高精度边缘检测的方法研究

徐　　兵

摘要：本文论述了在边缘检测中提高CCD固有分辨率的原理及其实现的软件方法，并通过计算机仿真得出了系统参数对测量精度的影响。

一、引　　言

在机械工业、电子工业、纺织工业等行业中，常常需要对产品的尺寸规格进行实时监测。例如：精密零件尺寸，线材直径，集成电路的线宽等都需要实时检测和控制。由于生产是在高速进行的，接触式测量无法实现，而以往的光学式测量仪在性能指标上满足不了实际需要。因此需要发展一种高速高精度的尺寸测量系统。在这种测量系统中，采用CCD作为光电接收器，具有许多特点，如：采样周期短，灵敏度高，测量精度高等。但是它作为光电检测元使用时，分辨率通常被约束在象元间距上，如果加上测量系统各环节的滤波作用，分辨率要大于一个象元间距。本文提出了两种提高CCD固有分辨率的算法，目的是使测量系统的分辨率达到CCD象元间距的几分之一，即亚象元的分辨水平。

二、边缘成像过程

假设成像物镜是没有几何像差的理想光学系统见图1。则像面的光强函数为

$$I(x_i,\ y_i)=I_0(x_i,\ y_i)\ *\ |h(x_i,\ y_i)|^2 \tag{1}$$

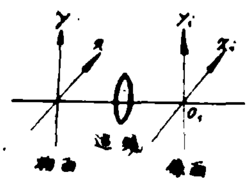

图1

式中：$I(x_i,\ y_i)$——衍射像的光强

$I_0(x_i,\ y_i)$——输入光强函数

$|h(x_i,\ y_i)|^2$——点光源位于光轴时的衍射像

CCD沿x_i轴放置，且测量的是目标宽度，于是（1）式中二维卷积可表示成一维的。

$$I(x_i)=I_0(x_i)*|h(x_i)|^2 \tag{2}$$

设成像放大率为1，输入光强函数为线宽函数，即

$$I_0(x_i)=[u(x_i+b)-u(x_i-b)] \tag{3}$$

（3）式中 $u(\xi)=\begin{cases}1,\ \xi\geqslant 0\\ 0,\ \xi<0\end{cases}$

由波动光学，$|h(x_i)|^2=K(\lambda,\ A)\cdot\left[\dfrac{2J_1(Ax_i/2)}{Ax_i/2}\right]^2$　　（4）

注：本文作者的导师为郝志航

式中：λ——输入光波长；A——光瞳直径；$2b$——输入函数宽度

把（3）、（4）代入（2）式，并对 x_i 求偏导

$$\frac{\partial I(x_i)}{\partial x_i}=I_0|h(x_i+b)|^2-I_0|h(x_i-b)|^2 \tag{5}$$

由贝塞尔函数 $J_1(x)$ 可知，$x=0$ 时，函数值最大且当 $|x|>3.238\lambda d_2/A$（d_2 为像距）时，函数值近似于零。因此 $x_i=b$ 和 $x_i=-b$ 时，输出光强函数的导数为最大，即输出函数导数最大值的横坐标为输入线宽函数的边缘点。同样可以证明，对一般测量系统而言，如果它的传递函数是对称的，那么输出信号的导数最大值所对应的位置就是输入线宽函数的边缘点。

三、测量系统的构成和系统传递函数

以CCD为光电转换元件的线宽测量系统，主要由四个部分组成，光学系统、CCD 接收器、视频处理电路以及计算机。结构框图见图 2 所示。

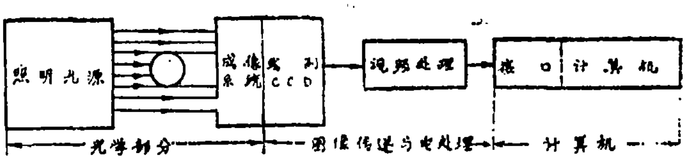

图 2

根据测量系统的设计，建立起系统的数学模型，求出整个系统的传递函数。

$$H(f_x)=\frac{2}{\pi}\cdot K\cdot\frac{a^2}{d}\left[\cos^{-1}\left(\frac{\lambda f_x}{2A}\right)-\frac{\lambda f_x}{2A}\sqrt{1-\left(\frac{\lambda f_x}{2A}\right)^2}\right]$$

$$\cdot[\mathrm{sinc}(2\pi a f_x)]^2\cdot e^{N\varepsilon(1-\cos(2\pi f_x d))} \tag{6}$$

