

文章编号: 1001-3806(2007)06-0603-04

二元微分联合变换相关器实现图像识别的研究

周云燕, 杨坤涛*

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了克服二元联合变换相关器的取阈和实时性问题, 采用微分运算与二元联合变换相关器结合的方法。联合功率谱中, 由于干扰项随频率的变化率比需要的信息量随频率的变化率慢得多, 因此可以采用微分方式削弱干扰项, 增强互相关信号, 对微分后的功率谱再进行二值化非线性处理得到优化功率谱, 然后对优化功率谱进行傅里叶逆变换, 得到目标和图像的相关输出。模拟实验结果表明, 所提出的相关器能很好地抑制自相关峰, 增强互相关峰, 具有更强的鲁棒性。而且该方法在处理过程中, 不需选择阈值, 简单的微分及二值化操作使之具有更强的实时性。

关键词: 信息光学; 二元微分联合变换相关器; 二元联合变换相关器; 功率谱; 光学相关; 图像识别

中图分类号: O438 文献标识码: A

Study about the binary differential joint transform correlator used in pattern recognition

ZHOU Yun-yan, YANG Kun-tao

(Institute of Optoelectronics Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074 China)

Abstract New binary joint transform correlator (BJTC) based on differential operation was proposed. It can well resolve the disadvantages about the bottleneck of real time processing and thresholding selection in BJTC. The unwanted term in joint power spectrum (JPS) varies slowly compared with wanted term. It is reasonable to use differential operation to improve JTC's contrast by depressing the auto correlate peak and enhancing the cross correlate peak. Then the differential JPS was binarized to only two values at Fourier plane before inverse Fourier transform. Then higher cross correlate output between references and object image can be obtained. Simulation results show the proposed JTC can well weakens auto correlation peak and enhances cross correlation peak. It also has better robustness. The proposed method can avoid computing or pre-setup threshold. Furthermore, it's quite simple differential operation and binarization require far fewer digital computations than does the BJTC.

Key words information optics; binary differential joint transform correlator; binary joint transform correlator; power spectrum; optical correlation; image recognition

引 言

用于光学图像识别的相关器主要有匹配滤波和联合变换相关器^[1] (joint transform correlator, JTC), 由于联合变换相关器具有无需制作和精确调整复空间匹配滤波器、高空间带宽积、高调制度、低载频及可实时操作等优点, 在机器人视觉及目标跟踪等方面有着巨大的应用前景^[2,3]。目前人们提出了很多新的联合变换相关方法, 如小波变换相关法^[4], 二元联合变换相关法等。由 JAVIDI 等人提出的二元联合变换相关器 (binary joint transform correlator, BJTC)^[5], 先将联合功

率谱 (joint power spectrum, JPS) 采用二值化处理, 再进行傅里叶逆变换, 能产生较高的相关峰值和峰值旁瓣比, 具有较窄的相关宽度, 大大提高了相关识别功能。

然而, 在进行二值化处理时, 阈值的选取对识别效率有很大的影响, 阈值过高会使联合功率谱的有效成分丢失, 相关峰值减小; 而阈值过低会将功率谱的噪声放大^[6,7]。目前应用较多的 BJTC 阈值选取方法都至少与参考图像的功率谱有关, 进行相关处理前, 预先将参考物功率谱存入计算机中, 很多时候甚至还需读取待识别图像的功率谱, 影响系统的实时识别。

为了避免 BJTC 取阈, 提高图像识别的实时性, 作者介绍一种新的二元联合变换相关识别方法——二元微分联合变换相关器 (binary differential joint transform correlator, BDJTC), 对联合功率谱进行微分以后, 再进行二值化, 削弱变换缓慢的直流功率谱, 突出互相关信号, 得到很好的识别效果。

作者简介: 周云燕 (1980-), 女, 博士研究生, 主要从事光电检测及图像处理方面的工作。

* 通讯联系人。E-mail: yangkuntao@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-09-04 收到修改稿日期: 2006-09-25

