

光学子波用于图像处理

闫丽, 袁家虎, 刘江, 李展

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要:在目标图像的处理中,对图像进行空间子区分割,利用子波函数的局域化和多尺度的特性,对有目标信息的子区进行光学子波函数变换,并对有目标信息子区中的子波函数进行多通道并行处理,避免了繁琐的数学运算,提高了图像处理速度,可快速给出准确的目标特征。文中阐述了一维子波函数光学变换用于图像处理的方法,通过光学方法将图像进行子区分割,并运用子波函数的特性对子区中图像信息进行光学子波变换,通过多路光学通道同时提取图像的边缘信息。本文基于子波变换的理论对光学子波变换的原理进行了详细论述,建立了一套完整的光学子波变换的实验系统,并给出了具有理论依据的实验数据。

关键词:子波变换;边缘提取;光学相关;图像空间分割

中图分类号:TN911.74 **文献标识码:**A

1 概述

子波变换是近几年发展起来的应用数学的新领域,子波变换是空间和频率的局域变换。通过子波函数的伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化处理,获得图像的特征信息,解决了傅立叶变换不能解决的许多困难。

在图像处理中,图像特征提取是光学信息处理中所研究的主要问题之一,图像的特征是图像中变化比较剧烈的位置,在边缘提取中也就是图像像素密度梯度变化的最大点,以往这类特征的提取大多采用数字信息处理技术,即运用滤波、微分、边缘增强及锐化等,获得图像特征。20世纪80年代随着子波变换这一理论的广泛应用,运用子波函数进行信号分析、图像识别已取得了一定的成果。

从理论分析可知,子波变换可通过数学计算实现,但子波变换比傅立叶变换运算量更大。因此,对运算器的要求更高,实现难度大。采用光学子波变换可克服运算量大、难度大的不足,具有实时运算的特点。本文将阐述一种光学子波变换的实验方法及结果。

2 子波变换与边缘提取

在图像处理中,边缘提取的主要方法是特征信息分析,信号分析的主要手段是寻找一种简单有效的信号变换方法,使信号所包含的重要特征能显示出来。

2.1 傅立叶变换(Fourier Transform)

19世纪发展起来的 Fourier 变换分析方法,现已成为各种信号处理的基本数学工具,其变换公式为:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

它有效地将时间域与频率域联系起来,在时间域内难以反映的现象和规律,在频率域内往往能十分清楚地显示出来。但傅立叶变换的积分作用平滑了非平稳过程的突变成份,不能反映各自在局部区域上的特征,影响了提取精度。

2.2 盖伯变换(Gabor Transform)

为了克服傅立叶变换不能同时进行时间-频率局域性分析,1946年 D. Gabor 提出了“窗口”傅立叶变换,也叫短时傅立叶变换。把非平稳过程看

成是一系列短时平稳信号的叠加,而短时性是通过时间域上加窗来实现的。通过采用一个窗函数 $g(t - \tau)$ 对信号 $f(t)$ 的乘积运算实现在 τ 附近的开窗和平移,再进行傅立叶变换,数学表达式为:

$$G(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

该变换在 τ 点附近局部的测量了频率为 ω 的正弦分量 ($e^{j\omega t}$) 的幅度,通常选用能量集中在低频处的 Gauss 函数作窗口函数,相应的 Fourier 变换仍旧是 Gauss 函数,从而保证窗口 Fourier 变换在时域与频域内均有局域化功能。但窗口 Fourier 变换 (Gabor 变换) 的时间-频率窗口大小是固定的,只适合分析所有特征尺度大致相同的各种过程,窗口没有适应性,不适于分析多尺度信号过程和突变过程,无法满足高分辨率的要求,这就限制了窗口 Fourier 变换 (Gabor 变换) 的应用范围。

2.3 子波变换 (Wavelet Transform)

