

位置非对称联合变换相关中相关峰特性分析

周金鹏 吴伟 秦石乔 王省书

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 从联合变换相关的基本理论出发,推导出输入目标图像的位置坐标与相关输出平面上对应相关峰位置坐标关系的普适表达式,进行了单目标、多目标联合变换相关仿真实验和相关峰特性分析;分析了运动目标联合变换相关峰位置的变化规律并进行了仿真。结果表明,位置非对称联合变换相关峰始终对称地出现在相关输出平面的坐标原点的两边,且相关峰和坐标原点的连线与目标图像中心和参考图像中心的连线平行,相关峰位置到坐标原点的距离等于输入平面中目标与参考物间的距离;目标运动时,对应相关峰的位置会随目标运动而相应地改变,且二者的坐标变化量相同。

关键词 联合变换相关;位置非对称;多目标识别;相关峰特性;仿真分析

中图分类号 TP391

OCIS 070.4550 070.5010 100.4550

文献标识码 A

Analysis of Characteristics of Correlation Peaks for Position Dissymmetry in Joint Transform Correlation

Zhou Jinpeng Wu Wei Qin Shiqiao Wang Xingshu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A general expression of discretional target position with its correlation peaks in correlation output is proposed based on the theory of joint transform correlation (JTC), and the single and multiple targets correlation experiments are also simulated. The characteristic of correlation peaks variation of moving targets is analyzed. The results show that dissymmetrical correlation peaks are always symmetric at two sides of coordinate centre, and the connections of correlation peaks with coordinate centre are parallel with the input target center with reference target centre. The distance of correlation peaks with coordinate center equals the input target with reference target. In addition, the correlation peaks change with the targets moving, and the value of coordinate changes are also equal.

Key words joint transform correlation; position dissymmetry; multiple targets recognition; characteristics of correlation peak; simulation analysis

1 引言

光学相关运算以其独特的高速、并行性一直倍受光信息处理者的关注,自20世纪中叶以来,该方法在光学模式识别中得到了广泛的应用,其中最典型的光学相关器结构有范德鲁格特光学相关器(VLC)^[1]和联合变换相关器(JTC)^[2]。这两类系统尽管实现的都是图像的相关运算,但系统的结构和具体实现方法却完全不同,因而具有不同的特点和应用领域。VLC是发展最早也是最成熟的光学相关结构,由于光学模式识别采用会聚透镜完成傅里叶变换(FT),限制了FT平面的信息量,进而对系统的分辨率、动态范围、光学对准精度就提出了较高的要求,但随着位相型空间光调制器(SLM)的出现,VLC的可应用范围得到了进一步的拓展。与VLC相比,JTC不需事先制备频域滤波器,可以实时更新参考图像而不再需要经过算法运算生成新的滤波器,对环境的适应能力比VLC更强。JTC因其实时性更强、不需要精确地对准的优势,目前已成功应

收稿日期: 2010-04-23; 收到修改稿日期: 2010-06-05

作者简介: 周金鹏(1967—),男,副教授,博士研究生,主要从事光电信息处理技术方面的研究。

E-mail: 13508482431@139.com

导师简介: 秦石乔(1963—),男,教授,博士,主要从事光电测控技术方面的研究。E-mail: sqqin8@nudt.edu.cn

用于指纹识别系统和人脸图像识别^[4~5], Valerij Tchernykh 等^[6]则探讨了利用 JTC 进行视觉图像导航, Sergey Dyblenko 等^[7]利用光电混合联合变换进行卫星陆标导航技术研究。由于在联合变换相关识别系统中,相关峰在视场中出现的位置与输入图像视场中的目标位置并不存在直接的对应关系,因而对于实际运动目标,相关峰出现的位置以及相关峰的运动规律值得深入分析和研究。本文从经典的联合变换相关的基本理论出发,通过理论推导对位置非对称目标图像的联合变换相关峰特性进行详细、深入的分析,并利用 MATLAB 进行仿真验证,为 JTC 的实际应用研究提供参考依据。

2 位置非对称目标的联合变换相关

目前国内外研究主要讨论的是目标位置对称的联合变换相关,即目标图像中心与参考图像中心关于坐标原点对称,所得相关峰的峰值位置也关于相关输出平面的坐标原点对称,如光学相关指纹识别系统。但对于运动目标,由于视场中的目标位置随时间变化,目标图像和参考很难保证关于坐标原点对称,相关峰的峰值位置同样会随目标的运动而改变,下面针对单目标和多目标的两种联合变换相关的相关峰特性进行具体分析。