1 系统结构

二元联合变换相关器如图 1 所示^[8], 由激光器发

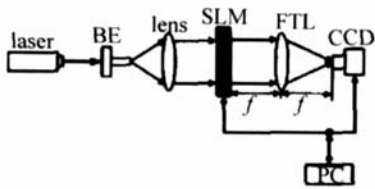


Fig. 1 A schematic diagram of the BJC setup

出的细激光束经扩束器 (beam expander BE) 扩束并由透镜准直后入射到空间光调制器 (spatial light modulator SLM) 上, 作为 SLM 的读出光, 参考图像和目标图像以电寻址的方式写到 SLM 上, SLM 在傅里叶变换透镜 (fourier transform lens FTL) 的前焦面处, 在 FTL 的后焦面上得到联合傅里叶变换, CCD 恰好位于 FTL 的后焦面上, 用于接收联合功率谱。计算机对联合功率谱作二值化等系列处理, 并把处理后的二元信息重新输送到 SLM 上, 再由 FTL 作傅里叶逆变换, 把相关输出成像到 CCD 探测器的像面上^[9]。

2 二元联合变换相关器

设 $r(x, y)$, $t(x, y)$ 分别表示参考图像和目标图像, 则联合变换相关器的输入 $f(x, y)$ 可表示为:

$$f(x, y) = t(x - a, y) + r(x + a, y) \quad (1)$$

式中, $2a$ 为 $t(x, y)$ 与 $r(x, y)$ 之间的距离, 联合傅里叶变换 $\mathcal{F}(u, v)$ 为:

$$\mathcal{F}(u, v) = T(u, v) \exp(-j2\pi au) + R(u, v) \exp(j2\pi au) \quad (2)$$

式中, (u, v) 为频谱面坐标, $T(u, v)$, $R(u, v)$ 分别表示 $t(x, y)$, $r(x, y)$ 的傅里叶变换。则 CCD 探测到的联合功率谱 $I(u, v)$ 为:

$$I(u, v) = |T(u, v)|^2 + |R(u, v)|^2 + 2|T(u, v)| \times |R(u, v)| \cos[4\pi au + \varphi_r(u, v) - \varphi_t(u, v)] \quad (3)$$

式中, $\varphi_t(u, v)$ 和 $\varphi_r(u, v)$ 是傅里叶相位谱, 对 (3) 式直接作傅里叶逆变换, 相关器的输出平面上可以得到衍射输出 $C(x, y)$:

$$C(x, y) = t(x, y) \otimes t(x, y) + r(x, y) \otimes r(x, y) + t(x, y) \otimes r(x, y)^* \delta(x - 2a) + t(x, y) \otimes r(x, y)^* \delta(x + 2a) \quad (4)$$

式中, \otimes 和 $*$ 分别表示相关和卷积运算, 第 1、第 2 项为很强的零级衍射, 属于干扰项, 第 3 项、第 4 项为 ± 1 级衍射, 是需要的相关信号。二元联合变换先对 (3) 式作二值化处理, 再作傅里叶逆变换得到, 即:

$$I_b(u, v) = \begin{cases} 1 & I(u, v) - I_b(u, v) > 0 \\ -1 & \text{其它} \end{cases}$$

$$I_b(u, v) = I_t(u, v) + I_r(u, v) \\ I(u, v) - I_b(u, v) = 2|T(u, v)| |R(u, v)| \times \cos[4\pi au + \varphi_r(u, v) - \varphi_t(u, v)] \quad (5)$$

这里, $I_b(u, v)$ 是二值化后的功率谱, $I_b(u, v)$ 为功率谱阈值, $I_t(u, v)$, $I_r(u, v)$ 分别表示单独输入目标图像和参考图像时得到的功率谱, 二值化处理可以消去零级衍射和余弦调制因子对相关峰的影响, 使二元联合变换相关器在进行图像识别时, 具有很高的性能。然而这种取阈方法需要已知参考图像和目标图像的功率谱分布, 参考图像的功率谱可以预先存在计算机中, 但是目标图像只能在识别时附加测量, 影响了系统的实时性。

