

高速高精度体全息光学相关器

易 瑶 曹良才 郑天祥 赵 瑛 何庆声 金国藩

(清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 体全息光学相关器基于体光栅的布拉格选择性, 在记录介质的共同体积中利用角度复用存储多幅图像。相关计算时, 输入一幅图像可以并行输出所有的相关点, 每个相关点的强度代表输入图像与对应库图像之间的内积值。分析了提高体全息光学相关器运算精度和速度的关键技术。总结了近年来采用散斑调制技术降低相关通道串扰, 采用二维随机交错方法消除图案依赖行为, 采用多样本并行估计方法提高并行运算精度, 采用读写分离结构实现系统小型化集成等体全息光学相关器技术方面的研究进展。目前体全息光学相关器已经实现超过 7500 通道的并行运算能力, 运算速度达到 138 GHz。系统在遥感图像匹配、指纹识别等领域的成功应用证明了其高速高精度运算能力。

关键词 全息; 体全息光学相关器; 光计算; 相关识别; 并行运算; 角度复用

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209005

High-Speed and High-Accuracy Volume Holographic Optical Correlator

Yi Yao Cao Liangcai Zheng Tianxiang Zhao Tian He Qingsheng Jin Guofan

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

Abstract The volume holographic correlator (VHC) can store multiple images in the common volume of the storage medium by angular multiplexing based on the Bragg selectivity of volume gratings. During the correlation, all the correlation results between the stored images and the input search argument can be simultaneously got. Each correlation result is represented by the intensity of the corresponding correlation spot. The key technologies and constraint factors of the practical utilization of the VHC are analyzed. The research progresses in suppressing the channel crosstalk by speckle modulation, eliminating the impact of pattern dependent behavior, improving the processing accuracy by multi-sample parallel estimation, and system integration of the read-only VHC are summarized. Parallel processing ability with more than 7500 channels and processing speed up to 138 GHz are achieved in the current portable VHC system. The successful applications in remote sensing image matching and biometric recognition have proved the high speed high accuracy abilities of the system.

Key words holography; volume holographic optical correlator; optics in computing; correlation pattern recognition; parallel processing; angular multiplexing

OCIS codes 070.4550; 100.1160; 100.4550; 200.4960

1 引 言

1964 年, Vander Lugt^[1] 基于透镜的二维傅里叶变换性质, 提出了利用光学全息法制作复空间滤波器的技术, 由此引发了对基于空间匹配滤波原理的光学

相关技术的广泛研究, 并在实时目标识别^[2-3]、自动导航^[4]、生物医学数据提取^[5] 等许多领域内得到了应

收稿日期: 2013-10-10; **收到修改稿日期**: 2013-11-20

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724007)、国家自然科学基金(61177001, 61275013, 60677037)

作者简介: 易 瑶(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事体全息光学相关器、光学指纹识别等方面的研究。

E-mail: yiy07@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 金国藩(1929—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事光存储、光学信息处理、二元光学等方面的研究。E-mail: jgf-dpi@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

用。Vander Lugt 相关器(VLC)利用一幅模板平面全息图进行空间滤波,可以实现输入图像与一幅模板图像之间的快速相关运算,其本质是单通道的光学相关器,一次只能完成两幅图像之间的相关运算,其并行性仅体现在数据页内运算的并行(通道内并行)。

体全息光学相关器(VHC)是一种基于高密度、大容量全息存储的光学相关技术,其完成光学相关的本质结构仍然是基于频域匹配滤波器的 VLC^[6]。但和 VLC 使用薄记录材料不同,体全息光学相关器的存储材料是三维体式材料,模板图像的信息以三维体光栅的形式存储于材料中^[7]。由于体光栅的布拉格选择性,记录在介质共同体积中的多幅全息图可以同时作为空间匹配滤波器,实现频域多重滤波。输入图像可以同时与所有存储的模板体全息图进行相关运算,每幅全息图代表一个相关运算通道。同时,由于体光栅厚度对相关分布的强烈抑制,每一个通道输出的相关分布在输出平面上占据的空间较小。输出的相关点中心反映的是图像之间的内积值。因此 VHC 可以抽象为一个多通道并行内积运算器,它不仅具备平面光学相关器的高速并行优势,还同时具备大容量的模板存储能力,相比传统的 VLC 等平面光学相关器具有更高的并行性和运算速度。

体全息光学相关器多通道高速并行运算的特点引起了人们的广泛重视,并得到多方面的研究。Holoplex 公司实现了一种高速“全息指纹识别系统”^[8],其样机可以存储 1000 幅指纹样本图像,在 1 s 内完成输入指纹与所有样本指纹的快速准确比较。加州理工学院研制了基于体全息相关器的车辆实时导航系统^[9]。斯坦福大学、IBM、印度理工学院等多家研究机构对体全息光学相关器的内容寻址功能进行了深入研究^[10]。

