

文章编号: 0258-7025(2005)04-0466-05

三维轴对称目标的简化识别

易亨瑜^{1,2}, 胡晓阳², 张 凯², 吕百达¹

(¹ 四川大学激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064
² 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 基于对空中轴对称目标识别的需要,根据目标投影变换和姿态测量,利用匹配滤波和坐标变换,提出一种简化的识别方法。选择合适的目标投影图像作为识别模板,并用计算全息的方法编制成匹配滤波器;在目标的三维姿态被探测后,根据其方位角和俯仰角,对滤波器进行坐标变换,再利用光学相关方式识别目标的投影图像。通过数值模拟,分析了不同姿态下二维任意目标的识别情况,以及三维轴对称目标的模板选择及其识别效果。分析表明,利用这种简化识别方法,只需将目标在 45°和 90°俯仰角下的投影图像制成识别模板,并进行组合,即可得到目标的最小相关系数为 0.4472,远大于飞机干扰物与模板的最大相关系数 0.06。

关键词 信息光学; 目标识别; 坐标变换; 计算全息; 傅里叶频谱; 三维姿态

中图分类号 O438 **文献标识码** A

Simplified Recognition of 3D Axes-Symmetric Object

YI Heng-yu^{1,2}, HU Xiao-yang², Zhang Kai², LÜ Bai-da¹

(¹ Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China
² Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In order to recognize axes-symmetric targets in the sky, based on target's projection transform and measurement of its three dimensional (3D) orientation, a simplified approach is put forward in this paper, which is realized in the way of matching filter and coordinate transform. An appropriate projected image of a target is chosen to make a discriminating template and is encoded to a matching filter by using computer-generated hologram. After 3D orientation of the target is explored, coordinate transform of the matched filter can be carried out according to its pitching angle and azimuth angle, and then this target is detected in the way of matching correlation. By this simplified detection method, it is studied how to select template for 3D axes-symmetric object, and recognized effect is simulated for 2D arbitrary target and 3D axes-symmetric object at random angle. With the combination of only two filters, which are made from target's projection of 45° and 90°, the minimum correlation coefficient between the target and template in various pitching angle is 0.4472 which is far more than maximal correlation coefficient of 0.06 between plane interference objects and template.

Key words information optics; recognition; coordinate transform; computer-generated holograms (CGH); Fourier spectrum; 3D orientation

1 引 言

三维目标的匹配滤波相关识别,本质上是对其二维投影图像的识别。实际应用中由于目标三维姿态的改变,其投影图像相对于识别模板发生“畸变”,导致相关平面上信号减弱,甚至消失。此时需要采用圆谐滤波器^[1,2]或综合判别函数^[3,4](SDF)制作匹配空间滤波器。由于目标姿态很多,在运用综合

判别函数技术对目标进行识别时还需不断刷新滤波器,这样就增大了目标识别的实现难度并降低了识别速度。

文献[5,6]针对火箭、导弹等圆柱体形状目标,研究了利用单站或多站图像获得目标三维姿态(方向角和俯仰角)的方法,并获得了两项专利。这些结论为简化三维轴对称目标的识别方法提供了理论依

收稿日期: 2004-01-05; 收到修改稿日期: 2004-04-26

基金项目: 中国工程物理研究院应用电子学研究所所长基金(SJ0111004)资助项目。

作者简介: 易亨瑜(1969—),男,重庆人,高级工程师,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: yihengyu1@sina.com

据。空间目标不同姿态角的投影成像,可近似为其特定角度投影像的坐标变换。在此基础上选择合适的目标投影图像作为识别模板。若目标姿态能被实时探测,可根据所测的目标方位角和俯仰角,对该模板进行坐标变换,再利用匹配相关方式进行识别,便能得到一定的识别结果。这种方法利用耗时较少的坐标变换,来实现对目标的实时识别,且实现容易。本文通过数值模拟,研究这种简化方法的可行性,并讨论了滤波器的选择问题。