3 离散联合变换相关器

由前面分析可知, 当目标图像和参考图像完全一致时, (3) 式可简化为:

$$I(u, v) = 2|R(u, v)|^2 + 2|R(u, v)|^2 \cos(4\pi au) = 2|R(u, v)|^2 [1 + \cos(4\pi au)] \quad (6)$$

显然, 此时功率谱有两部分组成: (1) 参考信号的功率谱 (干扰项); (2) 受到谱面上沿 u 方向、周期为 $1/2a$ 的余弦函数调制的功率谱 (所需信号)。由于调制信号沿 u 方向的变化率比参考信号沿 u 的变化快得多, 而微分作用能抑制变化缓慢的信号, 突出突变信号, 因此为了提取出所需的 u 方向被调制信号, 只需将联合功率谱对 u 求微分^[10], 并且此时功率谱在 v 方向并未受到调制, 无需求解功率谱对 v 的微分, 即只计算:

$$I_d(u, v) = \frac{\partial I(u, v)}{\partial u} \quad (7)$$

式中, $I_d(x, y)$ 表示微分后的联合功率谱, 对 $I_d(x, y)$ 再作逆傅里叶变换, 即可得到参考图像和目标图像的相关输出 $C_d(x, y)$, 结合傅里叶变换的微分性质得:

$$C_d(x, y) = \text{FT}^{-1}[I_d(u, v)] = -jx \text{FT}^{-1}[I(u, v)] \quad (8)$$

FT^{-1} 表示逆傅里叶变换, 此时 CCD 记录的能量为:

$$|C_d(x, y)|^2 = |jx \text{FT}^{-1}[I(u, v)]|^2 = x^2 |C(x, y)|^2 \quad (9)$$

可以看出, 对联合功率谱先进行微分操作后, 再进行傅里叶逆变换得到的相关器输出, 相当于在传统联合变换的输出面放置了一个模板对相关信号进行调制, 模板的透过率与对应点坐标的平方成正比, 与坐标成抛物面关系。由于自相关峰位于 $x = 0$ 附近, 此处对应的模板透过率很低, 约为 0, 模板作用就能很好地削弱自相关峰, 而在目标与参考信号的互相关位置, 模板具有较高的透过率, 突出互相关峰的效果, 满足实际要求。

4 二元微分联合变换相关器

将二元联合变换相关器与微分联合变换相关器结合, 即可得到二元微分联合变换相关器: 先对联合功率

谱进行微分操作, 然后进行二值化处理。原理如下, 先得到参考图像和目标图像的联合功率谱, 再对联合功率谱求微分, 对于某象素, 若微分值大于 Q 则该处的功率谱取 1, 否则取 -1, 如下式所示:

$$I_b(u, v) = \begin{cases} 1, & (\frac{\partial I(u, v)}{\partial u} > 0) \\ -1 & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

数字图像是由一系列离散的象素组成的, 对它的微分可以用一阶前向差分来近似, 即:

$$I_d(u, v) = \frac{\partial I(u, v)}{\partial u} \approx I(u+1, v) - I(u, v) \quad (11)$$

此时, $1 \leq u \leq M-1, 1 \leq v \leq N, M \times N$ 表示图像的大小。由功率谱的共轭对称性, 可以得出 $I_d(M, v)$ 。因此, 二值化函数 $I_b(u, v)$ 可以简化为:

$$I_b(u, v) = \begin{cases} 1, & (I_d(u, v) > 0) \\ -1, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

