

亚像素检测方法在图像检测点提取中的应用

芦 宁¹, 朱 睎¹, 喻擎苍^{1*}, 冯精武²

(1. 浙江理工大学 信息电子学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 图像检测点的提取是图像定位于检测系统中的关键问题。为解决利用二值细化提取图像检测点技术精度不足等问题, 将亚像素检测定位技术应用到图像检测点提取中。通过试验比较了三种亚像素定位算法图像定位中的优缺点, 进行了通过光条中心线的提取试验以及通过两条光条中心线交叉点提取图像检测点的试验, 对亚像素检测定位技术作出评价。研究表明, 将亚像素检测技术运用到提取结构光图像检测点中, 所达到的精度要高于利用二值细化方法提取图像检测点的提取精度。

关键词: 检测点; 亚像素; 二值化

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)03-0350-04

Sub-pixel detection on extracting image detection point

LU Ning¹, ZHU Kui¹, YU Qing-cang¹, FENG Jing-wu²

(1. College of Electronics and Information, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Extracting image detection point is critical in image location and detection system. In order to solve the problems of the lower accuracy of binarization on extracting image detection point, sub-pixel location was used to extract image detection point. The advantages and disadvantages of three methods of sub-pixel location were proved according experiments. The sub-pixel location was evaluated on the experiments of stripe center line extracting and cross point of stripe center line extracted image detection point. The experiment results show that sub-pixel location is more accurate than the binarization on extracting image detection point.

Key words: detecting point; sub-pixel; binarization

0 引 言

在工作中利用二值细化法^[1]来提取结构光图像中交叉点来获得符号检测点。根据基于交叉点提取算法原理, 以及实际处理时产生的问题, 归纳出算法存在的 3 个方面的不足: ①细化造成交叉点畸变; ②细化造成交叉点偏移; ③提取精度低, 只达到整像素级别, 限制了三维检测精度。

鉴于以上交叉点提取算法存在的不足, 本研究提出了利用亚像素检测方法来提取高精度结构光图像检测点。

1 亚像素定位算法

亚像素定位技术^[2-3]是有假设前提的, 即目标不是

由孤立的单个像素点组成, 而必须是由有特定灰度分布和形状分布的一组像素点组成。目标特征主要分为基于几何特征、基于灰度分布特征和基于几何与灰度耦合特征等 3 类。利用预知的目标特征, 对图像目标进行处理分析、识别, 并确定与目标特征最吻合的位置。利用目标特性从图像中分析计算出最符合特性的目标位置称为图像目标亚像素定位技术。

1.1 亚像素定位一般算法

1.1.1 灰度重心法

灰度重心法是把光条每个截面内像素点的灰度分布质心作为截面的光条中心点。灰度图像 $W(i, j)$ 的目标 S 的灰度重心 (x_0, y_0) 为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in S} iW(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} W(i,j)} \\ y_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in S} jW(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} W(i,j)} \end{cases} \quad (1)$$

1.1.2 多项式插值法

多项式插值法^[4]是设函数 $y=f(x)$ 在区间 $[a,b]$ 上有定义,并且已知在点 $a \leq x_0 < x_1 < \cdots < x_n \leq b$ 上的值 $y_0, y_1, \cdots, y_n$,若存在次数不超过 n 的代数多项式,即:

$$p(x) = a_0 + a_1x + \cdots + a_nx^n \quad (2)$$

其中 a_i 为实数,使得 $p(x_i) = y_i (i = 0, 1, \cdots, n)$ 成立,就称 $p(x)$ 为 $f(x)$ 的插值多项式,求 $p(x)$ 的方法称为多项式插值。

1.1.3 曲线拟合法

结构光与被测物体表面相交形成了具有一定宽度的光条。光条横截面的光强分布是不均匀的,而是近似服从高斯分布,光条中心点是灰度值最大的点^[5-8],如图1所示。曲线拟合法是基于光条截面点的灰度分布近似高斯分布这一特点,利用高斯曲线对其进行曲线拟合,则拟合曲线的局部极大值点即为截面的光条中心点。

