

文章编号: 0258-7025(2001)05-0429-06

分数相关尺度畸变不变模式识别特性研究^{*}

韩 利¹ 刘树田² 王 骥¹ 李润顺¹ 朱帮和²

(哈尔滨工业大学¹ 航天电子与光电工程系; 应用物理系 哈尔滨 150001)

提要 从理论上分析了分数相关的分数级次对相关输出面能量分布的影响,利用数值模拟方法,对分数相关尺度畸变不变模式识别特性进行了深入的讨论,并与传统相关器进行了比较。结果表明在尺度畸变不变模式识别中,分数相关方法比传统相关方法有着更强的识别能力。

关键词 光学相关,尺度畸变不变模式识别,分数傅里叶变换,光学模式识别

中图分类号 O 438.2 **文献标识码** A

Study on the Performance of Fractional Correlation Applied in Scale Distortion-invariant Pattern Recognition

HAN Li¹ LIU Shu-tian² WANG Qi¹ LI Run-shun¹ ZHU Bang-he²

(¹Department of Astronautic-Electronic and Opto-Electronic Engineering;

²Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract In this paper, the impact of the orders of fractional correlator on the energy distribution of the correlation plane is analyzed theoretically, and then the performance of fractional correlator for scale distortion-invariant pattern recognition is discussed deeply by numerical method based on the matched-filtering configuration. A comparison is made with the conventional correlation that shows the fractional correlation possesses more powerful capability of scale distortion-invariant pattern recognition than that of the conventional correlation.

Key words optical correlator, scale distortion-invariant pattern recognition, fractional Fourier transform, optical pattern recognition

1 引 言

光学模式识别方法由于其并行、高速的数据处理能力而得到广泛的研究^[1]。传统相关器(Classic Correlator, CC)成功地利用了傅里叶变换的空不变性质对目标进行识别和定位,但对输入目标的特征畸变(诸如尺度和旋转变化)则十分敏感,目标特征的较小变化都会引起相关峰的较大改变,从而给识别结果的精确判读带来困难。而在实际应用中,这些畸变是经常存在的。例如,在对军事目标的探测中,由于同一目标距离探测器远近不同,造成探测目标的尺度畸变,因此寻找尺度畸变不变相关方法成为模式识别领域中的重要研究课题。

神经网络理论(Neural Network Theory, NNT)^[2]、合成分辨函数(Synthetic Discriminant Function, SDF)^[3]以及圆谐展开(Circular Harmonic Expansion, CHE)^[4]方法都被提出用来克服传统相关器畸变不变模式识别特性的不足。理论上,这些方法在很大程度上提高了滤波器的畸变不变识别性能,但其在实际应用中的不足也应受到重视:若全光实现 NNT,整个装置则很复杂,实际制作 SDF 滤波器较为复杂,需采用多次曝光技术;而 CHE 滤波器的制作需依赖于展开中心的选取,而且这种选取又无简单的规律可以遵循。同时,这些不足也阻碍了它们在实时化处理方面的应用。相比而言,近年来基于分数傅里叶变换概念而提出的分数相关,由于其结构简单,并且易实现实时化处理^[5],同时又具有优化输出相关面能量分布的特性^[6]而引人注目。

分数傅里叶变换(FRT)的数学定义由 Namias 在 1980 年给出^[7],自 1993 年引入光学领域^[8,9]以来,

^{*} 教育部基金和国家自然科学基金(69577006)资助项目。

收稿日期:1999-12-29;收到修改稿日期:2000-02-28

对其在信息处理等方面的应用^[10~12]进行了广泛的研究。作为傅里叶变换的一种广义形式, FRT 具有两个特点:一是其变换级次的可叠加性。利用分数级次的级联,可实现多级、多通道滤波^[10],从而使传统的信息处理方法由平面型结构向立体型结构转变。另一方面, FRT 是部分空变的,分数级次表征了其部分空变程度的大小。因此,人们引入分数相关(Fractional Correlation, FC)^[13]的概念,利用 FRT 部分空变性质对空变模式识别进行研究^[14~16]。

本文将在 FC 峰值特性研究^[6]的基础上,进一步研究 FC 尺度畸变不变模式识别特性。通过数值模拟方法与传统相关器进行比较,可以看出在目标存在尺度畸变的情况下, FC 仍能保持较好的相关峰,有着更为优越的相关识别特性。

