

# 计算机视觉在轮缘磨损检测中的应用研究

周树民 阮秋琦

(北方交通大学信息科学研究所, 北京 100044)

**摘要** 为了提高轮缘磨损测量的精度和检测速度, 首先综合了当前的一些摄像机定标算法, 在实验的基础上, 针对工程实际中对算法的要求, 提出了一种处理过程较为简单的定标处理算法, 然后, 在简单微分算子和经典的八邻域搜索法的基础上, 提出了一种新的边界生长方法, 实验证明, 此定标算法不仅实现简单, 而且能够满足工程上的精度要求, 边界生长算法处理速度快, 而且对边界的提取效果也良好, 具有一定的实用价值。

**关键词** 定标算法 边界生长算法

**中图分类号**: TP391.41 **文章标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2002)10-1094-05

## A Study on Applying Computer Vision in Detection of Wheel Wear

ZHOU Shu-min, RUAN Qiu-qi

(Institute of Information Science, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract** To obtain high accuracy and real time processing in wheel wear detection, firstly, the article put forward a method of camera calibration based on the previous research, which simplified the computation in camera calibration by use of the special features in this imaging system; secondly, it suggested a new edge growing method based on easy differential algorithm and the classical 8 neighbor fields method, in which the neighbor area of a pixel on the wheel edge is analyzed in detail and then the method was put forward according to the special character of wheel image. It has been verified by the test on spot that the calibration algorithm is easy to be realized and can meet the accuracy requirement and that the edge growing algorithm is fast enough to be processed in real time and can obtain the better tracking result. In a word, the algorithms are effective and of a certain value.

**Keywords** Calibration algorithm, Edge growing algorithm

## 0 引言

目前在我国铁路现场, 对列车轮缘磨损的检测主要还是以手工和静态检测为主, 这样检测效率低, 而且作业条件也受限制, 比如一些中心城市的地下铁道上, 就不方便进行现场人工检测, 随着经济 and 科技的发展, 列车的车速将不断提高, 地下铁道的普及率也将会越来越高, 如何有效地实现轮缘磨损的自动检测, 成为一个迫切需要解决的问题。国内已经有一些关于这方面的研究和报告<sup>[1]</sup>, 它们多是将拍摄到的轮缘图象利用计算机处理来获得数据。在借鉴前人研究的基础上, 综合当前的一些摄像机定标算

法, 提出一种基于实验的摄像机定标方案, 此外, 针对系统的实时性要求, 还提出了一种边界生长的新方法, 并且在此基础上, 再利用亚像素图象处理技术进行像素点重新精确定位, 从而获得较高的测量精度。理论和实验证明, 这些算法是行之有效的。从现场试验所得到的数据来看, 整个系统的处理精度可以满足工程要求, 处理速度也能达到铁路现场的动态处理要求。

## 1 摄像机定标

摄像机定标过程实际上是一个确定摄像机内外参数的过程。关于这方面已经有比较成熟的理论和

算法,国内外学者和专家们都对此进行了比较系统的研究.按照算法的求解过程来分,主要有以下几类方法<sup>[2]</sup>:

(1) 直接非线性求解 该类方法直接利用图象点和物体点三维空间坐标的变换来求解.该算法考虑的像差比较全面,但需要选用初值来进行迭代,如果像差模型选择得不当,会导致结果不收敛.

(2) 通过中间变量 将非线性求解转化为线性求解.这种方法不能考虑摄像机的系统误差,从而定标精度比较低.

(3) 分步解法 该方法最初是由 Tsai 提出的,后来经过了多人的研究和发展,目前主要存在以下几种做法:一是,先解线性方程组,通过靠近图象中心的点来获得一个比较好的初值,然后再进行迭代,求出其他的参数;二是,解线性方程组求出近似解,然后再利用上面的中间参数来获得另一个线性方程组,通过一些约束条件来求解另外的参数<sup>[2]</sup>,这种做法尽管不用迭代求解,但是所求解的线性方程组是一个有无穷多解的方程组,这就需要根据一些约束条件来进一步求解,因此,整个求解过程较为繁杂.

