

提高图像测量系统精度的细分算法的研究

王建民 浦昭邦 刘国栋
(哈尔滨工业大学精密仪器系 哈尔滨 150001)

摘要 首先分析了亚像素细分技术的必要性, 然后通过建立二维图像测量系统的数学模型, 说明了各种提高图像测量系统的测量精度的算法的理论基础; 然后, 阐述了几种实用的提高图像测量系统精度的细分算法, 在论述最小二乘拟合法时, 本文提出了用正交筛选法来进行图像边缘响应函数形式的选择的观点, 最后通过计算机仿真, 验证了所提出的方法的有效性并比较了各种算法所达到的精度及其抗噪声性能。

关键词 图像测量 亚像素 精度 正交筛选法

1 引言

由于 CCD 摄像器件具有高灵敏度, 高分辨率, 高速度, 宽光谱响应及测量的非接触性等优点, 它在测量领域得到了越来越广泛的应用。一般的图像测量系统主要由: 照明系统、被测物体、光学成像系统、信号处理电路和计算机组成, 因此, 影响系统精度的因素主要有: 1) 照明系统; 2) 光学成像系统; 3) CCD 摄像器件; 4) 信号处理电路; 5) 软件算法。要想提高系统的精度, 通常可选用高分辨率的 CCD 摄像机、采样频率比较高的图像卡, 或采用特殊的光源进行照明, 这些方法的使用有时会受到某种限制, 如光学系统放大倍数太大时, 象的质量会下降, 甚至会使用有用的目标超出视场范围, 而利用软件来提高测量的精度具有方法简单、有效的优点, 因此, 图像测量的软件算法越来越受到人们的重视。图像测量系统软件算法的一个重要的方面是边缘检测的算法, 被测件有关边缘点的定位精度往往直接影响到整个测量的精度, 因此, 研究边缘点的精确定位算法是很有实际意义的。

2 图像测量系统的数学模型

图像测量系统的光学成像系统尽管形式各异, 但我们可等效为如下的模型:

实际的 CCD 图像测量系统, 有用相干照明系统的, 也有采用非相干照明系统的, 但非相干照明系统应用得多些, 所以本文主要推导非相干照明测量系统的数学模型, 并且不考虑光学系统的像差。在非相干照明下, 衍射受限成像系统对照度的变换是空不变系统, 设 $G(x, y)$ 为几何光学下的理想像的照度分布, $E(x, y)$ 为像面的照度分布, S 为光学系统孔径光阑的总面积, $h(x, y)$ 为系统的点扩展函数^[1], 则有:

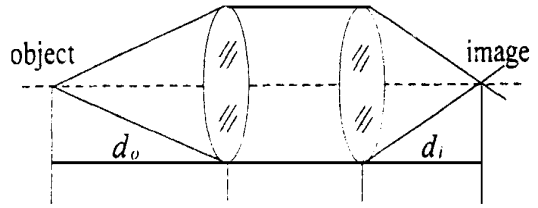


Fig 1 The imaging model of general optical systems

$$E(x, y) = k_1 G(x, y) * (h(x, y)) \tag{1}$$

上式中 k_1 为考虑光线经过成像系统时的能量损失系数。

在几何光学近似下, 物的照度分布与像的照度分布相同, 设 $O(x, y)$ 为物的辐亮度分布, M 为系统的放大倍数, S_0 为系统入瞳的面积, d_0 为物体到系统入瞳的距离, 则理想像的照度分布为^[1]:

$$G(x, y) = \frac{S_0}{d_0^2} \left(\frac{1}{M}\right)^2 O\left[\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right] = k_2 O\left[\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right] \tag{2}$$

设 $P_0(x, y)$ 为出瞳函数的傅立叶变换, d_i 为出瞳平面到像面之间的距离, λ 为光波波长, 系统的点脉冲响应为:

$$h(x, y) = \frac{1}{\lambda^2 d_i^2} \frac{|P_0[\frac{x}{\lambda d_i}, \frac{y}{\lambda d_i}]|^2}{S} = k_3 |P_0[\frac{x}{\lambda d_i}, \frac{y}{\lambda d_i}]|^2 \tag{3}$$

为更能说明问题的一般性, 我们以面阵 CCD 为接收器件, 设 CCD 光敏元的横向、纵向尺寸分别为 a, b , 光敏元的横向、纵向间距分别为 c, d 。CCD 器件对像的分布进行平均值取样, 故 CCD 器件在光照下中心在 (α, β) 处产生的电荷包为:

$$Q(x, y) = k_4 \int_{\beta - \frac{a}{2}}^{\beta + \frac{a}{2}} \int_{\alpha - \frac{b}{2}}^{\alpha + \frac{b}{2}} E(x, y) dx dy \tag{4}$$

k_4 为比例常数, CCD 感光面阵列可表示为:

$$\text{Rect}\left(\frac{x}{a}\right)\text{Rect}\left(\frac{y}{b}\right) * [\text{Com b}\left(\frac{x}{d}\right)\text{Com b}\left(\frac{y}{c}\right)] \tag{5}$$

