

基于最小平均相关能量滤波器的目标识别技术

贾欢欢 杨璐 王文生

(长春理工大学现代光学测试技术研究室, 吉林 长春 130022)

摘要 把用于匹配滤波器的最小平均相关能量(MACE)算法进行改进,成功应用于实时联合变换相关器。训练系列图像的谱按 MACE 综合后,经傅里叶逆变换在物面合成参考图像,同时在合成参考图像前对训练图像进行边缘提取,并对目标与参考图像的联合功率谱进行拉普拉斯锐化,提高相关峰对比度。给出了存在旋转变化的目标图像和光学实验。实验表明,改进后的 MACE 方法可大大减少训练图像的数目,减小运算量,很好地解决联合变换相关器对目标存在旋转变化的识别问题,可扩大目标识别的范围,提高识别率。

关键词 傅里叶光学; 最小平均相关能量; 畸变不变; 联合变换相关器; 训练图像

中图分类号 TP391

OCIS 100.4999 120.2440

文献标识码 A

Target Recognition Technology Based on Minimum Average Correlation Energy Filters

Jia Huanhuan Yang Lu Wang Wensheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Minimum average correlation energy algorithm (MACE) used in matched filter is improved and applied to real-time joint transform correlator. A set of spectrum of training images are synthesized with MACE and synthesized reference images are got after inverse Fourier transform. Meanwhile, the edge extraction of training images is made before reference images synthesis. Laplace sharpening to the joint power spectrum of object image and reference image are carried out in order to enhance contrast of correlation peak. Rotation variant object images and optical experiments are showed. The experiment proves that improved MACE method can decrease training image number greatly, reduce calculation and well solve the problem of rotation variant object recognition in joint transform correlator. Target recognition scope is expanded and recognition rate is increased.

Key words Fourier optics; minimum average correlation energy; distortion invariant; joint transform correlator; training image

1 引言

传统的联合变换相关器^[1,2]对输入图像发生的畸变相当敏感,即当目标图像相对参考图像发生大小和旋转变化时,目标图像就很难被探测到,因此解决畸变不变^[3~5]模式识别问题一直是光学相关领域的瓶颈技术。综合识别函数^[6~8](SDF)是解决畸变不变识别的有效途径,能提高图像识别的有效性,解决空间形变识别的问题。最小平均相关能量(MACE)算法是综合识别函数的改进方法^[9~11],克服了一般线性组合相关器旁瓣效应较大的缺点,具有相关峰尖锐、易于识别和定位并能够有效抑制噪声的特点。

对最小平均相关能量滤波器的研究多数是应用于匹配滤波器,但匹配滤波器制作繁琐,且不适于目标的实时探测^[12],因此应用范围不广。本文对最小平均相关能量算法做了改进,将其应用于联合变换相关器,可实时探测和识别存在旋转变化的目标。

收稿日期: 2009-08-20; **收到修改稿日期:** 2009-11-16

基金项目: 总装备部预研究局十一五(51317×××105)资助课题。

作者简介: 贾欢欢(1985—),女,硕士研究生,主要从事光学相关探测与识别等方面的研究。

E-mail: jhb19852008@yahoo.com.cn

导师简介: 王文生(1943—),男,教授,博士生导师,主要从事现代光学测试技术方面的研究。E-mail: wwsciom@163.com

2 实时联合变换相关器

在实时联合变换相关器中,参考图像与目标图像同时输入电寻址液晶(EALCD),经过第一次傅里叶变换,得到联合变换功率谱(JTPS),功率谱再次输入到电寻址液晶,经过第二次傅里叶变换后,获得一对相关点,从而达到目标识别的目的。

2.1 基本原理

用准直的相干单位振幅光照明,若目标图像 $f(x,y)$ 的中心位于 $(-a,0)$,参考图像 $r(x,y)$ 的中心位于 $(a,0)$,它们同时被写入电寻址液晶中,如果忽略噪声,光学傅里叶变换系统的输入函数

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

通过透镜进行傅里叶变换,透镜后焦面的振幅分布为

$$A(u,v) = \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda f}au\right)F(u,v) + \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda f}au\right)R(u,v), \quad (2)$$

