

白光彩色联合变换相关实验中的分通道方法*

翟宏琛^{1), 3)} 母国光^{1), 3)} 朱秀山^{1), 3)} 张铁群^{1), 3)}
康 辉^{2), 3)} 战元龄^{2), 3)}

1), 南开大学现代光学研究所, 天津 300071
2), 南开大学物理系, 天津 300071
3), 教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300071

摘 要 提出了在彩色联合变换相关中, 使用光栅对彩色图像进行分通道处理的方法, 讨论了实现此方法对光源、滤色片的限制, 并基于此讨论提出了一种使用三色光栅图像编码的分通道解决方法。实验的结果表明, 这种方法不但降低了对光源的限制, 而且对取向不同的功率谱也便于进行分通道并行处理, 包括并行地使用零级功率谱进行彩色图像的仅形状相关。

关键词 彩色联合变换相关, 分通道, 三色光栅, 图像编码。

1 引 言

自然界的物体不但具有形状特性, 而且具有色彩特性, 因此研究彩色物体的相关识别有利于提高识别真实物体的能力。这方面的工作有基于匹配滤波器的彩色相关识别系统^[1-5], 此外, 由于联合变换相关器(JTC)^[6, 7]的实时、易于实现等特点, Yu^[8, 9]等提出了基于彩色相干光照明的彩色联合变换相关(CJTC)识别系统。彩色相干光照明的彩色联合变换相关要求二至三种不同波长的激光光源, 因此实现起来比较困难, 同时也影响了系统的灵活性及适应能力。本文提出了白光光源照明条件下使用光栅分频实现多通道彩色联合变换相关的方法。在此方法中, 经光栅色散后的彩色图像经过傅里叶变换, 在输出面上分别取各种颜色的一级频谱, 并且用滤色片滤色, 可以形成三个并行处理通道进行联合变换相关处理。并针对上述实验, 对光源尺寸和滤色片的带宽进行了理论分析和计算, 提出了使用三色光栅对图像编码来实现彩色联合变换相关的方法。

2 光路及工作原理

图 1 为白光照明光栅分频的彩色联合变换相关的光路图。白光可认为是红、绿、蓝三色的合成光波, 其经过透镜 L_1 准直后的光场为:

$$s = \sum_i E_i \exp(-jkiz)$$

* 国家科委 863 高科技项目及高等学校博士学科点专项科研基金资助课题。

收稿日期: 1997-10-21; 收到修改稿日期: 1998-05-13

其中, i 为 r 、 g 、 b , 分别代表红、绿、蓝三种基色。设物函数为:

$$f(\alpha, \beta) = \sum_i f_i(\alpha, \beta)$$

其中, α 、 β 为物平面坐标。照明光经透镜 L_1 准直通过图像后, 其光场为:

$$f_t = \sum_i s_i \sum_i f_i(\alpha, \beta)$$

照明光准直后通过光栅, 若只考虑光栅面上的正一级衍射:

$$s'_i = E'_i \exp[-ik_i(x \sin \theta_i \cos \alpha + y \sin \theta_i \sin \alpha + z \cos \theta_i)]$$

其中 θ_i 为衍射光与 z 轴的夹角, α 为衍射光在光栅平面的投影和 x 轴的夹角, 则图像通过光栅后的函数 f_c 为:

$$f_c = f(\alpha, \beta) E'_r \exp[-jk_r(x \sin \theta_r \cos \alpha_r + y \sin \theta_r \sin \alpha_r + z \cos \theta_r)] + f(\alpha, \beta) E'_g \exp[-jk_g(x \sin \theta_g \cos \alpha_g + y \sin \theta_g \sin \alpha_g + z \cos \theta_g)] + f(\alpha, \beta) E'_b \exp[-jk_b(x \sin \theta_b \cos \alpha_b + y \sin \theta_b \sin \alpha_b + z \cos \theta_b)] \tag{1}$$

函数 f_c 通过透镜 L_2 进行傅里叶变换形成空间频谱, 其经过滤色片后的输出结果是:

$$F = F_r(\xi - \xi_r, \eta - \eta_r) + F_g(\xi - \xi_g, \eta - \eta_g) + F_b(\xi - \xi_b, \eta - \eta_b)$$

