

平面反射镜组在光学相关器中的应用

赵融生 陈向宁 陈建彪 甘世奇

解放军装备学院, 北京 101400

摘要 为了解决光学相关器无法与发生旋转的目标进行光学相关识别的问题,提出了使用平面反射镜组获取目标图像,与模板图像进行相关识别。在获取目标的光学系统中,加入一个由多个平面反射镜围成的正多棱柱体,它可以使目标产生的一组不同角度的镜像,将其作为目标图像与模板图像进行相关识别。可以从不同旋转角度的目标产生的镜像组中找到角度相似的镜像,这类目标图像与模板图像进行相关运算,能够得到相关峰。实验表明,将通过平面反射镜组获得的目标的镜像组作为目标图像,是解决光学相关器针对旋转目标识别问题的有效途径。

关键词 光学器件; 光学信息获取与处理; 反射; 相关识别; 全息存储; 信息光学

中图分类号 TN26

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1023003

Application of Plane Mirror Group in Optical Correlator

Zhao Rongsheng Chen Xiangning Chen Jianbiao Gan Shiqi

Academy of Equipment, Beijing 101400, China

Abstract In order to research the problems which optical correlator can not recognize with the rotating target. It is proposed that by using the plane mirror group we can obtain the target image and recognize with the mirror image of the template image. In the optical system of acquire target, inserting a polygonal prism which is enclosed by plurality of plane mirror, it can make the target to produce a set of different angles mirror image. The similar angle mirror image can be found from a set of mirror image by different rotation angle target, and correlation peak is acquired when such target image and template are correlated. Experimental results show that mirror image of the rotating target obtained by the plane mirror group as the target image, is an effective way to resolve problem that optical correlator recognize with the target.

Key words optical devices; optical information acquisition and processing; reflection; correlation recognition; holographic storage; information optics

OCIS codes 230.1150; 200.3050; 120.5700

1 引 言

光学相关器是基于空间匹配滤波原理^[1]的光学相关技术,它是以傅里叶变换为基础,其本身具有平移不变性,即输入物体平移,仅改变相关输出的位置,并不影响滤波效果。当输入物体的角度发生旋转时,对应图像的频谱发生变化,相关峰值降低,导致识别困难或误判。为了突破这一限制,国内外学者进行了大量的研究并取得了许多成果,如 Reddy B S等^[2]提出一种针对平移、旋转和尺寸变化的快速傅里叶变换技术; Zhou Hanying等^[3]设计了具有畸变不变性的最大平均相关高度(MACH)滤波器,它可以完成目标图像与一组含有畸变的训练集图像的相关运算并使相关结果最大化;傅里叶-梅林变换被用来识别发生旋转的目标图像^[4],但是该方法需要大量的处理时间,不适合实时识别^[5];冯升同等^[6]提出制作一个包括原模板图像在内的旋转图像的训练集,从而构建了一个体全息光学相关器。体全息相关器具有的大容量,并行性的特点,但是该方法需要将大量的模板图像存储到晶体中,操作繁琐、消耗材料容量。

收稿日期: 2015-04-27; 收到修改稿日期: 2015-06-05

作者简介: 赵融生(1991—),男,硕士研究生,主要从事光学相关方面的研究。E-mail: 18511802282@163.com

导师简介: 陈向宁(1962—),男,博士,教授,主要从事遥感方面的研究; E-mail: laser115@126.com

本文针对光学相关器无法识别旋转的目标图像的问题,提出在获取目标图像的光学系统中加入平面反射镜组,得到含有目标多角度镜像的目标图像。用这类目标图像与模板图像的镜像进行光学相关识,可以解决发生旋转的目标的光学识别,同时保证光学信息处理的快速,而且操作简便,节省存储材料容量。由此,设计获取目标图像的光学系统,并构建了一台全息存储^[7]与相关识别系统^[8]。上述系统分别完成获取目标图像和将模板图像镜像的全息图存储于晶体中,并与目标图像进行相关识别。

2 光学相关器的工作原理

2.1 光学相关识别原理

光学相关器是基于空间匹配滤波原理^[1]的光学相关技术。它是通过目标函数与模板函数傅里叶变换的乘积实现的。模板图像以其函数的傅里叶变换的共轭形式表现出来,作为空间滤波器。由于模板图像的函数是复函数,因此可以用全息图来实现。该滤波器的作用是要与目标函数进行互相关运算,判断目标函数是否与模板函数匹配。

首先,将模板图像 $o(x,y)$ 作为物光输入,经过傅里叶变换,与对应的参考光 $r(x,y)$ 发生干涉,形成匹配滤波器 $\beta'O^*R$,并记录在全息材料里。

物光与参考光发生干涉^[9]:

$$u(x,y) = o(x,y) + r(x,y) = o_0(x,y)\exp[-j\phi_o(x,y)] + r_0(x,y)\exp[-j\phi_r(x,y)]. \quad (1)$$

其强度分布为

$$I(x,y) = |U(x,y)|^2 = |O(x,y)|^2 + |R(x,y)|^2 + O(x,y)R^*(x,y) + O^*(x,y)R(x,y). \quad (2)$$