2 理论描述

2.1 分数傅里叶变换

对分数傅里叶变换有两种等价的解释。一种是基于光场在梯度折射率介质中传播的自聚焦效应^[8]。这一解释可以得到分数傅里叶变换定义的级数表达式,也使光纤成为进行信号分数傅里叶变换处理简单、易行的实现工具^[15]。另一种解释是在 Wigner 相空间的旋转运算^[9]。已知当光场进行一次傅里叶变换时,信号在 Wigner 相空间的表示将旋转 $\pi/2$ 。而当信号在相空间的表示旋转 $\pi/2$ 的非整数 p 倍时,相应地,信号在实际物空间的传播实现其 p 级次分数傅里叶变换。基于这种解释,可以得到易于理论分析的积分形式,有利于用分立光学元件实现。本文将引用积分形式的定义。

如果设输入信号为 $f(x)$, 则其 p 级分数傅里叶变换是基于积分核 $B(x, v)$ 的线性变换

$$F^p(v) = C \int f(x) B(x, v) dx \quad (1)$$

其中积分核 $B(x, v) = \exp\left\{ \frac{i\pi}{\lambda f_1} \left[\frac{(x^2 + v^2)}{\tan\phi} - \frac{2xv}{\sin\phi} \right] \right\}$ 而 $C = \frac{\exp\left\{ -i \left[\frac{\pi \operatorname{sgn}(\sin\phi)}{4} - \frac{\phi}{2} \right] \right\}}{|\sin\phi|^{1/2}}$ $\phi = p \frac{\pi}{2}$ p 为实值分数化级次, f_1 为具有长度单位的标准参数。即

$$F^p(v) = C \int f(x) \exp\left\{ \frac{i\pi}{\lambda f_1} \left[\frac{(x^2 + v^2)}{\tan\phi} - \frac{2xv}{\sin\phi} \right] \right\} dx \quad (2)$$

分数傅里叶变换同时满足边界条件和级次叠加性:

- 1) 边界条件: $F^0 = I, F^1 = F$
- 2) 叠加性: $F^\alpha F^\beta = F^\beta F^\alpha = F^{\alpha+\beta}$

对分数傅里叶变换其他性质的讨论可参阅文献[7~9]以及所引相关文献。由此可知,当分数化级次分别取 $p = 0$ 和 $p = 1$ 时,则(1)式将分别为 0 级分数傅里叶变换 - 恒等变换 I 和 1 级分数傅里叶变换 - 传统傅里叶变换 F , 由此可以分别得到输入信号 $f(x)$ 和其傅里叶谱 $F(v)$ 。因此,分数傅里叶变换又被认为是双域(空间域 - 空间频率域)信息联合表示,它同时包含着空间域和空间频率域信息。

2.2 分数相关

如果设输入的物信号和参考信号分别为 $u(x)$ 和 $h(x)$, 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 $U(v)$ 乘以参考信号傅里叶谱的共轭 $H^*(v)$, 然后进行乘积的逆傅里叶变换。即

$$V_{\text{FT}}(x) = \int u(x_0) h_0^*(x_0 - x) dx_0 = \int U(v) H^*(v) \exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda f_1} vx\right) dx \quad (3)$$

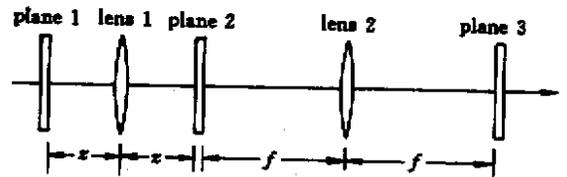


图 1 典型的分数相关系统图示

Fig. 1 Scheme of the typical fractional correlation system

分数相关可以以相似的方式进行定义。如图 1 所示的典型分数傅里叶变换系统示意图。在平面 P_1 输入的信号,经自由空间距离为 z 的 p_1 级分数傅里叶变换和平面 P_2 上参考信号 p_2 级分数傅里叶变换的共轭相乘,然后在平面 P_3 上得到其乘积的级分数傅里叶变换,作为系统的相关输出^[9,13]。此处变换透镜的焦距为 f 。这样,相关输出就由三个参数 p_1, p_2 和 p_3 来控制,从而可实现对相关输出面能量分布的优化^[6]。根据(1)式,如果设物信号和参考信号的分数傅里叶谱分别为

