

文章编号: 0258-7025(2005)02-0244-04

散斑调制用于提高体全息相关器的识别率

曹良才, 欧阳川, 何庆声, 廖 懿, 邬敏贤, 金国藩

(清华大学精密仪器与机械学系精密测量技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 体全息相关器能够进行快速的光学并行相关识别,但是在相关识别的过程中,页间串扰导致相关结果中旁瓣太多,影响了相关峰的判断,大大降低了相关器的识别准确率。为了抑制旁瓣,对传统的体全息相关公式中所产生串扰的因子进行了分析,引入了随机函数的自相关函数作为调制因子对公式进行修正,可以实现在水平方向和竖直方向同时抑制旁瓣,抑制效果与全息图的厚度无关。并提出在相关器的物光光路中物的前方放置随机相位器,实现对物函数的散斑调制。理论分析、数值计算及实验结果表明,该方法可以抑制旁瓣,突出相关峰,提高体全息相关器的识别准确率和通道密度。

关键词 信息光学;全息存储;相关识别;散斑调制;旁瓣抑制

中图分类号 O 438.1 **文献标识码** A

Improvement of Correlation Veracity of the Volume Holographic Correlator Based on the Speckle Modulation

CAO Liang-cai, OUYANG Chuan, HE Qing-sheng,
LIAO Yi, WU Min-xian, JIN Guo-fan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Volume holographic correlator has advantages for the fast optical parallel recognition. However, because of the inter page crosstalk, the sidelobes occur seriously, which reduces the parallel-processing capacity of the correlator, resulting in the low accuracy of the correlator. To suppress the sidelobes, the traditional correlation formula is analyzed to discuss the origin of sidelobes. It is proposed to modify the formula with the autocorrelation function of a random function, which can suppress the sidelobes in the horizontal direction as well as in the vertical direction, with no dependence on the thickness of the hologram. A diffuser is proposed to be placed in the object path to modulate the object beam with speckle. The theoretical analysis, numerical simulation and experimental results are presented and it is shown that this method can suppress the sidelobes, sharpen the correlation peaks and improve the correlation veracity.

Key words information optics; holographic storage; correlation recognition; speckle modulation; sidelobe suppression

1 引 言

体全息相关器基于超高密度体全息存储和光学相关识别系统,具有容量大、通道多、速度快、准确率高等优点,能广泛应用于如人脸识别^[1,2]、指纹识

别^[3]、自动导航^[4]、导弹防卫^[5,6]等各种图像与模式识别领域。

全息相关器关键的性能参数之一是识别率,在库图像存储的过程中,由于在晶体的同一体积内复用了多幅图像,页间串扰对识别率有很大的影响,为

收稿日期:2003-10-10;收到修改稿日期:2003-12-04

基金项目:国家 973 计划(G1999033001)和国家自然科学基金(60277011)资助项目。

作者简介:曹良才(1977—),男,湖北公安人,清华大学精密测量技术与仪器国家重点实验室博士研究生,主要从事体全息光学元器件、超高密度超快速体全息存储系统、光学信息处理方面的研究。E-mail:clc01@mails.tsinghua.edu.cn

为了减小页间串扰,常用的方法是在存储库图像时增大角度复用间隔,但这样导致的结果是大大降低了相关器图像库的容量。

随机相位板在相关识别中的应用已经得到了广泛的研究,在联合变换相关器的研究中,使用随机相位板对物光进行调制可以提高相关器的信噪比^[7]。另外随机相位板本身可以作为存储信息的一部分,进行信息加密,在智能卡的防伪认证方面已获得应用^[8]。本文提出一种散斑调制的方法,将随机相位板放置在空间光调制器(SLM)前一定距离处,由相位板产生的散斑经过空间光调制器对加载的物图像进行调制。

2 原理分析

图1所示为抽象化的体全息相关识别系统:一束平面波经物平面 (x_0, y_0) 加载信息后,经透镜 L_1 作傅里叶变换在透镜的后焦面 (x, y) 上形成了物像的频谱。 (x_m, y_m) 为参考平面,亦即透镜 L_2 的前焦面。点光源在参考平面上作二维扫描,形成不同角度入射的平面参考光。参考光与物像的频谱在体全息存储介质内相互干涉,形成折射率调制光栅。从而实现角度分维多重存储。而当在物平面 (x_0, y_0) 上输入待识图像,衍射场经透镜 L_3 傅里叶变换之后,在输出平面形成相关识别的结果。这个结果反映了待识图像与存储在体全息介质内的所有模板图像的匹配程度,从而完成相关识别过程^[1]。