记录在全息材料^[9]上,得到的全息图的分振幅透射率 w

$$t(x,y) = t_0 + \beta'I(x,y) = t_0 + \beta'|O|^2 + \beta'|R|^2 + \beta'OR^* + \beta'O^*R. \quad (3)$$

然后,将目标图像 $s(x,y)$ 经过傅里叶透镜变换的频谱 $S(f_x,f_y)$,与匹配滤波器 $\beta'O^*R$ 进行相关运算。若目标图像与模板图像相同,电荷耦合器件(CCD)将得到一个明亮的相关峰^[9]。若不相同,则不能得到相关峰:

$$S(f_x,f_y)T(f_x,f_y) \propto \beta'S(f_x,f_y)O^*(f_x,f_y)R(f_x,f_y) \propto |O(f_x,f_y)|^2 \exp[j\phi(f_x,f_y)]\exp[-j\phi(f_x,f_y)] \propto |O(f_x,f_y)|^2. \quad (4)$$

(4)式反映了光学相关实质上是在频域对待检信号的相位补偿。当目标发生旋转时,其频谱相位会相应的发生改变,无法与模板图像的频谱相位进行完全补偿。故得不到相关峰。解决光学相关器识别发生角度旋转的目标有两种途径:1)对发生角度旋转的目标进行预处理,将旋转的角度补偿为 0° ;2)对滤波器进行处理,增加滤波器的数量或改进滤波器的相位。后者操作复杂,且发生误识别的概率增加。而前者设计简单,方法可靠,其相应的相关识别原理如下所述,设计原理见2.2节所述。

在获取目标的光学系统中加入一个反射镜组,每一个反射镜与目标的夹角不同,因此可以得到一组角度各不相同的镜像组。反射镜对目标旋转角度起到补偿作用。将得到的镜像组作为目标图像与模板图像进行相关运算,其中与模板图像角度一致的镜像,会产生相关峰,如图1所示。

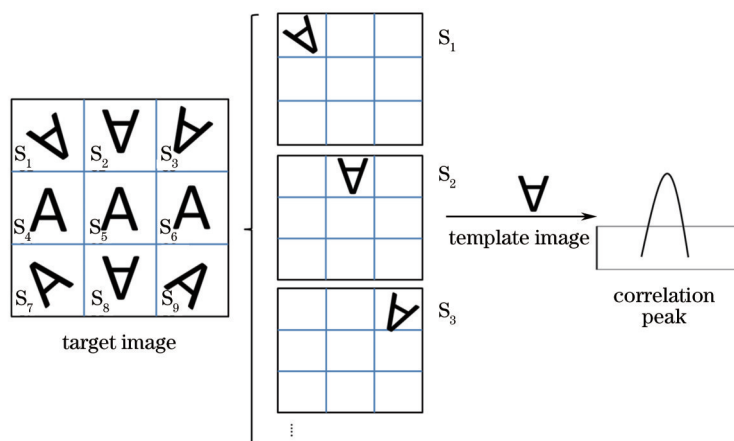


图1 模板图像与目标图像相同信息的光学相关

Fig.1 Recognize with same information of template image and target image

由图1可知,当含有各个方向字母‘A’的目标图像与模板图像‘A’进行相关识别,由于目标图像中的镜像S₂中的‘A’与模板图像‘A’角度相同,所以可以得到一个相关峰。

将目标图像看做是由n个镜像组成的,其中每个镜像作为一个独立的图像信息存在。则目标图像的表示为

$$\begin{aligned}
 S(f_x, f_y) &= \iint s(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \\
 &= \iint [s_1(x, y) + s_2(x, y) + s_3(x, y) + \dots + s_n(x, y)] \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \\
 &= |S_1(f_x, f_y)| \exp[j\phi(f_x, f_y)] + |S_2(f_x, f_y)| \exp[j\phi(f_x, f_y)] + \dots + |S_n(f_x, f_y)| \exp[j\phi(f_x, f_y)]
 \end{aligned} \quad (5)$$

目标图像与模板图像进行相关识别,就可以看做是每个镜像与模板图像进行一次相关运算。可表示为

$$\begin{aligned}
 S(f_x, f_y) T(f_x, f_y) &\propto \beta' S(f_x, f_y) O^*(f_x, f_y) R(f_x, f_y) \propto |S_1(f_x, f_y)| |O(f_x, f_y)| \exp[j\phi(f_x, f_y)] \exp[-j\phi(f_x, f_y)] + \\
 &|S_2(f_x, f_y)| |O(f_x, f_y)| \exp[j\phi(f_x, f_y)] \exp[-j\phi(f_x, f_y)] + \dots + |S_n(f_x, f_y)| |O(f_x, f_y)| \exp[j\phi(f_x, f_y)] \exp[-j\phi(f_x, f_y)] \\
 &\propto |O(f_x, f_y)|^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式说明如果第一项镜像信息与模板信息相同,即为待检信号的自相关运算,将得到一个相关峰。其他项为其他信号与待检信号的互相关,由于二者之间的差异,能量是弥散的。因此根据是否存在相关峰,可以判断出目标是否与模板相同。

