

文章编号: 0258-7025(2004)03-0328-04

# 以分数相关为基础的微小差异图样的识别

王应宗<sup>1</sup>, 霍义萍<sup>2</sup>, 杜艳丽<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062; <sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 光学图样识别(OPR)由光学相关来实现,传统的光学相关通过两物体相关峰的尖锐度来判断两物体的相似程度。分数傅里叶变换同时包含了空间域和空间频率域信息,分数相关也可以用于光学图样识别。针对传统相关难以识别微小差异图样的缺点,将分数傅里叶变换和分数相关引入差异相关系统,提出了一种基于分数相关的识别方法。给出了实现这一方法的光电混合系统。计算机模拟处理的结果表明,通过调节分数傅里叶变换的级次,该方法不仅能有效地识别与参考图样有微小差异的图样,而且能提供差异的位置信息。随着分数相关的级次渐变为0,得到的分数差异相关峰逐渐退化为两信号之间的差异;随着分数相关级次渐变为1,分数差异相关渐变为差异相关的结果。

**关键词** 信息处理技术;光学图样识别;分数相关;分数傅里叶变换;光电混合处理

中图分类号 O 438 文献标识码 A

## Recognition of Images with Small Differences Based on Fractional Correlation

WANG Ying-zong<sup>1</sup>, HUO Yi-ping<sup>2</sup>, DU Yan-li<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)  
(<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The optical pattern recognition is realized by optical correlation, the traditional optical correlation judge the similarity degree of two images by their correlation peak. The fractional Fourier transform contains the spatial information and the spatial-frequency information simultaneously. The fractional correlation can be used to optical pattern recognition too. To overcome the defect that the traditional optical correlator can not recognize images with small differences, a new method based on the fractional correlation was proposed. The theory of the photoelectric hybrid system for realizing this method is given. The simulated results showed that by adjusting the fractional order  $p$ , the correlator can not only recognize nearly identical images efficiently, but also provide the position information of differences. As the fractional order  $p$  approach zero, the fractional difference correlation peak became to the difference of two images; as the fractional order  $p$  approach one the result is the same as the result of difference correlation.

**Key words** information processing technique; optical pattern recognition (OPR); fractional correlation; fractional Fourier transform (FRT); photoelectric hybrid processing

## 1 引言

分数傅里叶变换(FRT)是光学信息处理中的一个新的分支<sup>[1~3]</sup>。近十多年来对其性质和光学应用已进行了广泛的研究<sup>[2~8]</sup>。分数傅里叶变换被认为是双域信息联合表示,同时包含了空间域和空间频率域信息,为光学信息处理提供了更大的自由度。

光学模式识别(OPR)是光学信息处理领域中一个有着广泛发展前途的课题<sup>[9]</sup>,实现模式识别的传统方法是光学相关,由分数傅里叶变换衍生而来的分数相关<sup>[10~12]</sup>亦可用于光学模式识别。最近的研究表明,分数相关由于可以对分数级次进行调节,因此具有更强的识别功能。然而仅仅通过观察目标和参

收稿日期:2002-10-14;收到修改稿日期:2003-01-24

作者简介:王应宗(1945—),男,陕西西安市人,教授,理学硕士,主要从事全息和光学信息处理的研究。E-mail:wangyz47@163.com 万方数据

考图样的相关峰难以识别差异很小的目标图样。针对这一困难提出的若干解决方案<sup>[13~15]</sup>仅适用于周期性或准周期性物体的识别,而且理论和处理过程也较为复杂。

为解决这一问题,不久前我们提出了一种差异相关的方法<sup>[16]</sup>。它虽然具有较强的识别能力,但不能提供差异的位置信息。为此,本文将分数傅里叶变换和分数相关引入我们先前提出的差异相关系统。数值模拟结果表明,通过调整分数傅里叶变换的级次,该系统不仅对结构复杂的相似物体具有很强的识别能力,并且能够指示出差异的位置所在。

## 2 分数傅里叶变换与分数相关

分数傅里叶变换是傅里叶变换的一种广义形式。如果设输入信号为  $u(x, y)$ , 则其分数傅里叶变换定义为

$$U_p = F^p \{u(x, y)\} = \int u(x, y) \exp \left\{ \frac{i\pi}{\lambda f_1} \left[ \frac{(x^2 + y^2 + \xi^2 + \eta^2)}{\tan \varphi} - \frac{2(x\xi + y\eta)}{\sin \varphi} \right] \right\} dx \quad (1)$$