本测量系统的定标要求有相对较高的精度和较好的系统稳定性,上述的两种方案不能适用.根据本测量系统的要求,只需要对部分外部参数和内部参数进行标定(其他的都可以通过测量得到),故将第 3 种方法应用于简化后的定标模型,并采用了文献<sup>[3]</sup>中的畸变模型,这样既避免了过多考虑畸变项而带来的算法不稳定,又不用解较为繁杂的线性方程,从而简化了定标的处理过程.经过实验验证,其定标的精度也能满足实际的要求.

摄像机模型普遍采用针孔近似模型,其模型可用如下公式描述:

$$\frac{x_c}{z_c} = \frac{u}{f} \quad (1)$$

$$\frac{y_c}{z_c} = \frac{v}{f} \quad (2)$$

这里摄像机坐标系中的  $X$  轴和  $Y$  轴,分别和图象坐标系的  $X$  轴和  $Y$  轴平行, $Z$  轴垂直于图象平面,并和主光轴重合,其中, $f$  是镜头焦距, $u$  是图象坐标系的横坐标, $v$  为纵坐标, $x_c, y_c$  是物体在摄像机坐标系中的  $X, Y$  坐标, $z_c$  是物体距镜头的距离.当摄像机的光心不与图象中心重合时,则需要在图象坐标中加入原点偏移量 $(x_0, y_0)$ ,考虑到实际定标中使用的为图象像素坐标,所以,式(1)、式(2)可表示为

$$\frac{x - x_0}{fs_u} = \frac{x_c}{z_c} \quad (3)$$

$$\frac{y - y_0}{fs_v} = \frac{y_c}{z_c} \quad (4)$$

此外,在不考虑像差的情况下,摄像机坐标系和物体所在的三维空间坐标系间的变换如下

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(3)、式(4)代入式(5)中,可得

$$\frac{x - x_0}{fs_u} = \frac{r_1x_w + r_2y_w + r_3z_w + t_x}{r_7x_w + r_8y_w + r_9z_w - t_z} \quad (6)$$

$$\frac{y - y_0}{fs_v} = \frac{r_4x_w + r_5y_w + r_6z_w + t_y}{r_7x_w + r_8y_w + r_9z_w + t_z} \quad (7)$$

其中  $x_w, y_w, z_w$  是物体的三维空间坐标; $t_x, t_y, t_z$  是三维空间坐标相对于摄像机坐标系的原点平移; $r_1$  到  $r_9$  由空间坐标系和摄像机坐标系坐标轴间的旋转夹角决定; $s_u, s_v$  为图象平面的水平和垂直标度因子.

就本测量系统而言,由于不考虑摄像机坐标系和物体坐标系之间的旋转,只考虑平移,因此  $r_1, r_5, r_9$  为 1,其他的都为 0,此外,令原点和摄像机坐标系的原点重合,则  $z_w = 0$ ,式(6)、式(7)可简化为

$$x + c_1x_w = c_2 \quad (8)$$

$$y + c_3y_w = c_4 \quad (9)$$

其中,  $c_1 = -f_u/t_x, c_3 = -f_v/t_x, c_2 = x_0 + f_u t_x/t_z, c_4 = y_0 + f_v t_y/t_z; f_u = fs_u, f_v = fs_v$ .

这样就可以通过最小二乘法,先利用靠近图象中心的控制点坐标和对应的图象坐标,求出摄像机的水平和垂直标度因子.在实验中发现,图象平面的水平和垂直原点偏移可近似视为 0<sup>[4]</sup>,即  $x_0 = 0, y_0 = 0$ ,所以从上面求出的  $c_2, c_4$  中,可进一步解出  $t_x, t_y$ .

以上是在近似无像差的假设下求出了摄像机镜头的部分内部参数.但实际的摄像机镜头由于各种因素,必然存在像差,根据像差模型<sup>[4]</sup>,有

$$u = \tilde{u} + \delta_u \quad (10)$$

$$v = \tilde{v} + \delta_v \quad (11)$$

关于像差的类型,有不同的分类方法<sup>[3,5]</sup>,在实验的基础上,根据几何特征将其分为径向畸变( $r^2, r^4, r^6, \dots$ ),切向畸变( $3x_r^2 + y_r^2, x_r y_r$ )和薄透镜畸变 3 类像差<sup>[5]</sup>,其中  $r$  为像素到透镜光心的距离, $x_r, y_r$  是以透镜光心为原点时像素的坐标.针对 16mm 和 25mm 普通 CCD 摄像机在 500mm 处拍的定标网格进行计算分析后发现,引起畸变的主要有径向 2 次

