

彩色图像的非相干光相关识别

张应平 丁剑平

(南京大学物理系, 南京 210093)

摘 要 提出一种用非相干光系统识别彩色图像的方法。将彩色图像分解成三个单色像处理, 设计一可实现的仅相位型光学传递函数, 对其进行带通优化, 从而提高信噪比并使相关峰锐化。通过一对滤波器来合成该光学传递函数。获得了彩色图像相关识别的实验结果。

关键词 图像识别, 非相干光相关, 光学传递函数。

1 引 言

现实世界的物体大多为彩色的, 而且它们发出的光也是非相干光, 因此用非相干光系统相关识别彩色图像具有很重要的现实意义。Shi^[1]、Case^[2]、Ishii 与 Murata^[3]、Yu 与 Chao^[4]对彩色图像相关进行过早期的研究, 但都限于用相干光系统。与相干光系统相比, 非相干光相关器有很多优点, 它没有相干光系统中不可避免的相干噪音, 不需要非相干光——相干光转换器, 不受光学元件缺陷和滤波器错位产生的相位差的影响, 因此非相干光系统结构更紧凑, 调节更容易。不过, 在理论上非相干光相关器也存在着很大的困难。非相干光系统的光学传递函数自身具有低通特性^[5, 6], 不可避免地对高频成分产生严重抑制, 从而使输出面上的相关信号峰平滑乃至不可辨别。这是一个严重的困难, 以至于目前国际上绝大部分有关光学图像的识别工作集中在相干光系统上。此外, 虽然非相干光系统对系统噪声如透镜瑕疵、灰尘、透镜及滤波器的位置偏差等有很好的耐受能力, 但和相干光系统一样对于输入面上的噪音仍很敏感^[7]。

以前我们曾提出用非相干光系统识别灰色图像的新途径^[8, 9], 得到了很好的图像识别结果。在本文中将该原理推广到彩色图像的识别上。将可见光彩色图像分解成三个单色像, 对三个单色像分别进行相关识别, 从而获得对原彩色图像的识别信息, 是一种可行的方法^[10]。根据这个方法通过干涉滤波片将彩色图像分解成 436 nm、546 nm、578 nm 三个单色像。针对每个单色像设计可实现的仅相位型光学传递函数。为提高对输入噪声的抗干扰力, 对光学传递函数进行带通优化。获得的光学传递函数可通过一对正负滤波器合成^[11, 12]。实验表明所设计的滤波器对彩色图像能产生尖锐的相关峰值信号, 得到了满意的识别效果。

2 原 理

2.1 非相干光相关识别的优点及困难

采用的非相干光系统光路如图 1 所示。

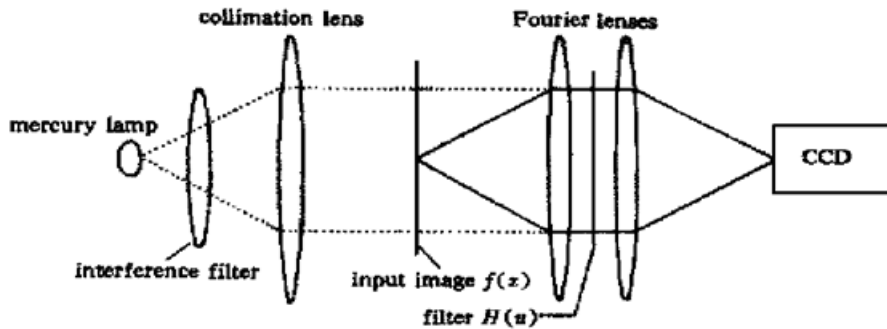


Fig. 1 Incoherent light correlation system. The focal length of the Fourier lenses is 1000 mm

为简单起见,在数学上输入的光场分布取一维函数。设输入面上的彩色图像可唯一地由三种单色成分光场分布的集合表示: $f(x) = \{f_1(x), f_2(x), f_3(x)\}$ 。如果系统能同时识别三个单色成分像,则输入的彩色图像可判别为目标图像。输出与输入有如下卷积关系:

$$c_\alpha(x) = |f_\alpha(x)|^2 \otimes |h_\alpha(x)|^2, \quad (1)$$

其中 $\alpha = \{1, 2, 3\}$, \otimes 为卷积运算符, $c(x)$ 为相关强度, $|h(x)|^2$ 为系统点扩散函数。对(1)式作傅里叶变换得出频谱域关系式

$$C_\alpha(u) = [F_\alpha(u) \star F_\alpha(u)][H_\alpha(u) \star H_\alpha(u)], \quad (2)$$