在工程应用中,实现高效算法、提高分辨率是图像处理两个基本要求,也就是变窗口;平移和正交性是作为信号分析最有效数学工具的主要条件。根据这一要求推出了子波理论,子波变换继承和发展了 Gabor 变换局部化的思路,同时又克服了窗口大小不随频率变化、缺乏离散正交基等缺点,其子波变换表达式为:

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

其中 a 是尺度函数, b 是定位函数

原型函数 $\Psi(t)$ 为子波函数:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

尺度函数 a 不仅可改变连续子波的频谱结构,且可改变其窗口的大小和形状; b 与 Gabor 变换中的 τ 相类似起着平移作用。对于较大的 a ,基函数扩展,用来分析信号低频部分;对于较小的 a ,基函数收缩,用于分析信号的高频部分。这就实现了“窗口”大小自适应变化,有利于检测快变信号,提高时域的分辨率。

子波函数 $\Psi(t)$ 可确定一时频窗,其时域中心分别为:

$$t_0^* = \int_R t |\Psi(t)|^2 dt / \|\Psi(t)\|_2^2 \quad (5)$$

$$\omega_0^* = \int_R \omega |\hat{\Psi}(\omega)|^2 d\omega / \|\hat{\Psi}(\omega)\|_2^2 \quad (6)$$

$$t_0 = b + at^* \quad \omega_0 = \frac{\omega^*}{a}$$

时频宽度为:

$$\Delta\Psi = \left(\int_R (t - t_0)^2 |\Psi(t)|^2 dt / \|\Psi(t)\|_2^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$\Delta\hat{\Psi} = \left(\int_R (\omega - \omega_0)^2 |\hat{\Psi}(\omega)|^2 d\omega / \|\hat{\Psi}(\omega)\|_2^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$\Delta\Psi_{a,b} = a\Delta\Psi, \quad \Delta\hat{\Psi}_{a,b} = \frac{1}{a}\Delta\hat{\Psi}$$

从上式可以看出,当 a 值较大时 $\Psi_{a,b}(t)$ 所确定的时频窗口中心频率低,带宽较窄,具有较低的时间分辨率和较高的频率分辨率;当 a 值较小时, $\Psi_{a,b}(t)$ 所确定的时频窗口中心频率高、带宽较宽,具有较高的时间分辨率和较低频率分辨率,平稳信号一般在相对低的频段,而突变信号一般在相对高的频段,这样通过对 a 的调整,可以逼近信号的任意细节部分;通过 b 的平移,可以对任意点的信号进行分析。

3 光学子波变换实验原理和组成

根据子波变换具有“窗口”大小自适应变化的特性,我们将其引用到图像分析、目标识别工程中,近几年许多文章已经介绍了一些此方面的工作,有很多是采用不同的子波函数通过大量的数学计算来进行图像分析,这种方法的最大不足是计算过程复杂、计算量大、速度慢。在此我们介绍一种光学子波变换用于图像分析和目标识别,它的优点在于通过建立不同的子波函数,经过光学成像,将目标图像与子波函数波形图共面,通过改变子波函数中参数 a 和 b ,使子波图形作伸缩和平移,以快速捕捉捕获图像的特征信息,给出图像的特征数据。

3.1 实验原理

工作原理如图1,由计算机控制子波函数发生器产生子波函数图形,经微镜阵列将子波函数图形与图像合成器上的图形进行叠加,再经光学成像将合成图像送入光电转换,经图像采集处理后输入计算机,并由计算机进行处理后给出图像的信息。通过分析计算机所给图像信息,进行子波函数中 a, b 的调整,以变换子波函数发生器上的子波图形,当尺度函数趋于零时,奇异点所对应的子波变换值将是局部极大值,其往往构成图像的边缘,便可快速给出图像的边缘信息。

