

# 多输入通道体全息子波相关器\*

冯文毅 严瑛白 金国藩 邬敏贤 何庆声

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084)

**提要** 在无需增加任何器件的情况下,通过输入面平移方法结合角度多重复合技术,构建了一种新型的多输入通道体全息子波相关器。该系统能根据一次并行输出结果同时识别多个输入图像。初步研究了其在人脸识别中的应用,给出了实验结果。

**关键词** 体全息存储,子波变换,相关检测,人脸识别

## 1 引 言

光折变晶体体全息存储技术因其存储容量大、传输速率高和寻址速度快等优势而逐渐得到重视<sup>[1]</sup>,随着记录晶体、空间光调制器和光电探测阵列等关键元器件的成熟,一些基于体全息存储的应用系统已经出现<sup>[2]</sup>。体全息的关联存储特性为构建多通道光学相关器提供了一种有效的手段<sup>[3]</sup>。由输入图像调制的物光照射存储的角度多重全息图时,会读出一系列不同方向的“参考光”,各光的强度大小代表了相应存储图像与输入图像的相关程度。这种相关器充分体现了光学的快速性和并行性。将子波变换引入相关系统,通过选择适宜参数的子波函数对图像进行滤波预处理,使相关匹配操作从输入图像与模板图像的直接相关转化为输入图像与模板图像经相同子波提取特征间的相关。这种方法的自相关峰锐利,旁瓣少,具有很强抗噪能力,易于判识<sup>[4~6]</sup>。

体全息子波相关器通常只有单一输入通道<sup>[7]</sup>,本文提出并实现了一种新型的多输入通道体全息子波相关器,该系统能同时识别多个输入图像,提高了光学系统的并行性。

## 2 子波相关理论

设待识图像与模板图像分别为  $f(x, y)$  和  $s(x, y)$ , 则其子波相关定义为<sup>[7]</sup>

$$[f(x, y) \otimes h_a^*(x, y)] \otimes [s(x, y) \otimes h_a(x, y)]^* = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) H^*(a_x u, a_y v) S^*(u, v) H(a_x u, a_y v) \exp[i2\pi(xu + yv)] du dv \quad (1)$$

其中“ $\otimes$ ”为相关操作,  $h_a(x, y) = \frac{1}{\sqrt{a_x a_y}} h\left[\frac{x}{a_x}, \frac{y}{a_y}\right]$  为子波函数,  $a = (a_x, a_y)$  为尺度因子,  $F(u, v)$ ,  $S(u, v)$  和  $H(a_x u, a_y v)$  分别为  $f(x, y)$ ,  $s(x, y)$  和  $h_a(x, y)$  的傅里叶变换。与传统相关不同,

\* 国家自然科学基金(批准号: 69877007)及 863 高科技基金(863-307-14-4)资助项目。

收稿日期: 1998-12-15; 收到修改稿日期: 1999-02-08

子波相关不是待识图像与模板图像间的直接匹配操作,而是子波函数提取的待识图像特征和模板图像特征间的匹配操作,因而具有更高的鉴别能力。本文选择墨西哥帽子波函数来构造子波滤波器,用以提取图像的边缘特征。二维墨西哥帽子波函数的频域形式为<sup>[8]</sup>

$$H(u, v) = 4\pi^2(u^2 + v^2) \exp[-2\pi(u^2 + v^2)] \quad (2)$$

为一正实值函数,便于制作。

传统相关和子波相关的比较如图 1 所示。图 1 (a) 为实验中的四幅人脸图像, (b) 为所采用的墨西哥帽子波滤波器, (c) 为子波滤波提取的特征图像, (d) 为第一幅人脸与四幅人脸的传统相关结果, (e) 为相应的子波相关结果。可见,子波相关的锐度等性能均强于传统相关。