假设体全息介质中存储了 $2M+1$ 幅模板图像 $f_m(x_0, y_0)$ 的谱面全息图, $m=-M, -(M-1), \dots,$

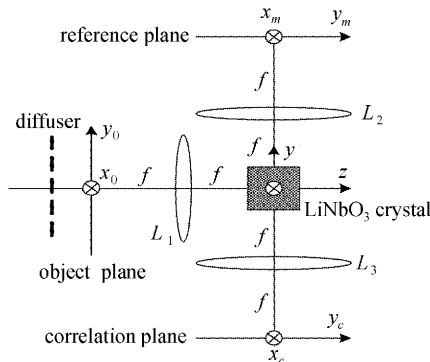


图1 体全息相关识别系统示意图
在物光光路放置一块随机相位板实现散斑调制
 $L_1 \sim L_3$: 透镜; f : 焦距

Fig. 1 Geometry diagram of the volume holographic correlator system

The speckle modulation is implemented by with the diffuser in the object path. $L_1 \sim L_3$: lenses; f : focal length

$0, \dots, (M-1), M$, 根据标量衍射理论、透镜的傅里叶变换公式, Gu 等^[9]给出了体全息相关识别的公式,当采用 90° 记录时,在相关输出平面的空间分布函数为

$$g(x_c, y_c) \propto \sum_{m=-M}^M \int dx_0 dy_0 f(x_0, y_0) f_m^*(x_0 + \xi, y_0 + \eta) \times t \operatorname{sinc} \left\{ \frac{t}{2\pi} \left[k_{mx} - k_{dx} + \frac{\pi}{\lambda} \frac{\xi(2x_0 + \xi) + \eta(2y_0 + \eta)}{f^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

其中 t 为体全息光栅的厚度, $k=2\pi/\lambda$, λ 为真空中的波长, $\xi=(\lambda f/2\pi)(k_{dx}-k_{mx})$, $\eta=(\lambda f/2\pi)(k_{dy}-k_{my})$, k_d 为衍射光波的波矢, k_m 为第 m 个参考光的波矢。

记录库图像时,当在空间光调制器前放置随机相位板对物光进行散斑调制后,用函数 $a(x_0, y_0)$ 代表散斑对物光的调制作用,并将被调制后的物函数记为

$$s(x_0, y_0) = f(x_0, y_0) a(x_0, y_0). \quad (2)$$

如果在识别过程中随机相位板的空间位置没有变化,同时假设散斑场是平稳的正态分布,由散斑场的二级统计性质, $a(x_0, y_0)$ 的自相关函数为 δ 函数,即

$$\langle a(x_0, y_0) a^*(x_0 + \xi, y_0 + \eta) \rangle = \delta(\xi, \eta). \quad (3)$$

将式(2),(3)代入式(1)中,可得散斑调制情况下的相关输出^[10]

$$g(x_c, y_c) \propto \sum_{m=-M}^M \int dx_0 dy_0 f(x_0, y_0) f_m^*(x_0 + \xi, y_0 + \eta) \delta(\xi, \eta) \times t \operatorname{sinc} \left\{ \frac{t}{2\pi} \left[k_{mx} - k_{dx} + \frac{\pi}{\lambda} \frac{\xi(2x_0 + \xi) + \eta(2y_0 + \eta)}{f^2} \right] \right\}. \quad (4)$$

从式(4)可看出,由散斑调制的体全息相关器的相关输出受两个函数的调制:一是 sinc 函数,它代表了体全息介质的厚度对相关峰的调制作用,主要与体全息光栅的厚度 t 有关。当 $t \rightarrow 0$ 时,即平面全息匹配滤波器情况;当 $t \rightarrow \infty$ 时, sinc 函数可近似为 δ 函数,但是 sinc 函数的调制作用是不对称的, x 方向的抑制作用远小于 y 方向的抑制作用,使垂直方向的旁瓣成为串扰噪声的重要来源。二是 δ 函数,它代表了散斑调制的作用,与 sinc 函数不同,它对各个方向的调制作用都是相同的,由于 δ 函数对积分的筛选作用,只有当 $\xi = \eta = 0$ 时,积分才有意义^[11],因此, $g(x_c, y_c)$ 只有在特定的点有相关峰值,而对于其他点,相关输出为零,这样就可以突出相关峰值,

同时散斑的引入只是抑制了旁瓣,不会影响相关峰的峰值大小。

3 数值模拟

对式(1)进行数值计算模拟,将最后的结果和理论分析结果进行比较,可以进一步解释散斑调制的作用。假设系统中只存储了一幅图像($M=0$),在体全息光栅的厚度分别为 $t=0\text{ mm}$, $t=0.5\text{ mm}$ 两种情况下进行数值分析。图2(a)所示为存储的物图像,该图像为二值图像,中间有对称分布的四个小方块,为了和后面的实验条件相对应,式(1)中相应的参数赋值为:透镜焦距 $f=150\text{ mm}$,波长 $\lambda=532\text{ nm}$,空间光调制器的像素数为 640×480 ,像素间距 $42\text{ }\mu\text{m}\times 42\text{ }\mu\text{m}$,用于存储与相关的该幅图像放置在光轴上,即 $x_m=0, y_m=0$ 。