由 (5) 式、(11) 式和 (12) 式可以看出, BJTC 在进行相关识别时, 首先分别获取单独输入参考图像和目标图像时的功率谱, 并用联合功率谱相减, 含两次减法运算, 再进行二值化; 而 BDJTC 不需获取参考图像和目标图像的功率谱, 且只需对功率谱作前向差分即可实现微分运算, 只需一次减法, 然后再进行二值化, 减少了计算量, 大大节省了运算时间, 而且减少了系统的内

存占用, 增强系统识别的实时性。

由于联合功率谱的强度变化范围很大, 一般情况下, 低频分量的强度比高频分量的强度高若干个数量级, 采用通用的 10 位或 12 位图像采集不能满足要求, 而实际上低频分量对相关峰的贡献很小, 因此, 在对功率谱作微分运算之前, 先用指数滤波器 $H(u, v)$ 对联合功率谱进行高通滤波, 以抑制功率谱中的低频成分, 增强高频部分:

$$H(u, v) = \exp\left[-\left|\frac{m}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right|^n\right] \quad (13)$$

式中, m 和 n 是指数参数, 它们的选取对相关结果有很大的影响, 一般, m 在 100~1000 范围内取值, n 选取小于 1 的值^[11], 都能使相关结果得到明显的改善。

5 计算机模拟结果

系统原理结构与 BJTC 一致, 如图 1 所示, 对联合功率谱的处理过程存在一些差别。用字母“E”作为参考图像, 分别用字母“E”和字母“G”作为目标图像, 如图 2a 和图 2b 所示, 以表示目标与参考图像相同和存在差别时的情况, 采用 BDJTC 得到的归一化相关峰分别如图 2c 和图 2d 所示。由图 2 可以看出, 当识别目标与参考目标相同时, 得到明显而尖锐的相关峰, 而识别目标与参考目标不同时, 得不到明显的相关峰, 因此, 采用 BDJTC 进行图像相关识别是非常有效的。

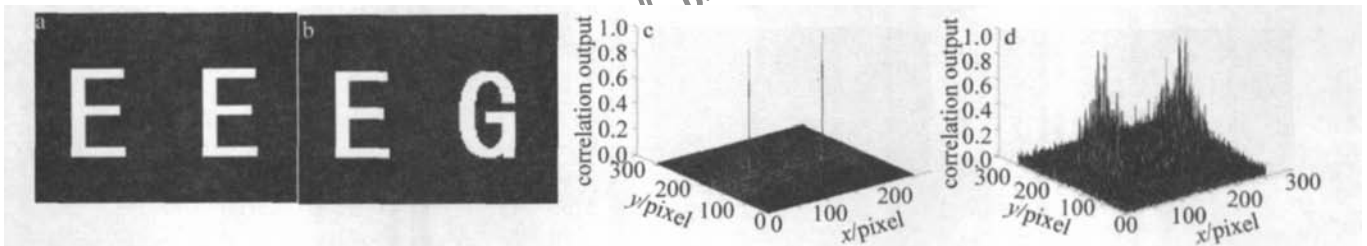


Fig 2 Computer simulation results obtained for the different input objects using BDJTC

a- input object is the same as reference object b- input object is different from reference object c- correlation result of Fig 2a d- correlation result of Fig 2b