2.1 位置任意的单目标联合变换相关

假定输入视场中的目标和参考图像的灰度分布分别为 $f(x-x_1, y-y_1)$ 和 $g(x-x_2, y-y_2)$, 其中 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别为对应图像的中心坐标,则输入图像的傅里叶变换为

$$S(u, v) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} [f(x-x_1, y-y_1) + g(x-x_2, y-y_2)] \exp[-j2\pi(xu + yv)/\lambda f] dx dy = \exp[-j2\pi(ux_1 + vy_1)]F(u, v) + \exp[-j2\pi(ux_2 + vy_2)]G(u, v). \quad (1)$$

该傅里叶谱经平方律探测器接收后,输出信号为

$$|S(u, v)|^2 = S(u, v) \cdot S^*(u, v) = |F(u, v)|^2 + |G(u, v)|^2 + \exp\{-j2\pi u[(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2)]\}F(u, v)G^*(u, v) + \exp\{j2\pi u[(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2)]\}F^*(u, v)G(u, v). \quad (2)$$

对上述功率谱 $|S(u, v)|^2$ 进行一次逆傅里叶变换后,在相关输出平面得到:

$$s'(x', y') = f(x', y') \star f(x', y') + g(x', y') \star g(x', y') + f(x', y') \star g(x', y') \otimes \delta(x' - x_1 + x_2, y' - y_1 + y_2) + g(x', y') \star f(x', y') \otimes \delta(x' + x_1 - x_2, y' + y_1 - y_2), \quad (3)$$

式中“ \star ”和“ \otimes ”分别代表相关和卷积运算,输出表达式的第 1、2 项分别是 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 的自相关,均位于输出平面的中心,可以认为是零级直流项;第 3、4 项则是 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 间的互相关,其中心坐标分别位于 $x' = \pm(x_1 - x_2), y' = \pm(y_1 - y_2)$, 这两项正是需要的相关输出信号。

从上可以看出,尽管目标图像和参考图像的中心位置是任意的,但其互相关峰的中心位置不仅与输入图像对应,且有一定的规律。根据解析几何的知识可知,在相关输出平面上,过两个相关输出中心的直线方程为 $(x_1 - x_2)y' = (y_1 - y_2)x'$, 且该直线过 $x'o'y'$ 坐标系的坐标原点,两相关峰对称地分布在该坐标原点的两边。而在输入平面,过目标和参考物图像中心的直线方程为 $(x_1 - x_2)(y - y_1) = (y_1 - y_2)(x - x_1)$ 。显然,这两条直线在各自的坐标平面中的斜率均为 $k = (y_1 - y_2)/(x_1 - x_2)$, 同时由于输入和输出平面的坐标轴平行,则输入平面中两个图像中心的连线和输出互相关峰中心的连线平行。

因此,对于位置非对称的联合变换相关,相关峰出现的位置与输入图像的中心位置对应,两个互相关峰中心的连线与两个输入图像中心的连线平行,且过输出平面坐标系的原点,每个相关峰中心到坐标原点的距离为 $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$, 即等于两个参与互相关运算的图像中心点之间的距离。

2.2 多目标的联合变换相关

在输入平面中,除参考目标图像外,若还包含两个或两个以上目标图像,此时若用该输入场景来进行目标相关检测,则应是多目标联合变换相关。现假定输入场景中包含 n 个目标 ($n \geq 2$), 其图像的灰度分布为 $f_i(x - a_i, y - b_i)$, (a_i, b_i) 为第 i 个目标图像中心 ($i \leq n$), 参考图像的灰度分布为 $g(x - c, y - d)$, 经第一次傅里叶变换后,其傅里叶频谱分布为

$$S(u, v) = \mathcal{F}\left[\sum_{i=1}^n f_i(x - a_i, y - b_i) + g(x - c, y - d)\right] = \sum_{i=1}^n \exp[-j2\pi(ua_i + vb_i)]F_i(u, v) + \exp[-j2\pi(uc + vd)]G(u, v), \quad (4)$$