式中  $\varphi = p\pi/2$ ,  $p$  为分数化级次,  $f_1$  为具有长度单位的标准参数。分数傅里叶变换同时满足边界条件

$$U_0 = I, U_1 = U$$

和线性性质

$$F^p \{au(x, y) + bv(x, y)\} = aF^p \{u(x, y)\} + bF^p \{v(x, y)\} \quad (2)$$

分数傅里叶变换的光学实现方法最早由 D. Mendlovic<sup>[2]</sup> 等提出,它可通过一段长度为特征长度的分数倍的介质波导来实现。后来 A. W. Lohmann<sup>[3]</sup> 根据 Fresnel 衍射理论提出可由单透镜来实现分数傅里叶变换。其光路图如图 1 所示:在  $s_1$  面放置输入函数,则在  $s_2$  面上将得到输入函数的分数傅里叶变换谱。光程  $d$  和透镜焦距  $f$  决定分数傅里叶变换的级次,且有关系:  $d = (1 - \cos \varphi)f$ 。

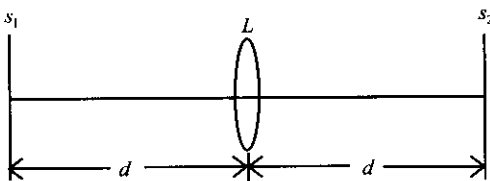


图 1 单透镜实现分数傅里叶变换

Fig. 1 Optical setup for defining fractional Fourier transform

如果设输入信号和参考信号分别为  $u(x, y)$  和  $h(x, y)$ , 那么基于傅里叶变换的传统相关定义为:物信号的傅里叶谱  $U(v)$  乘以参考信号的傅里叶谱的共轭  $H^*(v)$ , 然后进行乘积的傅里叶逆变换,即

$$C_1(x, y) = \int u(x_0, y_0) h^*(x_0 - x, y_0 - y) dx_0 dy_0 = \int U(\xi, \eta) H^*(\xi, \eta) \times \exp[2i\pi(\xi x + \eta y)/\lambda f_1] d\xi d\eta \quad (3)$$

分数相关可以用相似的方法定义:对物信号  $u(x, y)$  和参考信号  $h(x, y)$  分别进行  $p_1$  级次的分数傅里叶变换,得到

$$U_{p_1}(\xi, \eta) = F^{p_1} \{u(x, y)\}$$

$$H_{p_1}(\xi, \eta) = F^{p_1} \{h(x, y)\}$$

物信号的分数傅里叶谱  $U_{p_1}(\xi, \eta)$  乘以参考信号的分数傅里叶谱的共轭  $H_{p_1}^*(\xi, \eta)$ , 然后对其乘积进行  $p_2$  级次的分数傅里叶变换,这样就得到了  $u(x, y)$  与  $h(x, y)$  的分数互相关  $C_{p_1, p_2}(x, y)$ 。即

$$C_{p_1, p_2}(x, y) = F^{p_2} \{U_{p_1} H_{p_1}^*\} \quad (4)$$

当  $p_2 = -p_1 = -p$  时, (4) 式可化为

$$C_p(x, y) = F^{-p} \{U_p H_p^*\} \quad (5)$$

在这种对称情况下,分数傅里叶变换与傅里叶变换最为相似,最具有逻辑意义<sup>[5]</sup>。在以下的讨论中,我们就采用这种定义。

若  $u(x, y) = h(x, y)$ , 得到函数  $u(x, y)$  的分数自相关,即

$$C_p(x, y) = F^{-p} \{U_p U_p^*\} = F^{-p} \{|U_p|^2\} \quad (6)$$

相关操作在光学信息处理中经常被用来确定输入物体和目标的相似程度,以分数傅里叶变换为基础的分数相关也可以用于光学模式识别,为了得到尖锐的相关峰,分数级次还应满足一定的条件。分数相关峰强度不仅同两物体的相似程度有关,还同两物体的相对位置有关。通过改变分数傅里叶变换的级次,分数相关的平移特性还可以得到控制<sup>[12]</sup>。

## 3 微小差异目标识别的理论和处理系统的描述

设  $f(x, y)$  为参考信号的复振幅,  $f'(x, y)$  为待测信号的复振幅。分别对  $f(x, y)$  和  $f'(x, y)$  作级次为  $p$  的分数傅里叶变换,得到

$$F_p = F^p \{f(x, y)\}$$

$$F_p' = F^p \{f'(x, y)\}$$

$F^p \{ \}$  表示级次为  $p$  的分数傅里叶变换,进行如下的恒等变换

$$\begin{aligned}
 &|F_p' - F_p|^2 = \\
 &|F_p'|^2 + |F_p|^2 - F_p'F_p^* - (F_p')^*F_p = \\
 &2|F_p'|^2 + 2|F_p|^2 - \\
 &[F_p'|^2 + |F_p|^2 + F_p'F_p^* + (F_p')^*F_p] = \\
 &2(|F_p'|^2 + |F_p|^2) - |F_p' + F_p|^2 \quad (7)
 \end{aligned}$$