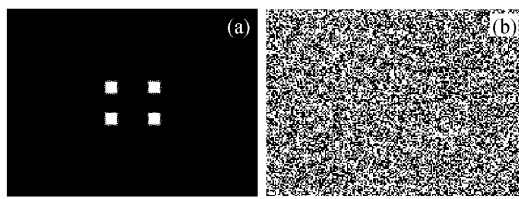


图2 用于数值计算的物函数(a)和散斑场函数(b)
Fig. 2 Object pattern (a) and speckle pattern (b) for the simulation

不加散斑调制时,使用图2(a)作为待识别图像输入,并假设物体的厚度为零,即平面全息,相应的自相关结果如图3(a)所示。可以看到,除了相关峰不尖锐外,在相关峰的周围还有一些较大的旁瓣。如果存储了多幅图像,那么这些图像的旁瓣相互叠加,就有可能在几个较强的相关旁瓣叠加后淹没了真正的相关峰,所以旁瓣是影响平面全息相关器性能的一个主要因素。而如果将平面全息改为体全息,例如取厚度 $t=0.5\text{ mm}$,得到的相关输出如图3(b)所示,平面光栅变成体光栅后,相关输出中 y_c 方向的旁瓣得到了很好的抑制,而 x_c 方向的旁瓣则难以消除,这是因为在式(1)中的sinc函数的自变量 y_c 的幂次为1,属于一阶布拉格失配,而 x_c 的幂次为2,属于二阶布拉格失配。尽管体光栅不能在空间对称地抑制旁瓣,但是进一步的数值计算结果表明,如果厚度增加到足够大, x_c 方向的旁瓣也可以完全抑制,只得到相关峰。但是厚度增加对材料的要求就越高,同时相关峰的峰值大小也相应地减小,不利于相关峰的探测。

当引入散斑调制时,为了计算方便,假设加入的散斑场只有二值的相位变化,相位值分别为0和 π ,散斑场的像素数以及像素尺寸均和物函数相同,如图2(b)所示。如果将散斑场和物函数相乘作为新的物函数代入式(1),在两种厚度下得到的相关识别结果分别如图3(c)和图3(d)所示,可以看到,不管是平面全息还是体全息,引入散斑调制之后,旁瓣基本消失,相关峰明显突出,并且只有在相关峰位置有值。由于计算中所取的散斑场函数是一个有限尺寸的函数,其自相关函数是近似的 δ 函数,所以在数值结果中还有一些旁瓣的噪声,但是这些噪声和图3(a),(b)相比,完全可以忽略不计。可以预见,如果散斑场是一个完全理想的各态历经的散斑场,那么相关输出就只会在相关峰处有值,其他位置的相关值为零,这和理论分析结果完全吻合。

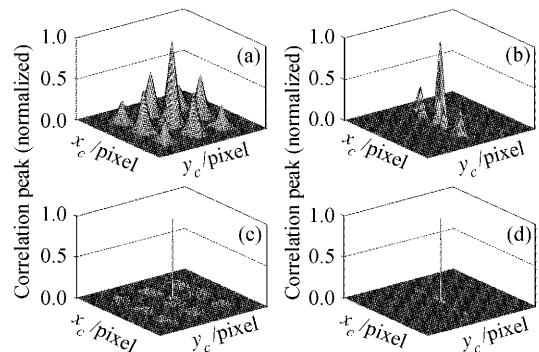


图3 不同情况下的相关输出
(a) $t=0\text{ mm}$, 无散斑调制; (b) $t=0.5\text{ mm}$, 无散斑调制;
(c) $t=0\text{ mm}$, 有散斑调制; (d) $t=0.5\text{ mm}$, 有散斑调制
Fig. 3 Correlation pattern calculated when
(a) $t=0$, without speckle modulation;
(b) $t=0.5\text{ mm}$, without speckle modulation;
(c) $t=0$, with speckle modulation;
(d) $t=0.5\text{ mm}$, with speckle modulation

4 实验及结果

实验采用和图1结构相同的体全息存储系统,物图像由空间光调制器加载,空间光调制器像素数及像素大小和数值模拟的参数相同。本实验采用的体全息记录介质为片状 $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 晶体,厚度为 2 mm ,相关输出图样由CCD采集。采用的随机相位板为透射型全息随机相位板,发散角为 5° ,在 532 nm 的透射率达到 92% ,其平均的颗粒尺寸大约为空间光调制器像素尺寸的 $1/10$,可以确保散斑颗粒大小比空间光调制器像素尺寸小,同时具有较高的光强透过率,不影响库图像的全息记录过程。

