

# 基于菌紫质膜联合子波变换的 实时模式识别\*

陈贤冬<sup>1</sup> 章献民<sup>1</sup> 陈抗生<sup>1</sup> 李庆国<sup>2</sup>

1, 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027  
2, 复旦大学生理和生物物理系, 上海 200433

**摘 要** 菌紫质(Bacteriorhodopsin, 简称 BR)是一种结构和功能与高级动物视网膜的视生色素——视紫红质极为相似的蛋白质,是一种优异的可逆光全息记录材料;子波变换是目标特征抽取和模式识别的有效方法。本文把联合子波变换和菌紫质膜优异的光学全息记录特性结合起来,提出了一种全新的光学全息实时模式识别方案,给出了相应的实验结果。

**关键词** 菌紫质, 子波变换, 双轴联合子波变换, 模式识别。

## 1 引 言

微生物嗜盐菌紫膜中的菌紫质分子,因与脊椎动物视网膜上的视紫红质分子具有相似的结构和性能,被认为是用于光计算和光存贮的理想生物分子材料,国内外有关研究工作

正日趋活跃。菌紫质经光照后,分子构型会发生一系列瞬态变化,其最大吸收峰(570 nm)也相应地发生一系列变化,并经历一系列的中间态 *K*、*L*、*M*、*N*、*O* 返回原始态而完成一次光循环,如图 1 所示。光循环过程是一个相当复杂的过程,菌紫质在初始 *B* 态经黄光(570 nm)激励后,经过一系列寿命极短的中间态(大约为 50  $\mu$ s)到达寿命较长的 *M* 态(寿命约大于 10 ms),再经蓝光(412 nm)激励后菌紫质膜又能弛豫到 *B* 态。由于其它中间态的极短寿命,所以有关菌紫质的应用研究主要利用其原始态 *B* 和中间态 *M* 之间的转换。菌紫质分子有很

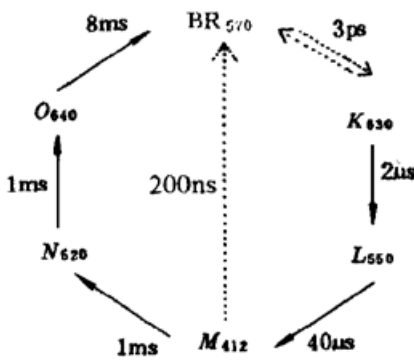


Fig. 1 Photocycle of BR

高的量子产率、很好的光化学稳定性、极快的光响应速度,是一种优异的光致色变材料。菌紫质膜在光存贮器、空间光调制器、光电混合神经网络、光学全息技术等方面的应用均有文献报道<sup>[1-3]</sup>。尤其是菌紫质膜高达 5000 l/mm 的空间分辨率、大于 10<sup>6</sup> 写入/擦除次数以及偏振记录特性特别适合于光学全息模式识别,并有较高的信噪比<sup>[3]</sup>。

子波变换是一个十分重要的信号分析方法。诸如在图像分析、数据压缩、模式识别、分

\* 浙江省自然科学基金资助课题。

形处理、轮廓抽取等领域有独特的优点<sup>[4-7]</sup>。光学连续子波变换源于子波变换卷积积分的精确定义,可由一系列的光学子波变换滤波器(WMF)来实现并具有内在的平移不变性,特别适合于光学模式识别。而且光学子波匹配滤波器可以一步完成信号的子波变换及二个变换后信号的卷积输出。由于子波变换可以增强信号的边缘特性,所以较之普通匹配滤波有更高的分辨力。有关子波变换用于光学实时图像处理有很多报道,Widjaja等采用光折变晶体筒并四波混频实现了实时子波滤波<sup>[6]</sup>,李骏等采用液晶电视(LCTV)等作为实时器件实现了联合子波变换的目标轮廓抽取<sup>[7]</sup>。本文把菌紫质膜作为实时全息记录材料,采用双轴联合子波变换相关器实现实时光学模式识别,实验结果表明比双轴联合傅里叶变换相关器的分辨能力有较大提高。

## 2 理论分析

信号 $f(x, y)$ 的子波变换为:

$$w_f(s_x, s_y, x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') h_{s_x, s_y}^*(x - x', y - y') dx' dy' = f(x, y) \star h_{s_x, s_y}(x, y) \quad (1)$$

