

文章编号: 1001-3806(2004)06-0641-04

## 小波变换在图像相关识别中的应用

刘冬梅, 沈君愉, 王丽君

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 光学图像识别具有广泛的实际应用价值, 而联合变换相关器(JTC)是目前采用最多的一种进行图像相关识别的结构方式。将小波变换与联合变换相关技术有效地结合在一起, 分析了如何采用小波变换来实现图像相关识别的理论方法, 并提供了相应的结构框图, 对采用小波变换用于图像目标识别的优点进行了概括及总结, 并对该相关识别系统中所应采用的小波类型、滤波方式、滤波器的制作等多方面进行了介绍和分析。

**关键词:** 小波变换; 联合变换相关器; 图像相关识别; 改进的 Mexican-hat 小波

**中图分类号:** O438 **文献标识码:** A

### Application of the wavelet transform to pattern correlation recognition

LIU Dong-mei, SHEN Jur-yu, WANG Li-jun

(School of Optical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Optical pattern recognition has extensive actual applications. The usually adopted technology is to detect the correlate intension between detection goal image and standard image. We combine effectively wavelet transform with the joint transform correlator(JTC), and have analyzed how to carry out correlation discrimination with wavelet transform, and dedicated the theoretical method and the structural block diagram that realizes image correlation identification. Finally the wavelet type, wavelet filter approach, wavelet filter perform and so on have been introduced.

**Key words:** wavelet transform; joint transform correlator(JTC); pattern correlate recognition; improved Mexican-hat wavelet

## 引 言

小波变换是一新兴的数学工具, 它突破了传统的傅里叶变换的限制, 并克服了傅里叶变换的缺点, 特别适用于处理局部或暂态信号, 充分体现了对信号不同区域、不同分辨率的分析特点, 在时、频两域都具有表征信号局部特征的能力, 正因为如此, 有人将小波变换誉为分析信号的数学“显微镜”, 并广泛应用于图像分析、信号处理、分形分析等众多领域之中。近年来, 人们采用光学方法可以很方便地实现小波变换, 比较常用的方式是采用  $4f$  傅里叶变换光学系统经过特定的带通滤波来实现。

小波变换作为一种新的分析手段, 它能有效地从光学图像(信号)中提取信息, 并通过伸缩及平移等运算功能对光学图像进行多尺度的细化。

光学图像识别具有广泛的实际应用价值, 近年来发展十分迅速。通常它所采用的技术是检测目标图像和标准图像间的相关强度: 对于与参考图像相同的目标图像, 要求其相关峰值高、峰宽度小; 对于与参考图像相似的目标图像则要求其相关峰应明显下降, 以获得较高的鉴别能力。

联合变换相关器(JTC)是目前采用最多的一种结构方式, 在这里, 作者将小波变换与联合变换相关技术有效地结合在一起, 分析了如何采用小波变换来实现图像相关识别的理论方法, 并提供了相应的结构框图, 对采用小波变换用于图像目标识别的优点进行了概括及总结, 并对该相关识别系统中所应采用的小波类型、滤波方式、滤波器的制作等多方面进行了介绍和分析。

## 1 变换的基本定义及联合变换相关器的基本原理

### 1.1 小波变换的定义

小波变换的含义是: 把某一被称为基本小波(也叫母小波)的函数  $\phi(t)$  作位移  $\tau$  后, 再在不同尺度

作者简介: 刘冬梅(1970-), 女, 工程师, 硕士, 现主要从事光学信息处理方面的研究工作。

E-mail: sjx8811@sohu.com

收稿日期: 2003-10-31; 收到修改稿日期: 2003-12-24

$a$  下与待分析信号  $x(t)$  作内积:

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \phi^* \left( \frac{t-\tau}{a} \right) dt = \langle x(t), \phi_{a\tau}(t) \rangle, a > 0 \quad (1)$$

式中,  $x(t)$  是平方可积函数 [记作  $x(t) \in L^2(R)$ ];  $\phi(t)$  是被称为基本小波或母小波的函数;  $a > 0$  是尺度因子;  $\tau$  反映位移, 其值可正可负; 符号  $\langle x, y \rangle$  代表内积。式中, 不但  $t$  是连续变量, 而且  $a$  和  $\tau$  也是连续变量, 因此, 称为连续的小波变换 (continuous wavelet transform, CWT)。