根据文献[2]的结论, 不难得出电荷包的实际分布为:

$$Q(x, y) = k_5 \{E(x, y) * [\text{Rect}\left(\frac{x}{a}\right)\text{Rect}\left(\frac{y}{b}\right)]\text{Com b}\left(\frac{x}{d}\right)\text{Com b}\left(\frac{y}{c}\right)\} * [\text{Rect}\left(\frac{x}{a}\right)\text{Rect}\left(\frac{y}{b}\right)] \tag{6}$$

k_5 为考虑到 k_4 及其它因素的常数。假设 CCD 工作在线性段, CCD 像元产生的电荷转换成信号电压是在输出二极管中完成的, 设二极管的电容为 C , 在二极管中得到的输出信号电压为 $\Delta U(x, y) = Q(x, y)/C$, 设输出放大器的放大倍数为 G , 则 CCD 输出的信号电压为:

$$U(x, y) = G\Delta U(x, y) = \frac{G}{C} Q(x, y) \tag{7}$$

综合以上各式, 可得出非相干照明下, 视频信号与物的辐亮度的关系式:

$$U(x, y) = K_z \left\{ O\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) * \left| P_0\left(\frac{x}{\lambda d_i}, \frac{y}{\lambda d_i}\right) \right|^2 * \left(\text{Rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{Rect}\left(\frac{y}{b}\right) \right) \times \text{Com b}\left(\frac{x}{d}\right) \text{Com b}\left(\frac{y}{c}\right) \right\} \\ * \left(\text{Rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{Rect}\left(\frac{y}{b}\right) \right) \quad (8)$$

上式即为非相干照明下图像测量系统的数学模型, $K_z = k_1 k_2 k_3 k_5 k G / C$ 。

根据上面推出的(8)式可以看出, 图像测量系统是一个对被测物的辐亮度的分布的几次卷积的过程, 由卷积的性质可知, 卷积具有对函数的平滑作用, 这样, 即使物体的辐亮度分布为阶跃分布, 系统最终的输出电压必然有一个由高到低或由低到高的渐变过程。另一方面, 由于 CCD 感光元不但接收照射到自身感光面的光, 还接收照射相邻感光元的光, 尤其是对边缘点, 因为所接收到的光来自于物体反射及背景, 而背景和物体的反射特性是不一样的, 这同样造成 CCD 器件对阶跃边缘的响应信号由明到暗(或由暗到明)存在一个渐变过程, 边缘点的亚像素位置恰好存在于这一过度的渐变阶段, 这就使得我们有可能采用插值或曲线逼近的方法获得边缘点的亚像素位置。

3 提高图像测量系统精度的亚像素细分算法

对(8)式所表征的图像测量系统, 可以用以下几种亚像素细分算法来提高系统的精度:

1) 插值法: 该方法先通过模板匹配法获得一个像素的定位精度, 然后再通过插值获得边缘的亚像素位置。设边缘模板大小为 D , 形式为:

$$v(n) = \begin{cases} -1, & n = -D, \dots, -2, -1 \\ 1, & n = 1, 2, \dots, D \\ 0, & \text{其余} \end{cases} \quad (9)$$

$f(n)$ 为图像灰度值, $v(n-i)$ 为模板移动 i 个像素之后的形式, 求使下列式子的绝对值最大的 i 值, 即可把边缘定位在一个像素上:

$$s(i) = \sum_n f(n) v(n-i) \quad (10)$$

设 t 为边缘的亚像素位置, 对 $s(i-1), s(i), s(i+1)$ 三点, 用二次曲线进行拟合, 对二次曲线求导数, 可得 t 为:

$$t = \frac{4is(i) - (2i+1)s(i-1) - (2i-1)s(i+1)}{-2s(i+1) + 4s(i) - 2s(i-1)} \quad (11)$$

2) 离散的 Chebyshev 多项式拟合法

由于边缘函数在边缘点附近是渐变的, 在此情况下, 用低阶多项式拟合边缘函数在精度上应该是可以接受的。设拟合区间 $I = [i-4, i-3, i-2, i-1, i, i+1, i+2, i+3, i+4]$, i 为边缘初始位置, $f(x)$ 为图像灰值, Chebyshev 正交多项式为:

$$P_0(x) = 1 \quad P_1(x) = x \quad P_2(x) = x^2 - \frac{20}{3} \quad P_3(x) = x^3 - \frac{59x}{5} \quad (12)$$

