标定系数计算标尺图像中相距最远的刻度线之间的距离, 结果如表 1 所示. 可以看出本文中的标定方法误差最大为 1.3%, 在可接受范围之内.

表 1 标定实验结果

图片序号	测得刻度数量	实际距离 (mm)	标定距离 (mm)	误差
1	70	0.7	0.6911	1.30%
2	80	0.8	0.7930	0.80%
3	60	0.6	0.6013	0.20%
4	60	0.6	0.6010	0.20%
5	60	0.6	0.6006	0.10%
6	60	0.6	0.6000	0.00%
7	80	0.8	0.7904	1.20%
8	80	0.8	0.7917	1.00%
9	70	0.7	0.6929	1.00%
10	70	0.7	0.6917	1.10%

### 4 结语

本文并结合显微测量系统的特点, 阐述了一种标定方法: 首先通过高斯-拉普拉斯算子和联通区域检测分离出图像中的刻度线, 然后采用一种基于 Hough 变换的标定算法, 利用刻度线对图像进行标定, 计算出标定系数. 标定物比较容易获取, 因此本算法方便实用. 实验结果表明, 本标定算法精度较高.

### 参考文献

- 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-54.
- Zhang Z, Matsushita Y, Ma Y. Camera calibration with lens distortion from low-rank textures. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2011. 2321-2328.
- Sun Q, Hou Y, Tan Q. A new method of camera calibration based on the segmentation mode. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(24): 6991-6995.
- Birbach O, Bauml B, Frese U. Automatic and self-contained calibration of a multi-sensorial humanoid's upper body. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2012. 3103-3108.
- Chandraker M, Agarwal S, Kriegman D, et al. Globally optimal algorithms for stratified autocalibration. International Journal of Computer Vision, 2010, 90(2): 236-254.
- Heinrich SB, Snyder WE, Frahm JM. Maximum likelihood autocalibration. Image and Vision Computing, 2011, 29(10): 653-665.
- Geng LC, Li SZ, Su SZ, et al. A new camera self-calibration method based on CSA. IEEE Conference on Visual Communications and Image Processing (VCIP). 2013. 1-6.
- Chen S, Li Y, Kwok N M. Active vision in robotic systems: A survey of recent developments. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(11): 1343-1377.
- 孟宇, 付贤杰, 刘立. 基于主动视觉的测距方法. 中南大学学报, 2013, 44(s2): 273-278.
- 陈宁, 赵鹏. Hough 变换在数码印花飞线检测中的应用. 计算机系统应用, 2013, 22(2): 182-185.