

高精度图像测量与对准系统的算法研究

杨丹¹ 刘亚威² 张小洪² 李东²

(重庆大学软件学院¹ 重庆大学数理学院应用数学系² 重庆400044)

Research on the Algorithms of High Accuracy Image Measurement and Registration System

YANG Dan¹ LIU Ya-Wei² ZHANG Xiao-Hong² LI Dong²

(Faculty of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)¹

(College of Mathematical and Physical Science, Chongqing University, Chongqing 400044)²

Abstract In this paper a new high accuracy image measurement and registration system design is proposed, in which edges of image in pixel are detected by improved Canny operator, edge points are recorded by an auto-tracing algorithm, edges in sub-pixel are located by spatial moment-based operator. The object parameters are calculated by means of Least Squares and the accuracy is improved by a proposed algorithm. Finally an automatic detection, recognition and measurement algorithm is proposed. The simulation experiment on a standard circle shows the properties of validity, feasibility about the design and algorithm proposed.

Keywords Image measurement, Edge detection, Edge tracing, Registration, Sub-pixel, Space-moment, Least squares method

0 引言

现代高精度加工系统中,常常需要对被加工工件的尺寸进行实时检测和控制。当工件处于高速运动或人无法接近的环境时(如激光照射),传统的接触式测量无法进行,而光学式测量仪在性能指标上又不能满足实际需求,因此需要一种高精度的测量系统。图像测量技术正是顺应这样的需求产生和发展起来。图像测量技术^[1]是以光学为基础,融合电子学、计算机技术、激光技术、图像处理技术等为一体的综合技术,被广泛应用于几何量检测、航空等遥感测量、精密复杂零件的尺寸测量和外观测量,以及光波干涉图、应力应变场状态分布图等和图像有关的技术领域中。

图像处理技术是整个图像测量与定位的关键,而图像处理算法的优劣直接决定整个系统的测量精度。本文在对各种算法深入分析研究的基础上,介绍了一套新的系统设计方案,对核心算法进行了深入研讨,并通过仿真对系统算法设计的合理性、可行性进行了验证。

1 图像测量系统原理简介

图像测量系统的结构主要由照明系统、CCD 摄像头、图像采集卡、计算机及其外设等组成,如图1所示。

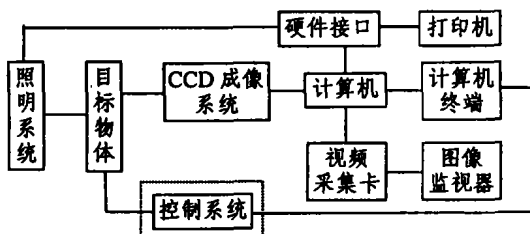


图1 图像测量与对准系统结构框图

为了实现目标定位,对 CCD 采集的图像通常要做如下处

理。

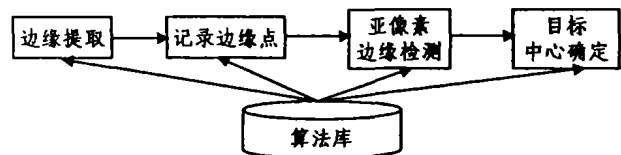


图2 测量系统中的图像处理过程

整个图像测量系统的核心是算法的设计,算法的好坏直接影响系统的性能和效率。目前针对图像测量系统的研究也多着眼于各种算法的改进。

2 算法实现

下面对测量系统中各种算法进行讨论。

2.1 改进型 Canny 算法的实现

像素级边缘检测是图像测量系统中的基本算法,被用于目标的初始检测。目前经典的边缘检测算法可满足图像质量较好、精度要求不高的图像测量需求。其中 Canny 边缘检测算子^[2]提出了迄今为止定义最为严格的边缘检测的三个标准,即好的信噪比、好的定位精度和单边响应准则,加之其相对简单的计算使其在边缘检测中得到了广泛应用。然而,传统 Canny 算子在对图像做 Gauss 平滑时边缘被当成高频成分损失很大,而且有些边缘还将成为缓变边缘,这在灰度直方图表现为灰度受到压缩,而在非极大值抑制时缓变的边缘将被丢失。为此,我们提出了如下的改进型 Canny 算子。