式中 $\mathcal{F}\{\}$ 表示傅里叶变换运算。经平方律接收后,得到的联合功率谱分布为

$$\begin{aligned} |S(u, v)|^2 &= \left| \sum_{i=1}^n \exp[-j2\pi(ua_i + vb_i)]F_i(u, v) + \exp[-j2\pi(uc + vd)]G(u, v) \right|^2 = |G(u, v)|^2 + \\ &\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n F_i(u, v)F_k^*(u, v) \exp[-j2\pi u(a_i - a_k) - j2\pi v(b_i - b_k)] \sum_{i=1}^n F_i(u, v)G^*(u, v) \times \\ &\exp[-j2\pi u(a_i - c) - j2\pi v(b_i - d)] + \sum_{i=1}^n F_i^*(u, v)G(u, v) \exp[j2\pi u(a_i - c) + j2\pi v(b_i - d)] + \\ &\sum_{i=1}^n F_i^*(u, v)G(u, v) \exp[j2\pi u(a_i - c) + j2\pi v(b_i - d)]. \end{aligned} \quad (5)$$

对上述功率谱再进行一次傅里叶逆变换,在输出平面上得到:

$$\begin{aligned} s'(x', y') &= g(x', y') \star g(x', y') + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n f_i(x', y') \star f_k^*(x', y') \otimes \delta(x' - a_i + a_k, y' - b_i + b_k) + \\ &\sum_{i=1}^n f_i(x', y') \star g(x', y') \otimes \delta(x' - a_i + c, y' - b_i + d) + \\ &\sum_{i=1}^n g(x', y') \star f_i(x', y') \otimes \delta(x' + a_i - c, y' + b_i - d), \end{aligned} \quad (6)$$

式中输出的第 1 项为参考图像的自相关,相关峰中心位于坐标原点;第 2 项为目标图像的自相关以及目标图像间的互相关,目标自相关峰中心仍然位于坐标原点,而互相关峰值位置则与两目标图像的中心位置有关;第 3 项为目标图像与参考图像的互相关,第 4 项为参考图像与目标图像的互相关,各峰值的位置分别位于 $x'_i = \pm(a_i - c)$, $y'_i = \pm(b_i - d)$ 处,每对相关峰关于坐标原点对称,相关峰峰值位置到坐标原点的距离为 $\sqrt{(a_i - c)^2 + (b_i - d)^2}$ 。由于各互相关峰关于原点对称分布,因此对于目标的探测接收输出平面的一半即可。

2.3 运动目标的联合变换相关

当待探测和识别的目标处于运动状态,为简单起见,先假定目标只在面内平移,即某一时刻图像的分布为 $f(x - x_1 + \Delta x, y - y_1 + \Delta y)$, 根据上述理论推导,则相关输出应为

$$\begin{aligned} s'(x', y') &= f(x', y') \star f(x', y') + g(x', y') \star g(x', y') + f(x', y') \star g(x', y') \otimes \delta(x' - x_1 - \Delta x + x_2, \\ &y' - y_1 + y_2 - \Delta y) + g(x', y') \star f(x', y') \otimes \delta(x' + x_1 + \Delta x - x_2, y' + y_1 - y_2 + \Delta y). \end{aligned} \quad (7)$$

从(7)式可以看出,相关峰出现在 $x' = \pm(x_1 - x_2 + \Delta x)$, $y' = \pm(y_1 - y_2 + \Delta y)$ 处,相关峰相对坐标原点的距离变为 $\sqrt{(x_1 - x_2 + \Delta x)^2 + (y_1 - y_2 + \Delta y)^2}$, 呈非线性变化,而相关峰中心的坐标在两个坐标轴上的变化却是线性的,其变化量与目标实际移动量一致。

3 仿真结果分析

为了验证上述推导结论,分别进行了 3 种条件下的联合变换仿真。选取图像尺寸为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 目标和参考图像尺寸均为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$, 并在相关仿真中采用非零级联合变换相关算法,消除了相关输出平面的零级项^[9~11], 便于相关峰的检测。

图 1 为对应于单目标情况,目标和参考图像的几何中心分别为(321, 193)和(193, 257),关于光轴与输入平面的交点(256, 256)的位置并不对称,但在相关输出中的相关峰位置却关于坐标点(256, 256)对称的,且两个输入图像的几何中心连线与相关峰峰值点坐标的连线平行。

图 2 为对应于任意多目标情况,输入平面中包含 3 个 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的目标图像和 1 个 $64 \text{ pixel} \times$

64 pixel 的参考图像,具体像素坐标位置分布为 $R(193, 257)$, $T_1(321, 129)$, $T_2(321, 257)$, $T_3(321, 385)$,得到的相关输出如图 2(b)所示,其中 C_{11} 和 C_{33} 为参考图像和目标 T_3 图像相关峰, C_{21} 和 C_{23} 为参考图像和目标 T_2 图像相关峰, C_{31} 和 C_{13} 为参考图像和目标 T_1 图像相关峰,而 C_{12} , C_{22} , C_{32} 以及图中未标明坐标的两个相关峰均为 3 个目标图像间的相关,由于 T_1 和 T_3 关于 T_2 位置对称,所以有些相关峰重叠在一起。