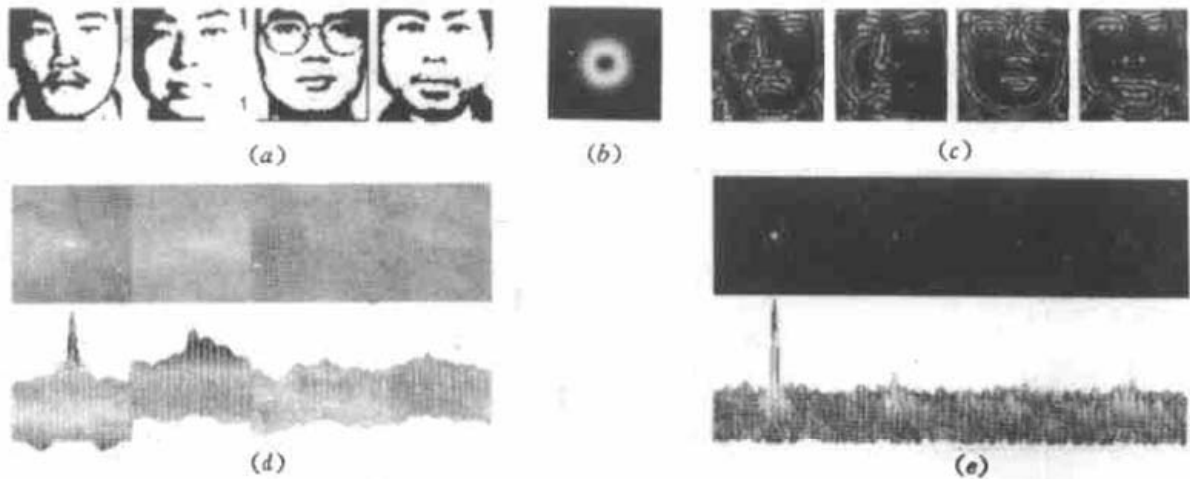


图 1 模拟计算结果

(a) 人脸图像; (b) 墨西哥帽子波滤波器; (c) 子波滤波提取的特征图像; (d) 传统匹配相关; (e) 子波相关

Fig. 1 Simulated results

(a) human face images; (b) the Mexican hat wavelet filter; (c) feature images extracted by wavelet transform;

(d) conventional correlation; (e) wavelet correlation

根据公式(1),首先在晶体中存储模板图像子波滤波的多重谱全息,然后用待识图像的子波滤波谱读取存储的全息图,再对读出信息作傅里叶反变换便可得到子波特征相关结果。

### 3 多输入通道体全息子波相关器

#### 3.1 实现机理

单一输入通道的体全息子波相关器,采用角度复合技术在光折变晶体中存储模板图像的信息,如图 2 (a) 所示。将输入图像平移便可以获得多个输入通道,以四输入通道为例,如图 2 (b) 所示。存储时,每次仅打开一个通道,关闭其余通道,通过参考光束在  $x$  方向的扫描完成所有模板图像的角度复合记录;每切换一个通道,都要使参考光束在  $x$  方向复位,并在  $y$  方向扫描一个间隔,再进行同样的角度复合记录。忽略晶体厚度及有限截面尺寸的影响,在晶体中记录的角度多重子波滤波谱全息图可简记为

$$I = \sum_{m_y} \sum_{m_x} |S_{m_x}(u, v)H(a_x u, a_y v) + R_{m_x, m_y}(u, v)|^2 = \sum_{m_y} \sum_{m_x} |S_{m_x}|^2 |H|^2 + |R_{m_x, m_y}|^2 + S_{m_x}^* H^* R_{m_x, m_y} + S_{m_x} H R_{m_x, m_y}^* \quad (3)$$