其中 $F(u)$ 为 $f(x)$ 的傅里叶频谱, \star 为相关运算符, $H(u)$ 为相干传递函数,即滤波器的复透过率函数,并且 $H(u)$ 为 $h(x)$ 的傅里叶频谱。(2)式中第二个自相关是光学传递函数 $O(u)$,这样在非相干光相关中,光学传递函数而非滤波器自身直接扮演滤波的角色。由于滤波器函数的自相关构成光学传递函数,因此一般情况下,对一个所需要的光学传递函数很难找到一个滤波器来实现它。一个滤波器即使在相干光系统中是高通的,但用于非相干光系统时,所产生的光学传递函数却只能是低通的,因而无法获得尖锐的相关信号峰。这是非相干光系统用于图像相关识别的最大困难所在。

非相干光系统也有其优点。与相干光系统不同,非相干光系统使用扩展光源是具有多信息通道的系统,正是这种信息冗余度使非相干光系统能免除相干噪声的干扰并抑制透镜缺陷、灰尘对相关输出的不利影响。现在再来讨论滤波器对非相干光系统输出的影响。在实际光学系统中,空间域坐标 x 和频率域坐标 u 有关系式 $u = x/(\lambda f_F)$,其中 λ 为光波长, f_F 为透镜焦距。位置偏差导致 $H(u)$ 从 $H(x/\mathcal{N}_F)$ 变为 $H[x/(\mathcal{N}_F) - \Delta x/(\mathcal{N}_F), \Delta z]$,由 $H(u)$ 是 $h(x)$ 的傅里叶频谱这一关系,可以得出错位后的 $h'(x)$ 为

$$h'(x) = \exp\left[-\frac{i2\pi}{\mathcal{N}_F}(\Delta x)^2\right] \exp\left[\frac{-i2\pi}{\mathcal{N}_F^2}(\Delta z)x^2\right]h(x), \quad (3)$$

而非相干光系统的点扩散函数是 $|h(x)|^2$,从(3)式中可以知道 $|h(x)|^2$ 没有变。因此,非相干光系统不受滤波器位置偏差的影响,与相干光系统相比,透镜、滤波器的调节更容易。

2.2 光学传递函数的带通优化和滤波器的设计

采用仅相位型的光学传递函数将能获得尖锐的相关峰信号。但仅相位型光学传递函数的全带通特性会导致输入信号对输入噪声的信噪比降低。为此,对仅相位型光学传递函数加上

带通限制,在不严重损失相关峰的锐化特性的同时,保持较高的信噪比。根据用非相干光系统识别灰度图像的方法^[8]和直接循环搜索算法^[13],可以得到带通优化后的光学传递函数为

$$O'(u) = \begin{cases} a \exp[-i\mathcal{Q}(u)] & u = 0, \\ P(u) \exp[-i\mathcal{Q}(u)] & u \neq 0, \end{cases} \quad (a = bS/|I(0)|) \quad (4)$$

式中 S 为输出面区域面积, b 为输出面的偏置, $P(u)$ 为带通优化函数:

$$P(u) = \begin{cases} 1 & \text{让频率 } u \text{ 处的谱通过,} \\ 0 & \text{不让频率 } u \text{ 处的谱通过,} \end{cases}$$

$I(0)$ 为输入光强 $i(x) = |f(x)|^2$ 的傅里叶频谱 $I(u)$ 在 $u = 0$ 时的值, $\mathcal{Q}(u)$ 为 $I(u)$ 的相位。该光学传递函数可以消除输出相关平面上偏置值,使输出相关强度最小值为零。 $O'(u)$ 对应一实数点扩散函数,可以将该点扩散函数表示为

$$g'(x) = g_+(x) - g_-(x), \quad (5)$$

其中 $g_+(x)$ 是 $g'(x)$ 的正数部分的绝对值, $g_-(x)$ 是 $g'(x)$ 的负数部分的绝对值。这样 $g_+(x)$ 和 $g_-(x)$ 均为非负实数,从而可以得出可实现的正负滤波器

$$H_+(u) = \mathcal{F} \left\{ \sqrt{g_+(x)} \exp[i\alpha_+(x)] \right\}, \quad H_-(u) = \mathcal{F} \left\{ \sqrt{g_-(x)} \exp[i\alpha_-(x)] \right\}, \quad (6)$$