2.2 平面反射镜组的设计

为实现光学相关器的旋转不变性,根据光学相关器本身的平移不变性和(6)式所表现的相关性,设计一个由平面反射镜组和透镜组成的获取目标图像的光学系统。

2.2.1 平面反射镜组的原理

根据光的反射定律^[10],平面反射镜可以获得目标的镜像,且平面反射镜相对目标的角度发生改变,可以得到与目标不同夹角的镜像。由此设计出一个可以获得目标多角度镜像的平面反射镜组,其结构如图2所示。

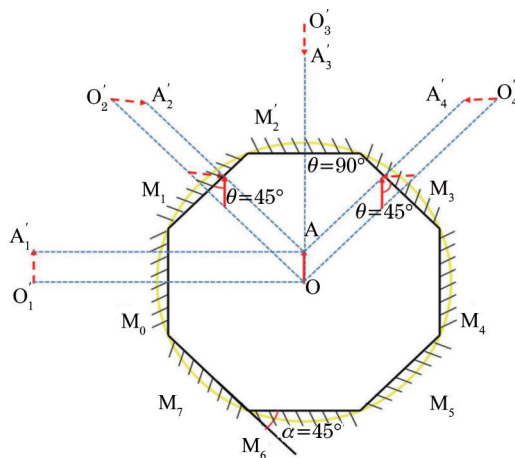


图2 平面反射镜组的结构

Fig.2 Structure of the plane mirror group

由图2可知,将8个反射镜围成一个多棱柱体,设定M₀为基准,顺时针方向旋转为正,镜面间夹角为α=45°,目标旋转角度为β,目标与镜面夹角为θ。得到的规律,如表1所示。

表1 旋转目标与其镜像的夹角

Table 1 Angel of rotating target and mirror image

	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
0°	0°	90°(2α)	180°(4α)	270°(6α)	0°	90°(2α)	180°(4α)	270°(6α)
β	-2β	90°-2β	180°-2β	270°-2β	-2β	90°-2β	180°-2β	270°-2β

通过分析得出,目标发生旋转时产生的镜像与未发生旋转的目标的夹角为2nα-β(n为镜片的位置)。

当 $\beta = 2n\alpha$ 时, $2n\alpha - \beta = 0^\circ$, ($n \in [0, \frac{360^\circ}{\alpha}]$, 且 $n \in Z$)。则可在发生旋转的目标的镜像组中找到与未发生旋转的目标角度一致的镜像。若 $\beta \neq 2n\alpha$, 则得到的镜像与未发生旋转的目标的最小夹角为 $\pm 2n\alpha - \beta$ 。

对字母‘A’进行旋转识别实验, 研究光学相关器允许目标发生旋转的最大角度 β 。实验将字母‘A’旋转 0° 、 3° 、 7° 、 10° (目标图像)分别与 0° 的字母‘A’(模板图像)进行相关识别, 得到相关峰值随目标图像旋转角度增加的变化曲线, 如图3所示。由图3可知, 旋转角度在 $[0^\circ, 7^\circ]$ 范围内变化, 相关峰值下降较为缓慢, 峰值较高; 旋转角度在 $[7^\circ, 10^\circ]$ 范围内变化, 相关峰值急剧下降, 但仍可由 CCD 得到一个突出的相关峰。即光学相关器能够识别旋转角度在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 内的目标。

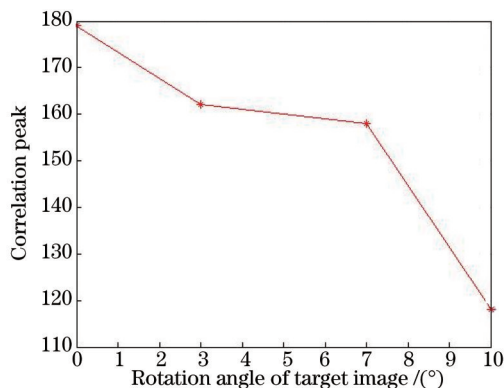


图3 旋转目标相关识别峰值的变化曲线

Fig.3 Curve of correlation peak and rotating target

表2 反射镜数量与镜像和模板图像的夹角的关系

Table 2 Relationship of mirror number and two image angle

Mirror number	Target image and template image angle
10	$[-36^\circ, 36^\circ]$
12	$[-30^\circ, 30^\circ]$
18	$[-20^\circ, 20^\circ]$
36	$[-10^\circ, 10^\circ]$
72	$[-5^\circ, 5^\circ]$

表2反映了反射镜数量与任意旋转角度的目标产生的镜像和模板图像(未发生旋转的目标)的最小夹角的关系。由表2可知, 用少于36片反射镜组成的平面反射镜组获取目标图像, 存在识别盲角。如用18片反射镜组成的平面反射镜组, 对于旋转角度在 $[20n - 10^\circ, 20n + 10^\circ]$ ($n \in [1, 18]$) 内的目标, 无法进行相关识别; 用超过36片反射镜组成的平面反射镜组获取目标图像, 允许目标发生任意角度的旋转。且得到的目标图像与模板图像进行相关识别, 能够得到相关峰。且反射镜的数量越多, 相关识别的精度越高。但在实际的设计中, 并不是反射镜的数量越多越好, 需要结合光学系统的设计。