由数据拟合的理论分析表明,如果只需要平滑后的二阶导数,那么最佳的卷积核是四阶中心 B-样条函数,而不是高斯函数。由于 Canny 算法中的求梯度只需要二阶导数,因此,平滑滤波器采用 B-样条滤波器,平滑滤波后对图像做一线性变换(灰度拉伸),以增加灰度的动态分布范围。算法步骤为:

Step 1 用中心 B-样条函数平滑图像: $I = I * B$;

杨丹 教授,博士,主要研究方向:数字图像处理、科学与工程计算、软件工程。刘亚威 硕士,主要研究方向:数字图像处理及计算机视觉、工程计算、系统优化。张小洪 硕士,主要研究方向:数字图像处理及计算机视觉、小波分析。

Step 2 对平滑后的图像作一次线性变换: $I = aI + b$;

Step 3 $I = \frac{\partial}{\partial n} G_n * I$;

Step 4 求局部极大值点, 并把其标为边缘点:

$$\frac{\partial}{\partial n} G_n * I = 0, \text{ 即: } \frac{\partial}{\partial n^2} G * I = 0;$$

Step 5 通过双阈值法去掉伪边缘。

其中: I 表示灰度图像, B 表示中心 B -样条函数, G 表示二维高斯函数, $G_n = \frac{\partial G}{\partial n} = n \nabla G$ (其中 $n = \frac{\nabla(G * I)}{|\nabla(G * I)|}$, $\nabla G = (\frac{\partial}{\partial x} G, \frac{\partial}{\partial y} G)$)

对同一幅原始和加噪图像分别采用 Canny 算法和改进 Canny 型算法做边缘检测的对比表明, 改进算法提取的边缘更加丰富和清晰、信噪比较高^[3]。

2.2 自动边缘追踪算法的实现

对原图像经过改进 Canny 算法处理后得到的是像素级边缘灰度图(一般为二值化图像)。为了进一步准确定位目标, 必须记录灰度图中物体的边缘坐标。最普通常用的方法是盲目搜索法, 即从图像左上角开始按从上到下、从左到右的顺序搜索, 遇到灰度值为0(二值化图中对应边缘)时记录下来, 形成一个边缘坐标链表。这种方法的缺点很明显: 速度慢, 效率低; 不能排除虚假边缘; 由此带来的亚像素定位精度差。

基于目标边缘总可以用一个(边缘连续)或多个(边缘有断点)通路来遍历的事实, 寻求高效的边缘追踪算法。对于一个灰度图像, 除去图像边界像素外, 每个像素周围有8个像素与其相邻。进而引进 N -近邻概念(N -近邻具体可分为两类: 一种是以边相邻, 称为边近邻; 另一种以对角形式相邻, 称为角近邻), 对 N 数值运算都假定为模8运算。对一个像素 P , 给出其近邻关系图^[4], 如图3所示。

3	2	1
4	P	0
5	6	7

图3 像素 P 的8邻近图

对二值化图像中所有边缘进行追踪, 则可利用追踪算法^[5,6]到整个图像的边缘。然而二值化图像中可能会含有环境噪声带来的虚假边缘, 这使得记录边缘的过程复杂化。因此, 为了正确进行追踪必须保证以下两个条件: 每次得到的点是边缘点, 且不能进入内点; 正确区分已跟踪点与尚未跟踪点(作标签)。

2.3 空间矩亚像素细分算法的实现

在实际应用中, 当定位精度要求不高时传统的像素级边缘检测算法可以很好地满足图像测量系统。然而, 随着微细加工的迅速发展, 使得在很多系统对定位精度要求大大提高, 有些情况下达到微米级^[7], 而 CCD 图像的像素当量也最多达到10微米级, 这就要求在相应的图像测量系统中采用更加精确的定位算法—亚像素细分算法。