式中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换, $\alpha_+(x)$ 和 $\alpha_-(x)$ 可取任意的相位值(非相干光系统的点扩散函数是 $|h(x)|^2$, 不受相位的影响)。

为了减小滤波函数的动态范围,采用 Gercherg-Saxton^[14]算法迭代算出滤波器的相位值 $\alpha(u)$,使得滤波函数 $H(u)$ 的振幅值收敛于一小范围内,就得到了实际的正负滤波器 $H_+(u)$ 和 $H_-(u)$ 。将 $H_+(u)$ 和 $H_-(u)$ 产生的相关输出相减即可得到所需的尖锐的输出相关信号峰。

3 图像识别实验

3.1 准单色条件

由于滤波器面上有 $u = x/\lambda f_F$, u 为频率域坐标, x 为空间域坐标,所以滤波器的宽度 W 与 λ 成正比。即

$$\Delta W/W = \Delta\lambda/\lambda, \quad (7)$$

而 ΔW 必须小于抽样单元,即

$$\Delta W < W/N, \quad (8)$$

其中 N 为滤波器的抽样数($N \times N$)。由(7)式和(8)式,得到准单色条件:

$$\lambda/\Delta\lambda > N. \quad (9)$$

实验中使用高压汞灯作为光源,经过三个干涉滤光片($\Delta\lambda < 1 \text{ nm}$),满足准单色条件: $\lambda/\Delta\lambda > N$, ($N = 256$)。

3.2 实验结果

实验中选择彩色的南京大学校徽作为待识别目标物,如图 2 所示。另取一图案相同,颜色不同的校徽作为伪目标物,如图 3 所示。

如果原理中选择为红、绿、蓝三原色成分像,则可反映可见光景物全貌。考虑到一般彩色物体光谱连续,选择合适的三单色成分像也可达到识别的目的。本实验所用光源为高压汞灯,可见光波段 4 条主要谱线波长分别为 405 nm、436 nm、546 nm、578 nm,其中 436 nm、



Fig. 2 Emblem of Nanjing University to be recognized



Fig. 3 Faked emblem of Nanjing University

546 nm、578 nm 三条谱线比较强, 因此选择 436 nm、546 nm、578 nm 三条谱线。实验中, 采用一台 8 位 CCD 摄像机进行图像采集工作, 可获得 256×256 像素的具有 256 级灰度的图像。原图像经透射波长分别为 436 nm、546 nm 和 578 nm 的三个干涉滤光片滤色后成为三个单色像, 由 CCD 采样得三个单色像的强度分布, 分别标记如下

$$f_{436}(x_j, y_k), \quad f_{546}(x_j, y_k), \quad f_{578}(x_j, y_k), \quad [j \in (0, 255), k \in (0, 255)],$$

其中, 下标“436”、“546”、“578”指单色输入的相应波长, 指标 j 、 k 对应采集图像的像素坐标。获得了以上三个单色输入后, 可以利用前面介绍的算法得到 6 个相应的 $H_{\pm}(u)$, 用罗曼 III 型编码方法作出计算全息图, 经缩微后制成相应的三对正负滤波器。

每个单色像经正负滤波器滤波后的相关输出分布由 CCD 记录采集, 然后由计算机对正滤波器和负滤波器的输出进行相减运算即获得原图像在相应单色通道上的合成后的相关输出。判定一个彩色图像是否为待识别的真目标的判据是: 三个单色通道的相关输出同时为“真”, 即三个输出都在同一坐标处出现尖锐的信号峰。将三个输出相乘即实现逻辑“与”运算, 可得到一个称之为综合的相关分布。从综合相关分布中, 可以根据是否有尖锐的相关峰信号确定输入目标图像的真伪。

图 4 是用根据图 2 的图像数据设计的三对正负滤波器再对图 2 的目标像三个单色通道中的相关识别结果, 在三个通道中都获得了很尖锐的相关信号峰。

图 5 是三个波长通道的综合相关输出。图 6 是对伪物图 3 的综合相关输出。图 5 有尖锐的相关信号峰, 而图 6 中没有, 证明设计的滤波器不仅对图形而且对颜色都有较强的识别能力。