图 4(a)为未加随机相位板的相关结果,可以看到水平方向的旁瓣在 $t = 2 \text{ mm}$ 的晶体中得到了完全抑制,但是垂直方向还存在明显的相关旁瓣。当紧贴着空间光调制器放置随机相位板后,存储图像再进行自相关读出,发现相关旁瓣得到了很好的抑制,如图 4(b)所示。该实验结果很好地验证了理论分析与数值仿真的结果。

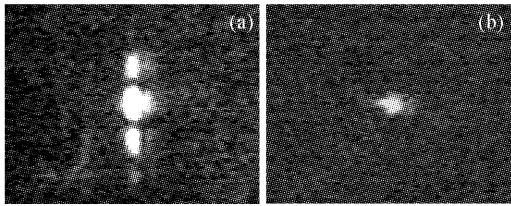


图 4 使用体全息相关器对图 2(a)的自相关图样

(a) 无散斑调制; (b) 有散斑调制

Fig. 4 Autocorrelation pattern of Fig. 2 produced by the correlator

(a) without speckle modulation; (b) with speckle modulation

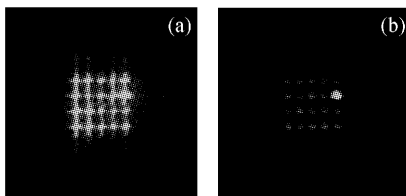


图 5 第 10 幅图的相关输出实验结果

(a) 无散斑调制; (b) 有散斑调制

Fig. 5 Experimental results of the correlation pattern of the input 10 page

(a) without modulation; (b) with modulation

因为串扰的影响在多幅图像相关中更加明显,所以在进一步的实验中存储了 20 幅二值随机图像库,分析散斑调制对相关串扰的影响。如果使用第 10 幅图作为相关识别的输入图像,无散斑调制和有散斑调制的相关输出分别如图 5(a), (b) 所示。可以看到,在图 5(a)中很难根据输出点判断哪个点为相关点,因为较强的相关旁瓣叠加起来超过了相关主瓣的强度;但是在图 5(b)中使用了散斑调制之后,相关平面上只有一个尖锐的主峰,很容易就判断出相关点是第 10 幅图像。

5 结 论

采用散斑调制的方法用于抑制全息相关器的旁瓣,可以明显地抑制旁瓣,突出相关峰。虽然增加体全息的厚度可以抑制旁瓣,但是它不具有空间对称性,而采用散斑调制可以完全弥补厚度调制带来的不足,降低了对体全息相关器存储介质的厚度要求,可以大大提高全息相关器的识别率和图像库的容量。根据理论分析初步推断,随机调制方法还可以用于平面全息相关器或其他光学相关器中对非相位型图像的相关识别。

参 考 文 献

- Ouyang Chuan, He Qingsheng, Wang Fengtao *et al.*. Volume holographic correlation system with large capacity [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
- Liu Haisong, Wu Minxian, Song Xiuyu *et al.*. An "electronic guard" system based on the volume holographic storage technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8):729~732
刘海松,邹敏贤,宋修宇等. 基于体全息存储技术的"电子门卫"系统[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8):729~732
- Feng Wenyi, Huang Gaogui, Yan Yingbai *et al.*. Multichannel wavelet correlators for fingerprint identification by the use of volume holographic storage [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3):370~375
冯文毅,黄高贵,严瑛白等. 多通道体全息子波相关器及其在指纹识别中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3):370~375
- D. Psaltis, F. Mok. Holographic memories [J]. *Scientific American*, 1995, **273**:70~76
- Tien-Hsin Chao, Hanying Zhou, G. Reyes. 512×512 high-speed grayscale optical correlator [C]. *SPIE*, 2000, **4043**:40~45
- Tien-Hsin Chao, Hanying Zhou, G. Reyes. Compact 512×512 grayscale optical correlator [C]. *SPIE*, 2002, **4734**:9~12
- V. M. Fitio, L. I. Muravsky, A. I. Stefansky. Using of random phase masks for image recognition in optical correlators [C]. *SPIE*, 1995, **2647**:224~234
- B. Javidi, J. L. Horner. Optical pattern recognition for validation and security verification [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(6):1752~1756
- C. Gu, H. Fu, J.-R. Lien. Correlation patterns and cross-talk noise in volume holographic optical correlators [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5):861~868
- J. Goodman. *Laser Speckle and Related Phenomena* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1975. 9~76
- Chuan Ouyang, Liangcai Cao, Qingsheng He *et al.*. Sidelobe suppression in volume holographic optical correlators by use of speckle modulation [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20):1972~1974