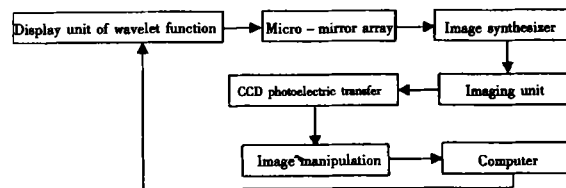


Fig. 1 The principle diagram of optic wavelet

3.2 实验主要组成

实验主要由子波函数发生器、微镜阵列、图像合成器、光学成像镜头、光电转换 (CCD)、图像采集

卡和计算机几个主要部分组成,其光路原理图如下:

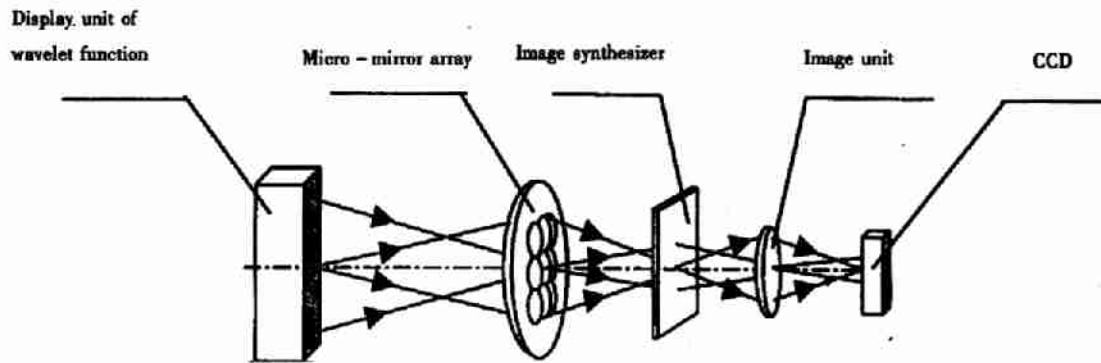


Fig. 2 The sketch diagram of optic system

子波函数发生器:由计算机控制在其上显示一子波函数的图形。

微镜阵列:将子波函数图形成像在图像合成器上,增加图像的信息通道。

图像合成器:将子波函数图形与目标图像进行合成。

光学成像镜头:将合成图像成像在 CCD 光敏面上。

CCD 光电转换器:将接收到的光信号转换成电信号送入图像采集系统。

3.2.1 子波函数发生器

在实验中,选用一维子波函数,其函数形式为:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (9)$$

其中 a 为尺度函数 b 为定位函数

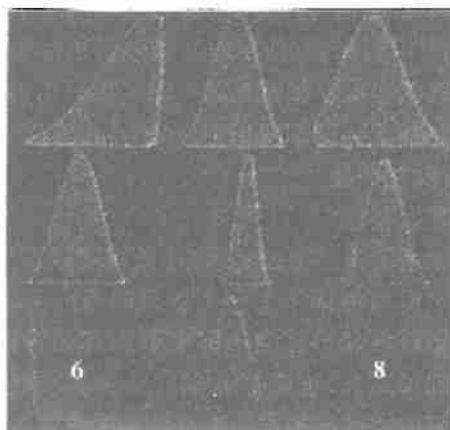


Fig. 3 The sketch map of display unit of wavelet function

在子波函数发生器上,由计算机控制产生子波函数图形,根据需要可将子波函数发生器上的

图形分成不同的子区阵列,并可分别设置各子区中的子波函数的参数,在不同的子区产生不同的子波函数图形。如图3,在实验中设定为一个 3×3 的子区阵列,子区编号如图。为了使用的需要可在各子区内,设置不同的子波函数的参数。