则边缘的亚像素位置 t 为^[3]:

$$t = \frac{-\frac{P_2(x)f(x)}{P_2^2(x)} / \frac{P_2(x)f(x)}{P_2^2(x)}}{3 \frac{P_3(x)f(x)}{P_3^2(x)} / \frac{P_3(x)f(x)}{P_3^2(x)}} \quad (13)$$

3) 最小二乘估计法

(1) 最小二乘估计原理: 此法需假设边缘的形式 $g(x)$, 第一阶段要把边缘定位在一个像素上。实际边缘可能以亚像素精度 Δx 出现在边缘估计位置 i 附近的任何地方, 并可能含有加性噪声。设

$$f(x) = g(x - \tau) + r(x) \quad (14)$$

$\tau = i + m \Delta x$, i, m 为整数, $r(x)$ 假设为高斯白噪声, 上式的数学形式为:

$$f(n) = g(n - \tau) + r(n), \quad n = 0, 1, 2, \dots - 1, -2, \dots \quad (15)$$

令:

$$\hat{Q}_g(\tau) = \sum_n [f(n) - g(n - \tau)]^2 \quad (16)$$

假设 $f(n)$ 为归一化之后的输入数据, 那么使

$$\hat{Q}_g(\hat{\tau}) = \min_c \hat{Q}_g(\tau, c) \quad (17)$$

$\hat{\tau}$ 为上式最小时的取值, c 为表示 $g(x)$ 锐利程度的参数, 这样就可以求出边缘的亚像素位置。

(2) 用正交筛选法选取边缘函数形式: 最小乘法的关键一点是如何选取边缘曲线的具体表达形式, 一般只能靠假设, 笔者认为可以用正交筛选法来进行边缘函数表达式的选择, 具体过程是: 先从自变量 x 的各种初等函数中选取一些项作为 $g_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, m$), 组成如下的线性表达式:

$$f(x) = a_1 g_1(x) + a_2 g_2(x) + \dots + a_m g_m(x) \quad (18)$$

a_i 为系数。然后把 $g_i(x)$ 看作新的自变量 x_i , 进行规一化, 计算 x_i 与 y 的相关系数:

$$Y_{iy} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 [\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2]}} \quad (19)$$

上式中 n 为测量次数, \bar{x}_i, \bar{y} 为自变量和函数的均值, 如果 y 也进行了标准化, 则上式变为:

$$Y_{iy} = \sum_{k=1}^n x_{ik} y_k \quad (20)$$

取相关系数最大者为第一个被选中的变量, 其它变量的选取类似。

为了验证正交筛选法进行边缘函数的选取的观点, 我们设计了如下的计算机仿真实验: 假设边缘曲线的表达式为:

$$f(x) = 2x - \exp(-x) + \sqrt{x} \quad (21)$$

根据上式产生一组对应数据, 令 $x = 0.5, 1, 1.5$, 然后利用正交筛选法进行筛选, 第一次计算的相关系数按从左至右的顺序分别为: 0.99948, 0.994148, 0.999049, 由此可见, 第一次被选中的项为 $2x$, 接着进行第二次筛选, 计算结果为 0.0322337, 0.0353102, 可见下一个被选中的项为 \sqrt{x} , 可以证明, 当自变量大于某个值时, 第一项的有无对函数的影响最大, 其次是第三

项, 由此, 我们认为可以使用正交筛法来确定边缘曲线的表达式。

4) 灰度矩边缘检测法

对一维实际获得的离散边缘数据, $x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$, 用开始的三阶矩来计算边缘的位置:

$$m_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^i \quad (22)$$

对理想的边缘, 灰度值是一系列的恒值 h_1 , 之后出现一系列的恒值 h_2 , 用 k 表示 h_1 值的个数, 则公式(21)等价于:

$$m_i = \sum_{j=1}^2 P_j h_j^i \quad (23)$$

其中 $P_1 = k/n$, $\sum_{j=1}^2 P_j = 1, h_1, h_2, P_1$ 未知, 利用下列几个公式可算得边缘的亚像素位置 k [5]:

$$\begin{aligned} h_1 &= m_1 - \sigma \frac{P_2}{P_1} & h_2 &= m_1 + \sigma \frac{P_2}{P_1} & P_2 &= \frac{1}{2} [1 + s \sqrt{4 + s^2}] \\ s &= \frac{m_3 + 2m_1^3 - 3m_1 m_2}{\sigma^3} & \sigma^2 &= m_2 - m_1^2 & k &= n p_1 \end{aligned} \quad (24)$$