畸变和切向畸变。所以根据式(10)、式(11)的像差模型,在考虑畸变后,式(6)、式(7)可表示为

$$\tilde{u} + k_2 r^2 - p_1(3\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) + p_2 \tilde{u}\tilde{v} = f_u \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w - t_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + t_z} \quad (12)$$

$$\tilde{v} + k_2 r^2 + p_1(3\tilde{v}^2 + \tilde{u}^2) + p_2 \tilde{u}\tilde{v} = f_v \frac{r_4 x_w - r_5 y_w + r_6 z_w + t_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + t_z} \quad (13)$$

其中,  $r = \sqrt{u^2 + v^2}$ , 经过第1步的求解,式(12)、式(13)中的右边都已经成为了已知数,可以利用最小平方误差准则求解出畸变系数  $k_2, p_1, p_2$ 。

利用上述矫正方案,对在500mm处用16mm镜头拍摄的边长为10mm的正方形网格图案,取140组对应控制点,并且利用亚像素图像处理技术中的形学法<sup>[6]</sup>进一步提高控制点定位的精度。利用二维图象定位精度来评价定标的优劣

$$D_{uv} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|m_i - \tilde{m}_i\|^2} \quad (14)$$

其中,  $N$  为随机抽取的点的个数,  $m_i, \tilde{m}_i$  分别为实际三维物体的二维投影坐标和定标后用图象坐标来估计得到的坐标。实验中,取  $n$  组对应点,由式(14)计算得到经过矫正后的定标误差如表1所示。

表1 经过矫正后的定标误差( $n$ 为选取点的个数)

$n$	$D$
10	0.169
20	0.171
30	0.174
40	0.167
50	0.168

从表中数据可以看出,定标精度大约在0.17mm左右。原来图象的最大畸变为0.66mm,可见,本矫正算法对于图象畸变的修正,效果明显。

## 2 一种基于简单算子的边界生长方法

由于本测量系统要求能够实时处理,所以尽管存在能够提取出单像素宽边缘的算子(如LOG算子),但由于它的处理过程要加入耗时较长的滤波操作,因此不能满足本系统的实时要求。鉴于此,在传统的简单算子提取边缘的基础上,针对车轮图象的特殊性,结合经典8邻域法,给出了一种边界生长的新方法。该方法首先对原始灰度图象,用简单微分算子进行二值锐化处理,处理后得到的目标边界一般

是一条线宽大于0,且宽度不均匀的曲线;然后用边界生长算法来得到一个像素宽的边界点集合。该方法的主要难点在于,在边界生长时,如何归纳出在逻辑上完备的各种边界点分布的集合。

### 2.1 边界点定义

$l$  为二值图象中的一条线宽大于0的曲线,令点  $a \in l$ , 则  $a=1; a \notin l, a=0$ 。那么,对于一个图象上的点  $a_i \in l$ , 它的8个邻域像素点中,点是边界点的条件为

$$a_{i-1} \oplus a_{i+1} = 1$$

其中,  $\oplus$  表示模二加。

从上面的定义可以看出,该定义是一个必要条件,而且实际上在一个边界点的8个邻接像素中,满足这个条件的点的个数往往不止一个。设  $a_i$  为一个边界点,  $a_i (0 < i \leq 8)$  是它的8个邻接像素,考虑到边界的连通性,可归纳出所有满足边界点定义的点(候选边界点)的个数情况如下:

- (1) 若  $\sum_{i=1}^8 a_i = 0$ , 那么  $a_i$  为孤立点, 若  $\sum_{i=1}^8 a_i = 8$ , 则  $a_i$  为内点, 此时  $a_i$  不属于边界点集合, 因此若已知  $a_i$  为边界点, 则这种情况可以排除;
- (2) 若  $\sum_{i=1}^8 a_i = 1$  或  $\sum_{i=1}^8 a_i = 7$ , 则  $a_i$  为端点, 在8邻接像素中满足定义的点的个数分别为1和2;
- (3)  $\sum_{i=1}^8 a_i = p, 7 > p \geq 2$ , 具体到每一种  $p$  值, 候选边界点的点数分布如表2所示。