## 1.2 联合变换相关器的原理

联合变换相关器的基本结构是  $4f$  系统, 如图 1 所示。将参考图像及待测图像同时置于输入面  $P_1$

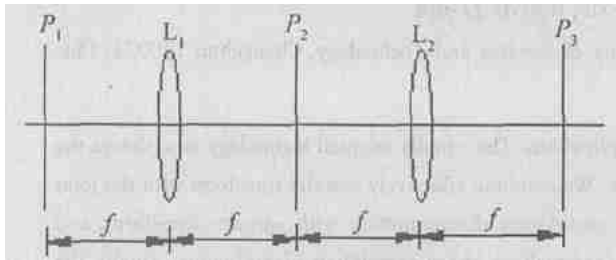


图1  $4f$  系统

上, 设参考图像和目标图像分别表示为  $r(x-a, y)$  和  $t(x+a, y)$ , 沿输入面  $x$  轴相距  $2a$ , 则 JTC 的输入可用函数表示为:

$$f(x, y) = r(x-a, y) + t(x+a, y) \quad (2)$$

经透镜  $L_1$  对  $f(x, y)$  作傅里叶变换, 在  $L_1$  后面  $P_2$  上得输入景物的空间频率谱为:

$$F(u, v) = R(u, v) \exp(-iua) + T(u, v) \exp(iua) \quad (3)$$

式中,  $(u, v)$  为频谱面坐标;  $R(u, v)$ ,  $T(u, v)$  分别为图像  $r(x, y)$ ,  $t(x, y)$  的傅里叶变换,  $P_2$  上的光强分布即联合功率谱, 可由平方律探测器 (如 CCD 阵列) 探测:

$$|F(u, v)|^2 = |R(u, v)|^2 + |T(u, v)|^2 + R(u, v) \times T^*(u, v) \exp(-iu2a) + R^*(u, v) T(u, v) \exp(iu2a) \quad (4)$$

经典的 JTC 将  $|F(u, v)|^2$  直接经透镜  $L_2$  作逆变换,  $P_3$  面上零级项两边就能够得到参考图像和目标图像的一对共轭互相关输出。

## 2 图像目标识别中应用小波变换的优点<sup>[1]</sup>

(1) 小波变换具有多分辨率的特性, 此特点是指能够利用小波变换对原始图像进行不同尺度的分解, 从而获得目标图像不同层次的轮廓信息和细节

信息; (2) 它具有运算速度快特点, 从而有助于降低图像目标小波变换的时间复杂度和空间复杂度; (3) 小波变换后代表图像顶点等特征点的模极大值的范数不随图像的旋转、平移和伸缩的变化而改变, 但模极大值的相位携带有目标图像的方向信息, 从而开拓了图像目标识别的范围; (4) 小波分解后, 数据量并没有增加, 不会占用大量的计算机内存, 有利于计算机的实时处理; (5) 利用图像信号突变点和噪声对小波系数敏感性的不同, 也可进行图像的消噪处理, 从而进一步提高图像目标识别的准确率。综上所述, 小波变换是进行图像目标识别较为理想的工具。

## 3 小波变换小波滤波的方法选择

在图像信息处理过程中采用的小波滤波的方法通常为: 空域滤波及空频域滤波。

空域滤波的系统简图如图 2 所示。

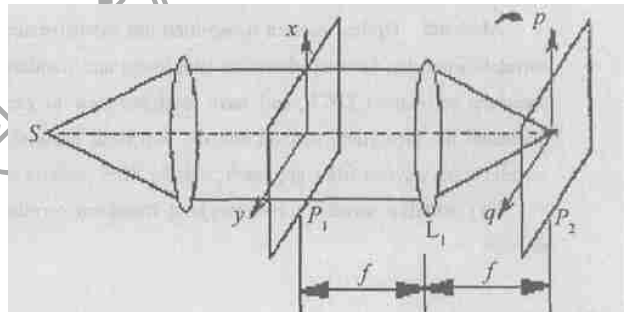


图2 空域滤波的系统简图

若在输入平面  $P_1$  放置一个复透明滤波片  $h_{a,b;c,d}(x, y)$  作为空域滤波, 于是总的输入为:

$$E(x, y) = f(x, y) h_{a,b;c,d}(x, y) \quad (5)$$

式中, 用二维母小波  $h_{a,b;c,d}(x, y)$  描述透明滤波片,  $f(x, y)$  是输入光信号。在光学系统中, 若把输入处理信号  $f(x, y)$  的空间坐标反转过, 并在输入空间域横向平移至  $(x_0, y_0)$  点, 即由  $f(x_0 - x, y_0 - y)$  代替  $f(x, y)$ , 则有:

$$E(x, y) = f(x_0 - x, y_0 - y) h_{a,b;c,d}(x, y) \quad (6)$$

则经透镜  $L_1$  作傅里叶变换后, 在空域中有:

$$\hat{E}(p, q) = \hat{F}(p, q) \hat{H}(p, q) \quad (7)$$

式中,  $\hat{E}$ ,  $\hat{F}$ ,  $\hat{H}$  分别是  $E, f, h$  的傅里叶变换。通过这样的方式实现了空域小波滤波。

空频域滤波的系统简图如图 3 所示。

若待处理信号  $f(x, y)$  置于空域  $P_1$ , 则输入信号的傅里叶变换分布在空频域  $P_2$  平面上, 若有一透明滤波片  $h_{a,b;c,d}(p, q)$  置于  $P_2$ , 于是紧靠  $P_2$  的背后复光场分布为:

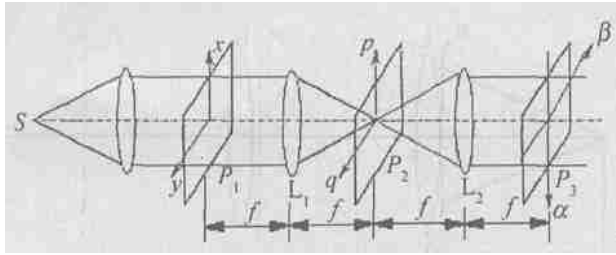


图3 空频域滤波系统简图

$$E(p, q) = k\hat{F}(p, q) h_{a,b;c,d} \left[ \frac{b-p}{a}, \frac{d-q}{c} \right] \quad (8)$$

在输出平面  $P_3$  上的光场分布为:

$$g(\alpha, \beta) = k\hat{F}(p, q) \otimes h_{a,b;c,d} \left[ \frac{b-p}{a}, \frac{d-q}{c} \right] \quad (9)$$

这里用小波母函数表示透明滤波片,空频域小波滤波器可由任意形状的孔径和狭缝组成低通、高通、带能小波滤波器,并可根据小波的特性,对输入信息的局部进行提取、识别,还可根据其空频域局部的变换情况,找出输入信号奇异点的变化情况,而通过调整和移动空频滤波器可实现各种尺度下的空频域小波滤波,当输入光信号是非平稳信号时,只有用小波变换才有可能进行滤波处理<sup>[1]</sup>。

通过分析小波滤波的方法,根据小波变换实现相关识别的原理特点,采用了频率域滤波的方法,来实现基于小波变换及联合变换相关器实现图像的相关识别。

#### 4 用小波变换及联合变换相关器实现图像相关识别的原理

仍设  $t(x, y)$  为输入的目标图像,  $r(x, y)$  为输入图像,二者分别定位于  $(0, a)$ ,  $(0, -a)$ , 则总的输入经准直相干光束照明后,在透镜  $L_1$  的后焦面上即可得到二者的联合变换频谱(与上面相似,故表示从略),若此时在谱面上放置一全息掩模板  $H^*(u, v)$ , 则透过掩模板的光场为<sup>[2]</sup>:

$$F'(u, v) = [T(u, v) \exp(-i2\pi va) + R(u, v) \exp(i2\pi va)] H^*(u, v) = T'(u, v) \exp(-i2\pi va) + R'(u, v) \exp(i2\pi va) \quad (10)$$