2.2.2 平面反射镜组的设计

综上所述, 搭建一个由透镜和平面反射镜组组成的获取目标图像的光学系统, 如图4所示。为简单直观, 图4中只画出反射镜组中的上下2个平面镜及其相关的成像关系。CCD在第2个透镜的像面处可以探测到实物OA经 L_1 、 L_2 后所成直立实像 $O''A''$, 同时可以探测到实物OA经 L_1 、反射镜组、 L_2 后所成的倒立实像 $O_1''A_1''$ 、 $O_2''A_2''$ 。

该光学系统由两部分组成, 第一部分是反射镜对实像成镜像; 第二部分是镜像作为虚物通过 L_2 成实像。

1) 物体OA经过透镜 L_1 , 在其像面处成一个倒立的实像 $O'A'$ 。上下反射镜 M_1 、 M_2 分别对 $O'A'$ 成两个镜像 $O_1'A_1'$ 、 $O_2'A_2'$, 如图5(a)所示。

2) 两个镜像 $O_1'A_1'$ 、 $O_2'A_2'$ 分别作为 L_2 的虚物, 通过 L_2 成像 CCD上。虚物 $O_1'A_1'$ 的物象关系如图5(b)所示。

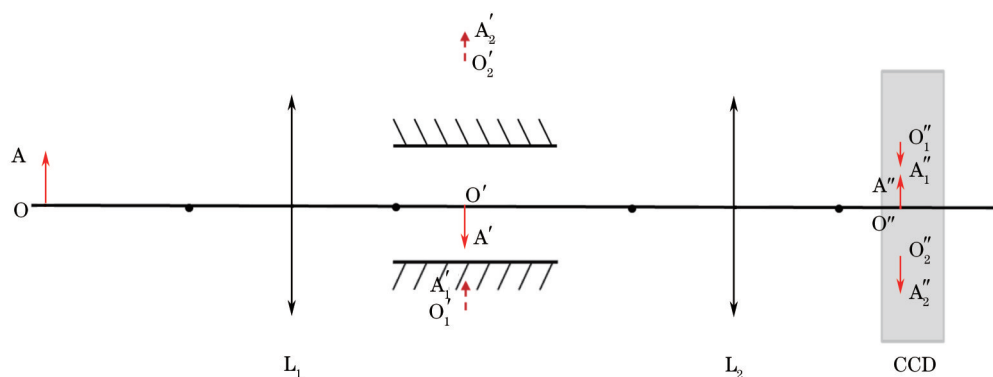


图4 获取目标图像的光学系统结构图

Fig.4 Structure of optical system of acquired target image

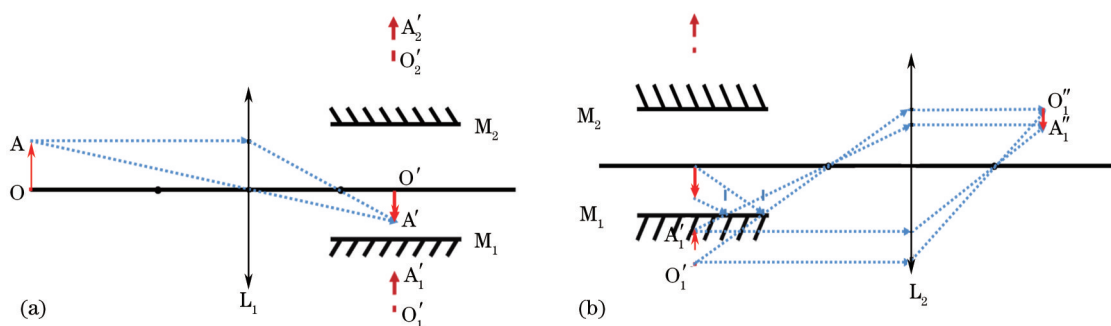


图5 (a) 反射镜对实像成镜像; (b) 镜像作为虚物成实像

Fig.5 (a) Real image into mirror image by mirror; (b) mirror image as virtual object into real image by L_2

在实际的设计中,需将反射镜组合透镜设计成一个完整成像镜头,配合 CCD 获取目标图像。同时需要考虑反射镜组的摆放精度、物像关系、透镜与反射镜组的尺寸等因素,对于获取目标图像质量和光学系统操作性的影响。

1) 反射镜组的摆放精度:反射镜组为一正多棱柱体,它的作用是使发生旋转的目标与模板图像的夹角,减小到可以实现光学相关识别的范围内,从而完成目标与模板的相关识别。所以在设计时只需要保证反射镜组的中线与光轴重合,如图 4、5 所示,而其绕轴转动不会影响相关识别结果。

2) 物像关系:可用变焦镜头替代 L_1 成像,参考高斯公式,调整合适的焦距和设计合理的反射镜尺寸,保证目标经 L_1 、 L_2 可以得到清晰的实像,且实像的全部信息可以完整的影射到反射镜上。

3) 透镜与反射镜组的尺寸:当反射镜数量增加时,会导致反射镜组的直径增大, L_1 、 L_2 的直径也会相应的增大,而光学系统的结构过大会影响其操作性。由表 2 可知,当镜片数量达到 36 片时,基本可以满足光学相关器对于任意旋转角度的目标的相关识别,所以为了尽可能的保证识别效果和操作性,反射镜组的镜片数量选取 36 片为宜。