上述变换提示,由于光学探测器不能直接对场振幅  $F_p, F_p'$  响应,因而用纯光学方法直接得到  $F_p' - F_p$  是困难的。但(7)式右边的每一项均可由光学的方法实现,并且右边的加减运算也容易通过计算机实现,从而可得到  $|F_p' - F_p|^2$ ,再对  $|F_p' - F_p|^2$  作级次为  $-p$  的分数傅里叶变换,得到

$$F^{-p}\{|F_p' - F_p|^2\} \quad (8)$$

为了讨论式(8)的物理意义,令

$$u(x, y) = f'(x, y) - f(x, y)$$

对  $u(x, y)$  作级次为  $p$  的分数傅里叶变换,并利用分数傅里叶变换的线性性质,可得

$$\begin{aligned}
 U_p &= F^p\{u(x, y)\} = F^p\{f'(x, y) - f(x, y)\} = \\
 &F^p\{f'(x, y)\} - F^p\{f(x, y)\} = F_p' - F_p \quad (9)
 \end{aligned}$$

所以,式(8)可以变形为

$$F^{-p}\{|U_p|^2\} = F^{-p}\{U_p U_p^*\} \quad (10)$$

根据分数相关的定义,式(10)是  $u(x, y)$  的分数自相关,即  $f'(x, y) - f(x, y)$  的分数自相关。因此文献[16]的结果可看作是上式  $p$  为 1 的一个特例。

根据这一原理,构建了一个由马-曾干涉仪改装的光电混合处理系统,其原理如图 2 所示。其中,  $x_1 y_1$  平面为参考图像的输入平面,  $x_2 y_2$  平面为待测图像的输入平面。  $k_1$  和  $k_2$  为光束通断控制快门。从激光器来的光束扩束后经分束镜 BS1 分为两束,其中一束经反射镜  $M_1$  反射,反射光经透镜  $L_1$  完成参考图像的分数傅里叶变换;另一束光经  $M_2$  反射,反射光经透镜  $L_2$  完成待测图像的分数傅里叶变换。在输出端 CCD 与数字计算机连接,用计算机处理采

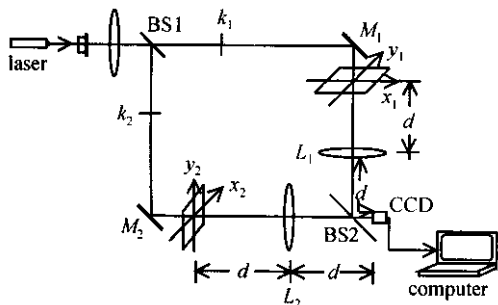


图 2 光电混合处理系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the photoelectric processing system

集到的数据。操作过程为  $k_1$  打开,  $k_2$  关闭, 计算机输入  $|F_p|^2$ 。  $k_1$  关闭,  $k_2$  打开, 计算机输入  $|F_p'|^2$ 。  $k_1, k_2$  同时打开, 计算机输入  $|F_p + F_p'|^2$ , 为了实现这一点, 马-曾干涉仪的两臂光程应严格相等。然后先按程序完成(7)式的运算, 再启动分数傅里叶变换的程序完成(8)式表达的差异的分数相关。由于接收器件 CCD 的响应时间很短, 且不需显影等化学过程, 因此光电混合处理使探测过程成为准实时过程。

### 4 数值模拟结果及讨论

图 3 是分子晶格点阵结构模型, 其中,  $f$  为参考信号,  $g_1, g_2$  分别为待识别信号。  $g_1$  比  $f$  缺少一个单元;  $g_2$  与  $f$  单元数相同, 但有一个单元离位。图 4~7 给出了分数相关级次分别为 0, 0.1, 0.9, 1 的处理