图 3 为对应于单目标运动时的情况,输入图像中的目标相对图 1 中的目标图像移动了 8 pixel,相关结果中的两相关峰峰值同样在相同的坐标方向移动了 8 pixel,说明联合变换相关峰在相关输出面运动与输入图像中目标在面内的运动规律是完全一致的。

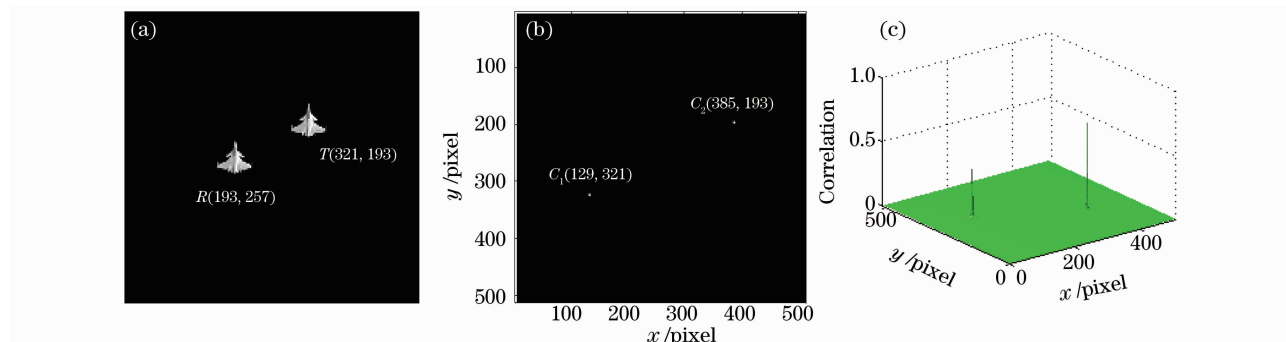


图 1 单目标位置非对称联合变换相关仿真。(a)输入图像,(b)相关输出,(c)相关峰值

Fig. 1 Joint transform correlation of single position dissymmetrical targets. (a) input scene, (b) correlation output, (c) correlation peaks

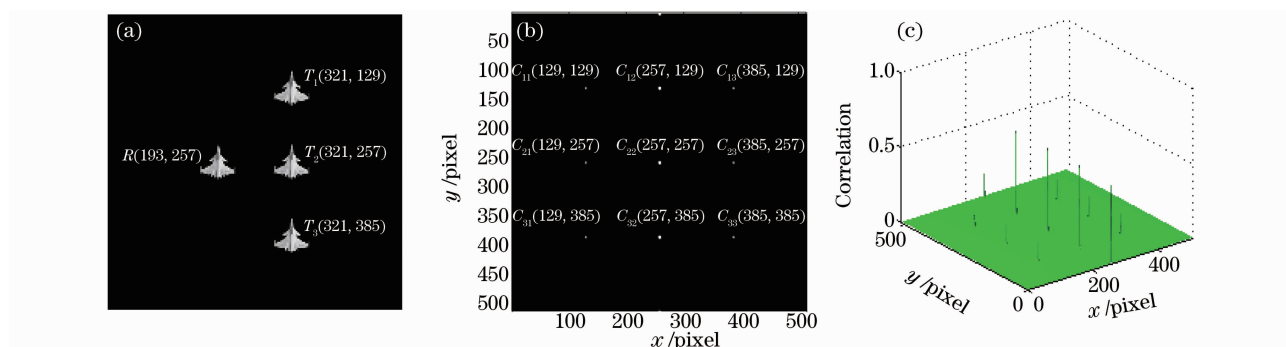


图 2 多目标位置非对称联合变换相关仿真。(a)输入图像,(b)相关输出,(c)相关峰值

Fig. 2 Joint transform correlation of multiple position dissymmetrical targets. (a) input scene, (b) correlation output, (c) correlation peaks

