

多通道体全息子波相关器及其 在指纹识别中的应用*

冯文毅 黄高贵 严瑛白 金国藩 邬敏贤

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要 基于子波匹配相关理论和光折变晶体的体全息关联存储特性, 采用球面波作参考光, 构建了一个新型的多通道体全息子波相关器。该系统具有多通道并行相关特性和更高的识别准确率, 并且较通常的平面参考光波体全息相关器更为紧凑, 易于小型化和实用化。初步研究了其在指纹识别中的应用, 给出了实验结果。

关键词 体全息存储, 子波变换, 多通道相关, 指纹识别。

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^[1], Burr 等已经在单一晶体中实现了 10,000 幅图像全息图的记录和恢复^[2]。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和发展, 一些基于体全息存储的应用系统已经产生^[3]。体全息图像存储是基于晶体的布拉格效应, 由特定角度、波长或相位分布的参考光复合来记录和读取图像信息。而利用体全息的关联存储特性, 由输入图像调制的物光照射存储的多重全息图时, 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。这种相关系统具有瞬间多通道并行操作的独特优点。

将子波变换引入相关系统, 使相关匹配操作从输入图像与库图像的直接相关转化为输入图像与库图像经相同子波提取特征间的相关。这种方法的相关峰锐利、旁瓣少, 具有很强的抗噪能力, 易于判识^[4-6]。这一优点对体全息相关器而言, 意味着单通道输出所占据的空间带宽减小, 因此可以在系统输出空间带宽一定的情况下, 进一步增加相关通道的数量, 发挥光学并行性的优势。此外, 结合子波函数和子波参数选择的灵活性, 可以针对需要增强的图像特征, 优化滤波性能, 获得多个子波匹配滤波的相关峰; 利用多个峰值进行判别, 可以减少单个峰值判别的风险, 还可用以区分两个极为相似的目标。

本文在简要介绍子波匹配相关理论的基础上, 提出并实现了一个新型的多通道体全息子波相关器。该系统具有多通道相关特性, 可以一次并行输出输入图像与所有库图像的相关结果; 通过子波滤波, 实现图像主要特征间的匹配相关, 具有更高的识别准确率; 采用球面波

* 国家自然科学基金(69877007、69673033)及国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1998-05-22; 收到修改稿日期: 1998-09-07

作参考光, 较通常的平面参考光体全息相关系统串扰噪声更小, 且更为紧凑, 易于小型化和实用化。实验结果表明, 系统在指纹识别等领域具有很好的应用前景。

2 子波匹配滤波理论

子波匹配滤波相关通过选择适宜参数的子波函数分别对输入图像和库图像进行滤波, 实现图像主要特征间的匹配相关, 因而相关峰更锐, 具有更高的识别准确率。

设输入图像与库图像分别为 $f(x, y)$ 和 $s(x, y)$, 则其子波变换分别为

$$\begin{aligned} W_f(a_x, a_y, x, y) &= f(x, y) \otimes h_a^*(x, y), \\ W_s(a_x, a_y, x, y) &= s(x, y) \otimes h_a^*(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 \otimes 为相关操作, $h_a(x, y)$ 为子波函数:

$$h_a(x, y) = (1/\sqrt{a_x a_y})h(x/a_x, y/a_y). \quad (2)$$

$a = (a_x, a_y)$ 为尺度因子, $*$ 为共轭操作, 子波匹配相关定义为

$$\begin{aligned} W_f(a_x, a_y, x, y) \otimes W_s^*(a_x, a_y, x, y) &= \\ &+ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a_x, a_y, x', y') W_s^*(a_x, a_y, x' - x, y' - y) dx' dy' = \\ &+ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) H^*(a_x u, a_y v) S^*(u, v) H(a_x u, a_y v) \exp[i2\pi(xu + yv)] dudv = \\ &+ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) S^*(u, v) |H(a_x u, a_y v)|^2 \exp[i2\pi(xu + yv)] dudv, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $F(u, v)$ 、 $S(u, v)$ 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, 令