式中：a——感光元尺寸；　　K——光电转换系数

　　　d——象元间距；　　f_x——空间频率

　　　A——光瞳直径；　　N——象元个数

　　　λ——照明光波长；　　ε——转移损失率

由（6）式可以看出，系统的传递函数是对称的，根据第二节所述的原理，可以高精度确定输入线宽函数的边缘位置。

四、亚象元边缘检测算法

线宽函数通过光学系统和CCD接收器的各种滤波后，再经过视频处理和 A/D 变换形成数字信号。并通过接口送入计算机中，在计算机中用程序对数据进行求导。由于数据含有干扰，而在进行数值微分时，即使很小的干扰，比值$\triangle y/\triangle x$都显得非常敏感。因此通常的差分方法是不实用的。要解决这个问题，首先要对数据进行平滑处理以减小干扰引起的误差；其次采用三次样条函数微商法。由三次样条函数性质可知，当信号 $f(x_i)$〔$i=1,2,\cdots,N$〕的光滑程度比较好时，不仅三次样条函数 $S(x_i)$ 一致收敛到 $f(x_i)$，它的导数 $S'(x_i)$ 也一致收敛到 $f'(x_i)$。由于导数$f'(x_i)$是离散形式的，仍然不能确定边缘点的精确位置。本文提到了两种

提高分辨率的算法。

（1）简单质心法

在导数中找出相临三个较大值，设为 f_{-1}，f_0，f_1，以这三个点的横坐标为中心，宽为1作三个矩形，假设三个矩形是质量分布均匀的物体，根据形心计算公式，质心坐标 x_e 由下式可得

$$x_e=\begin{cases}\dfrac{f_{-1}-f_1}{2f_1-f_0-f_{-1}}, & f_1<f_{-1}\\[2ex] \dfrac{f_{-1}-f_1}{2f_{-1}-f_0-f_1}, & f_1\geq f_{-1}\end{cases}$$

其中 x_e 也是边缘点坐标。

（2）包络法

取五个相临较大的导数 $f_j(j=-2,\ -1,\ 0,\ 1,\ 2)$，让 f_j 与一个低通函数作卷积运算，则得到的函数是导数的包络线，再利用二分法逼近函数的最大值。很显然这种算法只恢复导数的连续形式，因此这种算法不依赖于系统的传递函数。

五、计算机仿真结果及结论

（1）随着照明光波长变短，光瞳直径增大，转移损失率的减小，输出信号边缘梯度增大。

（2）在只有量化噪声的情况下，随着输出信号边缘幅值的梯度增大，亚象元分辨能力也随之增高。取 $e=0.0001$，$\lambda=7000$Å，$A=10$mm，包络法求得的精度是象元间隔66倍，质心法为15倍。

（3）加入一个白噪声干扰，当信噪比SNR≤80时，质心法作为一种亚象元分辨的算法已不再实用；而包络法在SNR＝50的情况下，提高精度7.5倍。

仿真的结果说明，包络法比质心法具有明显的优点，理想情况下分辨率可达 CCD 象元的66分之一，即使在SNR＝50的情况下分辨率仍可达一个象元的七点五分之一。

参 考 文 献

[1] J.W.顾德门；《傅立叶光学导论》，科学出版社，1976
[2] M.T.Gale and P.Seitz；SPIE，701 1986,254-258
[3] 程乾生；《离散数学》，科学出版社，1976

High Accuracy Edge Detection

Xu Bing

Abstract

This paper analyzes the principle of improving intrinsical resolution of CCD camera and presents a method of realizing software. The influence of parameters of the system on the measuring accuracy is descried as well.