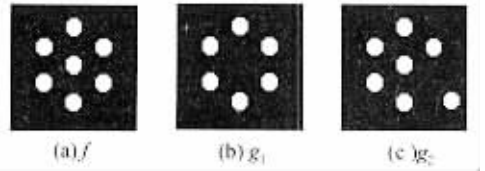


图 3 分子晶格点阵模型示意

Fig. 3 Sketch map of molecule crystal lattice model

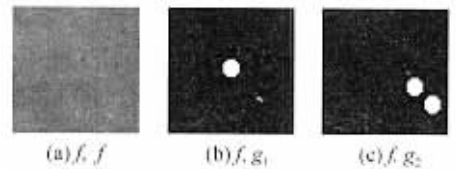


图 4 分数级次为 0 时的差异相关

Fig. 4 Difference correlation with fractional order  $p = 0$



图 5 分数级次为 0.1 时的差异相关

Fig. 5 Difference correlation with fractional order  $p = 0.1$



图 6 分数级次为 0.9 时的差异相关

Fig. 6 Difference correlation with fractional order  $p = 0.9$

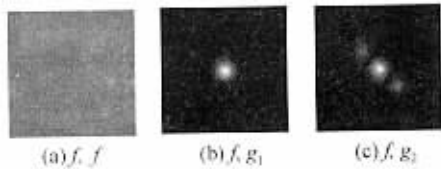


图 7 分数级次为 1 时的差异相关

Fig. 7 Difference correlation with fractional order  $p = 1$

结果。从这些结果可以看出,在目标图样和参考图样相同时系统给出零输出,在有小的差异时给出相关峰。当分数相关的级次为 0 时,实际上是输入信号和参考信号直接相减,得到两信号之间的差异;当分数相关的级次为 0.1 时,相关峰的形状与级次为 0 时相似;当分数相关的级次为 0.9 时,相关峰的形状与  $p$  为 1 时的相关峰相似。由此可知,随着分数差异相关的级次渐变为 0,得到的分数相关峰逐渐退化为两信号之间的差异;随着分数相关级次渐变为 1,分数相关渐变为文献[16]的结果。因此,当取到一定小的级次时,得到的分数相关不仅能识别微小差异物体,还能指示出差异所在的位置。

### 参 考 文 献

- 1 V. Namias. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics [J]. *J. Inst. Maths Applies*, 1980, **25**:241~265
- 2 D. Mendlovic, H. M. Ozaktas. Fractional Fourier transforms and their optical implementation; I [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(9):1875~1881
- 3 A. W. Lohmann. Image rotation, Wigner rotation and the fractional Fourier transform [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(10):2181~2186

- 4 M. A. Kutay, H. M. Ozaktas, O. Arijan *et al.*. Optical filtering in fractional Fourier domains [C]. *IEEE Trans. Sig. Proc.*, 1997, **45**(5):1129~1143
- 5 D. Mendlovic, H. M. Ozaktas, A. W. Lohmann. Fractional correlation [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **35**(2):303~309
- 6 D. Mendlovic, Y. Bitran, R. G. Dorsch *et al.*. Optical fractional correlation: experiment results [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(8):1665~1670
- 7 A. W. Lohmann, Z. Zalevsky, D. Mendlovic. Synthesis of pattern recognition filters for fractional Fourier processing [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **128**(4/6):199~204
- 8 Zhu Banghe, Han Li, Xie Hongwei. The properties of fractional correlation peak based on fractional Fourier transform [C]. *The Fourth International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 1999, **13**:868~872
- 9 J. W. Goodman. Introduction of Fourier optics [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1968. 177~184
- 10 Banghe Zhu, Shutian Liu, Lixue Chen. Fractional profilometry correlator for three-dimensional object recognition [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(35):6474~6478
- 11 Sergio Granieri, Myrian Tebaldi, Walter D. Furlan. Parallel fractional correlation: an optical implementation [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(35):6439~6444
- 12 Han Li, Liu Shutian, Wang Qi *et al.*. The study on aberrance invariability characteristic of fractional correlation pattern recognition [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2000, **29**(2):131~135
- 13 韩利,刘树田,王骥等. 分数相关畸变不变模识别特性研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(2):131~135
- 13 Y. Mejia-Barbosa. Correlation-based method for comparing and reconstructing nearly identical two-dimensional structures [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(2):235~239
- 14 V. B. Markov, Y. Mejia, R. Castaneda. Correlation analysis of pseudo-identical structures for pattern recognition [C]. *SPIE*, 1996, **2659**:187~196
- 15 Y. Mejia, V. B. Markov, R. Castaneda. Analysis of a quasi-periodical structure through its autocorrelation function [J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(10):2845~2851
- 16 Wang Yingzong, Huo Yiping, Du Yanli *et al.*. A photoelectric hybrid system for recognition of nearly identical images [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2002, **31**(9):1143~1145
- 王应宗,霍义萍,杜艳丽等. 一种用于相似图像识别的光电混合处理系统[J]. *光子学报*, 2002, **31**(9):1143~1145