

循环级联式的子波变换相关识别*

康 辉 周金鹏 许 剑 李 加 邓庆林 战元龄

(南开大学物理系 天津 300071)

张铁群 翟宏琛

(南开大学现代光学研究所)

提要 提出了一种时序循环级联式的子波变换相关识别系统。该系统是基于循环使用一个普通光学相关器,而相关器采用光折变全息图作为空间匹配滤波器,一个受计算机控制的空间光调制器作为输入器件,方位不同的参考光用于编码存储不同的输入信号、不同的子波和子波变换的傅里叶谱的多重信息。通过计算机控制系统互连网络和级联循环次数可完成用于不同目的的相关运算。给出简要的原理分析,并用纯光学方法实验研究了 Haar 子波变换、Haar 子波变换相关识别,并与普通相关识别作了对比。讨论了该系统所具有的诸多方面的特点。

关键词 子波变换相关识别, Haar 模板, 光折变匹配滤波器, 时序级联相关系统

1 引 言

近年来,子波变换日益引起研究工作者们的关注^[1]。这是因为它不仅具有傅里叶变换的所有优点,而且它还具有处理短暂和瞬变信号的独特能力^[2]。目前,它已广泛应用于图像处理、语音人工合成、模式识别、地震波的探测和分析、石油勘探、数据压缩和恢复等科技领域之中。

我们知道,子波变换使输出信号的维数倍增(1-D 函数的子波变换为二维函数,2-D 函数的子波变换变为四维函数),造成数据量的扩大。然而由于光子运算具有并行、快速、大容量和强的抗干扰能力,所以用光学方法实现子波变换将会具有很大的潜力。近年已有许多这方面的研究成果。由于子波变换具有多分辨和时、空局域定位分析的特点^[2],所以它是用于提取信号的局域特征、压缩信号数据量的实用工具。最近已有不少有关这方面的报道。如 Wang 等人利用光学 Haar 子波变换完成对图像边角特征的抽取^[3],本文作者亦曾利用 Haar 子波变换实现实时光学图像微分^[4]。另一方面,Sheng 等人提出了子波匹配滤波器的概念^[5],其滤波函数等于信号的傅里叶谱和子波函数功率谱的乘积。他们利用计算机全息术制备目标函数的空间匹配滤波器,用普通照相术制作子波函数的功率谱模板,将两者叠置在一起即构成所谓子波匹配滤波器。然后利用该滤波器在一个普通图像处理系统中进行空间滤波器操作即可得到两函数的子波变换 WT_f 和 WT_s 之间的相关运算。接着,Roberg 等人又进一步研究了一种组合子波匹配滤波器^[6],他们选用液晶电视器件产生纯相位组合匹配滤波器,从而提高了空间滤波器的衍射效率,并完成了多个物体的识别实验。由于在他们的实验中所采用的子波是 Mexican-hat 子波函数,它是高斯函数的二阶导数。在傅里叶平面上,这相当于一个带通滤波器。在一级近

* 国家自然科学基金、教委博士点基金和天津市教委“阳光计划”资助项目。

似下,它的表示式与文献[7]中的微分滤波函数的形式类同。冯继恒等人在该文^[7]中讨论了微分联合变换相关器,由于微分运算突出了图像的边缘,所以大大提高了系统的相关识别能力^[5,6]。

本文基于匹配滤波操作,提出一种时序循环级联形式的子波变换相关识别系统。描述了该系统的基本结构、工作原理和操作过程,并进行了模拟光学实验。在实验中,所采用的是适于抽取图像角和边缘特征的 Haar 子波,它是利用镀膜方法制作成一种透射型的子波模板。子波函数的空间匹配滤波器是通过角分复用的准直参考光在光折变晶体中记录傅里叶变换全息图得到的。利用 1-D 和 2-D Haar 子波模板分别在系统中完成了对输入图像的子波变换以及两个信号子波变换之间的相关运算。实验结果表明,由于 1-D Haar 子波变换能抽取图像的边缘特征,2-D Haar 子波变换能抽取图像的角特征,所以子波变换相关输出的信号主峰得到极为明显的锐化,旁瓣比得到改善,通过适当的取阈,系统输出的信噪比和相关识别能力均会得到增强^[7]。