其中 $\xi_i = (\lambda f / 2\pi) k_i \sin \theta_i \cos \alpha_i$, $\eta_i = (\lambda f / 2\pi) k_i \sin \theta_i \sin \alpha_i$,

ξ - η 平面为谱平面, ξ_i 、 η_i 为基色谱中心坐标, f 为透镜 L_2 的焦距。则由液晶光阀(LCLV)接收到的功率谱为:

$$FF^* = F_r(\xi - \xi_r, \eta - \eta_r) F_r^*(\xi - \xi_r, \eta - \eta_r) + F_g(\xi - \xi_g, \eta - \eta_g) F_g^*(\xi - \xi_g, \eta - \eta_g) + F_b(\xi - \xi_b, \eta - \eta_b) F_b^*(\xi - \xi_b, \eta - \eta_b) \tag{2}$$

可见, 在液晶光阀的写入面上得到分离的三个谱, 用准直相干读出红、绿、蓝三个通道的频谱, 并分别通过逆傅里叶变换便可得到三个通道的相关结果。

3 对光源的要求

设光源为一点光源 $\delta(x - x', y - y')$, x 、 y 为光源平面坐标, x' 、 y' 这发光点坐标。由图 1 可知, 当点光源照明图像时, 在液晶光阀输入面得到的光场分布 $u(\xi, \eta, x', y')$ 为:

$$u = \iiint \delta(x - x', y - y') h_1(x, y, x_1, y_1) f(\alpha, \beta) h_2(\alpha, \beta, x_2, y_2) dx dy dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 d\alpha d\beta$$

其中:

$$h_1(x, y, x_1, y_1) = \exp\left\{\frac{j\pi}{\mathcal{M}_1}[(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2]\right\} \exp\left\{\frac{-j\pi}{\mathcal{M}_1}(x_1^2 + y_1^2)\right\} \times \exp\left\{\frac{j\pi}{\mathcal{M}_1}[(\alpha - x_1)^2 + (\beta - y_1)^2]\right\}$$

$$h_2(\alpha, \beta, x_2, y_2) = \exp\left\{\frac{j\pi}{\mathcal{M}_2}[(x_2 - \alpha)^2 + (y_2 - \beta)^2]\right\} \exp\left\{\frac{-j\pi}{\mathcal{M}_2}(x_2^2 + y_2^2)\right\} \times \exp\left\{\frac{j\pi}{\mathcal{M}_2}[(\xi - x_2)^2 + (\eta - y_2)^2]\right\}$$

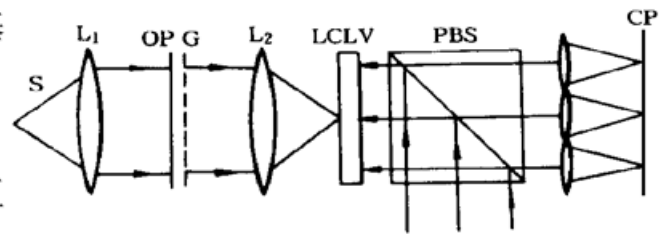


Fig. 1 The set-up of CJTC using conventional grating for channeling. S: light source, OP: object plane, G: grating, L: lens, PBS: polarized beam splitter, CP: correlation plane

将 $h_1(x, y, x_1, y_1)$ 、 $h_2(\alpha, \beta, x_2, y_2)$ 分别代入 $u(\xi, \eta, x', y')$, 积分得:

$$u(\xi, \eta, x', y') = C_0 \iint f(\alpha, \beta) \exp\left[-\frac{2j\pi}{f_1}(\alpha x' + \beta y')\right] \exp\left[-\frac{2j\pi}{f_2}(\alpha \xi + \beta \eta)\right] d\alpha d\beta = C_0 \mathcal{A}f(\alpha, \beta) \odot \delta\left(\xi - \frac{f_2 x'}{f_1}, \eta - \frac{f_2 y'}{f_1}\right) \quad (3)$$

