

利用快速傅里叶变换算法仿真光学相关器

王海山 李鹏飞 陶巍

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 光学相关器在图像模式识别中具有广泛的应用, 包括匹配滤波相关器和联合变换相关器, 两种相关器在应用中各有优势。文章通过利用数学软件 MATLAB 的快速傅里叶变换算法编程仿真两种光学相关器, 得到实验结果的二维图像和三维图像, 并比较两种相关器的识别效果。

关键字: 匹配滤波相关器; 联合变换相关器; 傅里叶变换

中图分类号: TN971 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-4801(2011)02-032-04

光学图像识别是以傅里叶光学为基础, 通过光学傅立叶变换, 在指定的范围或区域内识别出预期可能出现或已经存在的某一个或多个目标。光学图像识别具有高度并行性、容量大和速度快的优点。光学图像识别通过光学相关器来实现, 光学相关器主要分为两类: 匹配滤波相关器和联合变换相关器。匹配滤波相关器是由 A.VanderLugt 于 1964 年提出来的, 也称为 VanderLugt 相关器(VanderLugt Correlator, 简称 VLC), 联合变换相关器(Joint Transform Correlator, 简称为 JTC)由 Weaver 和 Goodman 提出的。匹配滤波相关器和联合变换相关器都得到了广泛的应用^[1]。本文在简要介绍匹配滤波相关器和联合变换相关器原理的基础上, 利用 MATLAB 对二者进行仿真实验。

1 基本原理

匹配滤波相关器和联合变换相关器的基本结构都是 $4f$ 光学系统^[2], 如图 1 所示, 图像从 P1 面输入, 通过透镜 L1 进行光学傅里叶变换, 在透镜 L1 的后焦平面 P2 得到频率谱, 而频率谱经过透镜 L2 进行傅里叶逆变换, 在 P3 面得到空域图像。

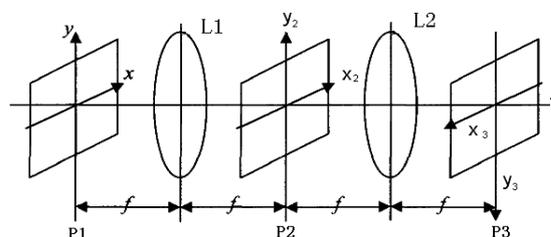


图 1 $4f$ 光学系统

1.1 匹配滤波相关器^[3]

匹配滤波相关器实现方法是在 $4f$ 系统的频率平面 P2 上放置一个匹配滤波器, 在频率域中对输入信号进行相位补偿, 从而在输出平面上产生会聚的相关光斑。传统上通过制作匹配滤波片, 即

$$M(f_x, f_y) = A^2 + |R(f_x, f_y)|^2 + AR^*(f_x, f_y) \exp(-j2\pi b f_y) + AR(f_x, f_y) \exp(j2\pi b f_y) \quad (1)$$

式中, R^* 表示函数 R 的复共轭, 在 P1 面输入带检测的目标图像 $t(x, y)$, 如果 $t(x, y)$ 包含参考图像信号 $r(x, y)$ 和不关心的噪声 $n(x, y)$, 输入图像 $t(x, y)$ 可以表示为:

$$t(x, y) = r(x, y) + n(x, y) \quad (2)$$

P2 面上的频谱为:

$$T(f_x, f_y) = R(f_x, f_y) + N(f_x, f_y) \quad (3)$$

经匹配滤波器的滤波作用, 离开 P2 时的分布:

$$\begin{aligned} U(f_x, f_y) &= M(f_x, f_y)T(f_x, f_y) \\ &= |A|^2 T + |R|^2 T + AR^* T \exp(-j2\pi b f_y) + \\ &\quad ART \exp(j2\pi b f_y) \end{aligned} \quad (4)$$

经过透镜的傅里叶变换后, 在 P3 上的光分布:

$$u(x_3, y_3) = A^2 t + r \otimes r^* t + Ar \otimes t^* \delta(x_3, y_3 - b) + Ar^* t^* \delta(x_3, y_3 + b) \quad (5)$$

式中表示 \otimes 相关运算, $*$ 表示卷积运算, 上式的第二、三、四项分布在 $(0, 0)$, $(0, b)$, $(0, -b)$ 处。分别对应直流项、相关项和卷积项。根据相关项的强弱来判别参考物与目标的相似性。