2 原 理

基于级联相关运算的子波变换和图像识别的原理方框图示于图 1。

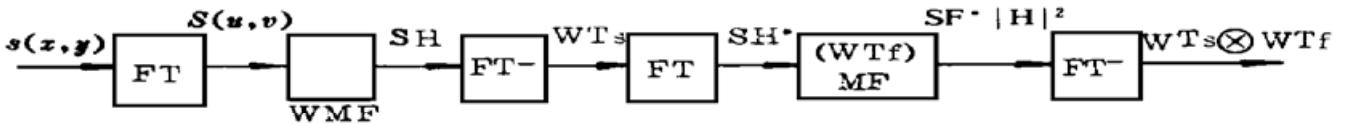


图 1 实现子波变换和相关识别的运算方框图

Fig. 1 The operational block diagram of the wavelet transform and the correlation recognition

其中,FT 是傅里叶变换算符,⊗ 为相关运算符。FT “·”表示·函数的傅里叶变换,WT_x表示 x 函数的子波变换,WMF 表示子波函数的空间匹配滤波器,(WT)MF 表示子波变换的匹配滤波器。

设 $s(x, y)$ 为信号函数, $f(x, y)$ 为目标函数, $h(x, y)$ 为子波函数,则有 $S(u, v) = FT \{s\}$, $F(u, v) = FT \{f\}$, $H(u, v) = FT \{h\}$ 。 $s(x, y)$ 的子波变换式可表示为^[5]

$$\begin{aligned}
 WT_s(a_x, a_y; b_x, b_y) &= s(x, y) \otimes h(x, y) \\
 &= \iint S(u, v) H^*(a_x u, a_y v) \cdot \exp[i2\pi(b_x u + b_y v)] dudv \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中略去了比例系数。其中频域内的子波变换表示式的操作过程由图 1 的前三个方框图表示。

同样,图 1 的后三个方框图所表示的运算公式为

$$\begin{aligned}
 WT_s \otimes WT_f &= \iint S(u, v) F^*(u, v) |H(a_x u, a_y v)|^2 \exp[i2\pi(b_x u + b_y v)] dudv \\
 &= FT^{-1} \{SF^* |H|^2\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

很明显,在相关操作的级联系统中,前级完成输入函数的子波变换,后级则完成子波变换的相关运算。若将前级作为输入图像的预处理器,通过子波变换抽取图像的特征信息,再经过后级的空间滤波操作进行相关识别,则必将会提高系统的相关识别能力^[7]。

3 循环级联形式的子波变换相关器的光学装置

为了用光学方法实现以上的运算过程,可采用图 2 所示的实验装置。图中,SLM—空间光

调制器, FTL—傅里叶变换透镜, PC—光折变晶体, H —全息图, R —平行参考光束, L —准直透镜, BD_1 —光束开关偏转器, BD_2 —光开关, OD—输出信号显示器, DC—数字计算机, D_1 和 D_2 —CCD 摄像机。

循环级联形式的相关器的工作过程描述如下:

由计算机源生子波函数^[6], 控制空间光调制器 (如磁光调制器^[8]、LCLV^[9]等), 它将子波函数显示于 FTL₁ 的前焦平面上。控制 BD_1 和 BD_2 (BD_1 的作用是提供和截断不同方向的参考光束。 BD_2 的作用是, 当记录全息图时, 阻挡参考光不进入接收器 D_1 ; 再现全息图时, 让衍射光束通过), 以引入平行参考光束 R_1 , 在晶体中记录子波函数的傅里叶变换全息图 H_1 。所需要的衍射光场分量为^[10]

$$T_H(u, v) = T_0 H^*(au, av) \exp[-i2\pi(\alpha_1 f u + \beta_1 f v)] \quad (3)$$