从70年代开始就有人研究亚像素边缘细分技术, 目前较为成熟的算法有^[8]: 拟合参数方程法、局部表面模型法、非线性插值法、矩法(灰度矩和空间矩)、二值化图像抖动法和已知形状的切线方向法。其中空间矩细分法以计算精度高、计算过程相对简单、不受数据加性和乘性因素影响等诸多优点在高精度图像测量系统中得到广泛应用。然而, 在空间矩算法中采用二级边缘模型公式近似计算更接近实际的三级边缘模型的

边缘, 进而带来了所谓的原理误差。对于某给定的图像采用窗, 传统的做法采用对于角度和边缘按一定的间隔采样构成的合成边缘构造的二维误差校正表来补偿原理误差^[9,10]。但由于二维校正表的引入使得算法的复杂度提高, 具体表现在误差校正表的构造(并且当采用窗变化时, 必须重新构造校正表)和二维校正表的查找(落在采样间隔中时需插值计算)上。

通过分析空间矩亚像素细分算法原理误差的起因, 我们推导了误差校正函数的显式表达, 并给出了误差校正函数的重要性质。下面就误差校正函数给出简单介绍, 具体推导过程可以参看文[11]。图4给出了理想三级边缘模型, 其中 h 代表背景灰度; $h + \delta k$ 代表过渡阶段灰度; 而 $h + k$ 为目标灰度; l_1 和 l_2 为最接近于实际边缘的两个像素级边缘(总是假设 $l_1 < l_2$ 成立); ϕ 为实际边缘法向与水平方向构成的角度。由空间矩算子得到边缘亚像素位置 l_c :

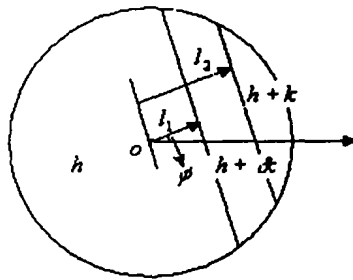


图4 理想三级边缘模型示意

$$l_c = \frac{\Delta 1}{\Delta 2}$$

$$\Delta 1 = \cos^2 \phi [bl_1 F(l_1, \frac{3}{2}) - bl_2 F(l_2, \frac{3}{2}) + \frac{1}{2} l_2 F(l_2, \frac{3}{2})] + \sin^2 \phi [-\frac{1}{3} bl_1 F(l_1, \frac{3}{2}) + \frac{1}{3} bl_2 F(l_2, \frac{3}{2}) - \frac{1}{3} l_2 F(l_2, \frac{3}{2})]$$

$$\Delta 2 = \cos \phi [-bF(l_2, \frac{3}{2}) + bF(l_1, \frac{3}{2}) + F(l_2, \frac{3}{2})]$$

其中: $F(x, p) = (1 - x^2)^p$ $b = \frac{\delta k}{k}$

现在就可以估计出亚像素位置 l_c 相对实际边缘 l 的偏差, 即原理误差函数 $E(l, \phi)$:

$$E(l, \phi) = l - l_c = l - \frac{\Delta 1}{\Delta 2}$$

实验表明, 在空间矩亚像素定位中使用误差校正函数进行原理误差补偿, 不但避免了使用校正表带来的计算复杂度高、存储量大以及重用性低等缺点, 而且定位精度明显提高。经过 5×5 的空间矩模板算子检测, 并用误差函数校正后的最大误差不超过0.0003像素单位^[11]。从而对空间矩算子实现了很好的修正。

2.4 目标参数定位算法的实现

在高精度加工生产中, 定位工件的准确性直接影响加工的精度。利用数字图像测量的最终目的也是为了定位目标物体在视场中的位置, 而目标物体的位置又表现为物体的几何参数。多数情况目标物体是圆形、椭圆形、矩形或三角形等规则几何形状, 它们的几何参数都可以统一为中心, 也就是图像测量系统的最终目的就是目标物体的图像信息中得到相应物体的中心。CCD 摄像头得到的图像经过了各种预处理后, 最后就是要利用物体边缘亚像素信息确定目标物体的中心。