综上所述,针对平面内发生任意角度旋转的目标,选用由 36 片反射镜组合的正多棱柱体获得的目标图像,光学相关器可以完成目标图像与模板图像的相关识别。若目标发生视角转动,则无法应用该方法进行识别。

2.3 光学相关器的设计

如图 6 所示,该光学相关系统主要由激光器、电寻址空间光调制器(SLM)、存储材料^[11-12][掺铁铌酸锂(Fe:LiNbO₃)晶体]、探测器、傅里叶透镜和用于获取目标的光学系统组成。图 6 中 T 表示目标图像。

该系统分为全息存储和相关识别两部分,其工作流程描述如下:

1) 全息存储:激光器发出的激光,经准直扩束装置后,扩束成平行光束。该光束经过偏振分光棱镜,反射一束振动方向垂直于桌面的参考光光束②和透射一束振动方向平行于桌面的物光光束③。物光光束③透过 SLM,获取模板图像的镜像,然后经过反射镜和半波片,与参考光光束②在晶体处发生干涉,将模板图像的全息图记录在晶体上,作为匹配滤波器。用参考光光束②照射全息图,可通过 CCD1 得到模板图像的再现图像。

2) 相关识别:将通过含有平面反射镜组的光学系统和 CCD3 获得目标图像,经电脑加载到 SLM,光束③透过 SLM 获得目标图像,将其经过傅里叶透镜变换的频谱与存储在晶体中的全息图进行相关运算。最后由 CCD2 获得相关识别的结果。

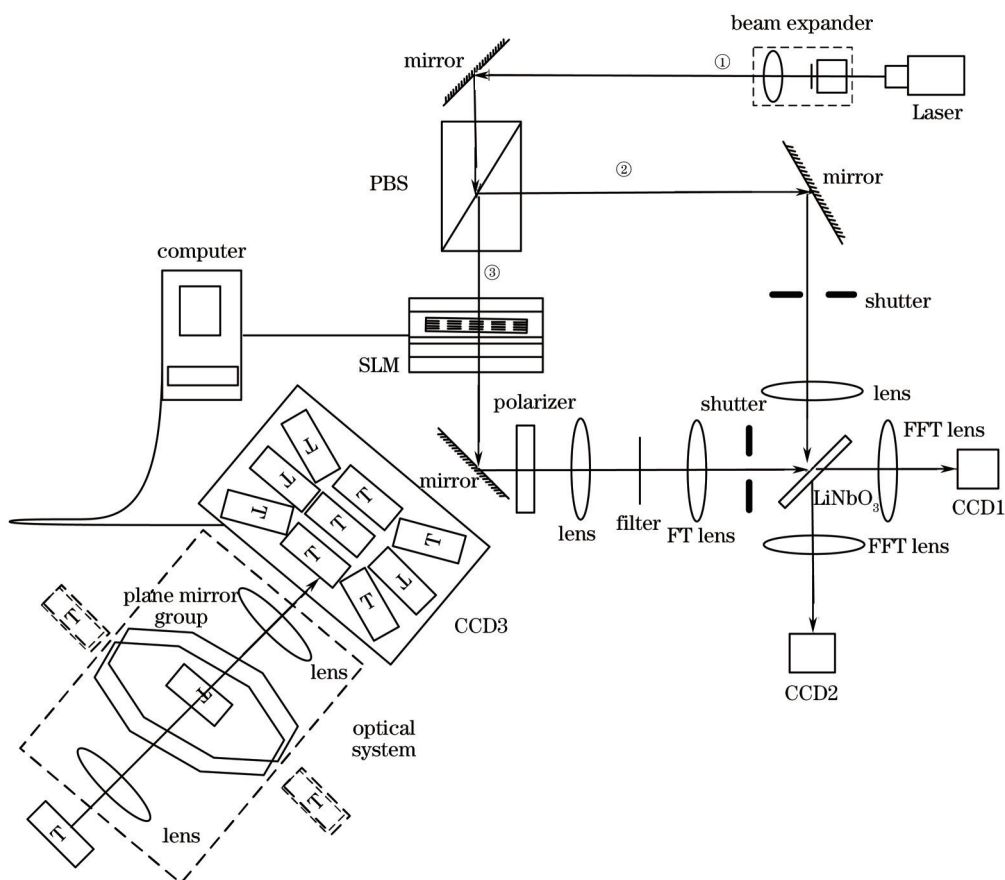


图6 光学相关器系统结构图

Fig.6 Optical correlator system structure

3 实验结果分析

3.1 平面反射镜组结果分析

用 L_1 焦距为 100 mm 的透镜,10 个 $7\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 的反射镜围成一个多棱柱体和单反相机搭建一个获取目标的光学系统。单反相机调至微距拍摄模式,自动调节 L_2 的焦距。实验环境选择暗室,避免其他光线进入反射镜组,影响成像质量。物像关系需满足高斯公式,如图 7 所示。将目标分别旋转 0° 、 30° 、 180° ,用相机分

