

文章编号: 0253-2239(2006)04-0621-4

空变菲涅耳联合变换相关器

邓绍更 刘立人 郎海涛 刘德安 郭袁俊

(中科院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要: 提出了菲涅耳联合变换相关器(Fresnel Joint Transform Correlator, FnJTC)结构,给出了数学推导过程,并通过计算机模拟验证了可行性及其与传统相关器所不同的相关特性。在相关过程第一阶段中,菲涅耳联合变换相关器对输入的联合图像作菲涅耳变换,代替了传统联合变换相关器(JTC)的傅里叶变换。与传统相关器相比,菲涅耳联合变换相关器是空变系统,相关峰值依赖于输入参考图像与目标图像的相似性、两图像之间的相对位置及参考图像(或目标图像)的线性相位调制。

关键词: 信息光学; 菲涅耳衍射; 联合变换相关器; 啁啾编码; 光信号处理

中图分类号: O438 文献标识码: A

Space-Variant Fresnel Joint Transform Correlator

Deng Shaogeng Liu Liren Lang Haitao Liu Dean Guo Yuanjun

(Laboratory for Optical information, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: A Fresnel joint transform correlator (FnJTC) is presented, here the Fourier transform in the joint (Fourier) transform correlator (JTC) is replaced by the Fresnel transform. The mathematical derivations for FnJTC are given, together with the computer simulation verifications. Compared with JTC, FnJTC is a space-variant system, output of which depends on the similarity of the two joint patterns in shape, the position of the reference pattern relative to the target pattern and the phase modulation of the reference pattern or the target pattern. The relation between FnJTC and fractional JTC has been described briefly.

Key words: information optics; Fresnel diffraction; joint transform correlator; chirp encoding; optical signal processing

1 引言

联合变换相关器(Joint-transform correlator, JTC)和匹配滤波相关器(Vander Lugt correlator, VLC)在模式识别、神经网络及光计算中得到了广泛的应用。这些相关器都具有空不变性(即空间位移不变性),也就是当输入面上两个联合图像的相对位置发生变化,在相关输出面上,相关峰的位置虽然发生相应的移动,但是相关峰的值不发生变化。这一点在跟踪及模式识别中无疑是有重要意义的。但在某些情况下,位移不变性却会成为缺点。比如在工业现场监督应用中,目标位置与定位要求的一致性是非常重要的;在安全加密以及图像编码中,输入目标的位置及相位提供了附加的编码特征。基于此,Jeffrey A. Davis 提出了空变菲涅耳变换光学相关器,该相关器

的相关输出敏感于输入目标的位置与形状,该结构在机器视觉、加密和光学逻辑方面均有潜在的应用^[1,2]。

但是由于该结构采用的是匹配滤波相关器(VLC)结构,因此在操作中存在输入图像与滤波器对准的困难,由于对准误差的存在必然会造成相关性能的降低。本文提出了以联合变换相关器结构为基础,实现空变的菲涅耳联合变换相关器(FnJTC),它与传统的联合变换相关器相比较,敏感于输入联合图像的位置和形状,文中对这些特点及相应理论做了详细的阐述,并用计算机做了仿真实验,验证了该相关器的可行性以及新颖的特性。

2 菲涅耳联合变换相关器的理论分析

菲涅耳联合变换相关器结构框图如图 1 所示。

作者简介: 邓绍更(1973~),男,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光学信息处理方面的研究。
E-mail: dengshaogeng@hotmail.com