$$U(y) = \int u(x_1) \exp\left[i\pi \frac{(x_1^2 + y^2)}{\lambda f_1 \tan\phi_1} - 2i\pi \frac{x_1 y}{\lambda f_1 \sin\phi_1} \right] dx_1 \quad (4)$$

$$H(y) = \int h(x_2) \exp\left[i\pi \frac{(x_2^2 + y^2)}{\lambda f_1 \tan\phi_2} - 2i\pi \frac{x_2 y}{\lambda f_1 \sin\phi_2} \right] dx_2 \quad (5)$$

其中 y 为中间谱面的坐标。则输出相关场 $V(x)_{\text{FRT}}$ 可表示为

$$V(x)_{\text{FRT}} = \int U(y) H^*(y) \cdot$$

$$\exp\left[i\pi\frac{(x^2+y^2)}{\lambda f_1 \tan\phi_3} - 2i\pi\frac{xy}{\lambda f_1 \sin\phi_3}\right] dy =$$

$$\iiint u(x_1)h^*(x_2)\exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda f_1}\left[\frac{(x_1^2+y^2)}{\tan\phi_1} + \frac{(x_2^2+y^2)}{\tan\phi_2} + \frac{(x^2+y^2)}{\tan\phi_3}\right]\right\} \times$$

$$\exp\left[\frac{-2i\pi y}{\lambda f_1}\left(\frac{x_1}{\sin\phi_1} + \frac{x_2}{\sin\phi_2} + \frac{x}{\sin\phi_3}\right)\right] dy dx_2 dx_1 \quad (6)$$

如果令 $\phi_n = p_n \frac{\pi}{2}$, $n = 1, 2, 3$, 由上可知, 当 $\phi_1 = -\phi_2 = \frac{\pi}{2}$, $\phi_3 = -\frac{\pi}{2}$ (或 $p_1 = -p_2 = 1, p_3 = -1$) 时, 对应(6)式的分数相关器就是传统相关器^[1]。

为了优化输出峰, 需要舍去(6)式中影响输出面能量分布的二次位相因子^[14], 则下式需要满足

$$\frac{1}{\tan\phi_1} + \frac{1}{\tan\phi_2} + \frac{1}{\tan\phi_3} = 0 \quad (7)$$

因此相关输出为

$$|K(x)_{\text{FRT}}| =$$

$$\left| \lambda f \sin\phi_2 \exp\left[\frac{i\pi x^2}{2\lambda f_1 \sin^2\phi_3}(\sin 2\phi_2 + \sin 2\phi_3)\right] \times \int u(x_1)h^*\left(-x_1\frac{\sin\phi_2}{\sin\phi_1} - x\frac{\sin\phi_2}{\sin\phi_3}\right) \times \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda f_1}\left[\frac{\sin(\phi_1 + \phi_2)}{\sin^2\phi_1}x_1^2 + \frac{\sin 2\phi_2}{\sin\phi_1 \sin\phi_2}xx_1\right]\right\} dx_1 \right| \quad (8)$$

由于一般接收器只对功率响应, 所以对输出相关场取模, 并舍去常数因子

$$|K(x)_{\text{FRT}}| = \left| u(x_1)h^*\left(-x_1\frac{\sin\phi_2}{\sin\phi_1} - x\frac{\sin\phi_2}{\sin\phi_3}\right) \times \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda f_1}\left[\frac{\sin(\phi_1 + \phi_2)}{\sin^2\phi_1}x_1^2 - \frac{\sin 2\phi_2}{\sin\phi_1 \sin\phi_2}xx_1\right]\right\} dx_1 \right| \quad (9)$$

为分析简单起见, 我们取满足条件(7)的一种特殊情况进行讨论, 即取

$$\phi_1 = -\phi_2 = \phi_s, \phi_3 = -\frac{\pi}{2}$$

(或 $p_1 = -p_2 = p_s, p_3 = -1$) (10)

则输出相关面上的场分布为

$$|K(x)_{\text{FRT}}| = \left| \int u(x_1)h^*(x_1 - x\sin\phi_s)\exp\left(\frac{-2i\pi x_1 x}{\lambda f_1} \cot\phi_s\right) dx_1 \right| \quad (11)$$