$$T(u, v) = S^*(u, v) |H(a_x u, a_y v)|^2, \quad (4)$$

将之定义为子波匹配滤波器函数。因此, 实现子波匹配相关可以有两种方式, 其流程如图 1 所示。图 1(a) 为依照子波匹配相关的原始定义进行的流程, 用光学方法实现起来需要两步串联的光学相关器, 第一步用作光学子波变换, 第二步对上一步两个子波变换的结果进行匹配操作。图 1(b) 为利用子波匹配滤波器一步直接完成相关操作的流程。MY Wen 等采用图 1(b) 流程, 通过在光折变晶体中存储大量子波匹配滤波器来实现子波匹配相关^[7]。本文则采用图 1(a) 流程来实现子波匹配相关: 记录时, 晶体中保存了库图像的子波变换信息; 读出时, 输入图像的子波变换与晶体中的存储信息进行相关匹配。这种方法的优点是记录和读出光路

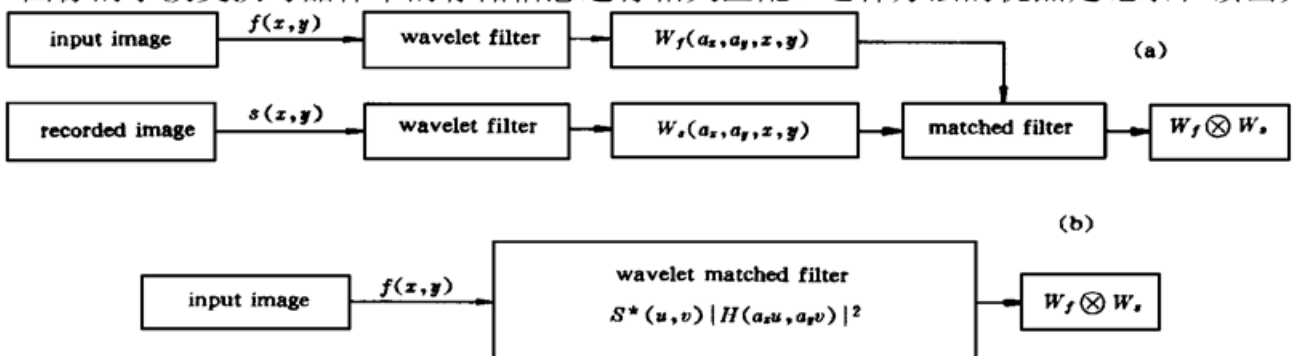


Fig. 1 Two flow charts of wavelet correlation. (a) Two steps for wavelet correlation, (b) Single step for wavelet correlation