2 原 理

三维轴对称目标识别的简化方法,其基础是目标的投影变换和姿态测量,以及计算全息中的坐标变换。

2.1 三维目标投影及其姿态

在图 1 中空间目标为圆柱体^[5], oz 轴为望远镜系统光轴,平面 oxy 为投影图像面, AB 为目标中轴线。 AB 在平面 oxy 内的投影 BC 与 ox 轴的夹角 $\angle CBD$ 称为方向角 ω , AB 与平面 oxy 的夹角 $\angle ABC$ 称为俯仰角 ϕ , 这两个角度可以表征圆柱体目标的三维姿态。当目标距离 u 远大于望远镜系统焦距 f 时,可用平行投影对目标近似描述。投影变换如下

$$Q = M_{\text{ort}} \cdot q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

上式表示待投影点 $P(x, y, z)$ 经过平行投影矩阵 M_{ort} 的变换得到其投影点 $Q(x, y)$ 。

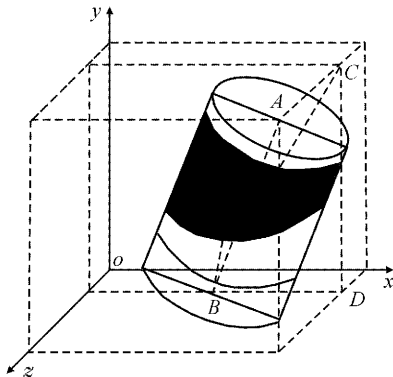


图 1 空间坐标系中的圆柱体

Fig. 1 A cylinder in space coordinate

根据目标的投影,从单站光测图像确定目标三维姿态的椭圆度法^[5]是:圆柱体上、下表面为圆,空

间圆投影时,除退化情况外一般得到椭圆图像(如图 2),根据椭圆度可计算出空间圆的姿态。在图 2 中,椭圆短轴所在直线 AA' 与 ox 轴的夹角等于空间圆柱方向角 ω ;俯仰角 ϕ

$$\phi = \arcsin(b/a), \quad (2)$$

式中 a, b 分别为椭圆的长轴和短轴。

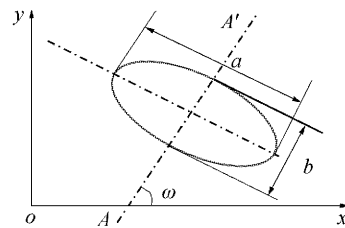


图 2 目标姿态角测量的椭圆度法

Fig. 2 Measure of the target's 3D orientation

2.2 识别模板的坐标变换

识别模板可通过计算全息编码来制作,它是相关识别的关键。当目标形状发生改变时,为了实现目标的准确识别,需要模板也发生相应变化。目标形状的变化可近似为坐标变换所引起的。设目标为 $g(x, y)$, 其频谱为 $G(\mu, \nu)$; 坐标变换后目标为 $g(x', y')$, 其中 $x' = a_1x + b_1y, y' = a_2x + b_2y$ 。其频谱 $G'(\mu, \nu)$ 为^[7]

$$G'(\mu, \nu) = \iint g(a_1x + b_1y, a_2x + b_2y) \times \exp[-j2\pi(x\mu + y\nu)] dx dy = \frac{1}{|D|} G(\mu', \nu'), \quad (3)$$

其中

$$D = a_1b_2 - a_2b_1, \\ \mu' = (b_2\mu - a_2\nu)/D, \\ \nu' = (a_1\nu - b_1\mu)/D.$$

1) 方向角 ω 对应的旋转变换

目标沿逆时针方向旋转 ω 角度后,利用(3)式可得其频谱的坐标变换关系为

$$\begin{cases} x' = x \cos \omega + y \sin \omega \\ y' = y \cos \omega - x \sin \omega \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu' = \mu \cos \omega + \nu \sin \omega \\ \nu' = \nu \cos \omega - \mu \sin \omega \end{cases}, \quad (4)$$

当 $\omega = 180^\circ$ 时,频谱就发生了左右翻转。

2) 俯仰角 ϕ 对应的伸缩变换

为方便起见,选择方向角 $\omega = 0^\circ$,即在 x 方向上,分析俯仰角 ϕ 对频谱的变换。同理可得

$$\begin{cases} x' = x \cos \phi \\ y' = y \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu' = \mu / \cos \phi \\ \nu' = \nu \end{cases}, \quad (5)$$