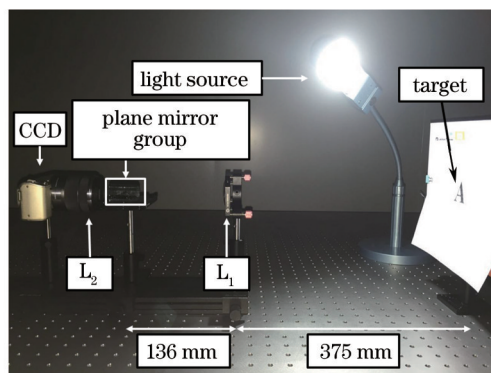


图7 获取目标图像的光学系统

Fig.7 Optical system for acquiring target image

别获得目标图像。获取目标图像的光学系统及 CCD 得到的目标图像,如图 8 所示。

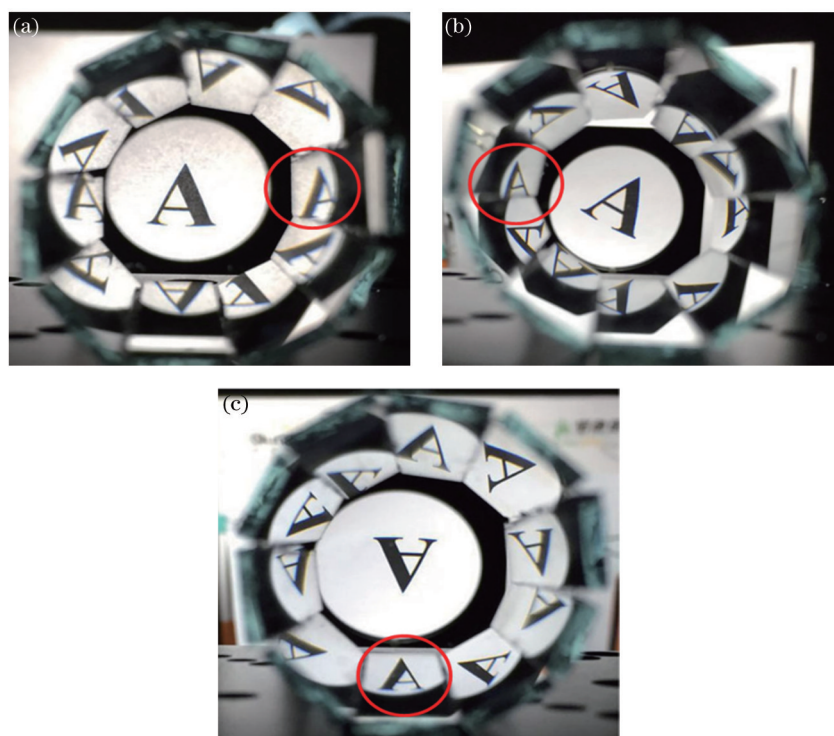


图 8 CCD 得到的目标图像。(a) 目标未旋转; (b) 目标旋转 30°; (c) 目标旋转 180°

Fig.8 Experiment result by CCD. (a) Target is not rotating; (b) target rotation 30°; (c) target rotation 180°

由图 8 可知,从得到的三组目标图像(a)、(b)、(c)中可以找到三个角度相似的镜像。(b)中的镜像相对于(a)、(c)的镜像存在很小的夹角。这反映了反射镜组的镜片间的夹角和物体旋转角度会对得到的镜像产生影响。其规律如 1.2.1 节中表 1 所示。

3.2 相关识别结果分析

选择字母‘A’的镜像作为模板图像,将其全息图记录在 Fe:LiNbO₃ 晶体中,它经过参考光再现的图像如图 9 所示。用模板图像和目标旋转 30°的镜像、目标旋转 180°的镜像作为目标图像,分别与存储在晶体中的全息图进行相关识别,相关识别结果及其相应的数值处理如图 10、11、12 所示。

图 10、11、12 均得到了光学相关结果,即相关峰。图 11、12 得到的相关峰能量低于图 10 的相关峰能量,并且存在很多的噪声。这是因为目标图像中与模板图像角度一致的镜像,与模板图像存在一定的位移,根据光学相关的平移不变性,可以解释图 11、12 得到的相关峰能量低于图 10 的相关峰。噪声是由于获得的目标图像中含有与模板图像角度不一致的其他镜像信息。这些信息与模板图像进行互相关运算,其能量是