完全一致，无需做任何调整；并且大多数常用频域子波滤波器为正实值函数，便于制作，避免了复值子波匹配滤波器的再现问题。

墨西哥帽子波是高斯函数的二阶微分，是最常用的边缘检测函数之一。二维墨西哥子波的空域和频域形式分别为

$$h(x, y) = (1 - x^2 - y^2) \exp [(-x^2 - y^2)/2], \tag{5}$$

$$H(u, v) = 4\pi^2(u^2 + v^2) \exp [-2\pi(u^2 + v^2)]. \tag{6}$$

图 2 为实验所用的指纹图像及其传统匹配相关和基于墨西哥帽子波的匹配相关模拟计算结果。可见，子波匹配相关较传统匹配相关峰值锐利，旁瓣少，可以提高判识的准确性。

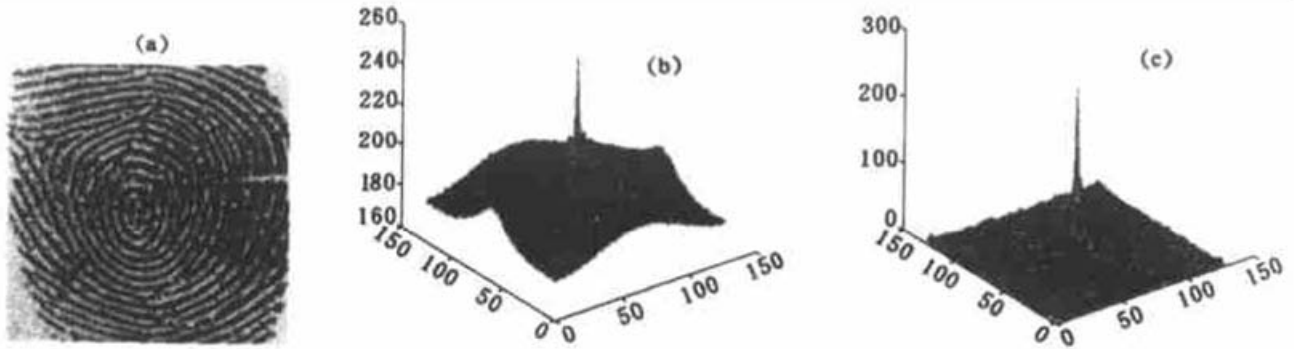


Fig. 2 Simulated results. (a) A fingerprint, (b) Conventional auto-correlation, (c) Wavelet auto-correlation

3 体全息子波相关器

3.1 实现体全息角度复合的光束扫描机构

角度多重记录要求参考光束以不同偏转角入射至光折变晶体表面的同一位置，该功能可以由图 3(a) 所示系统来实现。上图表示两透镜中心与入射平行光束中心重合的状态，下图表示透镜 L₁ 平移实现扫描的状态，记录晶体放置在 P₁ 面上。为保证参考光束在 P₁ 面上的大小和位置不发生变化，需要使扫描透镜 L₁ 所在的平面与记录晶体所在面 P₁ 关于透镜 L₂ 成物像关系。当透镜 L₁ 相对于光束中心线垂直移动 *d* 时，由几何光学理论，可得入射平行光束中心线偏转角 θ 为

$$\theta = \arctan [(l_1 - f_2)d / (f_1 f_2)] \approx (l_1 - f_2)d / (f_1 f_2), \tag{7}$$

尤其，当透镜 L₁ 与透镜 L₂ 共焦时，可以实现平行光束扫描[如图 3(b) 所示]，且有

$$l_1 = f_1 + f_2, \quad \theta = \arctan (d / f_2) \approx d / f_2. \tag{8}$$

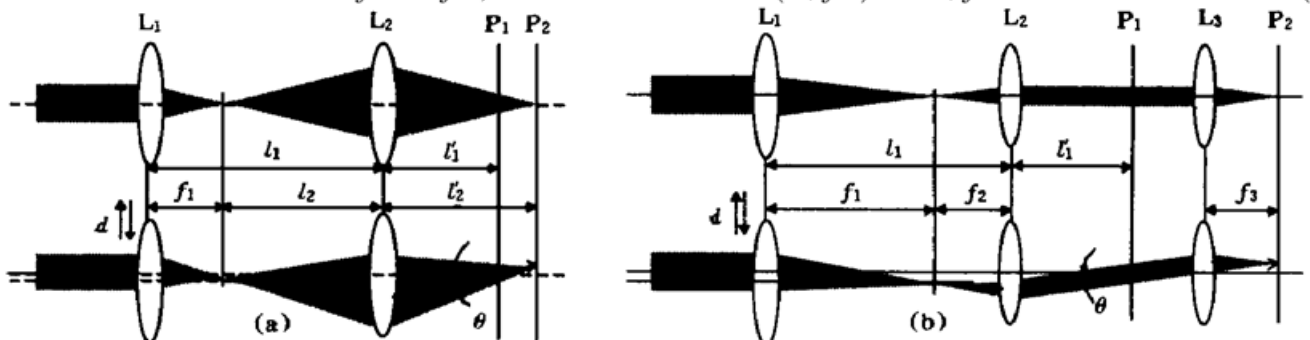


Fig. 3 Beam scanning setup for angle-multiplexing and principle of correlation implementation: (a) spherical reference beam, (b) planar reference beam

3.2 球面参考光波体全息相关机理

采用球面参考光波的体全息存储系统较平面波而言具有更低的串扰噪声^[8], 这一特点对提高多通道体全息相关器识别准确率十分有利。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全息图可简写为

$$I(u, v) = \sum_m |S_m(u, v)H(a_x u, a_y v) + R_m(u, v)|^2 = \sum_m |S_m|^2 |H|^2 + |R_m|^2 + S_m^* H^* R_m + S_m H R_m^*, \quad (9)$$