其中, f_1 、 f_2 分别为透镜 L_1 和 L_2 的焦距, C_0 为一常数, $\mathcal{A}f(\alpha, \beta)$ 是 $f(\alpha, \beta)$ 的傅里叶变换, \odot 表示卷积。上式是点光源照明时在液晶光阀写入面上得到空间频谱, 若光源为任意分布, 设其函数形式为 $S(x', y')$ 。则讨论光源对输出分布的影响时, 只需将上式在光源分布区域内对 x' 、 y' 积分即可。

下面就白光光源线度对实验的影响进行分析。为分析方便, 取物函数为

$$f(\alpha, \beta) = f_{01}(\alpha - a, \beta) + f_{02}(\alpha + a, \beta) \quad (4)$$

其中取 f_{01} 、 f_{02} 均为 δ 函数。则其傅里叶变换结果为:

$$\mathcal{A}f(\alpha, \beta) = \mathcal{A}f_{01}(\alpha - a, \beta) + \mathcal{A}f_{02}(\alpha + a, \beta) = \exp(i2\pi a \xi / f_2) + \exp(-i2\pi a \xi / f_2)$$

若光源函数为圆函数:

$$S(x, y) = \begin{cases} 1 & r < r_0 \\ 0 & r > r_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, r_0 为光源的半径。当光源为完全非相干光源时, 液晶光阀写入面上的光强是光源上所有各点源对应的光强结果的叠加。则对(3)式的强度积分, 可得光强分布(由于 C_0 为一常数, 分析方便起见, 以下把它忽略):

$$I(\xi, \eta, \lambda) = \iint \left| \mathcal{A}f(\alpha, \beta) \odot \delta\left(\xi - \frac{f_2 x'}{f_1}, \eta - \frac{f_2 y'}{f_1}\right) \right|^2 dx' dy' \quad (6)$$

将物函数的表达式(4)和光源函数的表达式(5)代入上式可得:

$$I(\xi, \eta) = 2 + 2 \frac{J_1(4\pi r_0 a / f_1)}{2r_0 a / f_1} \cos\left(\frac{4\pi a \xi}{f_2}\right) \quad (7)$$

根据对比度的定义:

$$V = [I_{\max}(\xi, \eta) - I_{\min}(\xi, \eta)] / [I_{\max}(\xi, \eta) + I_{\min}(\xi, \eta)]$$

求得空间频谱的对比度:

$$V = \frac{J_1(\pi r_0 a / f_1)}{2r_0 a / f_1} \quad (8)$$

由上式可知光源的线度 r_0 对空间频谱的对比度有影响, 即图像的线度一定时, 光源线度的增加会引起空间频谱对比度的降低。

4 滤色片带宽的要求

根据图 1 所示的光路, 在液晶光阀写入面上得到的结果是光栅函数的傅里叶变换和物函数傅里叶变换的卷积, 即在各色光的光栅衍射谱上载有图像的空间频谱。在各色光的一级衍射处用滤色片滤色后, 则得到三个基色通道的空间频谱, 每一空间频谱的载频的范围是滤色片的带宽 $\Delta\lambda$ 。设光栅函数为:

$$G(\alpha) = 1 + \cos(2\pi q \alpha) = 1 + \exp(i2\pi p \alpha) + \exp(-i2\pi p \alpha)$$

其傅里叶变换为:

$$\mathcal{F}[G(a)] = \delta(p, q) + \delta(p - p_0, q) + \delta(p + p_0, q)$$

对于在 p_0 处波长是 λ 的正一级衍射, 在液晶光阀写入面上的坐标为:

$$\xi_\lambda = \mathcal{N}^2 p_0$$

在联合变换相关中, 两个同基色物体在液晶光阀写入面上的强度分布为:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_\lambda \cos \left[\frac{4\pi}{\mathcal{N}^2} (a\Delta\xi) \right] d\lambda$$

对于任一波长, 其条纹极大处应满足:

$$(4\pi/\mathcal{N}^2)(a\Delta\xi) = 2k\pi, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