其中 (α_1, β_1) 为参考光束 R_1 的方向余弦。

当记录好子波函数的空间匹配滤波器 H^* 以后, 计算机将目标信号 $f(x, y)$ 送入 SLM, 同时控制 BD_1 和 BD_2 , 以便挡掉参考光 R_1 , 只让 $f(x, y)$ 的傅里叶谱 $F(u, v)$ 再现全息图 H_1 , 再现光束经 FTL₂ 作逆傅里叶变换后, 探测器 D_2 则得到 $f(x, y)$ 的子波变换 WTf 。计算机再将 WTf 作为目标图像输入 SLM, 同时控制 BD_1 和 BD_2 , 只引入平行参考光 R_2 , 记录函数 WTf 的傅里叶变换全息图 H_2 , 它即为子波变换的匹配滤波器 $F^* H$ 。接着, 计算机将待识别的信号 $s(x, y)$ 输入 SLM, 并控制 BD_1 和 BD_2 , 挡掉参考光, 只让 $S(u, v)$ 再现 H_1 , 于是在 D_2 平面上输出 WTs 。然后, 计算机将其作为输入送给 SLM, 并控制 BD_1 和 BD_2 , 使全息图 H_2 工作, 于是在 D_2 平面上最后得到 $WTs \otimes WTf$, 即两函数 $s(x, y)$ 与 $f(x, y)$ 的子波变换的相关输出。

4 光学模拟实验及结果

为了验证以上子波变换相关识别的工作原理, 我们采用纯光学方法进行了模拟实验。在所用的光学相关器中, 一台低功率的 He-Ne 激光器作为相干光源以提供物光和参考光束, 光折变晶体掺杂 LiNbO₃ 被用作全息记录材料, 焦距 $f = 240$ mm 的普通透镜作为傅里叶变换元件 FTL₁ 和 FTL₂。根据需要选用 Haar 透射模板作为子波函数, 它是利用镀膜方法制成的。将其放在 FTL₁ 的前焦面上, 它的伸缩因子由一矩孔光阑 (作为窗口函数) 的大小控制。在实验时所用的物函数是一个英文大写字母 “F”, 为了抽取它的直边特征和角特征, 选用的 1-D 和 2-D 子波函数的空间尺寸分别为 2×1 (mm) 和 2×2 (mm), 得到的输入图像的子波变换分别示于图 3 中, 图中 (a) 是 2-D 子波变换的结果。(b)、(c) 和 (d) 是 1-D Haar 片 (或物体、空间滤波器) 在空间不同取向时 1-D 子波变换的实验结果。再利用图 3 (a) 和 (b) 所示的预处理图像作为输入函数, 分别记录它们的空间匹配滤波器进行相关识别实验, 所得物函数子波变换的自相关运算结果分别示于图 4 (a) 和 (b) 中。为了进行对比, 还在图 4 (c) 中示出物函数的普通匹配滤波法所得到的自相关输出。理论分析表明, 字母 F 的角特征图像的自相关函数是一些离散点的组合, 而一维直边特征图像的自相关函数是一些离散线段的组合, 这与实验结果完全一致。经过粗略估算

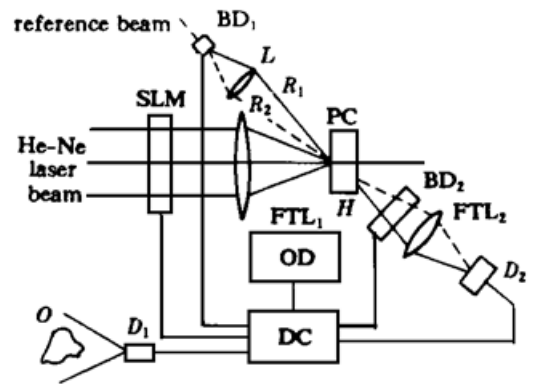


图 2 用于子波变换和图像识别的循环级联式的光学相关系统

Fig. 2 A cycle-cascade correlation system for wavelet transform and pattern recognition