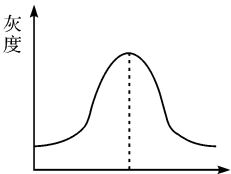


图1 光条截面灰度分布图

高斯分布拟合方法是采用高斯函数去逼近光条的灰度分布,从而计算出光条的中心。

1.2 亚像素定位算法检测实验

试验分别从计算效率、提取精度和窗口大小对算法影响的3个方面,对同一幅分辨率为 122×150 的实际光条图像进行光条中心点提取,实验采集的原始图像如图2所示。

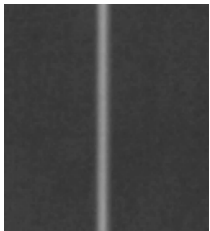


图2 实验原始图像

1.2.1 计算效率比较

试验的计算是由 Borland C++ Builder 6.0 结合 Intel 的 OpenCV 计算机视觉库完成,所用计算机的 CPU 为 Intel(R) Core(TM)2 1.86 GHz 处理器,1 G 内存。3 种算法的运行时间如表1所示。

表1 3种算法计算效率比较 (单位: $\times 10^{-3}$ ms)

算法	运行时间			平均运行时间
	第1次	第2次	第3次	
灰度重心法	414	425	402	414
多项式插值法	671	746	637	685
高斯曲线拟合法	660	775	648	694

从图表中可以看出,灰度重心法的运行时间最短。

1.2.2 提取精度比较

如图3所示是利用灰度重心法、多项式插值法和高斯曲线拟合法提取的光条中心坐标。横坐标为行数,纵坐标为各行的中心点位置,以不同的线型表示不同的提取算法,虚线表示灰度重心法,点划线表示多项式插值法,实线表示高斯曲线拟合法。

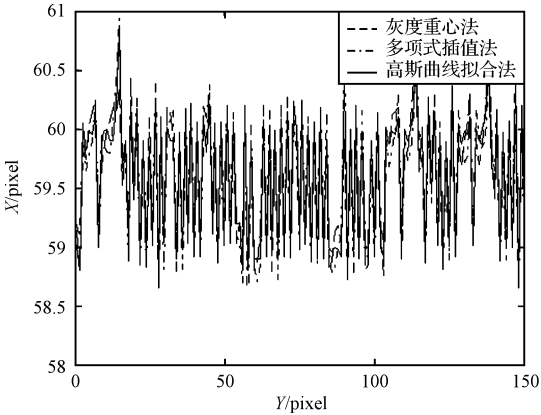


图3 3种算法提取中心坐标图

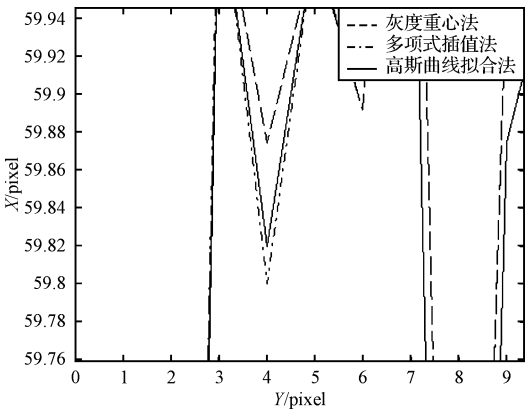


图4 中心坐标放大图(局部)

图3中一部分的放大图像如图4所示,纵坐标可以细分到 0.001 pixel。从图4中可以看出,灰度重心法与多项式插值法求出的坐标值均围绕高斯曲线拟合

法求出的坐标值波动。根据波动理论,参考值总是围绕真实值上下波动。因此高斯曲线拟合法提取的中心点更接近真实值,具有更好的精度。

1.2.3 计算窗口对算法影响

根据误差分析理论,假设被测量的真实值为 d_{real} ,第 i 个($i=1,2,\cdots,n$)测量值为 d_i ,那么 n 个测量值的算术平均值可定义为:

$$d_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \tag{3}$$

均值误差可定义为:

$$E = d_{\text{mean}} - d_{\text{real}} \tag{4}$$

绝对误差均值可定义为:

$$E' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - d_{\text{real}}| \tag{5}$$

标准差可定义为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - d_{\text{mean}})^2} \tag{6}$$

灰度重心法、多项式插值法及高斯曲线拟合法对于不同计算窗口范围,其稳定性有所不同。

3 种亚像素定位算法在 $y=75$ 的光条横截面,对不同的计算窗口提取光条中心点结果如表 2 所示(其中窗口大小指的是提取光调中心的模板的像素值大小,如窗口大小为 5,指的是 5×5 像素大小的模板)。