式中 $F(u,v)$ 和 $R(u,v)$ 分别为目标图像 $f(x,y)$ 和参考图像 $r(x,y)$ 的傅里叶变换, $A(u,v)$ 为 $f(x,y)$ 和 $r(x,y)$ 的联合傅里叶谱。如果用平方律探测器 CCD 测量傅里叶变换透镜(FTL)后焦面的图形,得到的光强分布,即联合变换功率谱为

$$\begin{aligned} |A(u,v)|^2 &= \left| \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda f}au\right)F(u,v) + \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda f}au\right)R(u,v) \right|^2 = \\ &|F(u,v)|^2 + \exp\left(i\frac{4\pi}{\lambda f}au\right)F(u,v)R^*(u,v) + \exp\left(-i\frac{4\pi}{\lambda f}au\right)F^*(u,v)R(u,v) + |R(u,v)|^2, \end{aligned} \quad (3)$$

将联合功率谱 $|A(u,v)|^2$ 再输入到 EALCD,进行一次傅里叶逆变换,得到

$$o(x,y) = C_{ff}(x,y) + C_{rr}(x,y) + C_{fr}(x,y) + C_{rf}(x,y), \quad (4)$$

式中,前两项自相关,两输出信号重叠在输出平面中心,即光轴附近,称之为零级衍射,这两项是输出信号中的最大噪声信号。第三项和第四项是目标图像和参考图像的互相关,是正负一级衍射项,在输出平面上沿 x 轴分别平移 $-2a$ 和 $2a$,它们是所探测目标的有用信号,根据是否有相关点,就可以进行目标的探测与识别。

当目标图像 $f(x,y)$ 与参考图像 $r(x,y)$ 相同时,联合变换功率谱可以认为是两函数上对应的无数点对形成的杨氏条纹的相干叠加。杨氏条纹经过傅里叶变换后的衍射图包含 2 个亮斑(+1 级与 -1 级衍射)和 0 级(直流)衍射光斑,这两个对称分布的亮斑即是相关峰^[13]。

2.2 实验装置

图 1 所示为实时联合变换相关器的实验装置。目标图像与参考图像一起输入到由计算机控制的 EALCD1 中,用准直的相干单位振幅光照明,经 FTL1 后,得到目标图像和参考图像的联合功率谱,用平方率探测器 CCD2 进行记录,输入到 PC2 的功率谱经空间光调制器的控制系统输入到 EALCD2 中,经第二个傅里叶变换透镜(FTL2)后,得到相关输出,由 CCD3 进行探测。

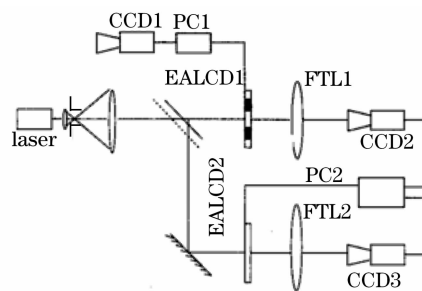


图 1 实时联合变换相关器结构图
Fig. 1 The configuration of real-time joint transform correlator

3 最小平均相关能量滤波器的算法

最小平均相关能量算法^[14,15]的基本原理是将某类目标图像及其畸变图像构成一个训练样本集,由训练集的这些图像进行线性组合构成合成图像,使其能对物体的多个畸变形态都输出足够的相关响应。

假设训练图像由 x 表示,将它按照一定角度旋转或一定比例变化,得到 N 个 d 维训练图像 x_1, x_2, \dots, x_N ,每个训练图像都包含 d 个像素,定义 x_i 为列向量

$$\mathbf{x}_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(d)]^T, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

它们的傅里叶变换用 $X_i(k)$ 表示,长度也是 d ,定义矩阵

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N], \quad (6)$$

则 \mathbf{X} 是由列向量 \mathbf{x}_i 的傅里叶变换 \mathbf{X}_i 构成的矩阵,其中, \mathbf{X}_i 也是列向量。设向量 $\mathbf{h}(n)$ 代表空域的滤波函数,

$H(k)$ 是其傅里叶变换,用 $g_i(n)$ 表示第 i 个训练图像 $x_i(n)$ 与滤波器的相关函数,则有

$$g_i(n) = x_i(n) \otimes h(n), \quad (7)$$

将相关函数的离散傅里叶变换记为 $G_i(k)$,则第 i 个相关面的能量

$$E_i = \left(\frac{1}{d}\right) \sum_{k=1}^d |G_i(k)|^2 = \left(\frac{1}{d}\right) \sum_{k=1}^d |H(k)|^2 |X_i(k)|^2. \quad (8)$$