可以看出, 当 $\phi_s = \frac{\pi}{2}$ ($p_s = 1$) 时,

$$|K(x)_{\text{FRT}}| = \left| \int u(x_1)h^*(x_1 - x)dx_1 \right| = |K(x)_{\text{FT}}| \quad (12)$$

即为传统相关输出表达式(3), 并且当 $x = 0$ 时

$$|K(0)_{\text{FRT}}| = |K(0)_{\text{FT}}| \quad (13)$$

即在不考虑噪声的影响下, 分数自相关的峰值保持不变, 并且也发生在中间位置。

由式(11)和(13)可以看出, 分数相关在保持和传统相关相同的自相关峰值时, 相关场的能量分布随着分数级次的不同而发生了变化。而传统相关的相关场能量分布是固定的(参看式(3))。因此, 当输入模式发生畸变时, 可以通过选择分数相关不同的分数级次, 以补偿输入模式的畸变, 来得到较理想的相关输出峰。从频率分析的角度来看, 空域和频域信息对信号畸变的响应是不同的。由于分数傅里叶变换是双域变换, 同时包含了空域和频域信息, 它们对信号畸变的响应程度的折中可以由分数级次来表征。因此, 利用双域信息的综合作用效果, 以达到改善相关器的畸变不变模式识别性能。下面用数值仿真研究将分数相关应用于尺度畸变不变模式识别, 将看到利用选择不同的分数级次来补偿输入模式的畸变以获取较理想的输出相关峰是可能的。

3 数值模拟与讨论

基于匹配滤波结构, 采用二维分数傅里叶变换对基于相关的模式识别过程进行数值模拟。为简单起见, 对于可分离变量的分数傅里叶变换定义^[9], 设沿 x 轴和 y 轴的分数级次以相同的速率同时变化。输入信号采用 64×64 像素的模拟信号——大写字母“E”。其无畸变像示于图 2(a), 它的两个尺度畸变像分别示于图 2(b)和图 2(c), 它们对无畸变像图 2(a)的尺度因子分别为 $\gamma_1 = 1.1$ 和 $\gamma_2 = 0.78$ 。整个输入面为 128×128 个像素。

为了使比较结果明了, 输出面的强度被归一化处理。对应于传统相关和分数相关的输出结果均用三维振幅分布图(示于图 3 和图 4)以及强度像表示图(示于图 5 和图 6)给出。

当输入目标无畸变时, 取输入目标图 2(a), 传统相关和分数相关的输出结果分别见图 3(a)和图 4(a), 此时进行分数相关的级次为 $p_s = 0.65$ 。可以看出, 传统相关的输出峰带有很大的旁瓣, 而分数相关得到了能量集中的相关峰, 且旁瓣很小。这一点从其强度像图 5(a)和 6(a)中更能清楚地表示出来。分数相关使相关面能量重新分布, 可以得到更窄的

相关光斑,提高了相关器的识别精度。这一结论和文献 16 的研究结果是一致的。

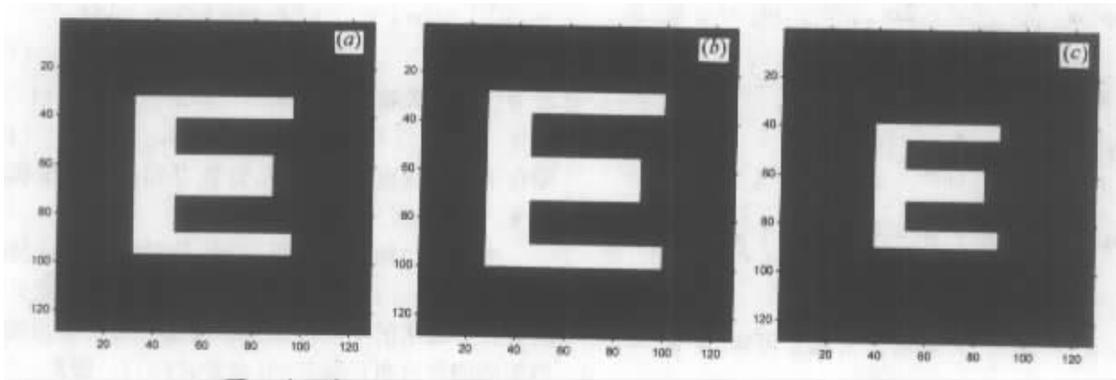


图 2 大写字母 E 的无畸变 (a), 尺度因子为 1.1 (b) 和 0.78 (c) 的畸变像
 Fig.2 Capital E image undistorted (a), scaled with a factor of 1.1 (b) and 0.78 (c)