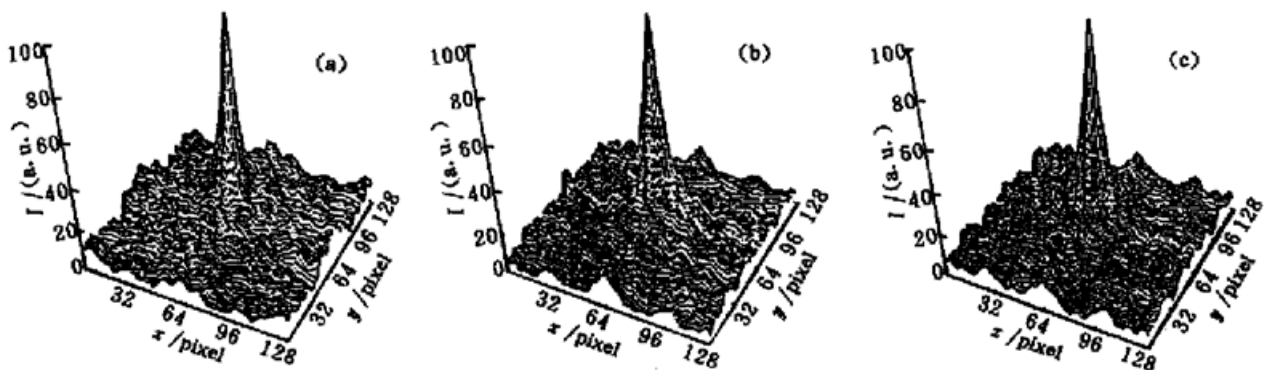


Fig. 4 Correlation output of the corresponding component images with three filters respectively. (a) Correlation output of the 436 nm-component image with 436 nm-filter, (b) Correlation output of the 546 nm-component image with 546 nm-filter, (c) Correlation output of the 578 nm-component image with 578 nm-filter

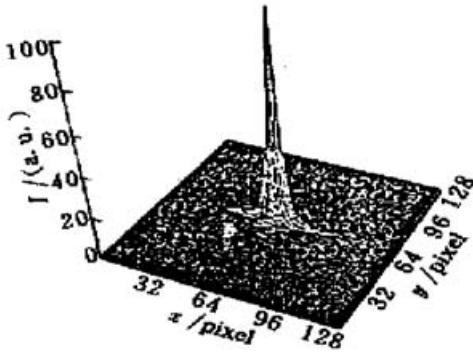


Fig. 5 Composite correlation output of the input image shown in Fig. 4

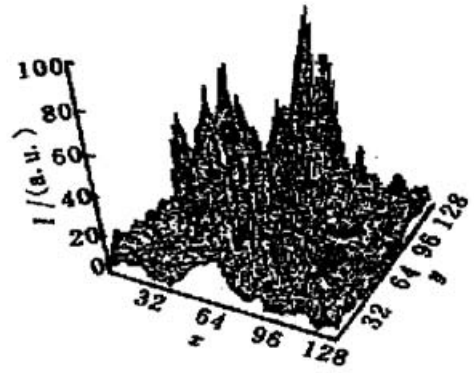


Fig. 6 Composite correlation output of the input image shown in Fig. 5

为检验所设计的滤波器对输入噪声的抗干扰能力, 在原图像加上偏差为 δ 的高斯噪声。图 7 为 $\delta^2 = E_{av}$ 的噪声像, 其中 E_{av} 为原物的平均强度。图 8 为三波长的综合识别结果。从图 5 和图 8 的对比可看出, 尽管噪声对图像的干扰很厉害, 但输出中的相关峰仍很清楚, 可以判别在噪声背景中存在待识别的目标像, 这表明本工作设计的带通优化滤波器对输入噪声有很好的抗干扰能力。



Fig. 7 Noise image with an additive Gaussian noise of variance $\delta^2 = E_{av}$, where E_{av} is the average intensity of the original image