表 2 3 种算法提取的光条中心比较 (单位:pixel)			
窗口大小	灰度重心法	多项式插值	高斯曲线拟合
5	59.918	59.913	59.914
7	59.901	59.879	59.881
9	59.995	59.856	59.867
10	59.894	59.855	59.860
11	59.896	59.864	59.857
13	59.902	59.861	59.858
15	59.901	59.874	59.873
17	59.903	59.871	59.876
19	59.901	59.857	59.875
均值	59.912	59.870	59.873
标准方差	0.031 7	0.018 2	0.017 7

基于上述 3 种算法的比较分析可知,灰度重心法计算效率最高,但提取精度不高,且稳定性较差;多项式插值法和高斯曲线拟合法计算效率均比灰度重心法要低,但从时间上来看,仍能满足实时性要求;在提取精度上,高斯曲线拟合法具有比多项式插值法更高的提取精度;在稳定性上,高斯曲线拟合法稳定性能最好。鉴于以上分析,选取高斯曲线拟合法作为提取结构光中心点算法。

2 结构光中心点提取方法

2.1 结构光中心点提取流程

试验中采用白底黑字结构光符号图像,结构光中心点提取流程是:首先确定二值后图像的形心位置,然后在单个符号内相邻两形心之间利用高斯曲线对光条中心点附近的灰度数据进行最小二乘拟合,求取拟合函数极小值点数据,确定光条中心点坐标。在确定了所有垂直方向和水平方向上的光条上的中心点后,利用最小二乘曲线拟合属于同一光条上的中心点,反复迭代进而得到光条中心线。

2.2 光条中心点和光条中心线提取

对结构光图像中每个符号确定 5×5 形心坐标处理后,可实现对每段光条截面上拟合区域作粗略定位。根据光条横截面光强分布特点可知,光条中心点为拟合函数极值点。实际图像中,由于噪声的影响,在拟合函数时会引起函数极值的偏移,从而使提取精度降低。因此,为提高光条中心点定位精度,需要对拟合点进行采样,选取有意义的拟合样点。当选取的拟合样点数量太少不足以进行曲线拟合时,将点定位在亚像素位置,并确定亚像素灰度值。

通过上述方法检测到的实际上是光条中心的点列,为了获取光条中心线,需要将中心点进行拟合。对中心点进行拟合时会遇到不合适数据点的问题,这时需要对数据点进行采样,基于迭代的曲线拟合算法很容易实现。

光条中心点和光条中心线提取如图 5、图 6 所示。

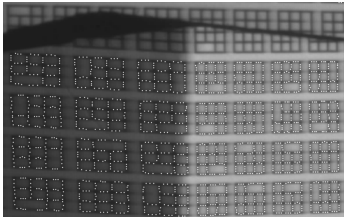


图 5 光条中心点提取

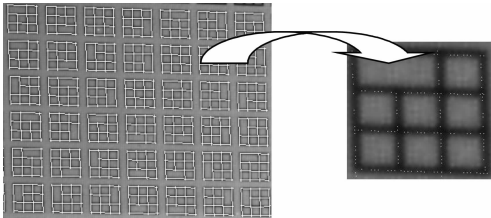


图 6 光条中心线提取图

3 符号检测点提取实验

试验中符号检测点是由两光条相交而成,因此可

利用曲线相交法提取符号检测点^[9-13]。曲线相交法简单,且提取的检测点精度可达到亚像素级。如齐次平衡法、Sine ~ Cosine 法、Jacobi 椭圆函数展开法。本节主要讨论求解非线性方程组的 Newton 迭代法^[14]。采用 Newton 迭代法对 2 048 × 1 536 的符号图像进行符号检测点提取,实验结果如图 7 所示。

符号检测点提取结果部分数据如表 3 所示,从表 3 中数据可以看出,利用提出的亚像素检测方法可以

使符号检测点定位精度达到亚像素级别。

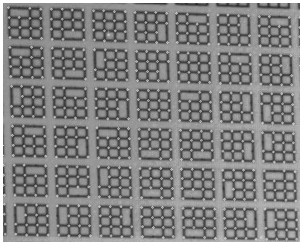


图7 符号检测点提取图

表3 符号检测点提取结果部分数据(本表仅列图片中第1行符号检测点数据,单位:pixel)