激光光斑中心检测^[12]是圆形目标物体几何中心定位的有效算法。传统的光斑中心检测算法有重心法、中值法及 Hough 变换法, 前两种算法要求光斑图像分布比较均匀, 否

则将会产生较大误差,后一种算法计算复杂度较高,且精度不理想。实际中,由于存在散斑、被测物体面反射特性不均匀以及受光学系统的影响,导致光斑信号强度分布极不均匀,而且一般测量中对实时性要求较高,因此上面提到的算法不再适用。下面介绍的是一种近年较常用的光斑中心检测算法—最小二乘法^[13]。

圆的方程可以描述为:

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2$$

$$\begin{cases} a = \frac{(\bar{x}^2\bar{x} + \bar{x}\bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - (\bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}\bar{y}^2 - \bar{x}^2\bar{y} - \bar{y}^3)(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \\ b = \frac{(\bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}\bar{y}^2 - \bar{y}^3 - \bar{x}^2\bar{y})(\bar{x}^2 - \bar{x}^2) - (\bar{x}^2\bar{x} + \bar{x}\bar{y}^2 - \bar{x}\bar{y}^2 - \bar{x}^3)(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \\ r = \sqrt{a^2 - 2\bar{x}a + b^2 - 2\bar{y}b + \bar{x}^2 + \bar{y}^2} \end{cases} \quad (*)$$

利用上述公式对边界点循环一次就可以计算出各参数,时间复杂度为 $o(n)$ 。为了去噪,很多情况下,我们可以由上面得到的三个参数计算平均残差平方和 $Q = Q / \sum_{i=1}^m i^{[13]}$,然后采用我们提出的如下方法,简化计算,提高检测精度。

设 E 为边界点集合, (a,b) 为圆心, r 为半径, $Distance$ 为边界点与圆心的距离, $Threshold$ 为测量边界点与实际边界点的最远距离。

Step1:初始化 $Threshold$,利用公式(6.3.7),由边界点集 E 计算初始参数 a,b,r ;

Step2:对 $\forall (x,y) \in E$,计算 (x,y) 与圆心 (a,b) 的距离 $Threshold$,如果 $Distance \geq r + Threshold$, or, $Distance \leq r - Threshold$,则

$$E \leftarrow E / (x,y)$$

Step3: $Threshold \leftarrow Threshold - 1$;利用公式(*),由边界点集 E 计算 a,b,R ;

Step4:如果 $Threshold < 2$,则停止,否则,转Step2。

上述算法不但可以提高测量精度,而且具有很好的抗噪能力,并为自动化检测和测量圆的算法提供了基础。

2.5 自动测量算法

我们利用在小尺度下检测到的边缘定位精度高,在大尺度下检测的边缘较真实且光滑、抗噪能力强的特性,提出了如下自动测量算法。

设图像为 I ,自动检测圆和测量圆参数的算法(ADM)如下:

Step1:对图像 I ,用小波多尺度积算法提取边缘;

Step2:用圆的识别方法,去识别圆,并确定圆所在的区域 A ;

Step3:在区域 A 内用改进的Canny算法对图像 I 做边缘提取,得边缘图 I' ;

Step4:在边缘图 I' 内,设区域 A 内的所有边界点为 E ,用测量圆的方法计算圆的参数,同时去掉噪声点,得到最终的边缘。

注意:在Step1,所选择的尺度为4就可以了,对噪声的阈值要尽可能的大,另外可以通过边缘连接的方法,把边缘链小于某一个数的边缘当着噪声滤掉。

3 仿真实验

在实验之前需要说明两点:在对目标进行边缘检测之前进行目标物体区域选定,即只对选定区域做相关的图像处理,这样可以降低计算复杂度;在亚像素定位过程中,可根据空间

在此,取残差为:

$$\epsilon_i = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2$$

上式中 $i \in E$, E 表示所有边界的集合, (x_i, y_i) 为图像边缘点坐标,由边缘追踪得到。那么残差平方和函数为:

$$Q = \sum_{i \in E} \epsilon_i = \sum [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2$$