光电器件的发展和上述工作的研究极大地提高了 VHC 的性能,然而 VHC 的发展依然受到以下因素的制约:1) VHC 的高速运算性能受限于模板库图像的存储容量及运算通道之间的串扰,且受匹配图案模式的影响;2) VHC 的高精度通道运算性能受限于传统的“击中-击不中”方法,不能充分挖掘利用其高并行能力,在大幅面图像稀疏采样分割情况下无法实现高精度匹配;3) VHC 包含众多元器件,

系统便携性差,难以搭载至移动平台及获取实时数据的应用现场完成实时相关。上述关键技术瓶颈限制了国内体全息光学相关技术的发展。本文主要介绍上述关键技术的研究进展,并围绕 VHC 在景象匹配、生物特征识别、正交变换等系统中的应用,介绍了相应的处理技术。

2 体全息相关器输出的理论模型

图 1 所示为抽象化的体全息相关识别系统,图中 $L_1 \sim L_3$ 为透镜, f 为焦距。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点 (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 的前焦点。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相似程度,从而完成相关识别过程。

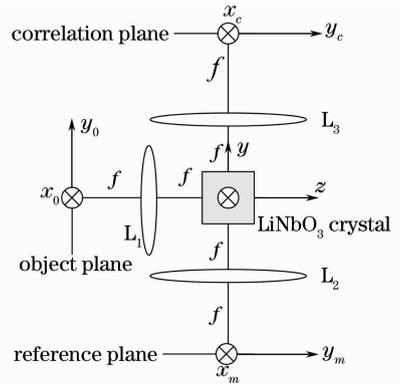


图 1 体全息相关识别系统原理示意图

Fig. 1 Geometry diagram of the volume holographic correlator system

假设全息存储介质 LiNbO_3 晶体中利用角度复用存储了 $2M+1$ 幅模板图像 $f_m(x_0, y_0)$ 的谱面全息图,其中 $m = -M, -M+1, \dots, M-1, M$, 根据标量衍射理论和透镜的傅里叶变换公式,Gu 等^[11]给出了体全息相关识别的公式。当采用典型的 90° 结构时,复振幅在相关输出平面的空间分布为

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

式中 t 为体光栅的厚度, λ 为真空中的波长, k_m 和 k_d 分别为第 m 个参考光以及衍射光波的波矢, $\xi = [\lambda f / (2\pi)](k_{dx} - k_{mx})$, $\eta = [\lambda f / (2\pi)](k_{dy} - k_{my})$ 。通过该模型可见 VHC 在 (x_c, y_c) 平面上输出的相关分布受两部分影响: 首先是物面上输入的实时图像 $f(x_0, y_0)$ 和 LiNbO_3 晶体中存储的模板图像 $f_m(x_0, y_0)$ 的互相关, 且每个互相关分布在输出平面上的位置和互相关中两图像的相对位移 (ξ, η) 存在一定的非线性对应关系。其次是 sinc 函数的调制使相关输出仅在相关中心点反映准确的内积值, 且压缩了相关分布。体光栅的厚度 t 越大, sinc 函数的主瓣宽度就越小, 压缩作用越强。

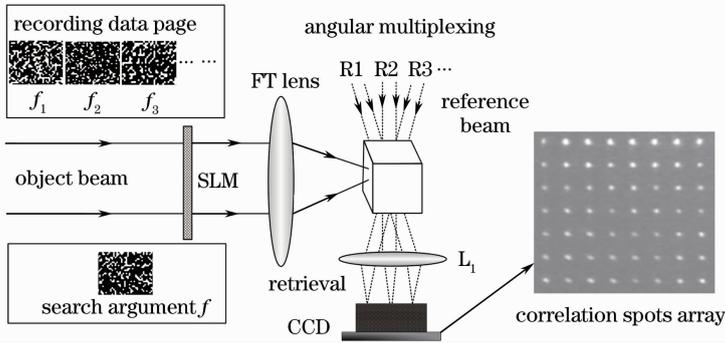


图 2 VHC 相关检索原理图

Fig. 2 Recording and retrieval processes in a VHC

3 提高 VHC 技术性能的方法

3.1 散斑调制降低多通道串扰

从(1)式可以看到, 由于在体全息材料的同一体积中存储了多幅库图像, 读出时除了得到自相关的相关峰, 还会得到输入图像与其他所有库图像的互相关。互相关构成了通道间的串扰, 从而影响了单通道内积值的准确提取。尽管相关公式中的 sinc 函数压缩了相关分布, 但依然会带来旁瓣串扰噪声。传统方法一般通过增加通道间隔(即复用角度间隔)