3.2.2 微镜阵列

微镜阵列在此实验中,选用一个 3×3 的排列方式,将子波函数的图形成像在图像合成器上,增加信息通道可在同一时间获得更多的图像信息。

4 实验参数及结果

4.1 实验系统的主要参数

微镜阵列的放大倍率为 $i = 0.3 \times$ 。

子波函数发生器产生的图像尺寸为: 126×126 mm,其中每个子区的尺寸为: 42×42 mm。

在图像合成器上有两条宽度相等的黑带像,如图4,在实验中我们需测出两条黑带的宽度。



Fig. 4 The black strap image on the image synthesizer

4.2 实验数据采集

本实验主要目的是快速给出黑带像的宽度。若要求出黑带像的宽度,首先要确定图像的边缘位置信息,根据边缘位置信息推算出其黑带像的宽度。如图5为在图像合成器上无图像叠加时的原始子波函数图形,各子区中函数参数设置相同。在实验中,我们通过子波函数 $\Psi(t)$ 中参数的连续改变,在不同尺度下平移检测图像的边缘信号,即图像边缘位置。如图6为子波函数图形与黑带像在图像合成器上的像,从图中可以看出,相同的子波函数分布在0~8的子区内,而在9个子区内通过图像处理给出的信息可知,黑带像分布在0、1、3、4、6和7共六个子区内,为快速确定边缘信息,仅对有图像信息的六个子区的子波函数中尺度函数 a 和平移因子 b 进行变换,如图7、图8、图9、图10及图11为在一系列不同尺度函数 a 和平移因子 b 下采集的图像,其数据如表1。在该实验的子波函数图像中,尺度函数 a 为函数波形的带宽,平移因子 b 为函数波形的峰值所在的横坐标值。



Fig. 5 Sampling 1

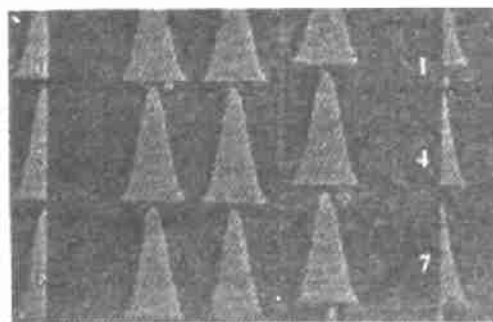


Fig. 6 Sampling 2



Fig. 7 Sampling 3

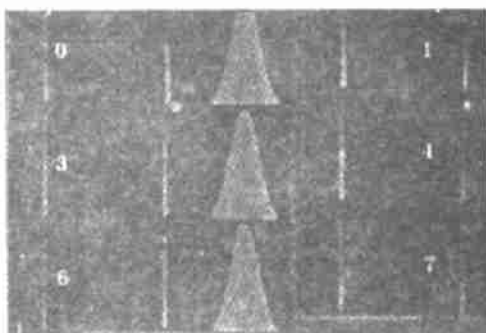


Fig. 8 Sampling 4

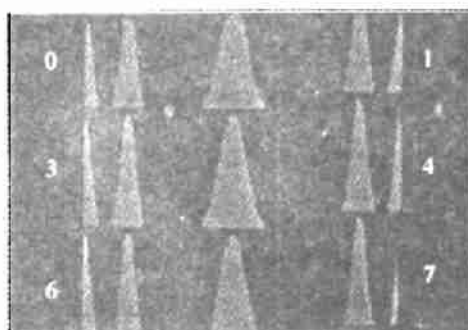


Fig. 9 Sampling 5



Fig. 10 Sampling 6

Table 1 The parameters of sampling

Subsegment	Fig. 6		Fig. 7		Fig. 8		Fig. 9		Fig. 10		Fig. 11	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
0	2	4	0.2	4	0.1	4.1	1	8	0.1	8.1	0.1	8.2
3	2	4	0.2	4	0.1	4	1	8	0.1	8	0.1	8.1
6	2	4	0.2	4	0.1	3.8	1	8	0.1	7.9	0.1	8
1	2	6	0.2	6	0.1	6.8	1	3	0.1	3	0.1	2.7
4	2	6	0.2	6	0.1	6.6	1	3	0.1	2.9	0.1	2.5
7	2	6	0.2	6	0.1	6.4	1	3	0.1	2.7	0.1	2.2

$$S'_B = 5.2 \text{ mm}$$

通过以上的分析计算,可以看出通过光学子波变换能快速求出黑带像的宽度。对于复杂的图形或目标,可在子波函数发生器上选择一个适当的子波函数形式,进行一维或二维光学子波变换,用同样的方法快速捕捉所需的图像信息。