(8)式是由 Parseval 定理得出的,也可以将其写成向量的形式

$$E_i = \mathbf{H}^+ \mathbf{D}_i \mathbf{H}, \quad (9)$$

式中上标 + 号表示复向量的共轭转置,而 \mathbf{D}_i 是一个 $d \times d$ 大小的对角阵,其对角线上的元素是对应每个 X_i 的振幅平方,即

$$D_i(k, k) = |X_i(k)|^2, \quad (10)$$

则矩阵的对角线元素也分别是每个训练图像的功率谱。

对于最小平均相关能量滤波器,为达到较好的探测结果,需要将相关面内除去原点以外的其他各点的相关程度最小化来突出相关峰,同时对峰值进行约束,这也相当于将相关面的能量 E_i 最小化。设 $g_i(0)$ 表示相关面输出的峰值, u_i 是指定具体的限制数值同时也是约束矢量 \mathbf{u} 的第 i 个元素,对 N 个训练图像,相关峰的幅度限制可以表示为

$$g_i(0) = \mathbf{X}_i^+ \mathbf{H} = u_i, \quad (11)$$

对所有训练图像,峰值约束也可以写成

$$\mathbf{X}^+ \mathbf{H} = \mathbf{u}. \quad (12)$$

在这里,需要找到能将相关面的能量最小化,同时又满足峰值约束的矢量 \mathbf{H} ,但同时最小化所有训练样本的输出能量 $E_i (i=1, 2, \dots, N)$ 是不可能的,则矢量 \mathbf{H} 也就不可能存在。因此,在满足(12)式线性约束的条件下,将 E_i 的平均值最小化

$$E_{av} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N E_i = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N \mathbf{H}^+ \mathbf{D}_i \mathbf{H} = \left(\frac{1}{N}\right) \mathbf{H}^+ \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{D}_i\right) \mathbf{H}. \quad (13)$$

将对角矩阵 \mathbf{D} 定义为 $\mathbf{D} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mathbf{D}_i$,其中 α_i 都是常数,如果 $\alpha_i = 1$,可以将(13)式重写为

$$E_{av} = \left(\frac{1}{N}\right) \mathbf{H}^+ \mathbf{D} \mathbf{H}, \quad \alpha_i = 1, i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

利用拉格朗日乘数法,可以求得(14)式的解,即最小平均相关能量滤波器函数

$$\mathbf{H} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{X} (\mathbf{X}^+ \mathbf{D}^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{u}. \quad (15)$$

这里,最小平均相关能量滤波器函数 \mathbf{H} 的构造由 MATLAB 编程来实现,同时将 \mathbf{H} 进行傅里叶逆变换,可以得到一组训练图像的合成图像,即参考图像。由于滤波器函数由矩阵 \mathbf{X} , 对角矩阵 \mathbf{D} 等简单的统计参数构成,计算简单,求逆方便,因此,满足约束条件时,将训练图像的平均相关能量降到最小来合成参考图像是省时而简单的,有利于实现目标图像的实时探测与识别。

4 实验结果

作为实例,给出了具体的实验结果,这里选用 6 幅做角度旋转的小轿车图像来合成模板图像,在用最小平均相关能量方法合成参考图像之前,将做不同角度旋转的图像分别进行边缘提取,作为一组训练图像,如图 2 所示。其中图 2(a)~(e)分别是经边缘提取的轿车图像顺时针旋转 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 和 25° 组成的一组训练图像,图 2(f)是合成的参考图像。图 3(a), (d)所示是目标图像与合成参考图像的联合图像,是联合变换相关器物面的输入图像,其中待识别的目标图像是轿车旋转 13° 和 26° 。为了增强相关点的亮度,将联合图像的功率谱用拉普拉斯算子锐化,得到如图 3(b), (e)所示的功率谱。再进行傅里叶逆变换,得到相关峰,如图 3(c), (f)所示。可以看到,在训练图像所包含角度的范围内,旋转任意角度的目标都可以被识别,且训练图像附近角度的目标也可以识别,经过实验证明,随着训练图像数目的增加,目标能被识别的范围随之增大,因此,用最小平均相关能量滤波器合成参考图像的方法可以应用于联合变换相关器,很好地解决存在畸变目