5) 空间灰度矩边缘检测法

该方法利用空间灰度矩来确定边缘位置, 可适于任意尺寸的窗口。函数 $f(x)$ 的 P 阶灰度矩为:

$$M_P = \int x^P f(x) dx \quad (25)$$

可根据窗口的大小及上公式产生模板来计算矩的值[6], 边缘的亚像素位置 L 计算公式为:

$$L = \frac{3M_2 - M_0}{2M_1} \quad (26)$$

4 仿真实验及算法特性分析

为比较各种算法在噪声情况下的准确度和重复性, 我们设计了如下实验: 用微机生成一标准的理想垂直刻线图像, 其大小为 100×100 像素, 刻线像宽六个像素, 刻线像素值置为 200, 背景灰度值置为 100。给标准图像加进均值为 0 的高斯白噪声, 并对标准图像进行平滑处理, 使边缘灰度成为渐变。定义信噪比为:

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{k}{\sigma} dB \quad (27)$$

其中 k 为边缘灰度差, σ 为白噪声的均方差。取 SNR 为 24, 34, 44 时, 多次进行仿真, 结果如表 1 所示:

其中最小二乘的边缘函数选为:

$$g(x) = (1 - e^{-c|x|}) \operatorname{sgn}(x) \quad \operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (28)$$

从表1可以看出,从细分的准确度来讲,最小二乘最高,从重复性来讲,插值法最好,而切比雪夫拟合法及空间灰度矩法无论是准确度还是重复性都较好,灰度矩法的准确性最差。从计算量来看,插值法的计算量最小,最小二乘法最大,另外,灰度矩法及空间灰度矩法对输入数据中的加性噪声和乘性噪声不敏感。

有一点值得说明,上述细分精度比较实验的结果只是从算法角度来进行比较,至于整个图像测量系统的精度,除与算法有关外,还与其它因素有关。

Table Emulated results of the performance of operators against noisy

operators	index	$SNR = 24$	$SNR = 34$	$SNR = 44$
interpolation	mean	49.51	49.50	49.50
	error	0.51	0.50	0.50
	standard deviation	0.08	0.03	0.01
	mean	49.37	49.33	49.31
Chebyshev	error	0.37	0.33	0.31
	standard deviation	0.32	0.14	0.10
	mean	48.95	48.89	49.71
least-square	error	- 0.05	- 0.11	- 0.29
	standard deviation	0.50	0.50	0.41
	mean	51.99	51.98	51.96
moment	error	2.99	2.98	2.96
	standard deviation	0.14	0.08	0.05
	mean	49.50	49.48	49.38
spatial moment	error	0.50	0.48	0.38
	standard deviation	0.28	0.26	0.23

5 结 论

本文所阐述的各种细分算法均可不同程度地提高图像测量的精度,正交筛选法可有效地帮我们确定最小二乘拟合时边缘曲线的形式,实际应用中,主要根据计算量及精度要求来选择软件细分算法。

参 考 文 献

- 1 加斯基尔 J. D. 著,封开印译 线性系统傅里叶变换光学 北京:人民教育出版社,1983
- 2 劳埃德 J.M. 著,尹白去,戴传衡译 热成像系统 北京:国防工业出版社,1981
- 3 Li Yu Shan, Young Tzay Y. Subpixel edge detection and estimation with a microprocessor-controlled line scan camera IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1989, 35(1): 105~ 107

- 4 Jensen Kris, Anastassiou Dimitris Subpixel edge location and the interpolation of still image. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(3): 285~ 295
- 5 Tabatabai Alij, Mitchell Owen Robert Edge location to subpixel values in digital imagery. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, PAMI-6(12): 188~ 201
- 6 Lyvers Edward P, Mitchell Owen Robert Subpixel Measurements Using a Moment-Based Edge Operator. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(12): 1293~ 1307

The Research of Subpixel Algorithms of Improving the Accuracy of Image Measuring Systems

WANG Jian-Min, PU Zhao-Bang, LIU Guo-Dong
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

This paper first analyzes the necessity of subpixel techniques, and describes the theoretical base of subpixel algorithms of improving the accuracy of measuring systems by building the mathematical model of general image measuring system. Several methods which can improve the accuracy of measuring system are presented. For the method of least-square fitting, we propose the view of using the method of orthogonal screen to determine the expression of the function of imaging edge response. At last, by emulating with the computer, we prove the validity of the methods we propose and compare the accuracy and the performance against noise of several algorithms.

Key words: Image measuring system, Subpixel, Accuracy, Orthogonal screen

王建民 男, 1967年6月出生, 1995年哈尔滨工业大学精密仪器专业硕士研究生毕业, 现在哈尔滨工业大学精密仪器专业攻读博士学位。主要从事 CCD 图像处理及图像测量方面的研究。