式中 $\star$ 代表相关,这就是光学中用相关结构实现子波变换的原理依据。傅里叶频率域中,(1)式可以写为:

$$W_f(s_x, s_y, u, v) = F(u, v) H_{s_x, s_y}^*(u, v) \quad (2)$$

$F(u, v)$ 、 $H_{s_x, s_y}(u, v)$ 分别为 $f(x, y)$ 和子波函数 $h_{s_x, s_y}(x, y)$ 的傅里叶变换。其中子波函数由子波母函数 $h(x, y)$ 经过扩和平移后得到:

$$h_{s_x, s_y}(x, y) = \frac{1}{s_x s_y} h\left[\frac{x - d_x}{s_x}, \frac{y - d_y}{s_y}\right] \quad (3)$$

式中 $(s_x, s_y)$ 为扩因子, $(d_x, d_y)$ 为位移因子。基于子波匹配滤波的模式识别是通过二个于波变换后的信号的光学相关来实现的:

$$c(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w_t(x', y') w_r^*(x' - x, y' - y) dx' dy' \quad (4)$$

式中 $w_t(x, y)$ 和 $w_r(x, y)$ 分别代表目标信号 $t(x, y)$ 和参考信号 $r(x, y)$ 的子波变换。在傅里叶频率域中,(4)式可以写为:

$$C(u, v) = W_t(u, v) W_r^*(u, v) = T(u, v) H_{s_x, s_y}^*(u, v) R^*(u, v) H_{s_x, s_y}(u, v) \quad (5)$$

$T(u, v)$ 、 $R(u, v)$ 分别为 $t(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 的傅里叶变换。所以,

$$c(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(u, v) H_{s_x, s_y}(u, v) R^*(u, v) H_{s_x, s_y}^*(u, v) \exp[-i2\pi(xu + yv)] dudv = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(u, v) R^*(u, v) |H_{s_x, s_y}(u, v)|^2 \exp[-i2\pi(xu + yv)] dudv \quad (6)$$

(6)式表明 $T(u, v)$ 、 $R^*(u, v)$ 和 $|H_{s_x, s_y}(u, v)|^2$ 的乘积再经过一次傅里叶变换即可得到模式识别所要探测的信号。另外由于 $|H_{s_x, s_y}(u, v)|^2$ 为实数,所以很容易用空间光调制器来实现。这可由本文提出的基于菌紫质膜联合子波变换相关器来实现(如图2所示)。目标图像 $t(x_1, y_1)$ 和参考图像 $r(x'_1, y'_1)$ 分别经傅里叶变换后其频谱以 $2\theta_1$ 的夹角重叠在相关面 $(x_2,$

$y_2$ ), 即菌紫质膜所在平面。则 $(x_2, y_2)$  面上的光复振幅分布为<sup>[3]</sup>:

$$A_{in} = \frac{1}{\lambda_1 f} T \left[ \frac{x_2}{\lambda_1 f}, \frac{y_2}{\lambda_1 f} \right] \exp \left[ \frac{i2\pi x_2 \sin \theta_1}{\lambda_1} \right] + \frac{1}{\lambda_1 f} R \left[ \frac{x_2}{\lambda_1 f}, \frac{y_2}{\lambda_1 f} \right] \exp \left[ \frac{-i2\pi x_2 \sin \theta_1}{\lambda_1} \right] = \frac{1}{\lambda_1 f} T(u, v) \exp(i2\pi f u \sin \theta_1) + \frac{1}{\lambda_1 f} R(u, v) \exp(-i2\pi f u \sin \theta_1) \quad (7)$$

其中  $T(u, v)$  和  $R(u, v)$  分别为  $t(x_1, y_1)$  和  $r(x_1, y_1)$  的傅里叶变换,  $f$  为傅里叶变换透镜的焦距,  $\lambda_1$  为记录光波长。菌紫质膜上的光强分布  $I(u, v)$  为复振幅分布的平方。在一级近似下, 菌紫质膜的光透过率  $G(u, v)$  正比于光强分布<sup>[3]</sup>。幅度分布为  $|H_{s_x, s_y}(u', v')|^2$  的平面光作为读出光(波长为  $\lambda_2$ ) 以  $\theta_2$  角入射到菌紫质膜上, 其中  $u' = x_2/\lambda_2 f = \lambda_1 u/\lambda_2, v' = y_2/\lambda_2 f = \lambda_1 v/\lambda_2$ , 入射角  $\theta_2$  满足布拉格衍射条件,  $\lambda_1 \sin \theta_2 = \lambda_2 \sin \theta_1$ 。这样菌紫质膜后表面的光振幅分布为:

$$A_{trans} \propto G(u, v) |H_{s_x, s_y}(u', v')|^2 \exp(i2\pi f u' \sin \theta_2) \propto \exp(i2\pi f u' \sin \theta_2) |H_{s_x, s_y}(u', v')|^2 \{ |T(u, v)|^2 + |R(u, v)|^2 + T(u, v) R^*(u, v) \exp(i4\pi f u \sin \theta_1) + T^*(u, v) R(u, v) \exp(-i4\pi f u \sin \theta_1) \} \quad (8)$$