根据体全息相关器的功能特点, 可以将其抽象为一个多通道并行内积运算器: 每幅库图像都对应着一个独立的内积运算通道(相关通道), 输入实时图像与各通道内的库图像并行完成内积运算, 并行输出所有运算结果。图 2 所示为 VHC 系统检索原理图, 其中 SLM 为空间光调制器, FT lens 为傅里叶变换透镜, 在 SLM 上输入待识别图像(检索图像) $f(x_0, y_0)$ 后, 可以在透镜 L_1 的后焦面上得到 $2M+1$ 个对应的相关识别结果。由于 CCD 的平方率探测关系, 每个相关点的中心点强度均正比于检索图像与库图像的内积值的平方, 且所有的相关点强度可以通过一次输入并行得出。

来降低串扰, 但同时会降低相关器图像库的容量, 导致系统并行度和运算速度的降低。

提出利用散斑随机相位调制进行旁瓣抑制的方法, 对传统的体全息相关引入调制因子, 能够有效抑制旁瓣, 锐化相关峰^[12-13]。在 SLM 前放置随机相位板对物光进行散斑调制后, 由散斑场的二级统计性质, 其自相关函数为 δ 函数, 相关输出平面的复振幅分布变为

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

式中 δ 函数的引入代表了散斑调制的作用。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, 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。

图 3 所示为引入散斑调制前后相关点阵的串扰对比, 可以看到引入散斑调制之后, 相关点旁瓣尤其是纵向旁瓣得到极大压缩, 相关峰明显突出, 并且只有在相关峰位置有值。通道串扰的降低对提高通道

运算精度、增加并行通道数量都有着重要作用。采用散斑调制后,进一步改进通道记录曝光时序,现有系统可以实现横向和纵向二维高密度角度复用,存储容量达到 7500 通道。在 SLM 幅面为 $640 \text{ pixel} \times$

480 pixel 、8 灰阶、60 frame/s 的刷新速度下,系统计算速度达到 138 GHz,且随着幅面像素的增加能够得到进一步提升。

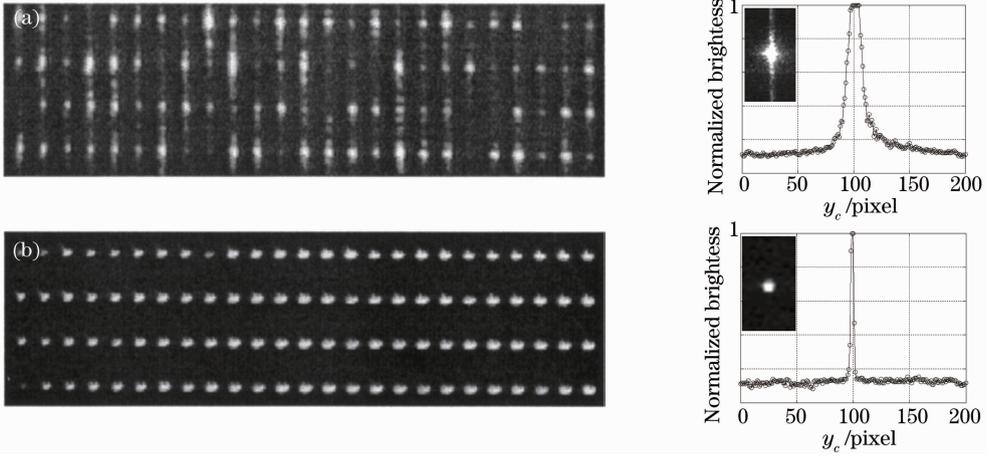


图 3 引入散斑调制(a)前(b)后相关点阵串扰对比

Fig. 3 Comparison of correlation spots (a) before and (b) after speckle modulation

3.2 二维随机交错消除图案依赖行为

对待识别图像和库图像的高精度光学内积运算是体全息光学相关器的核心技术,也是 VHC 应用于高精度相关识别的基础。理论上只有相关分布中心点的复振幅平方值严格等于所求的理论内积值,但在实际操作中(CCD 或其他探测元器件)无法单

独测量这一“数学点”的亮度,需要用相关分布中心区域的积分值去近似内积值。这个积分近似操作使相关器计算的内积值不仅取决于理论内积值,还依赖于它们的具体图案引起的不同相关分布,因此内积值相同的图像光学相关结果可能不同,称为“图案依赖行为”^[14-15],如图 4(a)所示。