即: $\Delta\xi = k\mathcal{N}^2/2a$

则在液晶光阀写入面上一级衍射条纹极大的坐标应是:

$$\xi_{\max} = \xi_\lambda + \Delta\xi = \mathcal{N}^2 p_0 + k\mathcal{N}^2/2a$$

若由 λ_1 的 k 级条纹坐标和 λ_2 的 $k+1$ 级坐标重合时决定 $\Delta\lambda$, 则可由:

$$\lambda_1 f/2p_0 + k\lambda_1 f/2a = \lambda_2 f/2p_0 + (k+1)\lambda_2 f/2a$$

得到: $\Delta\lambda = \lambda_2/(2ap_0 + k)$ (9)

设物函数的极限空间频率为 q_0 , 其对应的空间坐标为 $\mathcal{N}^2 p_0 + \mathcal{N}^2 q_0$ 。为了不丢失谱信息, 认为在 $\mathcal{N}^2 p_0 + \mathcal{N}^2 q_0$ 处是 λ_1 的 k 级:

$$k\lambda_1 f/2a = \lambda_1 f/2q_0$$

得: $k = 2aq_0$

将其代入(9)式, 并用中心波长 λ_0 表示, 得:

$$\Delta\lambda = \lambda_0/2a(p_0 + q_0) \quad (10)$$

根据定取样定理, 光栅的空间频谱应大于、等于物函数空间极限频率的二倍, 所以在光栅一级衍射处的滤色片的最大带宽应该满足条件:

$$\Delta\lambda \leq \lambda_0/6aq_0 \quad (11)$$

5 图像编码的分通道方法

根据本文的实验条件, 设图像间距 $a = 10 \text{ mm}$, 透镜 L_1 的焦距 $f_1 = 250 \text{ mm}$, 光栅频率为 $p_0 = 50 \text{ l/mm}$, 图像的极限空间频率为 $q_0 = 25 \text{ l/mm}$, 取红光滤色片中心波长 $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, 由(8)式可以计算出在对比度为 $V = 0.6$ 的一般条件下, 即

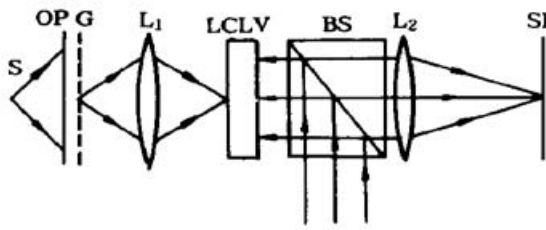
$$2r_0a/\mathcal{N}^2 f_1 = 0.3$$

若使用非相干白光光源照明, 则光源线度应满足:

$$r_0 \leq 0.3\mathcal{N}^2 f_1/2a = 4.5 \mu\text{m}$$

将以上实验条件代入(11)式可得对滤色片的带宽要求为 $\Delta\lambda \leq 0.4 \text{ nm}$ 。可见, 在一般条件下要求光源半径的数量级是微米量级, 对滤色片的带宽要求在亚纳米量级, 在本实验室现有的条件下满足上述条件有一定的难度, 因此, 图 1 所示实验方法虽然可行, 但实现起来较困难。

针对上述实验方法中存在的一些困难, 本文提出了一种基于彩色图像编码的联合变换相关分通道解决办法。该办法的关键是通过三色光栅^[10]对彩色图像进行空间频率编码, 用液晶光阀直接接收物体的编码像, 然后由相干光读出并分通道进行相应的联合变换相关处理。其



光路如图 2 所示。

三色光栅是由三种红黑相间、绿黑相间、蓝黑相间的光栅条纹按不同取向叠加而成的，其表达式可写为：

$$\tau_g(x, y) = g_r(x) + g_g(y) + g_b(x, y)$$

式中，

$$g_r(x) = k_1\{1/2 + (1/2) \operatorname{sgn} [\cos (\omega x)]\}$$

$$g_g(y) = k_2\{1/2 + (1/2) \operatorname{sgn} [\cos (\omega y)]\}$$

$$g_b(x, y) = k_3\{1/2 + (1/2) \operatorname{sgn} [\cos (\omega_1 x + \omega_2 y)]\}$$

k_1 、 k_2 和 k_3 为比例系数， ω 为空间频率， ω_1 和 ω_2 分别是

ω 在 x 和 y 方向的分量。该三色光栅应与物平面紧贴，对不同色彩图像部分以不同取向的空间频谱进行编码，并经 L_1 成像于液晶光阀的写入面。设物函数为：

$$f(x, y) = \sum_i f_i(x, y), \quad i = r, g, b$$

用准直相干光从液晶光阀读出，则读出光的振幅可表示为：

$$f_R = f'_r(x, y)g'_r(x) + f'_g(x, y)g'_g(y) + f'_b(x, y)g'_b(x, y) \quad (12)$$