收稿日期: 2005-05-31; 收到修改稿日期: 2005-07-18

为了说明方便,仅讨论一维情况。假定输入的参考信号和目标信号分别为 $f(x_1 - b)$ 、 $g(x_1)$,与传统的联合变换相关器一样,同时显示在空间光调制器(SLM)上,两信号之间距离为 b ,为了使互相关信号不与自相关信号重叠,要求 b 大于两信号尺寸之和。为了获得与传统相关器一致的相关值,还需要将参考信号乘以一个相位调制函数

$$\phi = \exp(i2\pi px/\lambda d), \quad (1)$$

上式中 p 值与参考信号、目标信号间在 x 方向上的

相对距离 b 相对应,当 b 与 p 值相等时,将会得到与传统联合变换相关器一致的相关结果, λ 表示照明光波长, d 表示空间光调制器(SLM)到液晶光阀(LCLV)的距离。 p 在非涅耳变换过程中,起到调节参考信号非涅耳变换谱的空间位置的作用,以便与目标信号的非涅耳变换谱重合。根据非涅耳衍射理论,在液晶光阀(LCLV)输入面上可以得到联合图像的非涅耳变换谱:

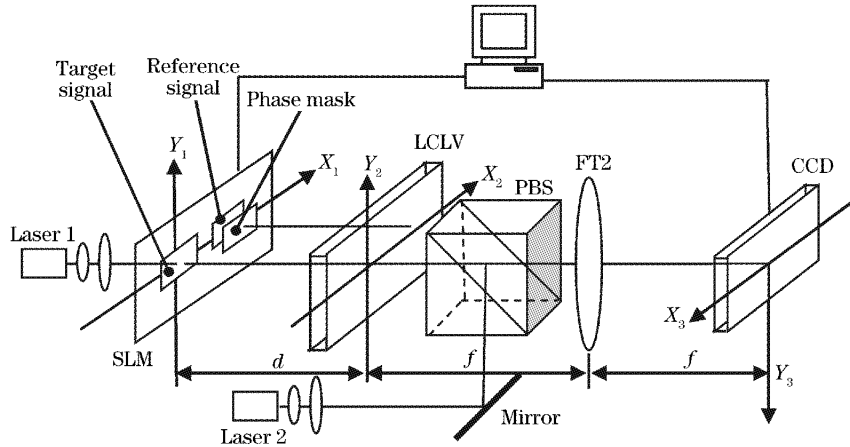


图 1 非涅耳联合变换相关器结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of Fresnel joint transform correlator

$$E_2(x_2) = Z_2(x_2; d)F\{Z_1(x_1; d)[\phi f(x_1 - b) + g(x_1)]\} = Z_2(x_2; d)F[Z_1(x_1; d)\phi f(x_1 - b)] + Z_2(x_2; d)F[Z_1(x_1; d)g(x_1)], \quad (2)$$

(2) 式中的 F 表示傅里叶变换操作, $Z_2(x_2; d)$ 是非涅耳相位函数, 定义为

$$Z(x; d) = \exp(i\pi x^2/\lambda d), \quad (3)$$

经液晶光阀的转换,在液晶光阀的输出端可以获得 $f(x_1 - b)$ 、 $g(x_1)$ 的非涅耳变换联合功率谱:

$$\begin{aligned} |E_2(x_2)|^2 = & |F[Z_1(x_1; d)\phi f(x_1 - b)]|^2 + |F[Z_1(x_1; d)g(x_1)]|^2 + \exp[-i2\pi(bx_2 - 0.5b^2)/\lambda d] \times \\ & F[Z_1(x_1; d)f(x_1)](x_2 + b - p)F^*[Z_1(x_1; d)g(x_1)](x_2) + \\ & \exp[-i2\pi(bx_2 - 0.5b^2)/\lambda d]F^*[Z_1(x_1; d)f(x_1)](x_2 + b - p) \times \\ & F[Z_1(x_1; d)g(x_1)](x_2), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $(x_2 - b - p)$ 、 (x_2) 表示第三、四项的坐标。上式中 $\exp(i2\pi b^2/\lambda d)$ 对相关结果没影响,在后文中省略。通过透镜 FT2 对上述非涅耳变换联合功率谱 $|E_2(x_2)|^2$ 作傅里叶逆变换,得到

$$O(x_3) = O_1 + O_2 + O_3 + O_4, \quad (5)$$

式中第一、二项为分别为 $Z_1(x_1; d)\phi f(x_1 - a)$ 、 $Z_1(x_1; d)g(x_1)$ 的自相关,并叠加于输出面的原点附近。下面分析第三项和第四项,令