可知, 字母 F 经过子波变换预处理后的自相关函数的主峰强度至少为次峰的二倍。

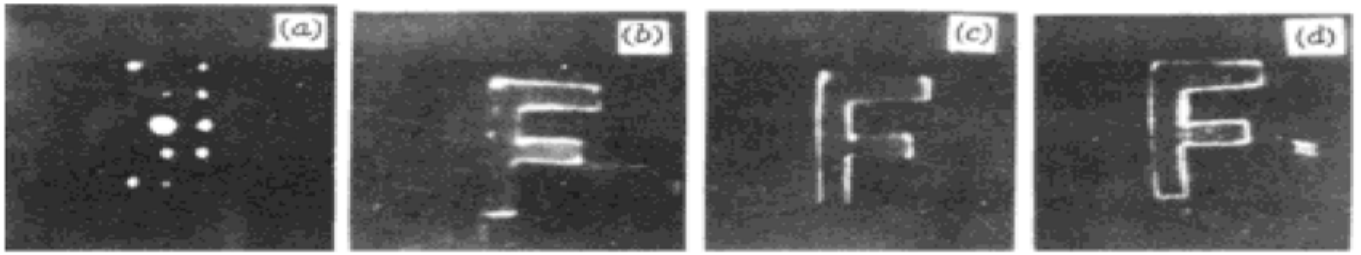


图3 Haar子波变换的实验结果。(a) 二维子波函数的情况;(b), (c) 和(d) 分别为一维子波函数的情况

Fig. 3 The experimental results of Haar wavelet transform for (a) 2-D wavelet, (b), (c) and (d) 1-D wavelet

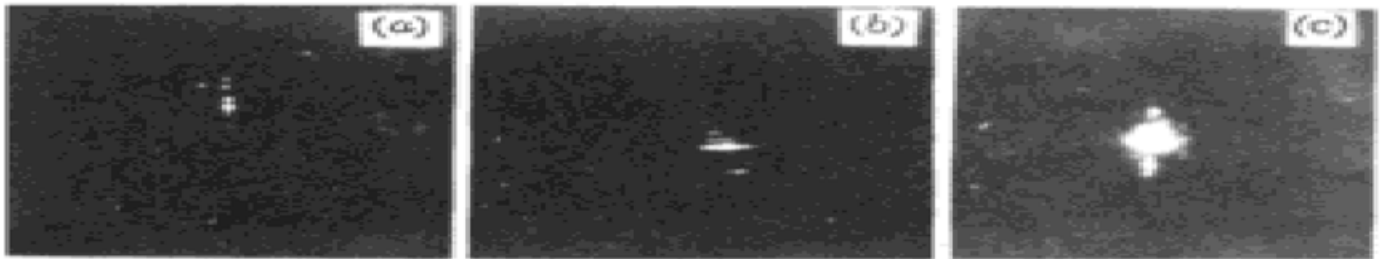


图4 物函数经子波变换预处理后的自相关实验结果。(a) 二维子波变换情况;(b) 一维子波变换情况;
(c) 为了与(a) 对比物函数未经过子波变换预处理时的情况

Fig. 4 The experimental results of auto-correlation for (a) 2-D WT function, (b) 1-D WT function, and (c) object function without WT preprocessing

由实验结果不难看出, 利用子波变换作为输入图像的预处理, 可突出图像的局部特征信息。这不仅压缩了图像的信息量, 而且利用这种特征信息进行相关识别, 将会提高系统的相关识别能力。