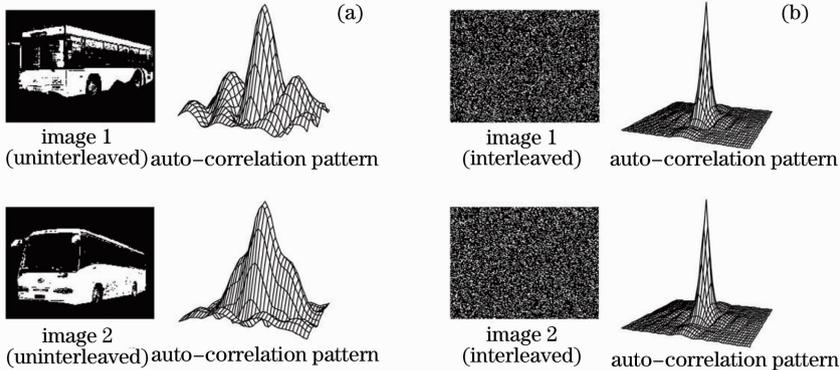


图 4 (a) 原始图像,自相关分布不同; (b) 交错后的图像,自相关分布相似

Fig. 4 (a) For uninterleaved images, different correlation patterns; (b) interleaved images, similar correlation patterns

采用二维随机交错方法,对输入图像的像素灰度分布进行编码重排,消除其空间稀疏有序性,映射到高频无序空间图像空间。如图 4(b)所示,通过二维随机交错后,理论内积值相等的任意两幅图像,其相关分布也近似相同,可以大大减小 CCD 像素化积分探测带来的误差,消除图案依赖行为。由于所有的图像都采用相同的编码重排规则,二维随机交错并不会改变图像之间的内积值。图 5 所示为对一组 10 通道相关器进行测试的结果,可以看到经过二维

随机交错后,理论内积值相等的 8 个通道,其光学相关值与理论值更加吻合。

3.3 多样本并行估计提高 VHC 多通道运算精度

尽管体全息光学相关器可以同时输出多个相关结果,但传统相关器模板图像之间相互独立,光学识别过程中,通常采用寻找最亮点的方法,对给定的实时图像做出二元判断,又被称为“击中-击不中”方法。这种算法本质上只有一个通道工作,属于单样本工作模式。在大幅面图像匹配和配准中,由于体

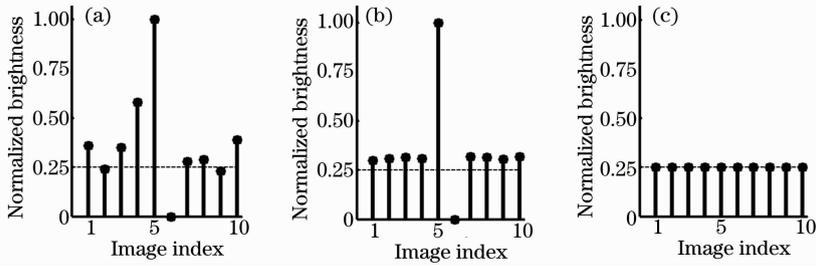


图 5 归一化的相关点强度值。(a)未交错;(b)交错;(c)理论值

Fig. 5 Normalized intensity of correlation spots. (a) Uninterleaved; (b) interleaved; (c) theoretical

全息材料中可以存储的模板库图像数量有限,需对图像进行稀疏采样分割,当分割距离较大时,单点二元判断的运算模式只能判断输入图像是不是模板图,对于旋转、平移以及落在模板图之间的情况无法进行高精度测量。

大幅面图像分割成模板图时,模板图像之间具有关联特性,最亮相关点及其邻域相关点构成的点阵,符合图像自相关函数分布(图 6),可以反演出任意输入图像与模板图像间的相对位置,不再局限于模板图像。利用遥感图像进行景象匹配时,根据遥感图像平稳随机过程的性质,相关点亮度与实时图

和模板图相对位移量之间的关系可以表述为

$$f(\Delta x, \Delta y) = R^2(\Delta x, \Delta y) =$$

$$[a \cdot \exp(-\alpha|\Delta x| - \beta|\Delta y|) + b]^2, \quad (3)$$

基于上述发现提出多样本并行估计方法,通过综合取样相关点阵的亮度值,可以精确判断实时图的位置^[16]。相关长度、分割间隔和样本数是使用多样本并行估计方法进行体全息数字景象匹配的重要指标,合理地选取这三个指标将有利于提高匹配精度。通过建立三者之间的最优稀疏采样分割规则^[17],可以有效抑制随机误差,提高系统的匹配精度。

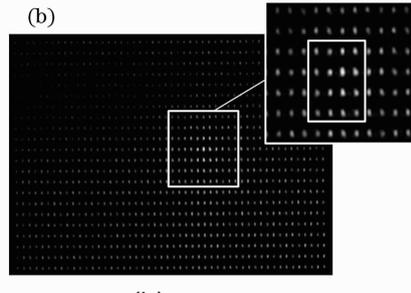
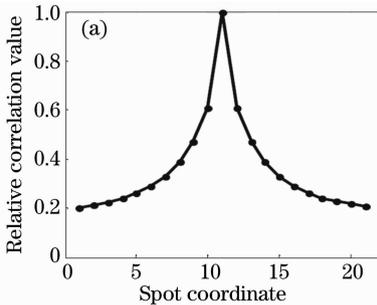