式中， f'_i 、 g'_i 分别为 f_i 、 g_i 在液晶光阀上成的像。编码图像经相干光读出后，由 L_2 进行傅里叶变换，若只选取空间频谱的一级和零级通过，则在频谱面上形成与三色光栅相对应的取向不同而代表三个通道的三组频率谱和零级频率谱，如图 3 所示。

若用 CCD 作接收器，则得到功率谱：

$$\begin{aligned} FF^* = & C_1[F'_r(\xi - \xi_r, \eta)F_r^*(\xi - \xi_r, \eta) + \\ & F'_r(\xi + \xi_r, \eta)F_r^*(\xi + \xi_r, \eta)] + \\ & C_2[F'_g(\xi, \eta - \eta_g)F_g^*(\xi, \eta - \eta_g) + \\ & F'_g(\xi, \eta + \eta_g)F_g^*(\xi, \eta + \eta_g)] + \\ & C_3[F'_b(\xi - \xi_b, \eta - \eta_b)F_b^*(\xi - \xi_b, \eta - \eta_b) + \\ & F'_b(\xi + \xi_b, \eta + \eta_b)F_b^*(\xi + \xi_b, \eta + \eta_b)] \quad (13) \end{aligned}$$

式中， C_1 、 C_2 、 C_3 为常数， ξ - η 平面为谱平面， $\xi_b = \xi_r / \sqrt{2}$ ， $\eta_b = \eta_g / \sqrt{2}$ ， F'_i 、 G'_i 分别为 f'_i 、 g'_i 的傅里叶变换。

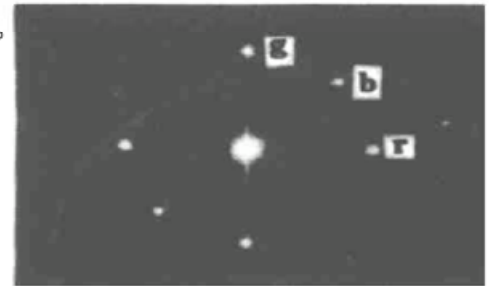


Fig. 3 The spectrum of the encoded image. r: The channel of red colour, g: The channel of green colour, b: The channel of blue colour

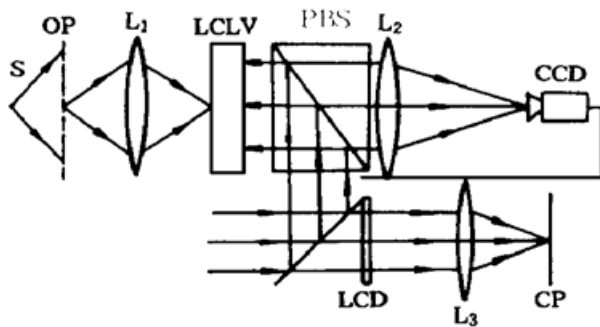


Fig. 4 The set-up of CJTC with encoded image.

S: white light source, OP: object plane, CP: correlation plane, L: lens, LCLV: liquid crystal light valve, BS: beam splitter, PBS: polarized beam splitter, LCD: liquid crystal display

在上述方法中，彩色图像经编码后成像于液晶光阀上，由相干光读出后进行联合变换相关，编码像的对比度稍微小些对实验影响不大。而且由于三色光栅的使用，理想情况下，在频谱面不需三原色空间滤波器滤波，所以可以降低上述分析中对实验条件的要求。同时，在傅里叶频谱面上经编码后的功率谱具有取向不同的空间通道，便于实验中的分通道处理。