$$\phi' = \exp(-j2\pi t/\lambda d), \quad (6)$$

$t = b - p$,可以得到 $Z_1(x_1; d)\phi' f(x_1 - a)$ 和 $Z_1(x_1; d)g(x_1)$ 的互相关,分别位于相关平面的 x_3 轴的 \pm

b 处,

$$\begin{aligned} O_{3,4}(x_3) = & [Z_1(x_1; d)\phi' f(x_1)] \otimes \\ & [Z_1(x_1; d)g(x_1)] * \\ & \delta(x_3 \pm b), \end{aligned} \quad (7)$$

以上各式中的符号“ \otimes ”、“ $*$ ”分别表示相关和卷积。由(6)式可知,当 $t = 0$ 时,(7)式可以得到 $Z_1(x_1; d)f(x_1)$ 和 $Z_1(x_1; d)g(x_1)$ 的互相关,其相关值与 $f(x_1)$ 和 $g(x_1)$ 的相关值一致。由于输入的参考信号和目标信号为啁啾函数所调制,所以相关峰值对输入信号的位置是敏感的,这一点与参考文献[1]中匹配滤波器结构的非涅耳相关器的特性是

一致的。相关信号的位置与传统联合变换相关器一样，由两个输入信号的相对位置 b 决定。当 $f(x_1) = g(x_1)$ 时，我们可以得到

$$O_3(x_3) = \left| \int \int |f(x_1)|^2 \exp(-j2\pi tx_1/\lambda d) dx_1 \right|, \quad (8)$$

在菲涅耳联合变换相关器中，当 $t \neq 0$ 时，将会引起(8)式中复指数项的快速振荡，从而使峰值高度降低。

3 菲涅耳联合变换相关器的仿真分析

为了研究菲涅耳联合变换相关器的相关特性，采用快速傅里叶变换的计算机程序来模拟菲涅耳联合变换相关器系统。输入的联合图像如图 2(a) 所示，空间带宽积为 256×256 ，联合图像中的参考图像和目标图像同为 $24 \text{ pixel} \times 21 \text{ pixel}$ 的字母 R，两图像沿垂直方向相距 60 个像素，假定下面的 R 为参考图像 $f(x_1 - b)$ ， $b = -60$ ，并乘以一个线性相位调制项 $\phi = \exp(i2\pi p x_1/\lambda d)$ ，令 $p = 60$ 。目标图像在联合输入图像的上部为 $g(x_1)$ ，经传播空间距离 d 在液晶光阀上获得联合输入图像的非涅耳联合变换

谱，如图 2(b) 所示，经液晶光阀转换成功率谱。对功率谱作逆傅里叶变换，在相关输出面获得相关峰，如图 2(c) 所示。从图中可以看到，与传统联合变换相关器相比较，其峰值是完全一致的。从(6)式可以知道， $t \neq 0$ 时，即 $b + p \neq 0$ 时，互相关项的峰值将会减小。下面保持 $b = -60$ 不变，令 $p = 1 \sim 350$ ，来研究相关峰值随 p 的变化情况，仿真结果如图 2(d) 所示，当 t 超出 $(-10, 10)$ 时，相关峰值迅速衰减。这与传统的联合变换相关器不同，在传统的联合变换相关器中，相关峰值不会受到输入图像的相位调制的影响。相关峰值随参量 p 呈周期性变化，周期为输入平面的空间带宽。下面我们研究参考图像与目标图像相对位置变化，对相关峰值的影响。令线性相位参量 $p = 60$ 保持不变，将两图像的相对距离由 60 个像素逐渐增加到 130 个像素，相关峰值的变化曲线如图 2(e) 所示，从图中可以看到，该曲线变化趋势与图 2(d) 在对应范围内是相一致的，图 2(f) 是线性相位因子 $p = 60$ ，两图像沿纵轴相对位移 $b = -70$ 时的相关输出，从图中可以看到，相关峰已经被严重削弱。