如果取扩因子  $s'_x = \lambda_1 s_x/\lambda_2, s'_y = \lambda_1 s_y/\lambda_2$ , 那么  $|H_{s_x, s_y}(u', v')|^2 = |H_{s'_x, s'_y}(u, v)|^2$ 。为了得到输出平面 $(x_3, y_3)$  上的光振幅分布  $A_{out}$ , 只要让  $A_{trans}$  再经过一次傅里叶变换, 则可得到:

$$A_{out} \propto \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2 f^3} \delta(x_3 + f \sin \theta_1, y_3) \circlearrowleft [w_t \circlearrowleft w_t^* + w_r \circlearrowleft w_r^* + w_t \circlearrowleft w_r^* \circlearrowleft \delta(x_3 + 2f \sin \theta_2, y_3) + w_r^* \circlearrowleft w_r \circlearrowleft \delta(x_3 - 2f \sin \theta_2, y_3)] \quad (9)$$

式中 $\circlearrowleft$ 为卷积算符。第三项和四项分别代表一个输入信号振幅分布与另一个输入信号的复共轭的卷积。这就是要探测的目标图像和参考图像的识别判据, 它和其余各项因  $\delta$  函数而相互分开。

### 3 实验和结论

菌紫质膜的全息图有两种类型, 第一种是基于初始 B 态, 用黄光(570 nm) 诱导 B-M 转换, 形成 B 型全息图; 另一种基于 M 态, 用蓝光(412 nm) 诱导 M-B 转换, 形成 M 型全息图,

这种全息图的形成事先需用波长在初始 B 态的吸收带内的光泵浦菌紫质分子到 M 态。M 型全息用蓝光记录, 读出光(红光或黄光) 同时可作为泵浦光而不会破坏形成的全息图<sup>[3]</sup>。由于 M 型全息图比 B 型全息更适合作为模式识别<sup>[3]</sup>, 所以作者采用 M 型全息。其实验装置如图 2 所示, 菌紫质膜位于傅里叶频谱面。由 He-Cd 激光器 ( $\lambda_1 = 441.6$  nm, 功率为 80 mW) 来的光经分束器(BS) 分成两束等光强的相干光作为记录光, 由 He-Ne 激光器 ( $\lambda_2 = 632.8$  nm, 功率为 10 mW) 提供读出光同时作为泵浦光,

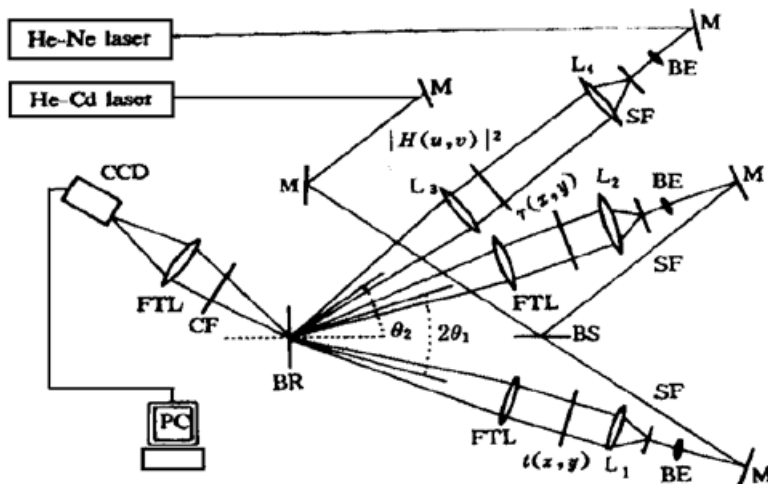


Fig. 2 Experimental setup of a dual-axis joint-wavelet-transform correlator for real-time pattern recognition with BR-films

入射角满足布拉格条件。输出光经滤色片(CF)滤去蓝光,再经傅里叶透镜变换后由 CCD 读入进行处理。实验中把紫膜悬浮液(光密度为 24.4)用滴管滴到石英基片上,使其均匀铺展,干燥后即成膜。用椭偏仪测得厚度约为  $100 \mu\text{m}$ 。实验中所用子波为 Mexican-hat 子波:

$$h_s(x, y) = \frac{1}{s^2} \left[ \frac{x^2 + y^2}{s^2} - 2 \right] \exp \left[ - \frac{x^2 + y^2}{2s^2} \right] \quad (10)$$