其中 $S_m(u, v)$ 和 $H(a_x u, a_y v)$ 分别是库图像 $s_m(x, y)$ 和子波函数 $h(a_x, a_y, x, y)$ 的傅里叶变换, $R_m(u, v)$ 表示 $s_m(x, y)$ 对应的参考光束。

识别时, 用输入图像 $f(x, y)$ 的子波变换去读取晶体中的全息图, 读出结果为

$$C(u, v) = F(u, v)H(a_x u, a_y v)I(u, v) = \sum_m F|S_m|^2 |H|^2 H + F|R_m|^2 H + FS_m^* |H|^2 R_m + FS_m H^2 R_m^*. \quad (10)$$

为获得相关输出, 需要对读出光再作一次傅里叶变换。考察上式中满足布拉格匹配条件的第三项, 作变换得

$$C \propto \sum_m (f \otimes h^*) \otimes (s_m \otimes h^*)^* = \sum_m W_f \otimes W_{s_m}^*. \quad (11)$$

若输入图像与某一库图像一致, 则在相关输出面的相应位置处会出现一自相关峰, 其余位置则为互相关。在以平面波做参考光的体全息相关器[如图 3(b)所示]中, 上述变换是由一个变换透镜 L_3 来完成的, 相关输出面在透镜的后焦面 P_2 上。而在以球面波为参考光的体全息相关器[如图 3(a)所示]中, 记录晶体受会聚球面参考光波照射。根据标量衍射理论, 读出时在光波会聚面 P_2 上可得到读出波面的傅里叶变换(除了相差一个二次位相因子外)。因此可以省去一个变换透镜, 使系统更为紧凑。

3.3 球面参考光波体全息子波相关器

图 4 为基于光折变晶体的体全息记录与相关系统光路示意图。激光器发出的线偏振光经显微物镜 BL、针孔 PH、扩束镜 EL 及光阑 D 滤波、扩束和准直后, 入射至半波片 HP_1 和偏振分光棱镜 BS, 被分为两束偏振方向正交的偏振光, 调整半波片 HP_1 可以获得适宜的物参光强比。参考光束经上述光束扫描机构后, 投射到光折变晶体上; 物光光路中, 输入图像经透镜 FL 的傅里叶变换谱被子波滤波器滤波后, 由成像透镜 IL 成像在晶体中心, 与参考光发生干涉; 物光入射晶体前, 半波片 HP_2 的作用是调整物光的偏振方向, 使之与参考光一致, 以获得高对比度的干涉全息图。干涉产生的全息图因光折变效应而记录在晶体中。更换输入图像, 并在垂直于透镜光轴方向平移透镜 L_1 以改变参考光的入射方向, 便可实现角度多重记录。相关读出时, 关闭位于透镜 L_1 和 L_2 之间的快门 S, 输入待识图像, 在球面记录参考光波的会聚面上便可得到多个通道的相关输出结果, 每一通道相关输出的位置和峰值与该通道的存储图像一一对应。相关输出由 CCD 获取后, 送至计算机处理, 并在监视器上作同步显示。由于系统处理瞬间完成,

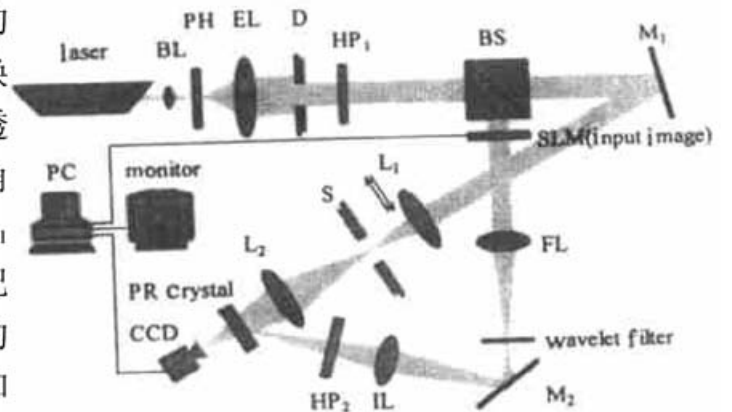


Fig. 4 Multichannel volume holographic wavelet correlators with spherical reference beam