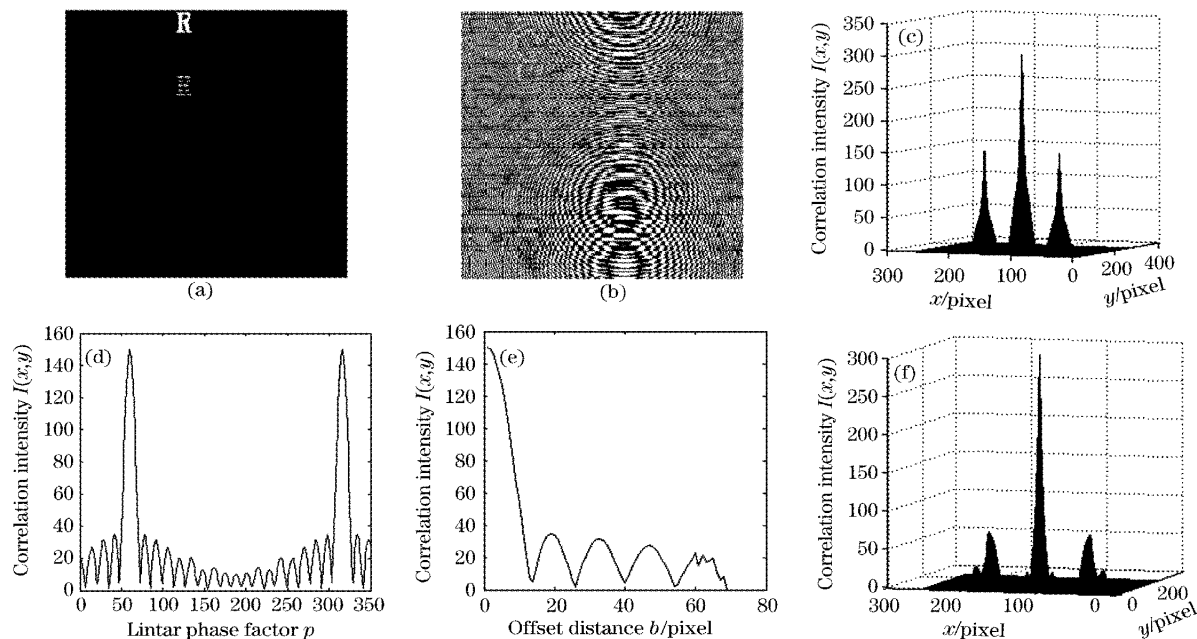


图 2 菲涅耳联合变换相关器的仿真图像。(a) 联合输入图像，(b) 联合输入图像的非涅耳变换谱，(c) 线性相位调制因子 $p = 60$ ，两图像沿纵轴相对位移 $b = -60$ 时的相关输出，(d) 相关峰值随着线性相位调制因子 p 的变化曲线，(e) 线性相位因子 $p = 60$ 时，相关峰值随参考图像相对目标图像的沿纵向位移变化曲线，(f) 线性相位因子 $p = 60$ ，两图像沿纵轴相对位移 $b = -70$ 时的相关输出

Fig. 2 Computer simulations of the FmJTC. (a) The joint input pattern of the FmJTC, (b) Fresnel lens pattern, (c) correlation output showing when the factor $p = 60$ of the linear phase-modulation term and the relative shift $b = -60$ of the two input patterns, (d) variation of the correlation peak value with the factor p , (e) variation of the correlation peak value with the relative shift b of the two input patterns when the factor $p = 60$, (f) the correlation output showing when $p = 60$, $b = -70$

4 结 论

在文献[1,2]所提出的空变菲涅耳变换相关器的基础上,提出了菲涅耳联合变换相关器结构,做了相应的理论推导及计算机的模拟仿真。进一步研究了该相关结构的独特的相关特性,即输入的参考信号与目标信号的相对位置和对参考信号的线性相位调制共同作用下影响相关结果,对这一特性作了仿真研究。该特性在光学神经网络、光学加密中将会具有潜在的应用。