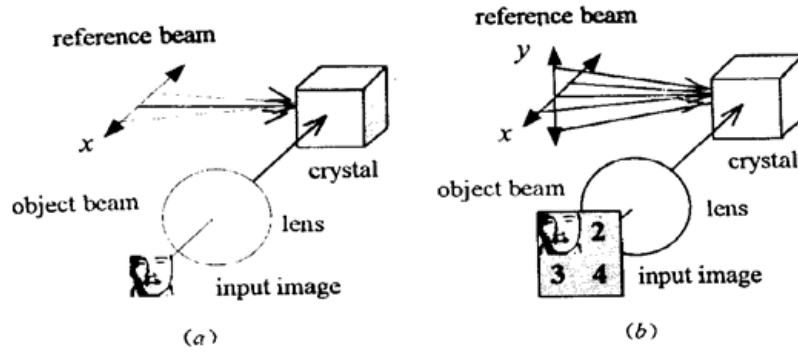


图 2 模板图像的角度复合记录

(a) 单一输入通道; (b) 四输入通道

Fig. 2 The angle-multiplexing record of patterns

(a) single input channel; (b) four input channels

其中  $S_{m_x}(u, v)$  为第  $m_x$  号模板图像  $s_{m_x}(x, y)$  的傅里叶变换,  $R_{m_x, m_y}(u, v)$  表示  $s_{m_x}(x, y)$  在输入通道  $m_y$  处对应的参考光束。

识别时, 用一组待识图像  $\sum_m f_m(x, y)$  (图像个数等于输入通道数) 的子波滤波谱  $\sum_m F_m(u, v)H(a_x u, a_y v)$  去读取晶体中的全息图, 读出结果为

$$C(u, v) = \sum_m \sum_{m_y} \sum_{m_x} F_m |S_{m_x}|^2 |H|^2 H + F_m |R_{m_x, m_y}|^2 H + F_m S_{m_x}^* |H|^2 R_{m_x, m_y} + F_m S_{m_x} H^2 R_{m_x, m_y}^* \quad (4)$$

考察上式中满足布拉格匹配条件的第三项, 作傅里叶反变换得

$$c \propto \sum_m \sum_{m_x} (f_m \otimes h^*) \otimes (s_{m_x} \otimes h^*)^* \quad (5)$$

若待识图像  $f_k$  与某一库图像  $s_{m_k}$  一致, 则在记录参考光  $R_{m_k, k}$  方向的相应位置处会出现一子波自相关峰。为了便于进行相关检测, 记录时, 各输入通道中模板图像的次序保持一致。输出面上的相关峰与模板图像的位置对应关系如图 3 所示, 其中的行和列分别与输入通道及模板图像相对应。

检测时, 根据各行最大相关峰出现的方位, 便可以得出与各输入通道待识图像最为相似的模板图像, 从而完成对多个输入图像的识别。

### 3.2 相关器原型

图 4 为多输入通道体全息子波相关器光路示意图。激光器发出的光经滤波、扩束、准直和分束后, 获得物光和参考光两束光路。参考光束经透镜  $L_1$  和  $L_2$  组成的光束扫描机构后, 投射到光折变晶体 PRC 上。为保证参考光束在晶体记录面上的大小和位置不发生变化, 而仅方向变化, 需要使扫描透镜  $L_1$  所在的平面与晶体记录面关于透镜  $L_2$  成物像关系。当透镜  $L_1$  相对于系统光轴在  $x$  和  $y$  方向分别移动  $d_x$  和  $d_y$  时, 由几何光学理论, 晶体中入射光束的偏角  $\theta$  为

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{l_1 - f_2}{f_1 f_2} \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \right] \approx \frac{l_1 - f_2}{f_1 f_2} \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (6)$$

其中,  $f_1$  和  $f_2$  分别为透镜  $L_1$  和  $L_2$  的焦距,  $l_1$  为透镜  $L_1$  和  $L_2$  的间距。由于系统采用了球面参

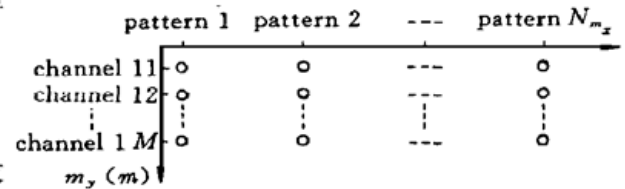


图 3 输出面上相关峰位置与模板图像及输入通道的对应关系

Fig. 3 Positions of correlation peaks corresponding to patterns and input channels on the output plane