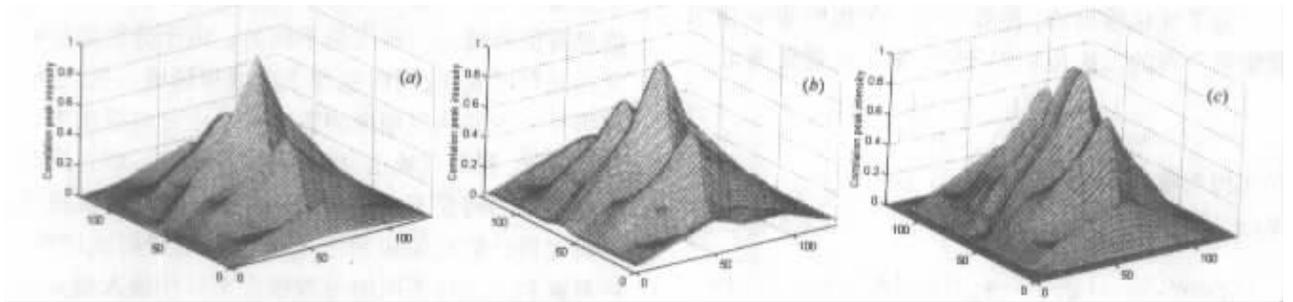


图 3 分别用大写字母 E 的无畸变 (a), 尺度因子为 1.1 (b) 和 0.78 (c) 的畸变像为输入时的传统相关三维输出结果
 Fig.3 Correlation results using the classic correlation for the capital E image undistorted (a), scaled with a factor of 1.1 (b) and 0.78 (c) plotted using a 3-D plotting routine

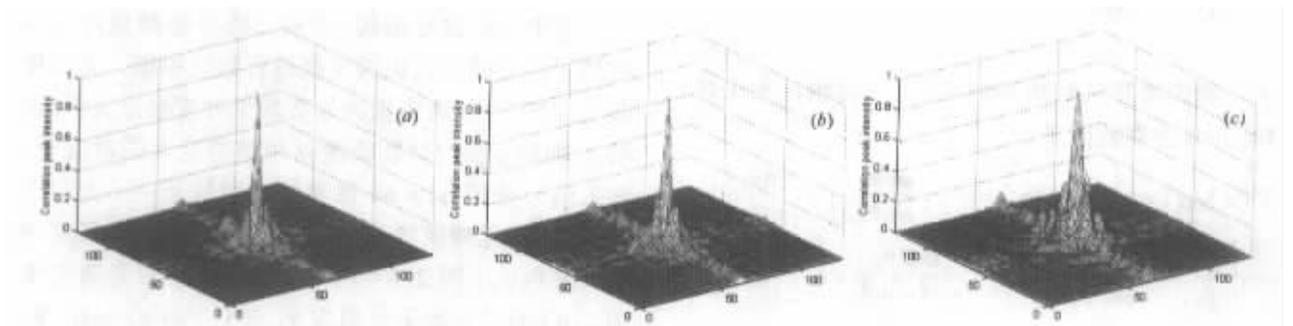


图 4 分别用大写字母 E 的无畸变 (a), 尺度因子为 1.1 (b) 和 0.78 (c) 的畸变像为输入时的 0.65 级分数相关三维输出结果

Fig.4 Correlation results using the fractional correlation for the capital E image undistorted (a), scaled with a factor of 1.1 (b) and 0.78 (c) plotted using a 3-D plotting routine when p equals 0.65

当输入目标发生尺度畸变时,分别采用图 2 (b) 和图 2 (c) 作为输入信号,传统相关的输出结果分别见图 3 (b) 3 (c) 以及强度像表示图 4 (b) 与 (c)。在同样的分数级次下 ($p_s = 0.65$),分数相关的输出结果分别示于图 4 (b) 和 (c),其强度像分别表示于图 4 (b) 和 (c)。经比较,此时传统相关的输出峰