本文提出的菲涅耳联合变换相关器是空变相关系统,与经典的联合变换相关器相比,本结构只是少了第一个傅里叶变换透镜 FT1,并紧挨着参考图像后附一相位掩膜(Phase mask),在假定空间光调制器与液晶光阀之间的距离 d 满足菲涅耳近似条件下,图 1 所示结构则具有了不同于经典联合变换相关器的空变特性,这是由于菲涅耳变换将依赖于空间的相位移引入了输入信号(或图像)的结果。

随着分数傅里叶变换被引入信息光学领域,相继有人提出了光学分数相关和光学分数联合变换相关器结构^[3~9]。菲涅耳联合变换相关器与分数联合变换相关器相比,在相关过程的第一阶段是菲涅耳变换,第二阶段则是传统的傅里叶变换,因此在结构上近似于文献[9]中的 FrT-FT 结构。根据菲涅耳变换与分数傅里叶变换之间的关系^[4],可以知道,菲涅耳联合变换相关器的相关值与分数联合变换相关器的相关值之间是比例关系,也就是说菲涅耳联合变换相关器是比例放大的分数联合变换相关器。

与 Jeffrey A. Davis 提出的菲涅耳相关器相比较,本文的菲涅耳联合相关器结构,不需要制作复滤波器,可以实时更新参考图像,允许参考图像和目标图像作同步菲涅耳变换,避免了匹配滤波器的对准操作。

最近提出的数字相关全息(Digital correlation holograms, DCH)的概念^[10],就是对两个由计算机

产生的全息图像做光学相关,在相关输出面上,可以得到一张有意义的图像(即所期望的图像)。该方法在光学安全认证、图像加密和图像编码等领域具有重要的应用意义。本文提出的菲涅耳联合变换相关器结构,由于图像要通过适当的相位调制才可以获得所需要的相关图像,这就意味着,相位调制项可以作为一项附加的编码特征,从而提高加密度。在这方面的应用情况,我们将在后续的文章中加以详细的讨论。

参 考 文 献

- 1 Jeffrey A. Davis, Don M. Cottrell *et al.*. Space-variant Fresnel transform optical correlator[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(32): 6889~6893
- 2 Jeffrey A. Davis, Rod P. Tiangco, Don M. Cottrell *et al.*. Four-plane space-variant Fresnel-transform optical processor with a random phase encoder [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(20): 3819~3828
- 3 Zeng Yangsu, Guo Yongkang, Xie Shiwei *et al.*. Computer-generated hologram of dual fractional Fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 155~158 (in Chinese)
曾阳素,郭永康,谢世伟等. 双重分数傅里叶变换计算全息[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 155~158
- 4 Hua Jianwen, Liu Liren, Li Guoqiang. Simple method to study the Fourier transform of object[J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(5): 435~438 (in Chinese)
华建文,刘立人,李国强. 研究物体分数傅里叶变换的简单方法[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(5): 435~438
- 5 D. Mendlovic, H. M. Ozaktas. Fractional Fourier transform and their optical implementation[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1993, **10**(9): 1875~1880
- 6 A. W. Lohmann. Image rotation, Wigner rotation, and the fractional Fourier transform[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1993, **10**(10): 2181~2186
- 7 David Mendlovic, Haldun M. Ozaktas, Adolf W. Lohmann. Fractional correlation[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(2): 303~309
- 8 Adolf W. Lohmann, David Mendlovic. Fractional joint transform correlator[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(29): 7402~7407
- 9 Chung J. Kuo, Yuan Luo. Generalized joint fractional Fourier transform correlator: a compact approach [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(35): 8270~8276
- 10 David Abookasis, Joseph Rosen. Digital correlation holograms implemented on a joint transform correlator[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **225**(1~3): 31~37