用字母“E”作为参考图像, 受噪声污染的“E”作为目标图像, 见图 3a 采用传统二元联合变换相关器和二元微分联合变换相关器得到的相关输出结果分别

见图 3b 图 3c 为了更直观地体现微分操作对相关识别的作用, 图 3d 还示出了用微分联合变换相关器对图 3a 的目标和参考图像进行识别的结果。相关峰全峰

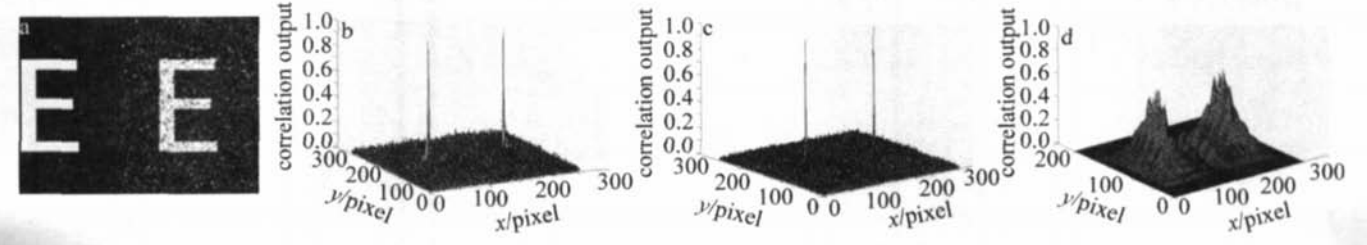


Fig 3 Computer simulation results obtained for the same noised input objects using different JTCs

a- input object and reference object b- correlation output using BJTC c- correlation output using BDJTC d- correlation output using DJTC

半宽 (FWHM) 与信噪比 (SNR) 如表 1 所示。

结合图 3 和表 1 可以看出, 二元联合变换相关器和二元微分联合变换相关器都能实现图像相关识别, 虽然 BDJTC 的自相关峰宽度比 BJTC 增加了 1, 但是它

Table 1 Numerical results of BJTC and BDJTC

	FWHM	SNR
BJTC	1 × 1	94.26
BDJTC	1 × 2	126

的信噪比提高了 33.67%，而且速度明显提高，减少内存占用，增强了系统的实时性。采用微分联合变换相关器进行图像识别时，微分作用可以很好地消去零级峰，突出相关峰，但是输出噪声很大，不适合单独使用，结合功率谱的二值化操作，即能得到理想的结果。

6 结 论

传统的二元联合变换相关器中，在对联合功率谱进行二值化处理时，对阈值的选取要求较高，阈值的确定影响系统的实时性，已经成为二元联合变换相关器的瓶颈。结合对联合功率谱进行微分处理和二值化处理，提出了一种新的二元联合变换方法——二元离散变换相关器，而且在对联合功率谱进行结合微分操作和二值化处理前，先用指数高通滤波函数对功率谱进行滤波。理论分析和模拟结果表明，改进后的算法使识别效果得到了改善，而且实时性明显提高。

参 考 文 献

- [1] LEIE IFON M, YATAGA IT. Adaptive binary joint transform correlator for image recognition [J]. *Appl Opt* 2002, 41(35): 7416~7421
- [2] MEIA C L, EMMIC C. A distortion-tolerant photorefractive joint transform correlator [J]. *J Optics A: Pure and Applied Optics* 2004, 6

- (9): 894~899
- [3] SHABTAY G, MENDLOVID D, ZALEVKY Z. Joint transform correlator for optical temporal signals [J]. *Appl Opt* 2000, 39(45): 6556~6560
- [4] LIU D M, SHEN J Y, WANG L J. Application of the wavelet transform to pattern correlator recognition [J]. *Laser technology* 2004, 28(6): 641~644 (in Chinese).
- [5] JAVIDI B, LI J AM R H F *et al*. Binary nonlinear joint transform correlator performance with different thresholding methods under unknown illumination conditions [J]. *Appl Opt* 1995, 34(5): 886~896
- [6] ZHAO J L, XU Q T, YANG D X *et al*. Optimized threshold of the binary joint transform correlator [J]. *Acta Photonica Sinica* 2002, 31(9): 1101~1104 (in Chinese).
- [7] BUTT J A, WILKINSON T D. Binary phase only reference for invariant pattern recognition with the joint transform correlator [J]. *Proc SPIE* 2006, 6234: 62340F1~62340F11
- [8] JULIC P T, JVELIS L, MARJOM U *et al*. Reduction of the effect of aberrations in a joint transform correlator [J]. *Appl Opt* 2004, 43(4): 841~849
- [9] VICTOR D R H, KOBER A, OSUE A B. Pattern recognition with an adaptive joint transform correlator [J]. *Appl Opt* 2006, 45(23): 5929~5941
- [10] ZHONG Sh, YANG J X, LU Sh T *et al*. Binary joint transform correlator based on differential processing of joint transform power spectrum [J]. *Appl Opt* 1997, 36(8): 1776~1780
- [11] WANG H X, ZHAO W, LIY X. Multi object recognition using power spectrum optimized joint transform correlator [J]. *Optical Technique* 2006, 32(2): 190~195 (in Chinese).