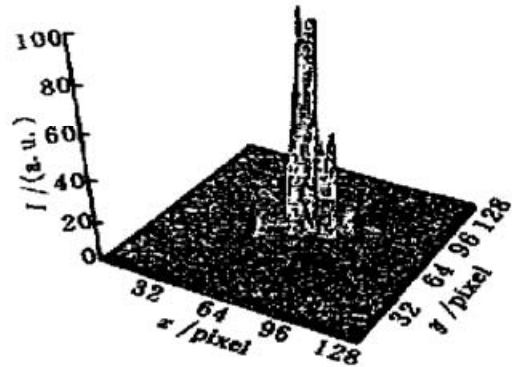


Fig. 8 Composite correlation output of the noisy input image shown in Fig. 7

4 讨 论

本文使用了三个单色滤波片将彩色图像分解为三个单色子图像, 分别制作出三个子图像的滤波器进行识别, 当三个子图像的认识信号都为真时, 认为原物为真。实验中看到当物形状不变而颜色改变时, 可以识别出图像的真伪, 实现了自然光下彩色图像的非相干识别。本实验结果是针对可见光景物, 其原理可以推广到非可见光景物, 只需在相应的波段上选择数个合适的单色像使选择的单色像能反映目标像的颜色特征。一般情况下, 选择三个单色像可以反映一个彩色像的彩色特征, 但如果实际需要, 也可以选择更多的特征单色像参与识别。CCD 的光谱响应会使不同单色像输出的测量值产生差异, 但由于进行识别实验时, 只在真伪物同一波长成分像间进行比较, 因此 CCD 的光谱响应不影响识别效果。

由于非相干光的低通特性及抗噪音差的性能, 输出相关信号峰平滑以至不可识别。为了得到尖锐的抗噪音的输出相关信号峰, 我们设计了一带通优化的仅相位型光学传递函数, 通过实际可制作的正负滤波器来合成该光学传递函数, 实验结果表明非常有效。最终所需的相关输出需要正负滤波器的输出叠加, 看来似乎不太方便, 实际上因为非相干光系统不受滤波

器位置的影响,两个滤波器可并排放置在滤波器平面上,通过计算机控制高速快门交替开关正负滤波器得到相关输出,从而可以实现图像的准实时识别。

参 考 文 献

- [1] Shi N K. Color-sensitive spatial filters. *Opt. Lett.*, 1978, **3**(3) : 85~ 87
- [2] Case S K. Pattern recognition with wavelength-multiplexed filters. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(12) : 1890 ~ 1894
- [3] Ishii Y, Murata K. Color-coded character-recognition experiment with wavelength-triplexed, reflection-type holographic filters. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(5) : 230~ 232
- [4] Yu F T S, Chao T H. Color signal correlation detection by matched spatial filtering. *Appl. Phy. (B)*, 1983, **32**(1) : 1~ 6
- [5] Katzir Y, Young M, Glaser I. Pattern recognition using incoherent OTF synthesis and edge enhancement. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(6) : 863~ 867
- [6] Gracht J V, Mait J N. Incoherent pattern recognition with phase-only filters. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(23) : 1703~ 1705
- [7] Chavel P, Lowenthal S. Noise and coherence in optical image processing. II. Noise fluctuations. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(6) : 721~ 732
- [8] Ding J, Itoh M, Yatagai T. Optimal incoherent correlator for noisy gray-tone image recognition. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(23) : 2411~ 2413
- [9] Ding J, Itoh M, Yatagai T. Optimal incoherent filtering for distortion-invariant image recognition. *Opt. Rev.*, 1997, **4**(5) : 539~ 542
- [10] Wang Z Q, Cartwright C M, Soutar C *et al.*. Real-time color image correlation with a color liquid-crystal television and a Fresnel holographic filter. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(5) : 715~ 717
- [11] Lohmann A W, Rhodes W T. Two-pupil synthesis of optical transfer functions. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(7) : 1141~ 1151
- [12] Mait J N, Rhodes W T. Pupil function design algorithm for bipolar incoherent spatial filtering. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(8) : 1474~ 1488
- [13] Ding J, Itoh M, Yatagai T. Design of optimal phase-only filters by direct iterative search. *Opt. Commun.*, 1995, **118**(1/2) : 90~ 101
- [14] Gerchberg P W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane picture. *Optik*, 1972, **35**(3) : 237~ 246

Color Image Correlation Recognition with Incoherent Light

Zhang Yingping Ding Jianping

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093)

(Received 27 November 1998; revised 5 February 1999)

Abstract A method of recognition of color image under incoherent optical system is proposed. A color image is decomposed into three monochromatic images to be processed, then a realizable phase-only optical transfer function (OTF) is designed. The passband of this OTF is optimized to increase the signal to noise ratio (SNR) and to yield a sharp correlation peak. This OTF can be synthesized by a couple of filters. The experimental results on color image recognition are presented.

Key words image recognition, incoherent optical correlation, optical transfer function.