标图像的实时探测与识别问题。

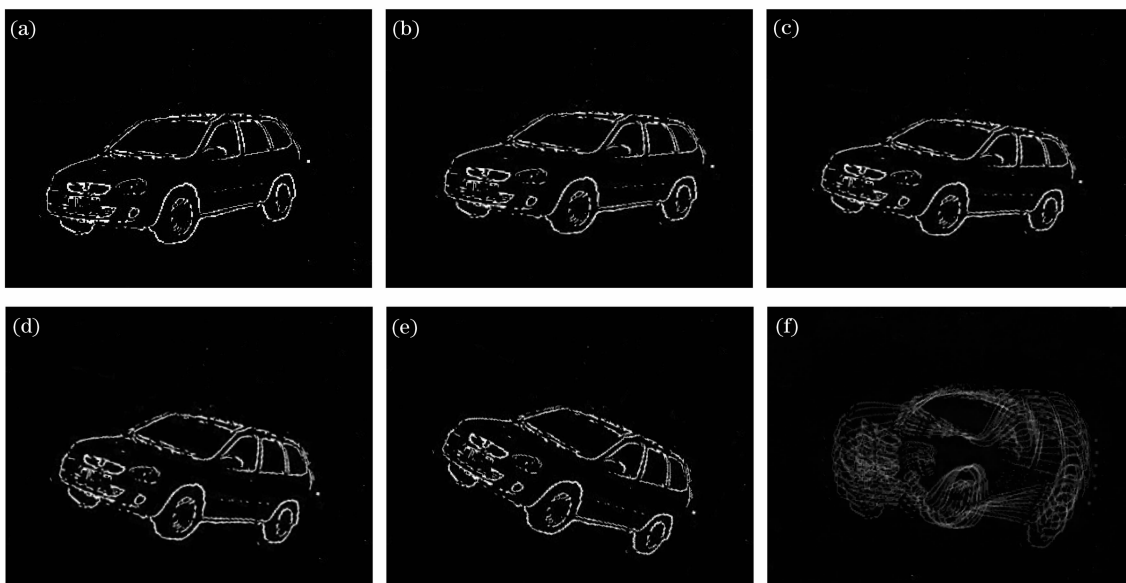


图 2 一组训练图像及合成的参考图像。(a)不做旋转的训练图像,(b)旋转 5° 的训练图像,(c)旋转 10° 的训练图像,(d)旋转 15° 的训练图像,(e)旋转 25° 的训练图像,(f)合成的参考图像

Fig. 2 A set of training images and synthesized reference image. (a) irrotational training image, (b) training image with 5° rotation, (c) training image with 10° rotation, (d) training image with 15° rotation, (e) training image with 25° rotation, (f) synthesized reference image

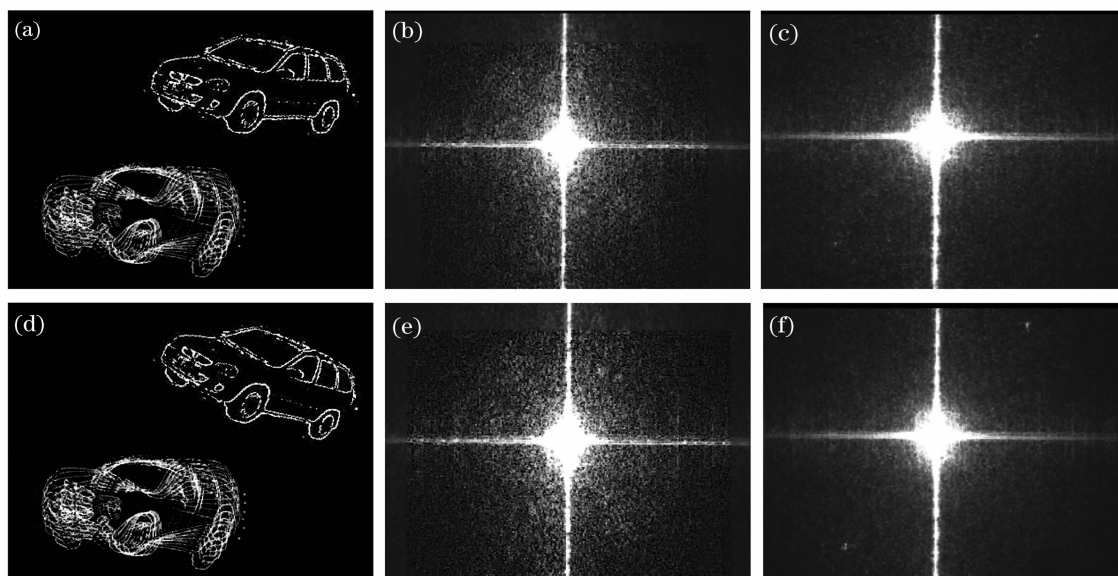


图 3 输入图像及其功率谱和相关峰。(a)模板与旋转 13° 的目标图像,(b)拉普拉斯锐化后的功率谱,(c)相关峰,(d)模板与旋转 26° 的目标图像,(e)拉普拉斯锐化后的功率谱,(f)相关峰