为了验证新方法的可行性，使用将彩色图像编码后的黑白胶片作为输入物进行了验证实验，它的光路如图 4 所示。

图中，S 为白光光源，用于照射彩色编码后的黑

白胶片 OP。L₁ 使编码后的图像成像于液晶光阀的写入面上, 编码图像的空间频率应能与液晶光阀的分辨率匹配。编码图像由相干光读出及经 L₂ 进行傅里叶变换后, 形成空间频谱如图 3 所示。由 CCD 接收功率谱并传输给 LCD, 使用平行的相干光照射 LCD, 并经透镜进行逆傅里叶变换, 在透射焦面上得到相关结果。

实验中, 未经编码的图像如图 5 所示。图 5(a) 中的图形是完全相同的两片树叶, 颜色是由绿色和蓝色组成的复色。图 5(b) 中的图形是形状完全相同的两片树叶, 而颜色不同, 右边树叶的颜色是由绿色和蓝色组成的复色, 左边树叶的颜色是由绿色和红色组成的复色。

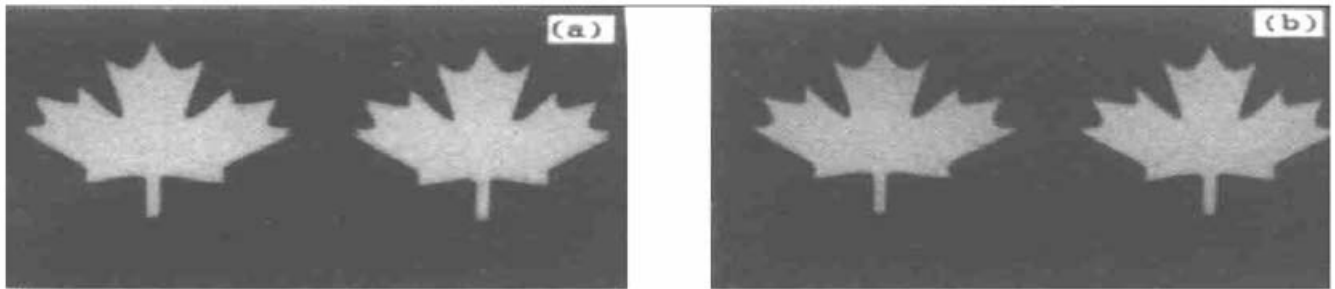


Fig. 5 The images to be encoded. (a) Two leaves with the same shape and colour (Both consist of green and blue primary colour), (b) Two leaves with the same shape and different colours (The left consists of red and green primary colour, and the right consists of green and blue primary colour)

用图 5 所示的图像经编码后作为输入图像时, 各通道的相关结果分别如图 6、图 7 所示。

上述结果中, (a) 图像中的两树叶由于形状和颜色完全一样, 它们在零级及绿、蓝三个通道上的相关很强, (b) 图像中的两树叶由于形状一样, 而颜色不同, 所以其在零级通道上的相关很强, 此外, 两树叶的颜色都含有绿色成分, 其在绿色通道上的相关也很强, 而其它通道则没有相关。由验证实验的结果可以看出, 利用三色光栅进行图像编码的彩色联合变换相关, 很好地解决了彩色联合变换相关中的分通道问题, 而且使实验变得简单易行。此外, 使用这种方法在傅里叶频谱面上得到的零级功率谱通道还可以用于并行地实现彩色识别图像与参考图像间的仅形状相关。

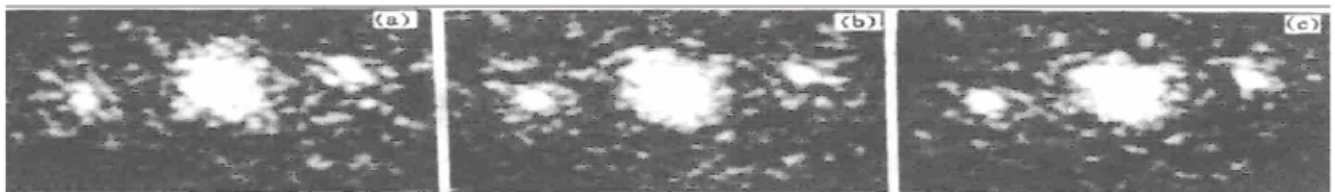


Fig. 6 The correlation of the two leaves in the Fig. 5 (a) on different channels. (a) The correlation on the channel of zero-order, (b) The correlation on the channel of green colour, (c) The correlation on the channel of blue colour