5 结 论

光学子波变换进行图像边缘提取,是利用子波局域性和多尺度性进行信息捕捉,其最大的优点是分辨率高、速度快、定位准确。它避免了子波变换边缘提取中数学方式的复杂运算。在光学子波变换中,根据图形特点选用适当的子波函数,并将子波函数发生器分成若干个子区,形成一个空间滤波器。当目标落入某一子区时,由计算机控制的图像处理可给出该子区的目标信息,控制子波函数发生器只针对该局部区域进行子波变换;通过子波函数可移“窗口”和多尺度特性,迅速给出所需的精确目标信息。这种方法在图像边缘提取和目标识别有其重要的意义,尤其在目标的实时跟踪上,以其快速、分辨率高的特性有其特殊的应用价值。

在本实验中,目标识别的分辨率主要由子波函数发生器、微镜阵列、图像采集和计算机控制的几个部分所决定。当用于高精度的目标识别和跟踪时,提高几个部分的分辨率,有助于整体精度的提高。



Fig. 11 Sampling 7

4.3 实验分析

从以上数据可以看出,图8和图11的平移因子 b 的位置差值就可以算出黑带像在子波函数发生器上的宽度。我们设定在子区 0、3、6 中的黑带像为 A,在子区 1、4、7 的黑带像为 B,宽度为 S ,则

$$S_A = \frac{\sum |b_{1i} - b_{2i}|}{3} = 4.13$$

$$S_B = \frac{\sum |b_{1i} - b_{2i}|}{3} = 4.13$$

其中 b 的每一个单位量的几何量为 4.2 mm,故在子波函数发生器上黑带像的宽度为

$$S_A = 17.346 \text{ mm}$$

$$S_B = 17.346 \text{ mm}$$

根据实验光路中的物像关系,微镜阵列的放大倍率 $i = 0.3^2$,可以得出黑带像在图像合成器上的宽度为

$$S'_A = 5.2 \text{ mm}$$

参考文献:

- [1] 赵松年,熊小芸编著.子波变换与子波分析[M].北京:电子工业出版社,1996.
- [2] 崔锦泰著.程正兴译.小波分析导论[M].西安:西安交通大学出版社,1995.
- [3] 李世雄编.小波变换及其应用[M].北京:高等教育出版社,1997.
- [4] 秦前清,杨宗凯编著.实用小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,1995.
- [5] 丁艳,刘榴娣,郭宏.小波变换在图像边缘检测中的应用[J].北京理工大学学报,1998,18(5):621-624.

Optical-wavelet transform application in image processing

YAN Li, YUAN Jia-hu, LIU Jiang, LI Zhan

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: The image is divided up several subsegments in space for process of aim. With characteristics of domains and multiresolution of Wavelet function, subsegments which have messages of aim are processed with Optical-Wavelet Transform and the function of Wavelet Transform which have messages of aim are performed with multicenter at the same time. It avoids the mathematical operation which is heavy and complicated, and the speed of image processing is improved. Objects features are given quickly and accurately. The method that edge of image is extracted by means of one-dimensional Optical-Wavelet Transform is described in this paper. The image is divided up many subsegments by means of optics. On the basis of the characteristic of Wavelet function, the image information is processed by Optic-Wavelet Transform in the subsegment. The edge information of the image is picked up in many optic channels at the same time. On the basis of the theory of Wavelet Transform, the principle of Optic Wavelet Transform is expounded in the paper. A suit of the integrate experimental system of Optic-Wavelet Transform is built, the experimental data with theoretical foundation is given.

Key words: wavelet transform; edge extracting; optical correlation; dividing image

作者简介: 闫丽(1965—),女,辽宁沈阳市人.1985年毕业于长春光机学院,现为中国科学院光电技术研究所副研究员.目前主要从事光学机械的研究和设计工作.