表2 候选边界点个数和  $p$  值的关系

$p$	2	3	4	5	6
候选边界点的个数	2	2,3	2,3,4	2,3,4,5	2,3,4

考虑边界连通性条件,在集合  $\{a_i | a_i = 1, 1 \leq i \leq 8\}$  中,存在一点为当前边界点  $a_i$  的上一个边界点,余下的  $p-1$  个点中,有且仅有一个点为下一个边界点,上面的3种条件下,对于所分析出来的满足边界点条件的8邻域点的不同个数,其可能的组合种类如下:

- (1)  $I=1, 2$  为简单情况,直接可以确定边界点;
- (2)  $I=3, 4, 5$ , 等于3时,有48种组合,等于4时,有38种,等于5,有4种。

证明:

对如图1所示的边界点像素的8邻域图,有3个点满足条件的组合数为  $C_3^2 - C_2^2 = 48$ , 有4个点满足条件的组合数为  $C_4^2 - C_2^2 C_2^2 - C_4^1 = 38$ , 有5个点满

足条件的组合数为  $(C_3^2 - C_2^2 - C_1^2 - C_0^2) \times 0.5 = 4$ , 与上面归纳一致, 故以上的归纳是完备的.

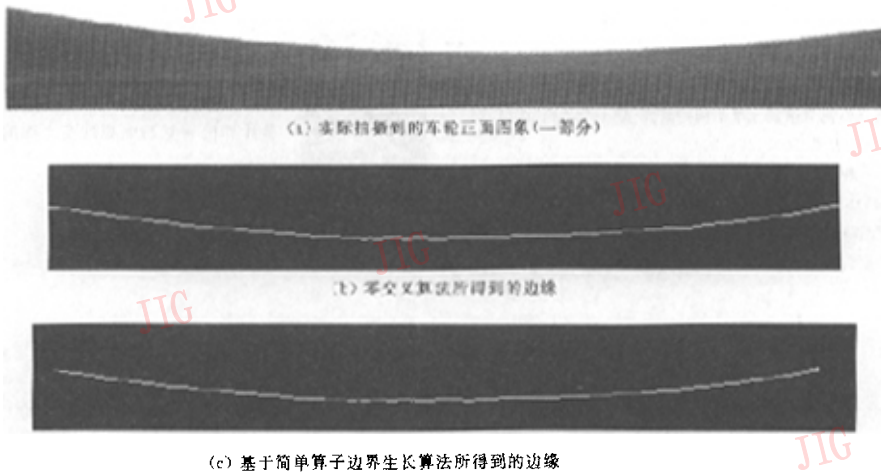


图 1 边界点的 8 邻域示意图

另外, 从实验中得出, 主要存在的候选边界组合情况要远远低于上面所归纳的种类, 而且边界点情

况的出现, 很大程度上依赖于外界的拍摄条件, 如光照强度, 目标物和背景之间的灰度反差等. 所以, 在实际操作中, 只要能够保证拍摄条件的相对稳定, 结合算法归纳出的候选边界点组和要提取的图形边界特性, 该算法还是可以得到比较好的跟踪效果.

图 2 是通过实验得到的零交叉算法和该算法对车轮正面跟踪的结果比较(只截取了含边界线的一部分):



(a) 实际拍摄到的车轮正面图象(一部分)

(b) 零交叉算法所得到的边缘

(c) 基于简单算子边界生长算法所得到的边缘

图 2 实验结果比较

取其中一段有效边界(大约 400 个像素点), 可计算出二者之间的坐标均方误差为 0.057 个像素. 计算公式如下

$$\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{i1} - x_{i2})^2 + (y_{i1} - y_{i2})^2} \quad (19)$$

式中,  $(x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2})$  分别是图 2(a) 和图 2(b) 中边界点像素坐标,  $N$  是像素点个数, 从实验和计算结果可以看出, 二者在边缘的提取效果上基本吻合, 计算时间上, 零交叉算法耗时大约 6746ms, 本文算法的耗时大约 301ms, 以上所有结果都是在 P 300 微机处理的结果. 由此可见, 本算法在运算时间上要大大优于 LOG 算子, 并能够满足实时处理的要求.