图 6 (a)遥感图像典型的相关曲线;(b)相关结果中的 4×4 相关点阵

Fig. 6 (a) Typical correlation curve of remote sensing image; (b) 4×4 spots array around the brightest correlation spot

3.4 只读全固态体全息光学相关器

由于包含角度复用机构等众多元器件,导致体全息光学相关器系统过于笨拙、所占体积大、便携性差,极大地限制了其应用。若相关器的高速运算功能无法和实时数据在时空上紧密结合,仅用于离线运算,其实时海量运算的优势将大打折扣。同时,平移台等移动部件的存在也限制了相关器在航空等高速运动平台的应用。缩小体全息光学相关器体积、提高便携性,是体全息光学相关器搭载至移动平台完成实时相关的关键技术。

体全息相关器相比于存储器具有不同的工作模式。相关器制备过程中需要复杂的参考光复用机构,一般离线完成,但是在相关识别过程中仅需要通

过 SLM 改变物光输入图像,可以由简单的光路完成,不需要参考光。如图 7(a)所示,基于对相关器工作模式和读写光场不一致性的分析^[18],提出了相关器制备和识别分离、无移动部件的只读体全息光学相关器方案,将相关识别核心组件单独封装,并对激光器、SLM、CCD 等关键器件进行一体化设计,以实现相关器的全固态和小型化^[19]。

图 7(b)为封装后的只读相关器实物图,系统尺寸为 20 cm×16 cm×11 cm,无移动部件,可以在移动平台工作。由于设计时充分考虑了系统性能,尽管相关器尺寸只有以前系统的 15%,系统依然具有 6384(76×84)通道运算能力^[20]。图 8 为系统输出 6000 通道结果。

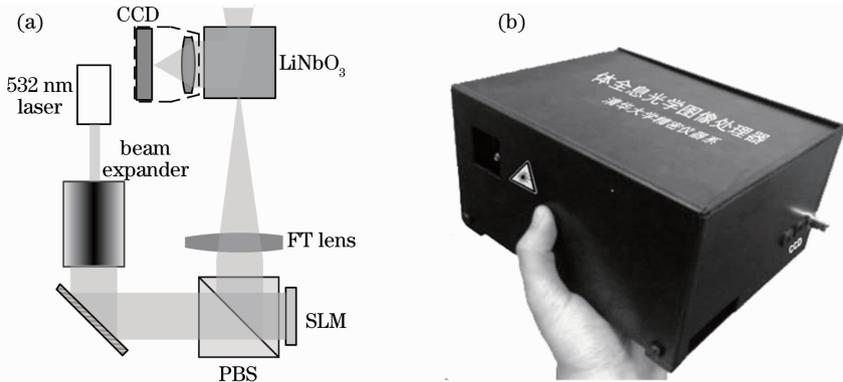


图 7 (a)只读体全息光学相关器原理图,库图像复用存储离线完成;(b)封装后的小型化只读相关器
Fig. 7 (a) Configuration of the proposed read-only correlator, the database images are stored off-line;
(b) encapsulated correlator

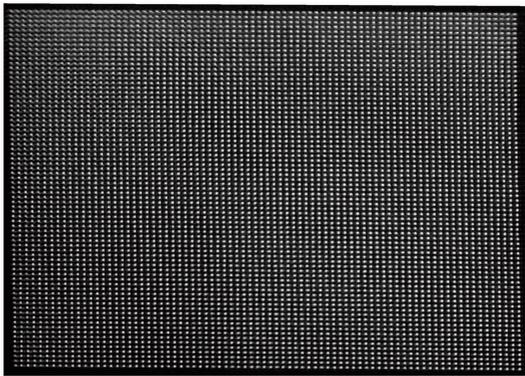


图 8 体全息光学相关器 6000 通道输出结果
Fig. 8 Output 6000 channels of the volume holographic correlator

4 体全息光学相关器应用研究

体全息光学相关器的高速高精度图像运算能力,使其在实时遥感图像匹配、生物特征识别等广泛领域具有很大的应用价值。

利用体全息相关器可以并行完成输入图像与多幅存储图像的内积运算,从而实现图像的二维离散 Walsh、二维离散余弦变换等正交变换^[21-22]。正交变换实质上是输入函数与一系列正交基函数内积运算的集合,通过将输入函数和基函数编码成输入图像和存储图像,使得体全息相关器能够并行完成输入函数和一系列基函数的内积运算,进而实现对输入函数做正交变换。图 9 所示为变换基图像和一幅唐老鸭图像的 Walsh 变换结果。