(图 3 (b) 与 (c) 或图 4 (b) 与 (c)) 呈现很大的旁瓣,而分数相关器得到了锐化的相关峰 (图 4 (b) 与 (c) 以及图 4 (b) 与 (c)),相关峰旁瓣小,从而提高了相关器畸变模式识别能力。这一点在相关器的设计中是人们所期望的。由此可知,当输入目标发生尺度畸变时,分数相关仍能得到较锐的相关峰。

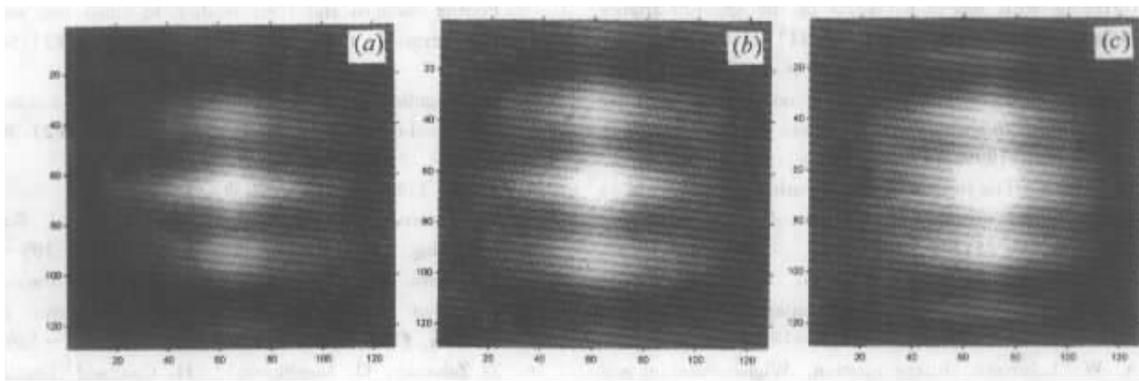


图 5 分别用大写字母 E 的无畸变 (a)、尺度因子为 1.1 (b) 和 0.78 (c) 的畸变像为输入时的传统相关强度像输出结果

Fig.5 Correlation results using the classic correlation for the capital E image undistorted (a), scaled with a factor of 1.1 (b) and 0.78 (c) shown using an intensity image

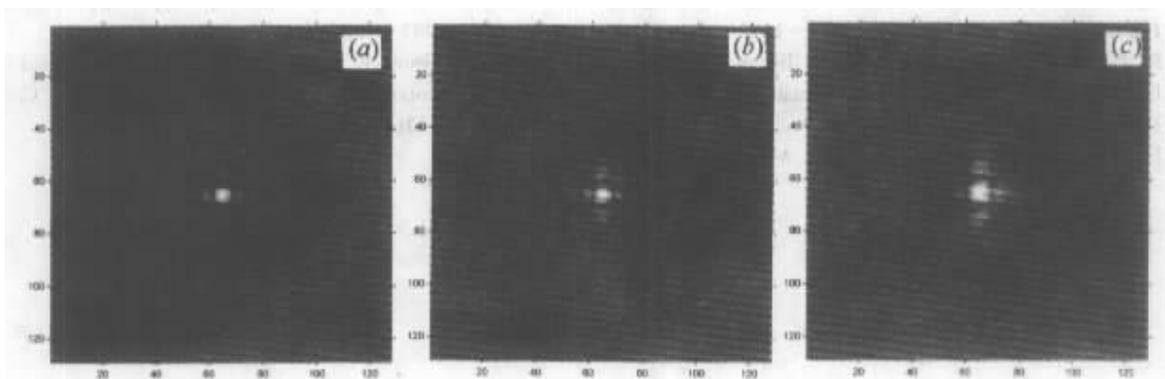


图 6 分别用大写字母 E 的无畸变 (a)、尺度因子为 1.1 (b) 和 0.78 (c) 的畸变像为输入时的 0.65 级分数相关强度像输出结果

Fig.6 Correlation results using the fractional correlation for the capital E image undistorted (a), scaled with a factor of 1.1 (b) and 0.78 (c) shown using an intensity image when p equals 0.65