其中扩缩因子  $s_x = s_y = s$ 。在傅里叶频域中, (10) 式为:

$$H(u, v) = 4\pi^2 s^2 (u^2 + v^2) \exp[-2\pi^2 s^2 (u^2 + v^2)] \quad (11)$$

在实验中,把  $|H_s(u, v)|^2$  先作二值化处理,然后再制成照相底片作为光调制器,利用透镜  $L_3$  来获取合适的扩缩因子  $s$ 。二值化的几何图形“ $\Delta$ ”和“ $\Delta+$ ”分别作为目标图像  $t(x_1, y_1)$  和参考图像  $r(x_1', y_1')$ 。实验结果由 CCD 经视霸卡读入计算机进行处理。为了比较傅里叶变换相关器和子波变换相关器的性能,先进行了传统的双轴傅里叶变换模式识别实验,其相关的输出及其三维光强分布如图 3 所示。加上子波滤波后,对应的双轴子波变换相关器的相关输出如图 4 所示。实验结果表明,后者的峰值比前者要尖锐得多。定义三维光强分布曲线上,当其输出值为相关最大峰值一半时相关峰输出的点数为全带宽。由图 3(b) 和图 4(b) 可以估计传统的联合双轴傅里叶变换模式识别系统的相关峰的全带宽是联合子波变换相关器的 2.38 倍。可见后者有更好的识别能力。



Fig. 3 (a) Correlation output and (b) its corresponding 3-D plot obtained using conventional Fourier matched filter



Fig. 4 (a) Correlation output and (b) its corresponding 3-D plot obtained using wavelet matched filter

本文把菌紫质膜优异的光学性质和联合子波变换技术结合起来,建立了用菌紫质膜作实时全息记录材料的光学模式识别系统。实验结果表明菌紫质膜光学模式识别系统用子波变换技术比传统的傅里叶变换技术,具有较高的识别能力。另外如采用程控变焦透镜系统来获取合适的扩因子和液晶电视作为空间光调制器来实时控制输入的参考图像和目标图像,则可以更好地满足实时模式识别的要求。

## 参 考 文 献

- [1] R. Thoma, N. Hampp, C. Brauchle *et al.*, Bacteriorhodopsin films as spatial light modulators for nonlinear-optical filtering. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6) : 651~ 653
- [2] 章献民, 叶险峰, 陈抗生, 光敏细菌视紫红质及其在光计算与光存贮中的应用. *光电子·激光*, 1994, **5**(4) : 213~ 219
- [3] N. Hampp, R. Thoma, C. Brauchle *et al.*, Real-time holographic pattern recognition with bacteriorhodopsin films. *Proc. SPIE*, 1992, **1732** : 260~ 270
- [4] Y. Sheng, D. Roberge, H. Szu *et al.*, Optical wavelet transform. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(9) : 1840 ~ 1845
- [5] E. Freysz, B. Pouligny, F. Argoul *et al.*, Optical wavelet transform of fractal aggregates. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(7) : 745~ 748
- [6] J. Widjaja, Y. Tamita, Real-time wavelet-matched filtering using photorefractive four-wave mixing. *Proc. SPIE*, 1995, **2529** : 285~ 289
- [7] 李 骏, 张阅春, 胡家升等, 基于联合子波变换的目标轮廓抽取技术. *光学学报*, 1995, **15**(11) : 1552 ~ 1555

## Real-Time Pattern Recognition with BR-Based Joint Wavelet-Transform

Chen Xiandong<sup>1</sup>   Zhang Xianmin<sup>1</sup>   Chen Kangsheng<sup>1</sup>   Li Qingguo<sup>2</sup>

1, *Information and Electronic Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027*  
 2, *Physiology and Biophysics Department, Fudan University, Shanghai 200433*

(Received 27 September 1996; revised 27 March 1997)

**Abstract** The bacteriorhodopsin (BR) is the light-transducing protein which is a novel reversible medium for holographic recording and is well suited to holographic pattern recognition. Wavelet transform is a very useful method for image features extraction and pattern recognition. In this paper, we proposed a new pattern recognition system using BR-based dual-axis wavelet transform, and give the experimental result.

**Key words** bacteriorhodopsin, wavelet transform, dual-axis wavelet transform, pattern recognition.