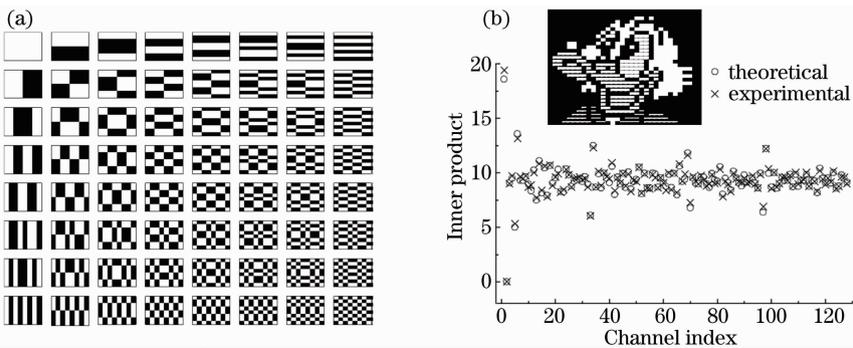


图 9 (a)二维 Walsh 变换的一组基图像;(b)输入图像及正交变换结果

Fig. 9 (a) Basis images obtained by encoding Walsh functions; (b) input image and its transform results

利用遥感图像的平稳随机性质,可以建立遥感图像平移、旋转和缩放的理论模型,从而将体全息光学相关器应用于遥感图像的平移、旋转和缩放测量。利用多样本并行估计方法,可以实现图像平移的亚像素级测量^[16]。通过扫描改变输入图像的旋转角度和缩放尺度,拟合每次输入过程中最亮相关点的

相关值,可以精确测量出 $-179^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 任意角度旋转、缩放尺度为 $0.8\sim 1.2$ 的遥感图像畸变测量,角度测量误差小于 $\pm 0.05^{\circ}$ 。为了充分利用系统的动态范围,还采用了图像黑白反转技术,使相关曲线的主要区域落在 CCD 的线性探测区^[23-27]。图 10 所示为输入图像与其 360 幅旋转图相关结果。

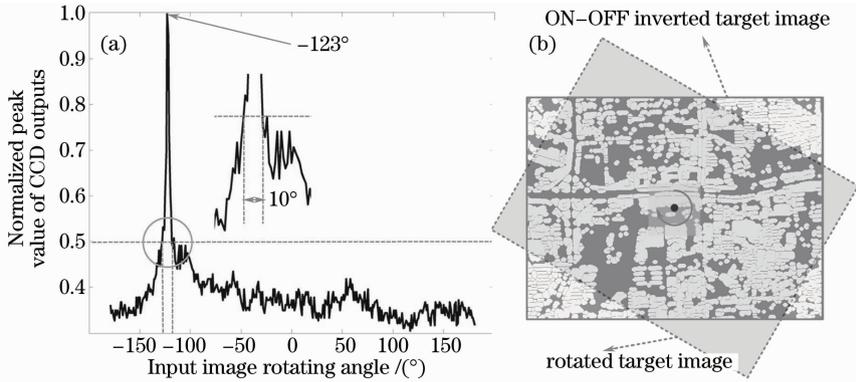


图 10 (a)输入图像与其旋转图相关结果;(b)黑白反转图像角度扫描示意图

Fig. 10 (a) Correlation results for an input image with its 360 rotated copies; (b) schematic for the angle scanning of the ON-OFF pixel inverted target image

将指纹图像局部细节节点结构特征编码成光学数据页,利用体全息光学相关器的高速并行运算能力,可进行指纹识别^[27]。相比于直接采用图像进行相关识别,这种特征结构编码识别方法具有抗平移和旋转、对非线性形变不敏感的优势,无需进行图像配准。对于编码过程中每个数据页填充率差异很大所导致的衍射效率不均匀、相关值不能准确反映数据页相似性等问题,通过综合采用改进的存储时序和归一化方法以及相似性计算公式进行克服。图 11 为一对存在严重形变的指纹细节节点光学匹配结果,图 12 所示为 15 个样本图像与图像库中所有图像的

光学匹配识别结果,可以看出该识别方法对指纹图像的畸变具有很好的稳健性。

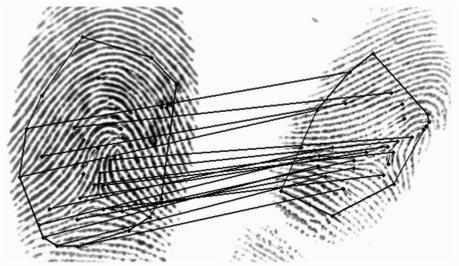


图 11 存在严重变形的一对指纹光学匹配结果
Fig. 11 Optically matched minutiae pairs between two fingerprints with large deformation