符号	X	Y	符号	X	Y	符号	X	Y	符号	X	Y	符号	X	Y	符号	X	Y
1	164.48	7.11	2	215.90	8.90	3	266.68	10.79	4	317.12	12.81	5	367.15	14.38	6	416.98	15.99
1	190.04	8.17	2	228.58	9.49	3	279.18	11.35	4	329.81	13.13	5	379.71	14.76	6	429.13	16.40
1	202.92	8.57	2	241.05	9.96	3	291.82	11.85	4	342.10	13.49	5	404.56	15.69	6	441.76	16.83
1	164.81	18.84	2	253.81	10.30	3	304.54	12.28	4	354.72	13.92	5	367.51	25.82	6	453.89	17.25
1	177.43	19.49	2	216.10	20.80	3	267.05	22.74	4	317.61	24.53	5	379.99	26.37	6	417.39	27.66
1	190.38	19.97	2	228.83	21.32	3	279.64	22.98	4	330.04	24.82	5	392.28	26.83	6	429.67	28.08
1	203.07	20.24	2	241.51	21.77	3	292.26	23.44	4	342.59	25.15	5	404.84	27.22	6	441.97	28.22
1	165.21	30.81	2	254.23	22.15	3	304.90	24.12	4	354.96	25.50	5	367.97	37.91	6	417.80	39.30
1	177.97	31.31	2	216.45	32.65	3	267.46	34.40	4	318.00	36.07	5	380.37	38.05	6	430.10	39.70
1	190.77	31.76	2	229.17	33.05	3	280.02	34.80	4	330.41	36.53	5	392.93	38.43	6	442.39	40.11
1	203.46	32.14	2	241.87	33.52	3	292.67	35.24	4	342.94	36.89	5	405.22	39.03	6	454.78	40.53
1	165.67	42.69	2	254.64	34.06	3	305.24	35.70	4	318.31	47.82	5	368.47	49.42	6	418.21	50.84
1	178.24	43.11	2	216.97	44.63	3	267.92	45.96	4	330.91	48.20	5	380.83	49.77	6	430.40	51.31
1	191.21	43.59	2	229.61	44.84	3	280.31	46.59	4	343.16	48.60	5	393.04	50.16	6	442.99	51.75
1	204.11	44.10	2	255.04	45.76	3	293.03	47.06	4	355.87	49.06	5	405.70	50.61	6	455.12	52.12
						3	305.55	47.35									

4 结束语

图像检测点的提取是结构光检测系统中的关键问题,检测点的亚像素定位是研究中的重点。通过比较试验找到一种合适的亚像素定位方法,并对现有的方法进行了综述。而后在实验比较的基础上,介绍了实际系统中所采用的亚像素定位算法,并详细介绍了光条中心线的提取步骤,通过光调中心线相交来提取图像检测点的实验,进一步验证了亚像素检测方法提取图像检测点的提取精度要高于原有的基于二值细化的图像监测点提取方法的精度。

参考文献(References):

[1] 李华强. 符号结构光图像解码及重建曲面滤波方法的研究[D]. 杭州:浙江理工大学信息工程学院,2008.

[2] 辛德刚. 基于线阵 CCD 的精确测量系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院,2007.

[3] 胡坤,周富强,张广军,等. 一种快速结构光条纹中心亚像素精度提取方法[J]. 仪器仪表学报,2006,27(10): 1326-1329.

[4] 徐士良. 数值分析与算法[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

[5] 李庆利. 尺寸测量中的边缘检测算法研究[J]. 计算机测

量与控制,2004,12(4):334-337.

[6] 魏新国,张广军,江洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(9):812-815.

[7] 罗明. 多传感器机器视觉测量系统的研究及其应用[D]. 天津:天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,1996.

[8] 邹定海. 三维视觉检测研究及其 ADC 应用[D]. 天津:天津大学精密仪器工程系,1992.

[9] WANG M L. Solitary wave solution for variant Boussinesq equations[J]. **Physics Letters A**,1995(199):162-172.

[10] FAN E G, ZHANG H Q. The homogeneous balance method for solving nonlinear solution equations[J]. **Acta Physica Sinica**,1997(47):353-361.

[11] YAN C T. A simple transformation for nonlinear waves [J]. **Physics Letters A**,1996,224(1):77-84.

[12] LIU S K, FU Z T, LIU S D. Expansion method about the Jacobielliptic function and its applications to nonlinear wave equations[J]. **Acta Physica Sinica**,2001,50(11):2068-2073.

[13] ZHANG G X, LI Z B, DUAN Y S. Exact solitary wave solutions of nonlinear wave equations[J]. **Science in China**, 2000,44(3):1103-1108.

[14] 凌永祥,陈明达. 计算方法教程[M]. 西安:西安交通大学出版社,2005:59-63.

[编辑:李辉]