4 结 论

本文对分数相关可调节相关面能量分布的特性进行了理论分析,指出这一特点可应用于有效补偿识别目标的尺度畸变。并且应用数值方法,对分数相关和传统相关在尺度畸变不变模式识别性能方面进行了比较。结果表明,分数相关对尺度畸变目标进行识别时,其自相关峰能量集中、旁瓣小,识别精度高。

由于分数相关分数级次调整灵活,能构成多样化的滤波结构^[10]并且易于实现实时化处理^[16],因此在畸变不变模式识别中有很大的应用潜力。利用分数相关进行畸变模式识别的一个不利因素是其光效率会随着输入模式畸变量的增加而变小,并且和传统相关具有相同的衰减特性(见式(13))。但在相关器的设计中,提高光效率的要求远不如锐化相关峰的要求重要,相关系统的光效率通常可以通过选

择性能较好的光源而较容易得到满足^[17]。利用分数相关进行模式识别的另一个不利因素是其具有的部分空变特性,对设备的对准精度要求较高。基于集成光学原理,已提出具有高对准精度的分数相关识别系统^[18]。因此,寻求更为灵活、实用化的分数相关系统也将是今后的一个主要研究方向。

参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics. New York: McGraw-Hill, 1968
- 2 M. W. Roth. Survey of neural network technology for automatic target recognition. *IEEE Trans. Neural Net.*, 1990, **1** 28 ~ 43
- 3 B. Javidi. Synthetic discriminant function-based binary nonlinear optical correlator. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(13) 2490 ~ 2493
- 4 Y. N. Hsu, H. H. Arsenault. Optical pattern recognition using circular harmonic expansion. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(22) 4016 ~ 4019
- 5 Z. Zalevsky, D. Mendlovic, J. H. Caulfield. Fractional

- correlator with real-time control of the space-invariance property. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(11) :2370 ~ 2375
- 6 Zhu Banghe, Han Li, Xie Hongwei *et al.*. The properties of fractional correlation peak based on fractional Fourier transform. *Proceedings of Electronic Measurement & Instruments*, 1999, **13** :868 ~ 872
- 7 V. Namias. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics. *J. Inst. Maths. Appl.*, 1980, **25** :241 ~ 265
- 8 D. Mendlovic, H. M. Ozaktas. Fractional Fourier transforms and their optical implementation : I. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(9) :1875 ~ 1881
- 9 A. W. Lohmann. Image rotation, Wigner rotation and the fractional Fourier transform. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(10) :2181 ~ 2186
- 10 M. A. Kutay, H. M. Ozaktas, O. Arikan *et al.*. Optimal filtering in fractional Fourier domains. *IEEE Trans. Sig. Proc.*, 1997, **45** :1129 ~ 1143
- 11 R. G. Dorsch, A. W. Lohmann, Y. Bitran *et al.*. Chirp filtering in the fractional Fourier domain. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(32) :7599 ~ 7602
- 12 H. M. Ozaktas, B. Barshan, D. Mendlovic *et al.*. Convolution, filtering, and multiplexing in fractional Fourier domains and their relation to chirp and wavelet transforms. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(2) :547 ~ 559
- 13 D. Mendlovic, H. M. Ozaktas, A. W. Lohmann. Fractional correlation. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(2) :303 ~ 309
- 14 A. W. Lohmann, Z. Zalevsky, D. Mendlovic. Synthesis of pattern recognition filters for fractional Fourier processing. *Opt. Comm.*, 1996, **128**(4 5 6) :199 ~ 204
- 15 T. Alieva, F. Agullo-Lopez. Reconstruction of the optical correlation function in a quadratic refractive index medium. *Opt. Comm.*, 1995, **114**(1 2) :161 ~ 169
- 16 Z. Zalevsky, D. Mendlovic, J. H. Caulfield. Localized, partially space-invariant filtering. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(5) :1086 ~ 1092
- 17 B. V. K. Vijaya Kumar, L. Hasebrook. Performance measures for correlation filters. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(20) :2997 ~ 3006
- 18 S. H. Song, J. S. Jeong, S. Park *et al.*. Planar optical implementation of fractional correlation. *Opt. Comm.*, 1997, **143**(4 5 6) :287 ~ 293