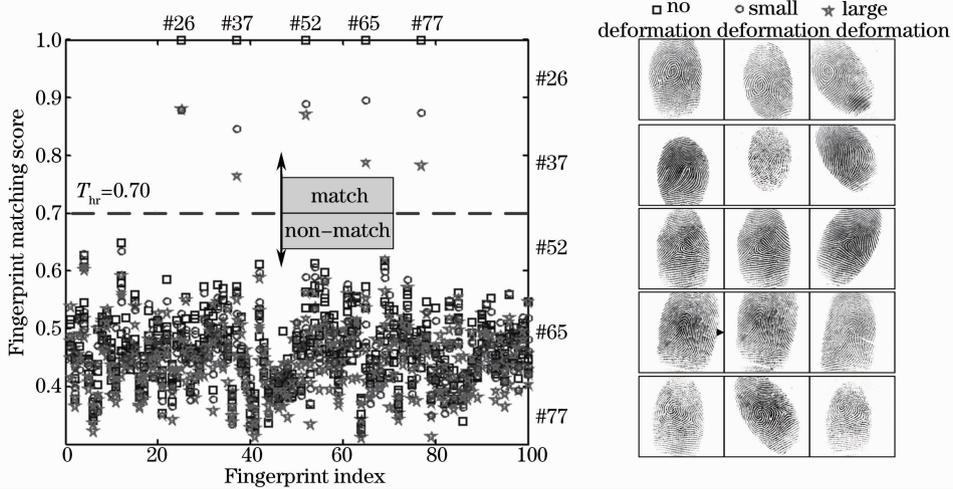


图 12 无形变、小形变和大形变样本图像与 100 幅库图像的交叉匹配测试结果

Fig. 12 Matching results of the fingerprints with no deformation, small deformation and large deformation when searching over the database stored in the optical system

5 体全息光学相关器的发展趋势

从体全息技术和光学相关器技术发展和社会需求的角度看,今后体全息光学相关器的发展可能着

重于以下方面:

1) 体全息光学相关信息处理与超高密度光学信息存储更加紧密地结合以提高相关器系统的整体

性能,从单点角度复用逐渐走向多点角度与空间复用结合,以实现更大容量模板库的存储和更高的运算速度;

2) 体全息存储记录材料的研究对体全息光学相关技术的发展起着重要的推动作用,充分研究光与记录介质的光物理化学作用,提升材料性能,实现大容量高可靠性长时间存储,将大大推进体全息光学相关器的实用化;

3) 光学运算和数字处理技术的有机结合,将数字处理算法更有效地融入光学相关模板编码和匹配滤波器的设计,充分发挥各自的技术优势,将为模式识别和高速图像处理提供强有力的解决工具;

4) 从核心光电子器件的小型化以及光机系统的紧凑设计等方面进一步提升相关器系统的紧凑性,提高系统对温度、振动等环境变化的稳健性,是体全息光学相关器实现在移动平台大规模应用的关键。

6 结 论

体全息光学相关技术是一种重要的光学信息处理技术,相比传统电子计算机处理技术,具有以下优点:1) 体全息光学相关器模板库采用体式存储、密度高、容量大,且能通过光学编码实现数据加密,军事保密性强,且具有很强的抗电磁干扰能力;2) 页式存储与运算,模板存储器同时也是运算器,没有数据传输速率的限制,可直接对灰度图像进行处理;3) 超并行运算能力,可在二维图像数据页的像素之间以及所有数据页之间实现页内、页间并行运算,各通道的运算结果并行输出。

通过讨论体全息光学相关器的关键技术,介绍了近 10 年来体全息光学相关器在并行通道、运算精度、数据处理、系统优化集成等方向的发展情况,并进一步分析了体全息光学相关器的发展趋势。现有技术已经在相关器系统中实现 7500 通道高精度并行运算,运算速度可达 138 GHz,是现有电子芯片运算速度的 2~3 个数量级。光学识别具有并行处理速度快的特点,但是也有其不足之处。由于它是基于模板匹配原理,所以对模板设计提出了很高的要求,否则难以完成复杂的识别、匹配工作。发展体全息光学相关技术的关键是找到合适的应用场合,并且与电子微处理器实现高效协同。在遥感图像配准、景象匹配、生物特征识别等领域的应用研究,都是将体全息光学相关器作为高性能协处理器,与计算机构成光电混合系统,其成功应用也证明了体全