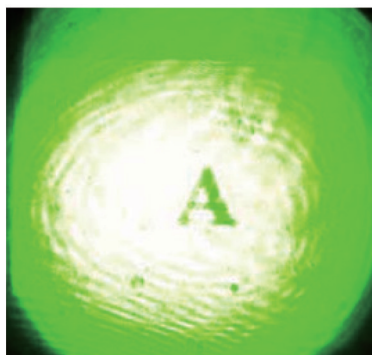


图 9 模板图像

Fig.9 Template image

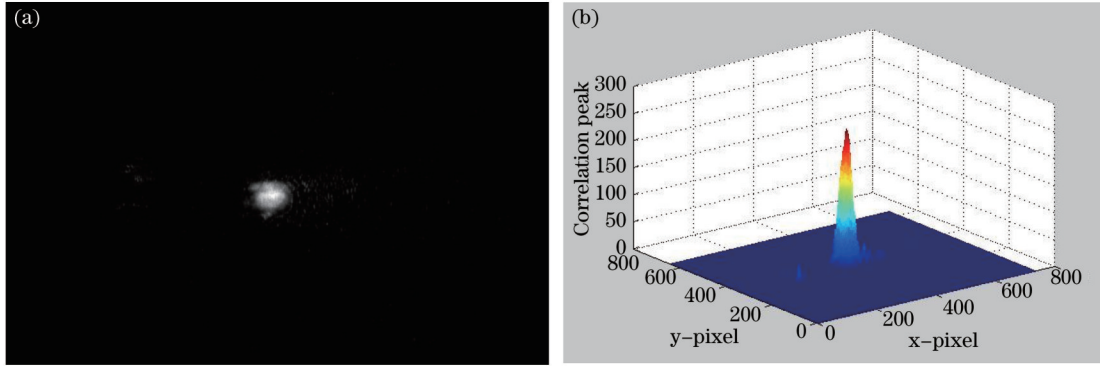


图 10 相关结果。(a) ‘A’与‘A’进行相关; (b) 相关识别的数值处理
Fig.10 Correlation result. (a) ‘A’ and ‘A’ is correlated; (b) corresponding digital process

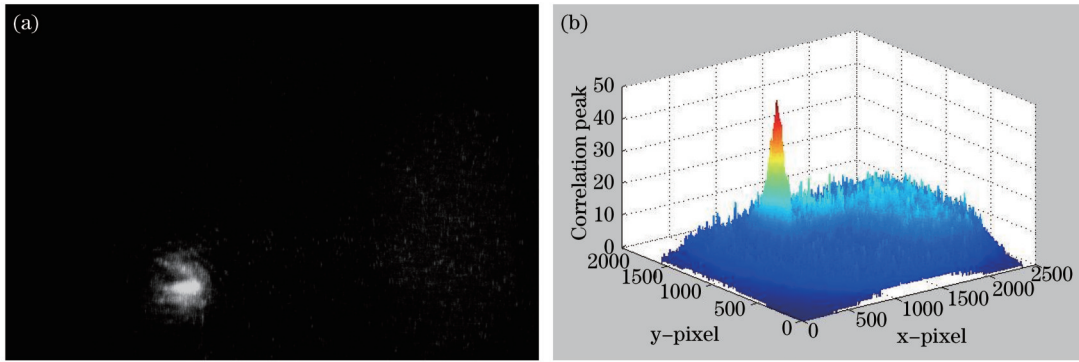


图 11 相关结果。(a) 目标旋转 30°的镜像与‘A’进行相关; (b) 相关识别的数值处理
Fig.11 Correlation result. (a) Mirror image of target rotation 30° and ‘A’ is correlated; (b) corresponding digital process

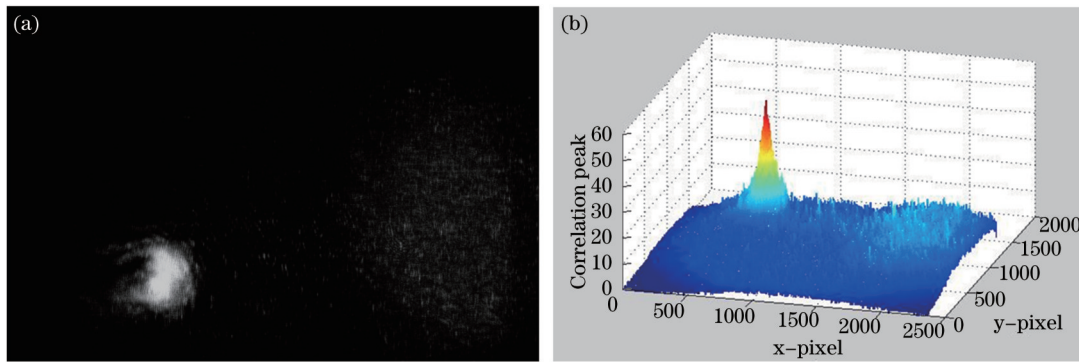


图 12 相关结果。(a) 目标旋转 180°的镜像与‘A’进行相关; (b) 相关识别的数值处理

Fig.12 Correlation result. (a) Mirror image of target rotation 180° and ‘A’ is correlated; (b) corresponding digital process

弥散的,表现为噪声。此类噪声随着目标图像产生,因此它是不可避免的。但是它是弥散能量的表现,峰值不高,不足以产生误判,所以它的存在也不会影响相关识别的判定。由图 11、12 得到的实验结果说明,通过反射镜组获得的目标的镜像可以与模板图像完成光学相关运算,该方法是可行的。

在实际的使用中,光学系统的尺寸会随着设计要求不同,相应的放大或缩小。针对微小型载荷平台,获取目标的光学系统中的反射镜组若仍由 36 片反射镜组成,其尺寸显然不能满足设计要求。为满足设计要求,必须减小反射镜的数量。结果会对某些旋转角度的目标无法识别。如:反射镜数量由 36 片减少到 18 片,其直径会减小一半,但是对于旋转角度在 $[20n - 10^\circ, 20n + 10^\circ]$ ($n \in [1, 18]$) 内的目标,均无法识别,详见表 2。这时可以结合体全息存储^[8,13]的方式,将该区间内的某一个角度的图像与模板图像存储在晶体上的相同位置,制作成不同衍射角的全息图,与目标图像同时进行相关识别。这种做法既可以克服设计要求带来的限制,也可以节省材料容量。