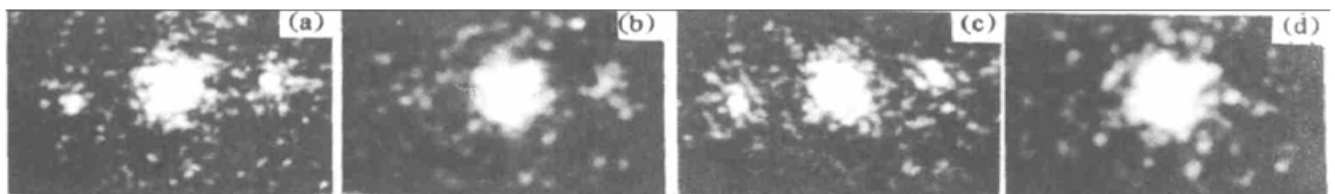


Fig. 7 The correlation of the two leaves in the Fig. 5 (b) on different channels. (a) The correlation on the channel of zero-order, (b) The correlation on the channel of red colour, (c) The correlation on the channel of green colour, (d) The correlation on the channel of blue colour

参 考 文 献

- [1] Yu F T S, Chao T H. Color signal correlation detected by matched spatial filtering. *Appl. Phys. (B)*, 1983, **32**(1) : 1~ 5
- [2] Yu F T S, Lu X. Large-capacity real-time spatial-spectral scanning optical correlator. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(5) : 812~ 816
- [3] Yu F T S, Javidi B. Experiments on real-time polychromatic signal detection by matched spatial filtering. *Opt. Commun.*, 1986, **56**(6) : 384~ 388
- [4] Millian M S, Campos J, Ferreira C *et al.*. Matched filter and phase only filter performance in color image recognition. *Opt. Commun.*, 1989, **73**(4) : 277~ 284
- [5] Weaver C S, Goodman J W. A technique for optically convolving functions. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(8) : 1248~ 1249
- [6] Rau J E. Detection of differences in real distribution. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(9) : 1490~ 1493
- [7] Yu F T S, Lu X J. A real-time programmable joint transform correlator. *Opt. Commun.*, 1984, **52**(1) : 10~ 16
- [8] Yu F T S, Jutamulia S, Yelamarty R V *et al.*. Adaptive joint transform correlator for real-time color pattern recognition. *Opt. Laser Technol.*, 1989, **21**(3) : 189~ 192
- [9] Yu F T S, Yang Zhaomi, Pan Kun. Polychromatic target identification with a color liquid-crystal-TV-based joint transform correlator. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(11) : 2170~ 2172
- [10] Mu G G, Zheng Z L, Liu F L *et al.*. A physical method for colour photography. *Trends in Optics*, Anna Consortini. ed, San Diego, USA: Academic press Inc. U.S.A., 1996

Discussion on the Channeling in the Experiment of Color JTC

Zhai Hongchen^{1), 3)} Mu Guoguang^{1), 3)} Zhu Xiushan^{1), 3)} Zhang Tiejun^{1), 3)}
 Kang Hui^{2), 3)} Zhan Yuanling^{2), 3)}

1), *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*

2), *Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*

3), *Opto-Electronic Information Science Laboratory, Nankai University, Tianjin 300071*

(Received 21 October 1997; revised 13 May 1998)

Abstract The restriction on white light source and colour filter in a colour joint transform correlator (CJTC) is discussed. Based on this discussion, a new method of channeling using a three-color grating for pattern encoding is suggested. It is concluded from the experimental result that, by using this new method, not only the restriction on the experimental condition is relieved, but also the power spectra of the encoded pattern are easy for experimental processing in parallel channeling. Besides, the zero order power spectrum forms an important channel for the shape-only correlation.

Key words colour joint transform correlation, channeling, three-colour grating, pattern encoding.