息光学相关器在航天、国防和公安领域的重大应用前景。

参 考 文 献

- Vander Lugt A B. Signal detection by complex spatial filtering [J]. IEEE Trans Information Theory, 1964, 10(2): 139-145.
- 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]. Opt Eng, 1999, 38(11): 1814-1825.
- 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.
- Holeman J M, Welch J D. Autonomous Space Navigation System Utilizing Holographic Recognition[P]. US Patent: US3636330, [1972-1-18].
- Bond R L, Mazumder M K, Testerman M K, *et al.*. Automatic screening of biological specimens by optical correlation [J]. Science, 1973, 179(4073): 571-573.
- Burr G W, Kobras S, Hanssen H, *et al.*. Content-addressable data storage by use of volume holograms[J]. Appl Opt, 1999, 38(32): 6779-6784.
- Li Jianhua, Cao Liangcai, Tan Xiaodi, *et al.*. Transmission type of collinear volume holographic storage technology based on LiNbO₃ crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0409001.
李建华, 曹良才, 谭小地, 等. 基于 LiNbO₃ 晶体的透射式共光轴体全息存储技术[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0409001.
- Demetri P, Fai M. Holographic memories [J]. Scientific American, 1995, 273(5): 70-76.
- Pu A, Denkwalter R, Psaltis D. Real-time vehicle navigation using a holographic memory[J]. Opt Eng, 1997, 36(10): 2737-2746.
- Coufal H J, Psaltis D, Sincerbox G T. Holographic Data Storage [M]. New York: Springer-Verlag, 2000.
- Gu C, Fu H, Lien J R, *et al.*. Correlation patterns and cross-talk noise in volume holographic optical correlators[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 861-868.
- Ouyang Chuan, Cao Liangcai, He Qingsheng, *et al.*. Sidelobe suppression in volume holographic optical correlators by use of speckle modulation[J]. Opt Lett, 2003, 28(20): 1972-1974.
- Cao Liangcai, He Qingsheng, Ouyang Chuan, *et al.*. Improvement to human-face recognition in a volume holographic correlator by use of speckle modulation[J]. Appl Opt, 2005, 44(4): 538-545.
- Ni Kai, Qu Zongyao, Cao Liangcai, *et al.*. Improving accuracy of multichannel volume holographic correlators by using a two-dimensional interleaving method[J]. Opt Lett, 2007, 32(20): 2972-2974.
- Ni Kai, Qu Zongyao, Cao Liangcai, *et al.*. High accurate volume holographic correlator with 4000 parallel correlation channels[C]. SPIE, 2007, 6827: 68271J.
- Wang Shunli, Tan Qiaofeng, Cao Liangcai, *et al.*. Multi-sample parallel estimation in volume holographic correlator for remote sensing image recognition [J]. Opt Express, 2009, 17(24): 21738-21747.
- Wang Shunli, Cao Liangcai, Gu Huarong, *et al.*. Channel analysis of the volume holographic correlator for scene matching [J]. Opt Express, 2011, 19(5): 3870-3880.
- Zhao Tian, Cao Liangcai, Qin Shuang, *et al.*. Influence of readout optical field variations on inner product calculation in volume holographic correlator[J]. Opt Commun, 2013, 300:

- 156—161.
- 19 Zhao Tian, Li Jingming, Cao Liangcai, *et al.*. Read-only high accuracy volume holographic optical correlator[C]. SPIE, 2011, 8120: 81200R.
- 20 Zhao Tian. Read-Only Volume Holographic Correlator [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. 91—112.
赵 瑛. 只读体全息光学相关器[D]. 北京: 清华大学, 2013. 91—112.
- 21 Ma Qiang, Ni Kai, He Qingsheng, *et al.*. Fast associative filtering based on two-dimensional discrete Walsh transform by a volume holographic correlator[J]. Opt Express, 2009, 17(2): 838—843.
- 22 Ma Qiang, Cao Liangcai, Tan Qiaofeng, *et al.*. Two-dimensional discrete Walsh transform based on multi-channel volume holographic correlator[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2997—3001.
马 强, 曹良才, 谭峭峰, 等. 基于多通道体全息相关器的二维离散沃尔什变换[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2997—3001.
- 23 Zheng Tianxiang, Cao Liangcai, He Qingsheng, *et al.*. Image rotation measurement in scene matching based on holographic optical correlator[J]. Appl Opt, 2013, 52(12): 2841—2848.
- 24 Zheng Tianxiang, Cao Liangcai, He Qingsheng, *et al.*. Full-range in-plane rotation measurement for image recognition with hybrid digital-optical correlator[J]. Opt Eng, 2013, 53(1): 011003.
- 25 Zheng Tianxiang, Cao Liangcai, Yi Yao, *et al.*. Image rotation estimation by angle scanning and channels average method in optical correlator[J]. Opt Commun, 2013, 308: 309—315.
- 26 Zheng Tianxiang, Cao Liangcai, He Qingsheng, *et al.*. Image scale measurement with correlation filters in a volume holographic optical correlator[C]. SPIE, 2013, 8913: 891313.
- 27 Yi Yao, Cao Liangcai, Guo Wei, *et al.*. Optical fingerprint recognition based on local minutiae structure coding[J]. Opt Express, 2013, 21(14): 17108—17121.

栏目编辑:何卓铭