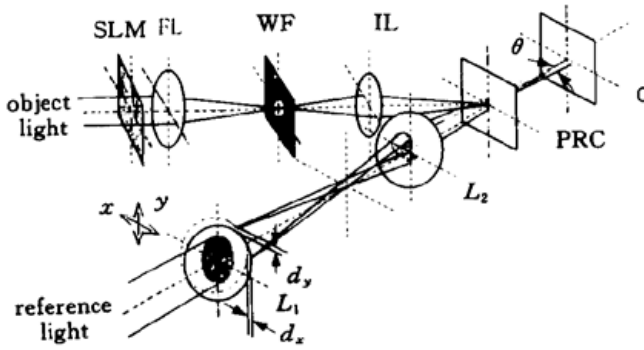


图 4 多输入通道体全息子波相关器光路示意图  
 Fig. 4 Schematic drawing of the volume holographic wavelet correlator with multi-input channels

考光波, 根据标量衍射理论, 读出时在光波会聚面上便可得到读出波面的傅里叶变换, 因此相关输出就在会聚面  $O$  上<sup>[7]</sup>。物光光路中, 空间光调制器 SLM 上的输入图像经透镜 FL 的傅里叶变换谱被子波滤波器 WF 滤波后, 由成像透镜 IL 投影在晶体记录面上, 与参考光束发生干涉, 干涉产生的全息图因光折变效应而记录在晶体中。

记录时, 依文中 3.1 节所述方式切换输入通道和更换模板图像, 并在垂直于透镜光轴的  $x$  和  $y$  方向平移透镜  $L_1$ , 便可实现角度多重记

录。读出时, 关闭参考光路, 输入一组待识图像, 就可以在参考光波的会聚面  $O$  上得到多个输入通道的相关输出结果。相关输出由 CCD 获取后, 送至计算机作峰值检测, 根据图 3 中的位置对应关系识别出所有输入图像。由于记录过程是事先进行的, 读出操作则在瞬间完成, 因此可以实现图像的实时识别及跟踪。

### 4 人脸识别中的应用研究

实验用的 He-Ne 激光器额定功率为 30 mW, 工作波长为 632.8 nm, 出射激光为竖直偏振的线偏振光。记录晶体选用掺 Fe 浓度较高的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 以获得较大的记录动态范围<sup>[9]</sup>。子波滤波器及其参数选择是实现子波特征相关识别的关键。实验中根据滤波器评价参数<sup>[10]</sup>对人

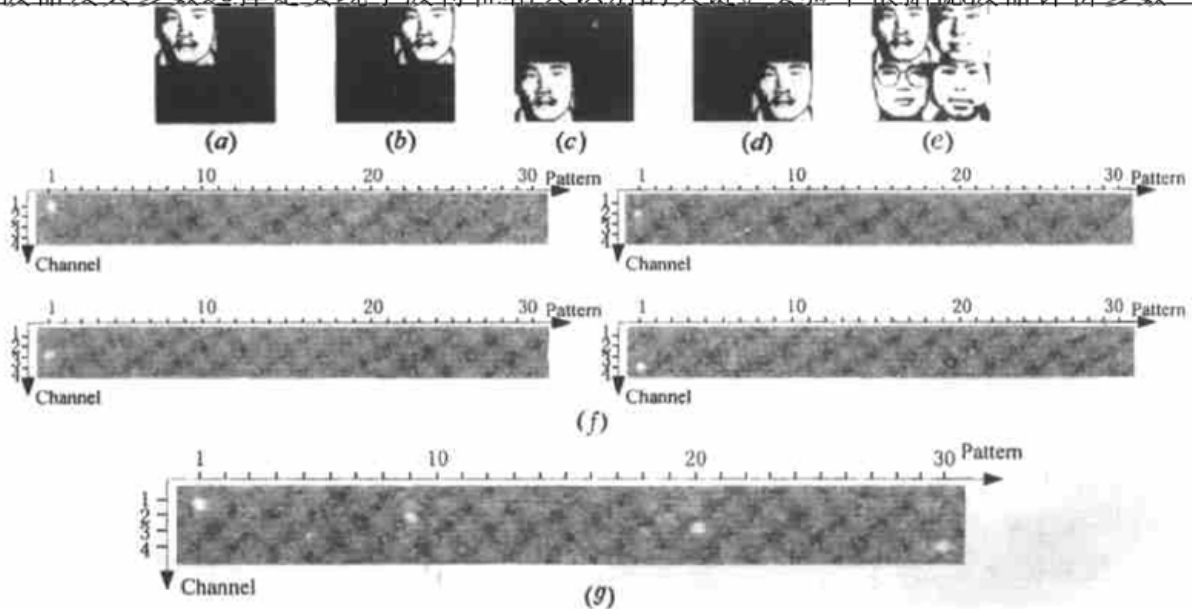


图 5 实验结果

(a) ~ (d) 记录时模板图像在不同输入通道中的形式; (e) 输入的待识图像;  
 (f) 输入(a) ~ (d) 时系统的输出结果; (g) 输入(e) 时系统的输出结果