(上接第 602 页)

验发现此值为 6.1。

(3) 900℃热处理条件下高浓度掺杂的 Yb³⁺ 对体系相结构影响不大，但是它延缓了 γ 相的形成，提高了相变的温度。

参 考 文 献

- [1] YAN Y C, FABER A J de WAAL H. Erbium-doped phosphate glass waveguide on silicon with 4.1 dB/cm gain at 1.533 μ m [J]. *A P L*, 1997, 71(20): 2922~2924
- [2] WONG S E, PUNEY B, CHUNG P S. Er³⁺-Yb³⁺ codoped phosphate glass waveguide amplifier using Ag⁺-Li⁺ ion exchange [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2002, 14(1): 80~82
- [3] HEMPSFAD M. Ion exchanged glass waveguide lasers and amplifiers [J]. *SPIE*, 1997, 2996: 94~102
- [4] VANDENHOVEN G N, SNOEKSE, POLMAN A *et al*. Upconversion in Er-implanted Al₂O₃ waveguides [J]. *JA P*, 1996, 79(3): 1258~1266
- [5] OHTSUKI T, HONKANEN S, NAJAFI S. Cooperative upconversion effects on the performance of Er³⁺-doped phosphate glass waveguide amplifiers [J]. *J O S A*, 1997, B14(7): 1838~1845.
- [6] QIU H W, YANG P Zh, ZHONG H Y *et al*. Influence of annealing and doping on Yb:YAG [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2002, 29(5):

- 438~442 (in Chinese).
- [7] POLAN A. Erbium implanted thin film photonic materials [J]. *JA P*, 1997, 82(1): 1~39
- [8] GU T Zh, ZHU M H, XIA T *et al*. Spectroscopic properties of Er³⁺ doped niobate tellurite glasses [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2): 162~164 (in Chinese).
- [9] KOZANECKI A, STEPANKHOVA M, LANZERSTORFER S *et al*. Excitation of Er³⁺ ions in silicon dioxide films thermally grown on silicon [J]. *A P L* 1998, 73(20): 2929~2931.
- [10] WANG X J LEIM K, YANG T *et al*. Coherent effect of Er³⁺-Yb³⁺ co-doping on enhanced photoluminescence properties of Al₂O₃ powders by the sol-gel method [J]. *Optical Materials* 2004(26): 253~259
- [11] ZHANG L, HU H F, OIC H *et al*. Spectroscopic properties and energy transfer in Yb³⁺/Er³⁺-doped phosphate glasses [J]. *Optical Materials* 2001(17): 371~377
- [12] TING C C, CHEN S, YANDLEE H Y. Physical characteristics and infrared fluorescence properties of sol-gel derived Er³⁺-Yb³⁺ co-doped TD₂ [J]. *JA P*, 2003, 94(3): 2102~2109
- [13] LI Sh F, ZHANG Q Y. Absorption and photoluminescence properties Er/Yb codoped soda silicate glasses [J]. *Acta Physica Sinica* 2005, 54(11): 5462~5467 (in Chinese).
- [14] OKADA K, HATTORIA, KAMESHIMA Y. Concentration effect of Cs⁺ additive on the γ -Al₂O₃-to- α -Al₂O₃ phase transition [J]. *Materials Letters* 2000, 42(3): 175~178.