且存储的图像是先验的，因此可以进行实时图像识别及跟踪。

4 指纹识别中的应用实验研究

采用光折变晶体体全息相关器进行指纹研究的优势在于可以同时实现指纹图像的大容量

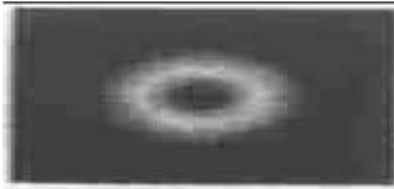


Fig. 5 The wavelet filter used in the experiment (3×)

存储和快速相关识别。实验所用的 He-Ne 激光器额定功率为 30 mW，工作波长 0.6328 μm，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 LiNbO₃ 晶体，以获得较大的记录动态范围^[9]，其尺寸为 8 mm×8 mm×3 mm。子波滤波器及其参数选择是实现指纹子波匹配相关识别的关键，实验中选择墨西哥帽子波为子波函数。为优化子波尺度以期获得最佳的匹配效果，文中根据滤波器评价参数^[10]对指纹库图像在不同尺度下的子波匹

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，如图 5 所示。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。

为验证子波匹配相关对比于传统匹配相关的优势，以图 2(a) 所示指纹为处理对象进行相关匹配实验，结果如图 6 所示。其中(a)、(b)为传统匹配自相关输出，(c)、(d)为子波匹配自相关输出。子波匹配相关在提高判识准确性方面的优越性是显而易见的。由于子波匹配相关的峰值锐利，还可以减小相邻相关峰之间的间距，使得在输出探测面大小一定的情况下，获得更多的相关输出通道，提高系统的并行处理能力。

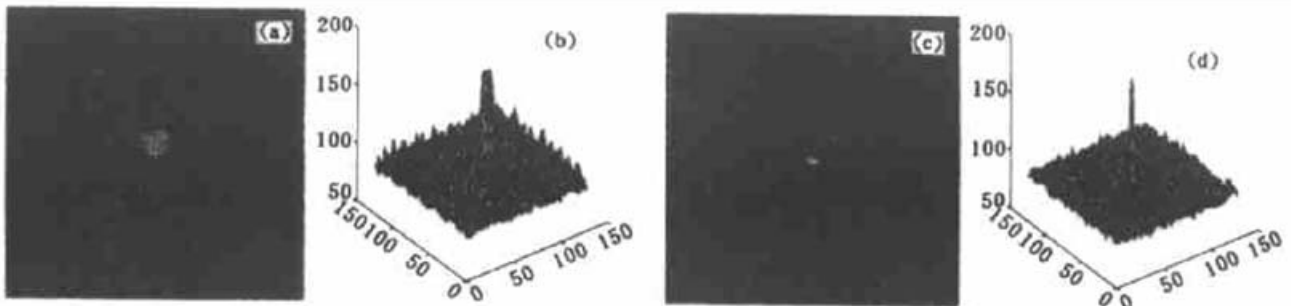


Fig. 6 Experimental results: (a), (b) conventional auto-correlation and it's 3D distribution; (c), (d) wavelet auto-correlation and it's 3D distribution

图 7 为 11 幅指纹图像的子波匹配相关输出在纵向拼贴而成的结果。图中，每一纵坐标处表示系统的一次并行输出结果；横坐标表示输入指纹与 11 幅存储指纹图像的子波相关结果。就每一次并行输出而言，最亮斑点处为输入图像与对应库图像的子波匹配自相关结果，与之并排的较暗斑点处为该图像与其它库图像

的子波匹配互相关结果。计算机判识时，相关图样所在的位置是相对固定的，只需适当选取阈值，找出并行相关输出结果中最大峰值点的位置便可得到对应的指纹归属。由图可见，子波自相关与互相关的峰值差别显著，可以实现准确判识。此外，指纹库图像的体全息记录是事先完成的，识别过程只是读出操作，输入图像与大量库