2.3 相关识别

匹配相关识别是一种快速、准确的二维图像识

别方法,其结果反映了模板与图像之间匹配点的数量,详见文献[8]。在数学上,相关系数是一个表示图像 A 与模板 B 的线性联系密切程度的统计量,它是小于 1 的正数。当相关系数为 1 时,表示图像 A 与模板 B 的线性联系最密切;当相关系数为 0 时,表示图像 A 与模板 B 不相关,线性联系最弱。相关系数的基本概念与相关识别原理一致,相关系数的公式如下

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2 (B_{mn} - \bar{B})^2}}, \quad (6)$$

式中 m, n 表示图像的行、列数, \bar{A} 和 \bar{B} 表示图像 A 和模板 B 的平均值。

3 模拟结果及分析

识别模板的坐标变换是讨论简化方法的核心。二维图像识别是三维目标的识别基础。虽然三维目标是轴对称的,但其投影却是任意图像,故首先先讨论不同姿态下的二维任意图像的识别。

3.1 二维任意图像的识别

选择一幅战斗机图片并用 Sobel 算子进行边缘分割得图 3(a),经过纯相位离轴编码^[9]后得图 3(b),模拟再现得图 3(c)。以图 3(b)为识别模板,对图 3(a)进行相关识别得到尖锐的相关峰,如图 3(d)。

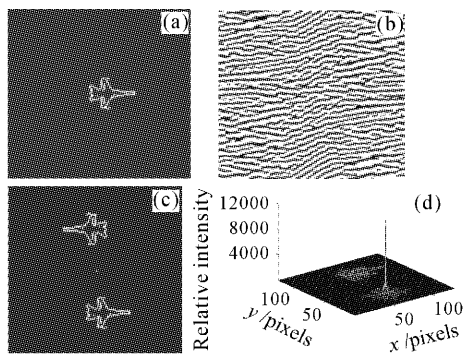


图 3 输入图像 (a), 离轴编码频谱 (b), 模拟再现 (c) 以及对原图的识别结果 (d)

Fig. 3 Input image (a), spectrum of off-axis coding (b), simulated reconstruction (c) and recognized result (d)

1) 频谱左右翻转

利用(4)式对频谱图 3(b)进行左右翻转坐标变换,其再现像如图 4(a)。以变换后的频谱为模板,对图 3(a)进行相关识别,得到上下翻转的识别结果,如图 4(b)。

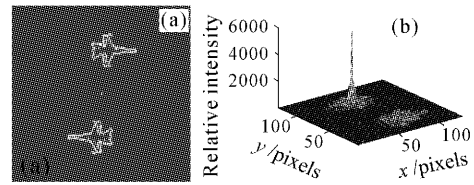


图 4 频谱左右翻转后的模拟再现(a)和对原图的识别(b)
Fig. 4 Simulated reconstruction of overturn spectrum(a) and its recognized result (b)

2) 俯仰角 ϕ 对应的伸缩变换

利用(5)式对频谱图 3(b)进行俯仰变换,其再现像如图 5(a)。对原图像[图 3(a)]进行相同俯仰角投影,得到图 5(b)。用俯仰变化后的谱作模板,对图 5(b)进行识别得到俯仰变换后的识别结果,如图 5(c)。与图 3(d)对比可知,相关峰的锐度、信噪比等指标都没有下降。

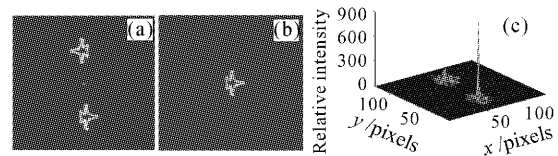


图 5 频谱伸缩变换后的模拟再现 (a), 原图俯仰变换 (b) 以及对原图俯仰变换的识别结果 (c)
Fig. 5 Simulated reconstruction of telescopic spectrum (a), pitching of input image (b) and its recognized result (c)

3) 方向角 ω 对应的旋转变换

在不同物体中进行目标识别,以图 3(b)作为匹配模板,对图 6(a)进行识别得到尖锐的相关峰,如图 6(b)。利用(4)式对频谱图 3(b)实施 90° 方位角旋转,对图 6(c)进行相关识别,可得图 6(d)。可以看到,噪声峰小于目标相关峰,不会干扰目标的正确