式中,  $T'(u, v) = T(u, v) H^*(u, v)$ ,  $R'(u, v) = R(u, v) H^*(u, v)$ , 这样由平方律探测器探测到的光强分布为:

$$I(u, v) = |F'(u, v)|^2 = (|T'|^2 + |R'|^2) + T'R'^* \exp(-i4\pi va) + T'^*R \exp(i4\pi va) \quad (11)$$

若再对(11)式经透镜  $L_2$  作逆变换,则在输出面上有:

$$O(x, y) = FT^{-1}[I(u, v)] = |E_0|^2 \delta(x, y) + [t'(x, y) \star r'(x, y)] * \delta(x, y - 2a) +$$

$$[r'(x, y) \star t'(x, y)] * \delta(x, y + 2a) \quad (12)$$

式中,  $t'(x, y) = FT^{-1}[T(u, v) H^*(u, v)] = t(x, y) \star h(x, y) = W_t$ 。同理,  $r'(x, y) = W_r$ , 于是(12)式又可表示为如下形式:

$$O(x, y) = FT^{-1}[I(u, v)] = |E_0|^2 \delta(x, y) + [W_t \star W_r] * \delta(x, y - 2a) + [W_r \star W_t] * \delta(x, y + 2a) \quad (13)$$

上式表明,在输出面  $P_3$  上即可得到参考图像的小波变换和目标图像的小波变换之间的互相关输出。

由于基于小波变换的目标识别方式一方面可通过小波变换来抽取目标的边缘特性,同时去除背景噪声的影响,以实现图像的预处理,另一方面还将通过图像边缘增强图形之间的互相关实现相关识别。

从上面的分析中可见,当采用小波变换及联合变换相关器相结合来实现图像的相关识别的原理,与联合变换相关器的原理有异曲同工之妙。所不同的是, JTC 实现的是参考图像与目标图像的相关,而这里则实现的是参考图像的小波变换与目标图像的小波变换之间的互相关<sup>[2,3]</sup>。

图 4 是基于小波变换的联合变换相关器的实验框图。



图4 联合变换相关器的实验框图

#### 5 小波变换实现图像相关识别的系统讨论与分析

##### 5.1 光学小波的选择

在光学小波变换的实现中,通常运用的小波函数有 Harr 小波、Mexican-hat 小波、Morlet 小波等,当分析 Mexican-hat 小波时,发现该小波满足所谓的“容许条件”,且其傅里叶变换是一正的实函数,为此选择了 Mexican-hat 小波作为系统的母小波,LI 等人<sup>[4]</sup>指出:当采用 Mexican-hat 小波进行滤波时,由于其输出的光强分布是一双峰结构,处理结果不尽如人意,故将该小波加以改进,改进后的一维 Mexican-hat 小波为:

$$h_1(x) = \frac{2.718}{4\sqrt{2\pi}\sigma} h(x) + 2.718 \left[ \frac{\lambda f x}{4\pi\sigma^2} + \frac{\sqrt{2}\lambda f}{8\pi\sigma} \times \left( 1 - \frac{x^2}{\sigma^2} \right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k k!}{(2k+1)!} \left( \sqrt{2} \frac{x}{\sigma} \right)^{2k+1} \right] i \quad (14)$$

式中,  $\sigma > 0$  为伸缩因子,  $\lambda$  为光波波长,  $f$  为透镜焦距,  $h(x)$  为一维 Mexican-hat 小波, 其形式为:

$$h(x) = [1 - (x/\sigma)^2] \exp[-1/2(x/\sigma)^2] \quad (15)$$

经过傅里叶变换即可得到  $h_1(x)$  的频谱, 并可将一维形式推广到二维形式。当采用改进的 Mexican-hat 小波提取信号时具有单峰的特征, 很明显比 Mexican-hat 小波的效果要好。

## 5.2 小波匹配滤波器的制作及其不同伸缩因子的实现

系统的识别能力依赖于小波函数和伸缩因子的正确选择, 而这主要依赖于输入图像的特征, 当目标图像和参考图像差别较大时, 如何兼顾好二者而制作出一个合适的小波滤波器显得非常重要。