根据最小二乘法原理可以解出三个未知参数:

矩算子的量化精度误差性质^[15]对参加定位的边缘点取舍,进一步提高图像测量系统的定位精度。图4是一幅是由画笔生成的仿真灰度图像,其目标为标准的圆,且原始图像只有三级灰度,由里到外依次为99、126和190。目标物体几何参数已知:圆

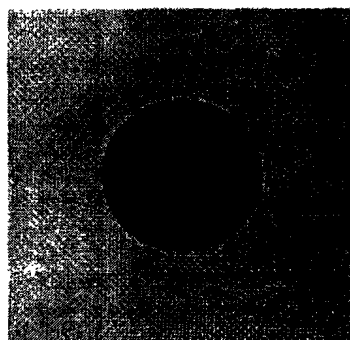


图4 原始图像

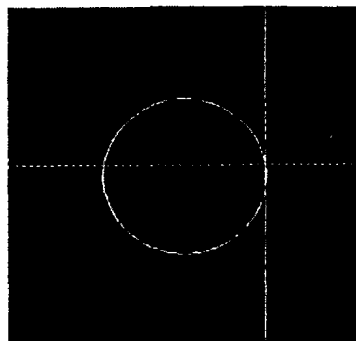


图5 边缘检测和追踪后图像

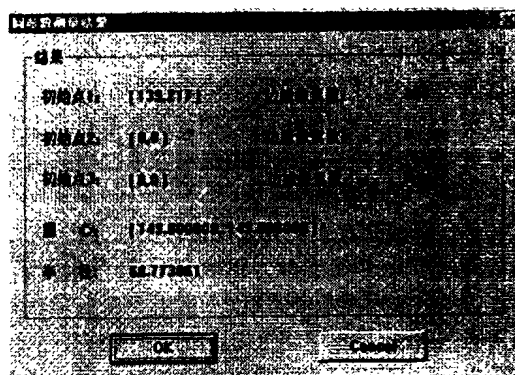


图6 几何参数定位结果

心坐标为(149.0000,149.0000),半径为69.0000(均以像素为单位)。实验中给出了对原始图像进行处理的过程和定位结果,下面我们以列表的形式给出测量算法对于仿真图像分别在无噪声、高斯噪声($\mu=0, \sigma=0.02$)、脉冲噪声(脉冲概率为20%)和乘性噪声(方差为0.1)下的各项指标和定位结果。

表1 仿真实验数据

图像 指标	原始图像	高斯噪声 图像	脉冲噪 声图像	乘性噪 声图像
初始点	(137,217)	(139,217)	(99,195)	(127,214)
进缘像素数	388	388	389	389
中心坐标	(149.0000, 149.0000)	(148.9860, 149.0762)	(149.0826, 149.1241)	(148.9117, 149.0904)
半径	68.7800	68.8425	68.6892	68.7528
中心偏差	(0.0000, 0.0000)	(0.0140, 0.0762)	(0.0826, 0.1241)	(0.0883, 0.0096)

从表1中数据可以看出,对于原始仿真图像,定位目标中心没有产生偏差。表1实验数据仍然表明系统算法对于各种噪声不敏感。虽然噪声的加入使得实际的边缘点数发生细微变化,但这并不影响定位精度,在常见的三种噪声干扰下,目标中心的偏差总是不超过0.15个像素。同时也注意到,系统检测目标半径的偏差还是较大,最大是接近0.3个像素。然而由于ICF图像测量系统的特殊要求,在实际应用中我们更为关心的是圆形目标物体的中心坐标,半径偏差不是我们所考虑的,它也不会对后面的控制产生影响。

结论 在介绍图像测量系统原理的基础上,提出了一种新的系统设计方案。对新系统所涉及的各种算法进行了深入分析,并就算法在测量系统中的应用做了介绍。仿真实验结果

(上接第79页)