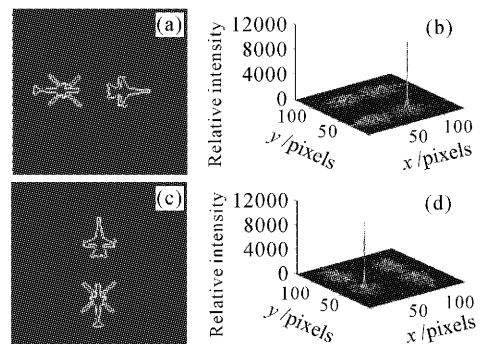


图 6 输入场景 (a), 不同目标的识别 (b), 旋转后的输入场景 (c) 以及旋转变换后的识别结果 (d)

Fig. 6 Input image(a) and its recognized result (b), rotation of input image (c) and its recognized result (d)

识别。结果说明,俯仰变化、方位变换后二维目标可用经过相同变换的模板进行识别。

3.2 不同俯仰角下圆柱体投影图像的识别

三维目标的方位变化,不会改变目标的形态(即投影像),因而可通过模板的坐标旋转变换来准确识别。但目标的俯仰变换,却使其形态随俯仰角的大小而变化。下面讨论在 0° 方向角时,三维目标俯仰角变化时的识别情况。为简化计算量,采用相关系数来评价识别效果。

与文献[5]相同,选择如图7(a)的圆柱体目标,其上表面直径0.4 m,高度2 m。对望远镜成像,按照平行投影模型计算得到其不同俯仰角下的投影图像。作为识别模板,图7(b),(c),(d)分别简称为 0° 、 45° 和 90° 模板。加入截止条件——当俯仰角大于 76° 后,就不再对模板进行俯仰变换——防止模板形状在变换后退化成一条线段。

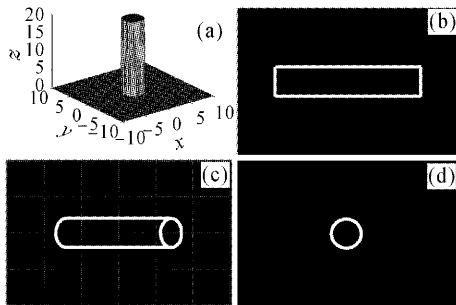


图7 三维圆柱体(a),俯仰角为 0° 时的投影(b),俯仰角 45° 时的投影(c)以及俯仰角 90° 时的投影(d)
Fig. 7 3D cylinder (a) and its projection of 0° (b), 45° (c) and 90° (d)

该圆柱体在不同的俯仰角下投影得到不同“畸变”程度的输入图形。利用(2)式计算其俯仰角,对 0° 和 45° 模板实施与“畸变”图形相同的俯仰角变换;再对“畸变”图形进行相关运算,得到相关系数随角度的变化情况,如图8(a),(b)所示。对比可知, 45° 模板在 $0^\circ\sim 80^\circ$ 间相关系数大于0.5,优于 0° 模板;加入截止条件后,在一定程度上改善大角度下的识别能力,但俯仰角在 90° 时,该模板的相关系数值下降到0.2314。

选择 90° 模板,不经过任何变换,对三维圆柱体进行相关运算,得到的相关系数如图8(b)下方曲线所示。 90° 与 45° 模板的两条曲线相交点为 $(88.529^\circ, 0.4472)$ 。这说明用 90° 模板作为 45° 模板的补充,可进一步提高在接近 90° 俯仰角的相关系数,两模板组合后最小的相关系数为0.4472。

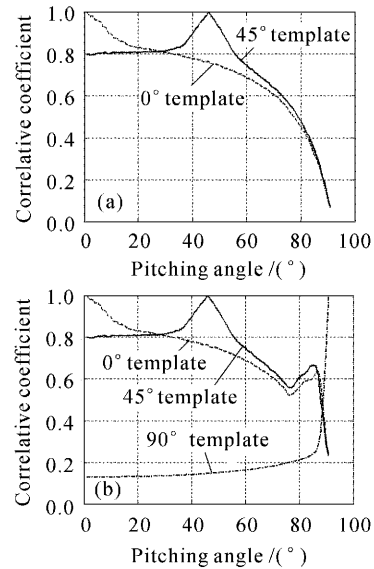


图8 不同模板与不同俯仰角下三维圆柱体的相关系数
(a) 无截止条件, (b) 加上截止条件

Fig. 8 Correlation coefficient between templates and the target in various pitching angle
(a) No cut-off, (b) cut-off