Fig. 3 Input image together with its power spectrum and correlation peak. (a) template and object image, with 13° rotation, (b) power spectrum after Laplace sharpening, (c) correlation peak, (d) template and object image with 26° rotation, (e) power spectrum after Laplace sharpening, (f) correlation peak

5 结 论

普通的 MACE 算法仅能应用于 $4f$ 系统,改进后的 MACE 可应用于联合变换相关器,减少训练图像的数目,实现对旋转目标的实时探测。实验表明,应用改进后的最小平均相关能量算法可在相关面得到尖锐的

相关峰,在一定范围内实现了旋转变化目标的识别。

参 考 文 献

- 1 He Wantao, Hong Rutong, Lian Tongshu. Electro-optical hybrid synthetic discriminant function correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(1): 100~105
何万涛,洪汝桐,连铜淑. 光电混合综合判别相关器[J]. 光学学报, 1996, **16**(1): 100~105
- 2 Zhang Yimo, Qin Yuwen, Huang Zhanhua. Real-time high-efficiency joint transform correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7): 883~887
张以谟,秦玉文,黄战华. 实时高效联合变换相关器[J]. 光学学报, 1995, **15**(7): 883~887
- 3 An Peijian, Yang Aifen. The research on large range distortion-invariance electronic-optic hybrid image identification[J]. *J. Appl. Opt.*, 1994, **15**(6): 56~59
安培建,杨爱粉. 大范围畸变不变光电混合图像识别研究 [J]. 应用光学, 1994, **15**(6): 56~59
- 4 Liu Haisong, Wu Minxian, He Qingsheng *et al.*. Optical distortion-invariant image recognition based on the multivariate discriminant analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 912~918
刘海松, 邬敏贤, 何庆声 等. 基于多变量鉴别分析的光学畸变不变性图像识别[J]. 光学学报, 2000, **20**(7): 912~918
- 5 Wu Dan, Lu Yuan, Ling Yongshun *et al.*. Distortion invariant pattern recognition based on amplitude-modulated phase-only filtering and sliced orthogonal nonlinear generalized correlation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1397~1402
吴 丹,路 远,凌永顺 等. 基于振幅调制纯相位滤波器和片状正交非线性广义相关的畸变不变识别[J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1397~1402
- 6 Liu Wenyao. Optoelectronic Image Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 335~340
刘文耀. 光电图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 335~340
- 7 Chen Yu, Miao Hua, Lang Qi *et al.*. Application of mellin transform in opto-electronic hybrid target detection technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 421~425
陈 宇,苗 华,郎 琪 等. 梅林变换在光电混合目标探测技术中的应用[J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 421~425
- 8 Gan Houji, Hua Wenshen, Wang Jinyu. Improvement of conventional synthetic discriminant functions[J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, **28**(3): 376~379
甘厚吉, 华文深, 王金玉. 常规综合鉴别函数的改进[J]. 应用光学, 2007, **28**(3): 376~379
- 9 A. Mahalanobis, Anjana Khunkhum. Purely real unconstrained correlation filters[C]. *SPIE*, 1995, **2490**: 188~193
- 10 A. Mahalanobis, B. V. K. Vijaya Kumar, S. Song *et al.*. Unconstrained correlation filters[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(17): 3751~3759
- 11 B. V. K. Vijaya Kumar. Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(23): 4773~4801
- 12 Miao Hua, Zou Xin, Lang Qi *et al.*. Research on spectrum plane processing technology of target auto-recognition in cluttered scenes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 366~369
苗 华,邹 昕,郎 琪 等. 复杂背景目标自动识别谱面处理技术研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 366~369
- 13 Song Feijun, S. Jutamulia. Advanced Optical Information Processing[M]. Beijing: Peking University Press, 1998. 78~83
宋菲君, S. Jutamulia. 近代光学信息处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998. 78~83
- 14 Wang Yongzhong, Xue Rui, Zhang Yong. Minimum average correlation energy filter with noise immunity[J]. *Optics & Optoelectronics Technology*, 2004, **2**(6): 20~22
王永仲,薛 蕊,张 勇. 抗噪型最小平均相关能量滤波器[J]. 光学与光电技术, 2004, **2**(6): 20~22
- 15 Abhijit Mahalanobis, B. V. K. Vijaya Kumar, David Casasent. Minimum average correlation energy filters[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(17): 3633~3640