4 结 论

设计了2个原理性验证实验,首先,在获取目标的光学系统中,加入由10个平面反射镜围成的正多棱柱反射镜组,获得目标旋转 0° 、 30° 、 180° 的镜像组作为3个目标图像,并从中找到了3个角度相似的镜像;然后,将3个目标图像分别于模板图像进行相关识别,均得到了相关峰。由此说明平面反射镜组是解决光学相关器识别旋转目标的有效方法。该方法是以硬件的形式对获取目标时进行预处理,不同于以往使用计算机对目标进行处理。省时、操作简便且方法可靠。综合理论分析与实验说明,得出在获取目标的光学系统中加入有36片反射镜围成的正多棱柱反射镜组,能够有效的解决光学相关器的旋转不变性。

光学相关识别的应用前景十分广泛,它具有实时处理^[14-15],信息容量大,抗干扰能力强,结构紧凑等优点,用于制导,可以大大提高导弹攻击的机动性,抗干扰能力和命中率,实现导弹末制导的智能化。该光学相关器有望在导弹末制导^[16-17]、遥感影像匹配^[18]中应用。

参 考 文 献

- 1 Vanderlught A B. Signal detection by complex matched spatial filtering[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1964, 10: 139-145.
- 2 Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1266-1271.
- 3 Zhou Hanying, Hughlett C, Hanan J C, *et al.*. Development of streamlined OT-MACH-based ATR algorithm for grayscale optical correlator[C]. SPIE, 2005: 78-83.
- 4 Zhang Guangjun, Lei Ming, Liu Xulin, *et al.*. Novel template matching method with sub-pixel accuracy based on correlation and Fourier-Mellin transform[J]. Optical Engineering, 2009, 48(5), 057001.
- 5 Li Jiong, Lei Humin, Liu Xingtang. Automated tracking and classification of infrared images[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles & Guidance, 2005, 25(4): 963-965.
李 炯,雷虎民,刘兴堂. 红外目标自动识别分类及跟踪算法[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 963-965.
- 6 Feng Shengtong. Volume Holographic Wavelet Correlator and Rotation-Invariance Research[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005.
冯升同. 体全息子波相关器及其旋转不变性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- 7 Ouyang Chuan, He Qingsheng, Wang Fengtao, *et al.*. High capacity volume holographic correlation system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(9): 1095-1098.
欧阳川,何庆声,王凤涛,等. 大容量体全息相关系统[J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1095-1098.
- 8 曹良才,何庆声,尉昊赟,等. 10 Gb/cm^3 小型化体全息数据存储及相关识别系统[J]. 科学通报, 2004, 49(23): 2495-2500.
- 9 Goodman J W. Introduction to Fourier Optics[M]. Greenwood Village: Roberts and Company Publishers, 2006.
- 10 Wang Wensheng, Liu Dongmei, Xiang Yang, *et al.*. Applied Optics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2010: 9-10.
王文生,刘冬梅,向 阳,等. 应用光学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010: 9-10.
- 11 Shi Hongxin. Double Mixed Hf: Fe: LiNbO₃ Crystal Photorefractive Performance and Its Optical Correlation Recognition Applied Research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
石宏新. 双掺Hf: Fe: LiNbO₃晶体光折变性能及其光学相关识别应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- 12 陆 猗,刘思敏,舒华德,等. LiNbO₃: Fe光折变晶体实时光学相关存贮研究[J]. 物理学报, 1994, 43(11): 1770-1775.
- 13 Yi Yao, Cao Liangcai, Zheng Tianxiang, *et al.*. High-speed and high-accuracy volume holographic optical correlator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209005.
易 瑶,曹良才,郑天祥,等. 高速高精度体全息光学相关器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209005.
- 14 Miller P C, Royce M, Virgo P, *et al.*. Evaluation of an optical correlator automatic target recognition system for acquisition and tracking in densely cluttered natural scenes[J]. Optical Engineering, 1999, 38(11): 1814-1825.
- 15 Hu Maohai. Algorithm of object recognition based on similarity measurement of correlation output[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0409002.
胡茂海. 基于相关输出相似性度量的目标识别算法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0409002.
- 16 张常国. 光学相关识别制导技术[J]. 飞航导弹, 1990, 12: 43-48.

- 17 Wei Jianzhong, Chen Xianbing. Applied optical correlator to the imaging guidance system[J]. Infrared and Laser Engineering, 1995, 24(1): 13-19.
魏建中, 陈先兵. 应用光学相关识别的成像制导系统[J]. 红外与激光工程, 1995, 24(1): 13-19.
- 18 Zhao Tian, He Qingsheng, Cao Liangcai, *et al.*. Remote sensing image scene matching system for fast optoelectronic hybrid[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1659-1663.
赵 瑱, 何庆声, 曹良才, 等. 一种用于遥感图像景象匹配的快速光电混合系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1659-1663.
- 19 Cao Liangcai, Ouyang Chuan, He Qingsheng, *et al.*. Improvement of correlation veracity of the volume holographic correlator based on the speckle modulation[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(2): 244-247.
曹良才, 欧阳川, 何庆声, 等. 散斑调制用于提高体全息相关器的识别率[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 244-247.

栏目编辑: 韩 峰