表 3 计算与手工得到的测量数据

单位: mm

车轮编号	踏面磨损 (H)	轮缘厚度 (H)	踏面磨损 (C)	轮缘厚度 (C)
1	0.56	32.54	0.29	32.36
2	0.48	31.94	0.24	32.03
3	0.61	31.56	0.52	32.00
4	0.63	32.10	0.50	32.05
5	0.70	32.10	0.48	31.90
6	0.24	32.05	0.39	31.85
7	0.70	31.80	0.65	32.21
8	0.43	32.56	0.21	32.70
9	0.38	31.66	0.08	31.58
10	0.55	31.59	0.37	31.77

制在 0.5mm 以内, 这在工程上可以满足精度要求.

### 3 实验结果

应用以上技术和算法, 现场分别对车轮的正面图象(为车轮正面的一部分)和侧面图象进行处理, 计算得到的测量数据(C)和手工测量数据(H)如表 3 所示.

由这些数据可以看出, 测量系统的精度可以控

### 4 结 论

针对轮缘磨损检测的特殊性, 综合前人的研究成果, 提出了一种计算复杂性适中, 精度也较好的定标算法, 而后又给出一种快速有效的边缘提取算法. 从实验数据可以看出, 算法在精度上能够保证工程

中的应用要求(0.5mm),而且能够取得实时处理的效果,具有一定的实用价值.但是在实际的测试中发现,文中的边缘提取算法并不能绝对保证提取出的是真正的图象边缘,因此在一定程度上降低了测量的精度,这也是日后需要进一步研究的地方.

### 参考文献

- 李文哲. 计算机图像处理技术在铁路车辆车轮踏面磨耗和轮廓磨耗检测中的应用[硕士学位论文][D]. 北京:铁道部科学研究院,1996,7.
- 权铁汉等. 摄像测量系统的高精度标定与修正[J]. 北京:自动化学报,2000,26(6):749~755.
- 舒志龙. 从立体视觉恢复三维结构的研究[硕士学位论文][D]. 北京:北方交通大学,2001:21~29.
- 工亚东等. 一种基于摄像机模型的畸变图象矫正方法[J]. 北京:自动化学报,1997,23(5):717~719.
- 范洪. 3D计算机视觉系统的高精度标定和修正和3D运动信息的准确获取[博士学位论文][D]. 北京:北方交通大学,1992.

- 雷志辉等. 亚像素处理技术在网格法中的应用[J]. 长沙:国防科技大学学报,1996,18(4):17~19.



**周树民** 1978年生,2000年获北方交通大学自动控制系学士学位,现为北方交通大学信息科学研究所硕士研究生,感兴趣的研究方向为计算机视觉、视频编码.



**阮秋琦** 博士生导师,教授,北方交通大学计算机与信息技术学院院长.长期从事计算机视觉和虚拟现实方面的研究.

## Epson 新一代 7 色大幅面打印机 PRO7600/9600

新一代 7 色大幅面打印机 PRO7600/9600 是在原有 6 色墨的基础之上增加了一种新的墨水——淡黑色.通过增加这种墨水,显著地提高了在黑白图像中的层次表现力,使得色阶更丰富,灰平衡效果大幅改善,色彩过渡更加光滑、逼真.

大幅面打印机 PRO7600/9600 有 3 种墨水配置方式可供选择.它们分别是:由照片黑色、淡黑色加上五种必选色(青色、洋红、黄色、淡青色和淡洋红)组成的标准模式,由粗面黑色、淡黑色加上五种必选色组成的美术纸模式和由两种粗面黑色加上五种必选色组成的普通纸模式.3 种配置方案分别适应不同的应用行业,用户可以根据不同的行业应用自由更换配置,而且配置转换简单快捷,大大突破了以前大幅面打印机的应用局限,其中,普通纸模式配置方式,可快速、细致地实现 CAD/GIS 领域中大量黑白打印输出的需求.

此外,大幅面打印机 PRO7600/9600 中实现了最高 2880×1440dpi 的分辨率和颜料墨水中 4pl 的最小墨滴,同时其还应用了智能变换墨滴技术,使打印质量与打印速度得以更好的结合.