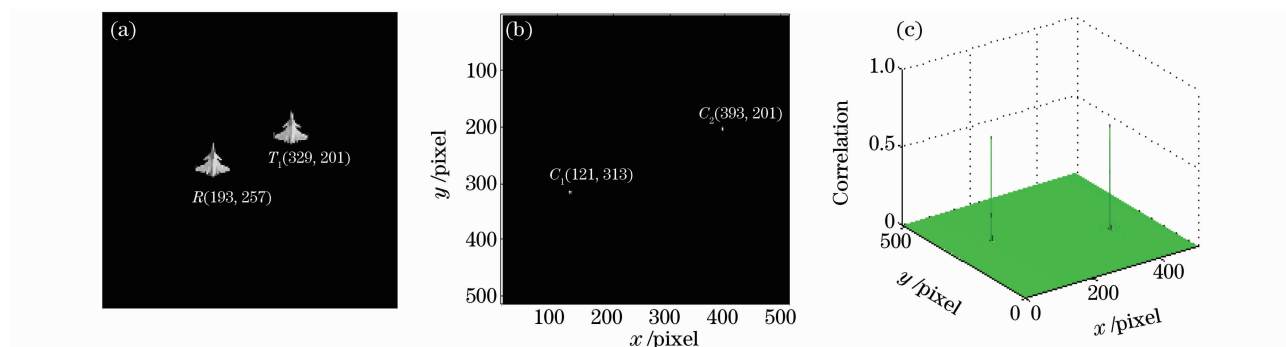


图 3 运动目标的联合变换相关仿真。(a)输入图像,(b)相关输出,(c)相关峰值

Fig. 3 Joint transform correlation of moving targets. (a) input scene, (b) correlation output, (c) correlation peaks

4 结 论

对于实际应用情况,目标在视场中一般是运动的,因此利用联合变换相关进行目标探测、识别时,目标和

参考图像的位置总是关于输入平面坐标原点是而非对称的。从以上理论推导和仿真实验可以看出,在联合变换相关中,无论目标位置如何,目标图像和参考图像的相关峰总是对称地分布在相关输出平面坐标原点的两边,相关峰峰值的位置到坐标原点的距离等于目标图像几何中心到参考图像几何中心的距离,相关峰峰值点连线的方向与目标和参考图像的几何中心的连线方向一致。当参考图像位置保持不变而目标在运动时,相关峰出现的位置随目标移动而对应变化,且相关峰在两个坐标轴上的移动量与目标在输入平面内的两坐标轴方向上的移动是相等的。对于多目标情况,由于各目标之间也存在互相关,与目标和参考图像的相关峰一起出现在相关输出平面上,很难进行类内分辨,但可利用以上非对称联合变换相关峰特性,巧妙安排多个参考图像,实现多类目标识别。

参 考 文 献

- 1 A. VandLugt. Signal detection by complex spatial filtering[J]. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1964, **10**(3): 139~145
- 2 C. S. Weaver, J. W. Goodman. A technique for optically convolving two functions[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(7): 1248~1249
- 3 Chen Huaixin, Chen Xiaowei, Chen Zhenpei *et al.*. Real-time fingerprint identification system with high discriminability [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(3): 279~283
陈怀新, 陈晓伟, 陈祯培 等. 高准确度实时指纹识别系统[J]. *中国激光*, 2001, **28**(3): 279~283
- 4 Joewono Widjaja, Ubun Suripon. Experimental verifications of a joint transform correlator using compressed reference images[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(31): 8074~8082
- 5 Feng Lei, Masahide Iton, Toyohiko Yatagai. Adaptive binary joint transform correlator for image recognition[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(35): 7416~7421
- 6 Valerij Tchernykh, Martin Beck, Klaus Janschek. An embedded optical flow processor for visual navigation using optical correlator technology[C]. *IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, 2006, 67~72
- 7 Sergey Dyblenko, Klaus Janschek, Anton Kisselev *et al.*. Optoelectronic image processing system for satellite landmark navigation[C]. *SPIE*, 2004, **5485**: 121~132
- 8 Yuan Xiangyan, Tao Chuncan, Yu Dayong *et al.*. Phase-encoded joint transform correlator by use of amplitude-modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 149~153
袁祥岩, 陶纯堪, 于大勇 等. 位相编码振幅调制联合变换相关器的设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 149~153
- 9 G. Unnikrishnan, Joby Joseph, K. Singh. A non-zero order joint transform correlator for space-variant pattern recognition [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**(1-3): 149~158
- 10 E. H. Horache, M. S. Alam. Remove dcterms and false alarms in fringe-adjusted joint transform correlator by using binary random phase mask[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **245**(1-6): 93~101
- 11 Victor H. Diaz-Ramirez, Vitaly Kober. Adaptive phase-input joint transform correlator[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(26): 2358~2366