Fig. 5 Experimental results

(a) ~ (d) patterns for recording in different input channels; (e) the input images for recognition;  
 (f) outputs of the system with (a) ~ (d) as the input image; (g) output of the system with (e) as the input image

脸模板图像在不同墨西哥帽子波尺度下的特征匹配效果进行了统计分析, 获得了近似最优尺度的子波滤波器。实际制作的滤波器用打印精度为 3600 dpi 的激光打印机打印在胶片上。

实验中采集了 30 幅人脸进行应用研究。以四输入通道为例, 记录时, 第 1 号人脸模板图像在不同输入通道中的形式分别如图 5(a) ~ (d) 所示, 黑色背景为不透光部分。依次输入图 5(a) ~ (d) 中的图像, 系统输出结果如图 5(f) 所示, 最大相关峰值分别出现在第 1 列的第 1 ~ 4 行上。输入图 5(e) 所示的四幅人脸图像(依次为第 1, 9, 20, 30 号人脸), 系统输出结果如图 5(g) 所示, 各行的最大相关峰值依次出现在第 1, 9, 20, 30 列处, 验证了本系统的可行性和有效性。

### 参 考 文 献

- 1 J. F. Heanue, M. C. Bashaw, L. Hesselink. Volume holographic storage and retrieval of digital data. *Science*, 1994, **265**(5173): 749~ 752
- 2 A. Pu, R. Denkewalter, D. Psaltis. Real-time vehicle navigation using a holographic memory. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(10): 2737~ 2746
- 3 Feng Wenyi, Huang Gaogui, Yan Yingbai *et al.*. Multichannel wavelet correlators by the use of associative storage in a photorefractive material. *Proc. SPIE*, 1998, **3554**: 149~ 154
- 4 D. Roberge, Y. Sheng. Optical wavelet matched filter. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(23): 5287~ 5293
- 5 Jun Li, Yuechun Zhang, Jiasheng Hu. Object recognition with a wavelet-transform-based joint transform correlator. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(3): 775~ 777
- 6 Wang Jun, Wang Ruli, Hua Tiejun *et al.*. Research of application of optical Fourier transform and wavelet transform for real-time fingerprint recognition. *J. Infrared Millim. Waves* (红外与毫米波学报), 1996, **15**(1): 55~ 59 (in Chinese)
- 7 Feng Wenyi, Huang Gaogui, Yan Yingbai *et al.*. Multichannel wavelet correlators for fingerprint identification by the use of volume holographic storage. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(3): 370~ 375 (in Chinese)
- 8 I. Ouzieli, D. Mendlovic. Two-dimensional wavelet processor. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(29): 5839~ 5846
- 9 X. Li, M. Wu, Y. Yan *et al.*. Dynamic range metric for a photorefractive crystal in a volume holographic memory system. *Opt. Comm.*, 1997, **138**(1, 2, 3): 143~ 150
- 10 B. V. K. Vijaya Kumar, L. Hassebrook. Performance measures for correlation filters. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(20): 2997~ 3006

## Volume Holographic Wavelet Correlators with Multi-input Channels

Feng Wenyi Yan Yingbai Jin Guofan Wu Minxian He Qingsheng

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

**Abstract** A novel volume holographic wavelet correlator with multi-input channels is proposed and constructed in this paper without adding any component. The method of input plane shift and the technique of angle multiplexing are combined besides the introduction of wavelet transform. Multi-input images can be recognized simultaneously according to a system output. Its application in human face recognition is studied, and experimental results are given.

**Key words** volume holographic storage, wavelet transform, correlation identification, human face recognition