添加删除时间里,前者使用了文档关联算法,括号内则是未使用文档关联算法测出的时间,可见文档关联算法的使用,对添加文档有了较大的影响,而对于删除文档则影响不大。

4.2 查询结果测试

在系统中添加了200篇文档后,我们对系统测试结果如下。

表2 全文检索系统查询结果

编号	结果1	结果2	相关文档数
1	6	6+3	5+3
2	2	2+4	2+4
3	10	10+9	9+8
4	27	27+8	25+7
5	12	12+1	11+1
6	5	5+1	4+1
7	7	7+2	6+2
8	3	3+0	3+0
9	5	5+2	5+2
10	3	3+1	3+1
合计	80	80+31	73+29

这个测试是针对用户给出的关键词信息进行搜索,对于

表明了新系统的合理性,可行性和先进性。

参考文献

- 1 吴晓波. 图像边缘特征分析. 光学精密工程, 1999, 7(1)
- 2 Canny J. A Computational approach to edge detection. PAMI, 1986, 8(6): 699~698
- 3 张小洪, 杨丹, 刘亚威. 基于 Canny 算子的改进型边缘检测算法. 计算机工程与应用, 2003. 12(待发)
- 4 李云, 鲍苏苏, 杨璐. 二值化图像中物体区域的选定及外边缘跟踪技术. 华南师范大学学报(自然科学版), 2002, 8(3): 27~29
- 5 周丽娟, 柳池, 郝瑛. 图像边界自动跟踪的边缘提取算法. 哈尔滨理工大学学报, 1997, (5): 50~53
- 6 惠毓伦, 施泽生. 任意形状二值线图边缘追踪的实现. 青岛大学学报(自然科学版), 1994, 7(2): 58~63
- 7 黄宏一, 丘悦, 范滇元. 靶瞄准中的图像处理. 中国激光, 1998, A25(7): 649~652
- 8 王建国, 浦昭邦, 刘国栋. 提高图像测量系统精度的细分算法的研究. 光学精密工程, 1998, 6(4): 44~50
- 9 Lyvers E P, Mitchell O R. Subpixel measurements using a moment-based edge operator. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell, 1989, 11(12): 1293~1308
- 10 王建国, 浦昭邦, 尹继学. 空间矩亚像素细分算法的研究. 光学技术, 1999(4)
- 11 刘亚威, 杨丹, 张小洪. 基于空间矩的亚像素边缘定位技术的研究. 计算机应用, 2003, 23(2): 47~49
- 12 杨耀权, 施仁, 等. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. 光学学报, 1999, 19(2): 1655~1660
- 13 Thomas, Chan. A Simple Approach For The Estimation Of Circular Arc Center And Its Radius. CVGIP, 1989, 45: 362~370
- 14 孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 275~279
- 15 孔丹. 基于空间矩的灰度边缘亚像素度量精度分析. 红外与激光工程, 1998, 27(2): 6~10

使用和不使用文档关联算法,得到了两个结果(搜索得到的文档数),对于使用文档关联算法的测试,以形如: X+Y 的方式表示,其中 X 是直接搜索关键词得到的文档数,而 Y 是这 X 篇文档的关联文档数(去掉了 X 篇文档中的重复部分)。

表2显示,系统在使用了文档关联算法后,增加了29/80=36.25%关联文档,显著提高了系统的查全率,查准率也得到了提高。

小结 本文介绍了一种基于全文检索的文档关联算法的实现,提高了全文检索系统的查全率和查准率,尤其是属性关联度的应用,提高了关联度计算的准确性,而且丰富了关联度计算的方式,目前该系统已经投入使用。

参考文献

- 1 曹元大, 等. 中文 Web 文档全文检索系统的设计及实现. 北京理工大学学报, 2002
- 2 Mladenic D, Stefan J. Institute Text-learning and Related intelligent Agents. A Survey IEEE 1999
- 3 范焱, 郑诚, 王清毅, 蔡庆生, 刘洁. 用 Naïve Bayes 方法协调分类网页. 软件学报, 2001
- 4 Lawrence S, Bollacker K, Gils C L. Indexing and Retrieval of Scientific Literature 1999
- 5 William Hersh, Paul Over TREC-9 Interactive Track Report 2001