小波匹配滤波器的制作方式有多种: (1) 采用光学方法来记录小波滤波器的二维全息; (2) 采用计算全息技术制作小波匹配滤波器; (3) 摄影透射滤波器的制作。总的来讲, 制作小波滤波器是非常复杂的, 通常为了得到合适的扩因子, 需要制作大量的具有不同伸缩因子的小波滤波器, 而且对滤波器实现其精确定位也存在一定的难度。为了解决这个问题, 可以通过改进  $4f$  傅里叶光学系统来降低小波滤波器的制作难度。其结构如图 5 所示<sup>[5]</sup>。

该结构特点是: (1) 直接采用发散球面波进行照明; (2) 物体的频谱面 (即照明光波的会聚像点所在平面) 移至透镜的前表面附近; (3) 输入物平面在透镜  $L_1$  的前表面附近。该系统的优点是可以对其频谱面上的坐标尺度进行放大, 其放大倍数与照明

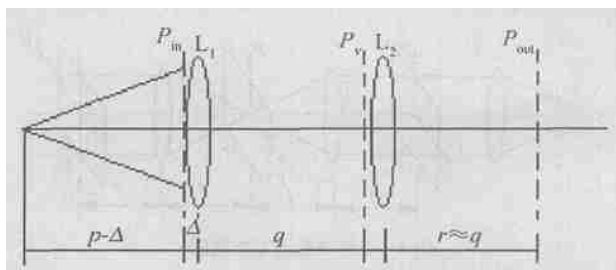


图5 改进的  $4f$  系统

光源和输入平面的位置有关。这对降低实验技术上的操作难度和提高实验精度具有十分重要的意义。

## 6 结束语

由于小波变换是一门新兴的科学, 目前尚处于迅速发展阶段, 鉴于小波变换突出的处理信号特点及其图像识别能力, 其应用前景必定十分宽广。

### 参 考 文 献

- [1] HUANG X J. Pattern correlation recognition using a binary wavelet filter [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2001, 12(10): 1068~1071.
- [2] LI J. Gao identification research of real-time based on joint wavelet transform structural [J]. Chinese Journal of Lasers, 1995, 22(10): 783~787.
- [3] ROBERGE D. Optical wavelet matched filter [J]. Appl Opt, 1994, 33(23): 5387~5293.
- [4] CHEN H M. Use the improvement Mexican-hat wavelet filter that is produced with calculates holographic realization 2-Dimension optical wavelet transform [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(5): 420~424.
- [5] WANG Q Q. Improve Fourier optical system to realize the frequency spectra enlarge of plane fractal signal and wavelet transform [J]. ACTA Optical Sinica, 2000, 20(2): 217~223.

(上接第 640 页)

应注意: 以上数据及示意图是针对右旋石英而言的。

## 4 结 论

(1) 由表 1 和图 3 可看出: 对石英来说, 随着波长的增大, 左、右旋圆偏振光的折射率都减小。波长在 500nm 以内, 左、右旋圆偏振光折射率下降很快; 当波长大于 500nm 后, 左、右旋圆偏振光折射率下降比较平缓。

(2) 由图 4 可看出: 随着波长的增大, 左、右旋圆偏振光的折射率差也在减小。当波长大于 2000nm

后, 左、右旋圆偏振光折射率差趋近于 0。

### 参 考 文 献

- [1] 宋光乐, 宋洪训, 杨兆华. 大学物理教程 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 298~300.
- [2] 李国华. 光学 [M]. 济南: 山东教育出版社, 1991. 433~435.
- [3] 新古隆一, 范爱英, 康昌鹤. 偏振光 [M]. 北京: 原子能出版社, 1994. 27~34.
- [4] 过巴吉. 非线性光学 [M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1984. 157~160.
- [5] 胡楚乐. 旋光晶体的寻常光折射率与左旋光和右旋光折射率的关系探讨 [J]. 内蒙古师范大学学报, 1999, 12(24): 21~22.
- [6] 仲维卓. 人工水晶 [M]. 北京: 科学出版社, 1994. 409.