空中的干扰信号大多数是飞机,利用图7中圆柱体的 0° 、 45° 和 90° 模板,分别对图3(a)进行相关运算得表1。由表1可知,飞机与圆柱体模板的相关系数小于0.06。光学相关识别运算,是将模板平移后,再与输入场景的共轭复数相乘再求积分^[8]。如果圆柱体目标与飞机干扰物体在输入场景中不重叠,其位置分别在场景中 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 处,通过Sobel算子消除云层等缓变背景的干扰后,由于相关结果在 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 处差别较大,所以利用 45° 、 90° 两个模板的组合,通过俯仰变换,能够对不同俯仰角下圆柱体目标进行识别。当然这种方法的误判率决定于目标与干扰物投影像的相似程度。相似程度越小,误判率越低。

表1 飞机与三种模板的相关系数

Table 1 Correlation coefficient produced by a plane and one of three templates

0° template	0.0086
45° template	0.0112
90° template	0.0569

4 结 论

三维目标的匹配识别,涉及目标的尺度、方位与俯仰变换。方位变换导致目标投影图像的旋转。尺度变换和俯仰变换都会导致目标投影像的伸缩,其

区别在于尺度变换使目标投影像发生等比例伸缩,可以利用文献[10]介绍的频谱的对数变换来解决;俯仰变换使目标投影像发生畸变。利用本文介绍的简化方法,在干扰物与目标外形相似程度较小的情况下,可以解决不同姿态下二维任意目标和三维轴对称目标的识别问题。模拟结果表明,对于二维目标,只需一个模板便可进行准确识别;而对于空间轴对称目标,只需 45° 和 90° 两个模板就可进行判别。对于一端是圆锥状的圆柱体目标,也可进行类似分析。另外如果干扰物与目标相似程度较大,这种简化方法可能失效,此时需要根据物体的辐射谱等其他特征进行识别。

对于任意姿态的目标,其俯仰角和方位角都可能不为 0° 。可先对模板进行俯仰变换,再根据方位角作旋转变换来识别它。由于坐标变换在程序中费时较少,所以这种简化识别方法可以实现目标的实时识别。

参 考 文 献

- 1 Y. N. Hsu, H. H. Arsenault. Optical pattern recognition using circular harmonic expansion [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(22): 4016~4019
- 2 Chen Xuewen, Chen Zhenpei. Rotation invariant amplitude phase composite circular harmonic filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 373~377
陈学文,陈祯培. 旋转不变振幅位相合成圆谐滤波器 [J]. 光学学报, 1996, **16**(3): 373~377
- 3 D. Casasent. Unified synthetic discriminant function computational formulation [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(10): 1620~1627
- 4 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
- 5 Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Qiu Zhiqiang. Approach of determination of object's 3D pose from mono-view [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(1): 77~79
于起峰,孙祥一,邱志强. 从单站光测图像确定空间目标三维姿态 [J]. 光学技术, 2002, **28**(1): 77~79
- 6 Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Chen Guojun. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image [J]. *J. National University of Defense Technology*, 2000, **22**(2): 15~19
于起峰,孙祥一,陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法 [J]. 国防科技大学学报, 2000, **22**(2): 15~19
- 7 Mu Renwang, Zhou Jin, Tan Suqing *et al.*. The application of coordinate transformation in Fourier computer generated holograms [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9): 829~832
沐仁旺,周进,谈苏庆等. 坐标变换在傅里叶计算全息中的应用 [J]. 中国激光, 1998, **A25**(9): 829~832
- 8 Yi Heng-yu, Ye Yidong, Zhang Wei *et al.*. Recognition of targets under complicated background of cloud [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2002, **14**(5): 693~696
易亨瑜,叶一东,张卫等. 云层背景中目标的相关识别 [J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(5): 693~696
- 9 J. L. Horner, P. D. Gianino. Phase-only matched filtering [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(6): 812~816
- 10 A. Moya, J. J. Esteve-Taboada, J. Garcia *et al.*. Shift- and scale-invariant recognition of contour objects with logarithmic radial harmonic filters [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(29): 5347~5352