5 讨 论

理论分析和模拟实验结果表明, 本文所讨论的光学子波变换相关识别原理和所采用的某些实验方法, 它们都是切实可行的。与已报道的与此有关的某些工作相比, 它具有一些明显的优点和特征: (1) 由于它的工作原理是基于频谱滤波的光学相关器的级联, 所以具有平移不变性。而且, 既可得到函数的子波变换, 又可得到它们的相关运算结果, 从而增加了系统的功能和处理信息的灵活性; (2) 由于是相关器的重复使用, 所以简化了系统的结构, 缩小了体积; (3) 由于采用光折变材料作为全息记录介质, 这不仅使全息图可达到较高的衍射效率, 而且还克服了某些其它记录材料(如银盐胶片、光聚合物等)所必须的线外操作步骤以及高精度调整复位等一系列问题, 可较好地实现实时操作。除此以外, 理论分析和实验研究均已证明, 光折变晶体具有大的信息存储容量。所以利用它可同时存储多种不同类型的子波函数, 或者不同目标物函数的子波变换的匹配滤波器, 通过时序操作, 可根据需要实现灵活选择的目的; (4) 利用镀膜方法制备 Haar 子波片, 方法简单, 工艺成熟, 精确可靠。所得透射 Haar 片(如与偏振法相比)具有较高的光能利用率; (5) 利用计算机可对系统的输入和输出信号进行非线性操作以适应于不同的目的和要求。而且通过它控制循环次数, 还可以灵活地选择多种运算的输出, 如子波变换输出、普通匹配滤波相关输出以及子波变换相关识别的输出等。

参 考 文 献

- 1 H. Szu, H. Caulfield. Wavelet transforms. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(9) : 1823~ 1824
- 2 H. Szu, Y. Sheng, J. Chen. The wavelet transform as a bank of the matched filters. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(17) : 3267~ 3277
- 3 W. Wang, G. Jin, Y. Yan *et al.*. Image feature extraction with the optical Haar wavelet transform. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(4) : 1238~ 1242
- 4 康 辉, 苏 衡, 杨方正 等. 利用液晶光阀实现实时图像微分. *中国激光*, 1994, **A21**(8) : 657~ 660
- 5 Y. Sheng, D. Roberge. Optical wavelet matched filters for shift-invariant pattern recognition. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(4) : 299~ 301
- 6 D. Roberge, Y. Sheng. Optical composite wavelet-matched filters. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(7) : 2290~ 2294
- 7 冯继宏, 金国藩, 邬敏贤 等. 基于微分滤波的联合变换相关. *光学学报*, 1995, **15**(3) : 326~ 331
- 8 T. Burns, K. Tiedling, S. Rogers *et al.*. Optical Haar wavelet transform. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(9) : 1852~ 1858
- 9 G. Paul, Y. Sheng. Optical phase-dominant filter using liquid crystal television. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(9) : 2165~ 2172
- 10 于美文. 光全息和信息处理. 北京: 国防工业出版社, 1984, 71~ 74

Cycle-cascade Wavelet Transform Correlation Recognition

Kang Hui Zhou Jinpeng Xu Jian Li Jia Deng Qinglin Zhan Yuanling

(*Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Zhang Tiequn Zhai Hongchen

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract A sequential cycle-cascade correlation system for wavelet transform (WT) of images and correlation recognition based on feature extracting by WT is presented. The basic structure of the correlation system consists of a usual optical correlator. In this correlator, spatial light modulators can be used as real-time input device. A piece of photorefractive crystal is used as an information storage element, a vast number of signal data are recorded in Fourier transform holograms by spatially encoding reference beams, such as different spatial frequency spectra of object functions, wavelet functions and WT functions of signals. The input and output signals, and sequential operation procedures of the correlation system are controlled by a computer, which can collect the input and the output signals by CCD cameras, record them, and process them in nonlinear thresholding.

In this paper, the optical analogous experimental results of wavelet transform of 2-D images and their correlation recognition are provided in the cases of 1-D and 2-D Haar wavelets. For comparison, the optical result of usual correlation experiment is also presented. It is very obvious that the wavelet transform correlation recognition possesses more high discriminability than the usual correlation recognition. In addition, some other advantages of the cycle-cascade correlation system are discussed finally.

Key words wavelet transform correlation recognition, Haar mask, photorefractive matched filter, sequential cycle-cascade correlation system