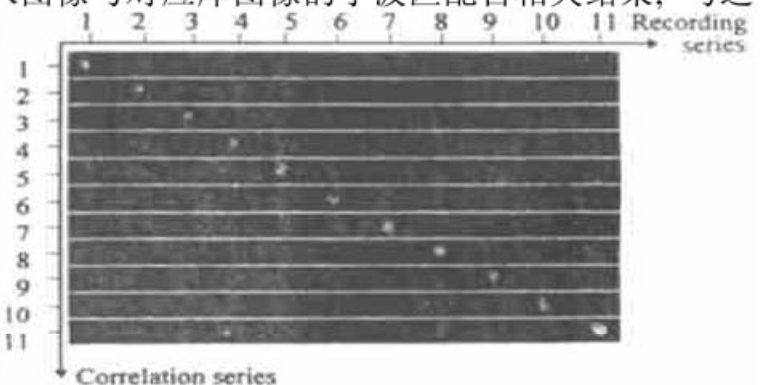


Fig. 7 Wavelet correlation results of 11 fingerprints

图像的子波相关是在一次瞬间并行操作中完成的。而二维子波变换和相关运算对计算机来说都是相当费时的, 因此同类算法中, 采用多通道体全息子波相关器, 识别速度和效率都得到极大程度的提高。

结 论 本文通过理论和实验证明了针对处理图像选择适宜子波及其尺度的情况下, 子波匹配相关较传统匹配相关具有较大的优越性。采用球面波作参考光构建的多通道体全息子波相关器, 结构上更为紧凑, 具有实时并行多通道相关识别处理的能力。在指纹识别中的应用研究表明, 该系统可以存储和识别大量指纹图像, 具有开发潜力及广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Heanue J, Bashaw M, Hesselink L. Volume holographic storage and retrieval of digital data. *Science*, 1994, **265**(5173) : 749~ 752
- [2] Burr C W, Mok F H, Psaltis. Large scale volume holographic storage in the long interaction length architecture. *Proc. SPIE*, 1994, **2297** : 402~ 414
- [3] Pu A, Denkwalter R, Psaltis D. Real time vehicle navigation using a holographic memory. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(10) : 2737~ 2746
- [4] Roberge D, Sheng Y. Optical wavelet matched filter. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(23) : 5287~ 5294
- [5] Li Jun, Zhang Yuechun, Hu Jiasheng. Object recognition with a wavelet transform based joint transform correlator. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(3) : 775~ 777
- [6] Wang Jun, Wang Wuli, Hua Tiejun *et al.*. Research of application of optical Fourier transform and wavelet transform for real-time fingerprint recognition. *J. Infrared Millim. Waves*, 1996, **15**(1) : 55~ 59
- [7] Wen M, Yin S, Purwardi P *et al.*. Wavelet matched filtering using a photorefractive crystal. *Opt. Commun.*, 1993, **99**(5/6) : 325~ 330
- [8] Li X, He Q, Wu M. Diffraction properties of a volume hologram with spherical reference beams. *Opt. Commun.*, 1998, **149**(1~ 3) : 13~ 18
- [9] Li X, Wu M, Yan Y *et al.*. Dynamic range metric for a photorefractive crystal in a volume holographic memory system. *Opt. Commun.*, 1997, **138**(3) : 143~ 150
- [10] Kumar B V K V, Hassebrook L. Performance measures for correlation filters. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(20) : 2997~ 3005

Multichannel Wavelet Correlators for Fingerprint Identification by the Use of Volume Holographic Storage

Feng Wenyi Huang Gaogui Yan Yingbai Jin Guofan Wu Minxian
*(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
 Tsinghua University, Beijing 100084)*

(Received 22 May 1998; revised 7 September 1998)

Abstract Based on the theory of wavelet correlation and the associative characteristic of volume holographic storage in a photorefractive crystal, a novel multichannel wavelet correlator is constructed. It has characteristics of multichannel correlation processing and a higher recognition veracity. With the spherical reference beam, the system is more compact and easy to be miniaturized and utilized. Its application in fingerprint identification is studied, and experimental results are given.

Key words volume holographic storage, wavelet transform, multichannel correlation, fingerprint identification.