1.2 联合变换相关器^[3]

在透镜 L 的前焦面 P1 上放置待识别的目标

图像 $t(x, y)$ 和参考图像 $r(x, y)$ ，中心分别位于 $(\pm b, 0)$ ，用准直激光束照明，输入函数可以表示为

$$u(x, y) = t(x + b, y) + r(x - b, y) \quad (6)$$

通过透镜 L 进行傅里叶变换，在透镜的后焦面 P2 上的复振幅分布为

$$U(f_x, f_y) = T(f_x, f_y) \exp(j2\pi b f_x) + R(f_x, f_y) \exp(-j2\pi b f_x) \quad (7)$$

其中， $U(f_x, f_y), T(f_x, f_y), R(f_x, f_y)$ 分别为 $u(x, y), t(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 的空间频谱，并称 U, T, R 为 $U(f_x, f_y)$ 为 $T(f_x, f_y), R(f_x, f_y)$ 的联合傅里叶谱。

在 P2 面用记录介质或其他平方率探测器进行光强记录，因为记录的只能是光强信号，而光强是振幅的平方，所以是记录的是图像的联合功率谱。得到联合傅里叶变换的功率谱

$$|U(f_x, f_y)|^2 = |T(f_x, f_y)|^2 + |R(f_x, f_y)|^2 + T^*(f_x, f_y)R(f_x, f_y) \exp(-j4\pi b f_x) + T(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y) \exp(j4\pi b f_x) \quad (8)$$

式中， $T^*(f_x, f_y), R^*(f_x, f_y)$ 分别表示 $T(f_x, f_y), R(f_x, f_y)$ 的共轭复数。

用单位振幅的平面波读出功率谱，再经过相同焦距 f 的透镜 L 进行傅里叶变换，在输出平面 P3 得到的输出为

$$u_3(x_3, y_3) = t(x_3, y_3) \otimes t(x_3, y_3) + r(x_3, y_3) \otimes r(x_3, y_3) + t(x_3, y_3) \otimes r(x_3, y_3) * \delta(x_3 - 2b, y_3) + r(x_3, y_3) \otimes t(x_3, y_3) * \delta(x_3 + 2b, y_3) \quad (9)$$

式中，第一、二项分别是待识别目标图像和参考图像的自相关项，也称为直流项，中心在原点。第三、四项为待识别目标和参考图像的互相关项，中心分别在 $(2b, 0)$ 和 $(-2b, 0)$ ，强度取决于待识别目标与参考图像的相似性。在 $t(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 相同的情况下， $(2b, 0)$ 和 $(-2b, 0)$ 处有足够锐利的亮斑，则可知待识别目标图像和参考图像相关度较大，从而可以认为二者相同；而如果 $(2b, 0)$ 和 $(-2b, 0)$ 周围只有较暗的弥散斑，则可以知道待识别目标图像和参考图像相关度较小，从而实现图像的相关识别。

2 仿真实验

MATLAB 提供了 `imread()`, `fft2()`, `ifft2()`,

`fftshift()` 等函数，能够容易地模拟 $4f$ 相干光学成像系统的变换作用，并能得到同时含有振幅和位相信息的复矩阵。光学信息处理中显示的是振幅或强度信息，在 MATLAB 中要用 `abs()` 函数对复矩阵取模，为了显示的方便，进行归一化运算，以降低显示的幅值。

2.1 匹配滤波相关器的仿真

在实际的光学识别中，匹配滤波相关器用于图像识别的匹配滤波器用全息方法制作比较麻烦，而在 MATLAB 中实现则相对容易。图 2 所示为匹配滤波相关器的仿真结果。在仿真实验中，为了识别图 2b 中是否含有图 2a 中的飞机，可以以图 2b 作为待识别图像，图 2a 作为目标图像，图 2a、2b 均为 500×500 的灰度图像。仿真过程具体实现过程为：读取图像 2a 存储于矩阵 RE，2b 存储于矩阵 TA，然后对 RE 进行傅里叶变换存储于 RE1，取 RE1 的复共轭矩阵存储于 MF 中，MF 就是用于识别目标图像中是否含有参考图像的匹配滤波器。对矩阵 TA 进行傅里叶变换的得

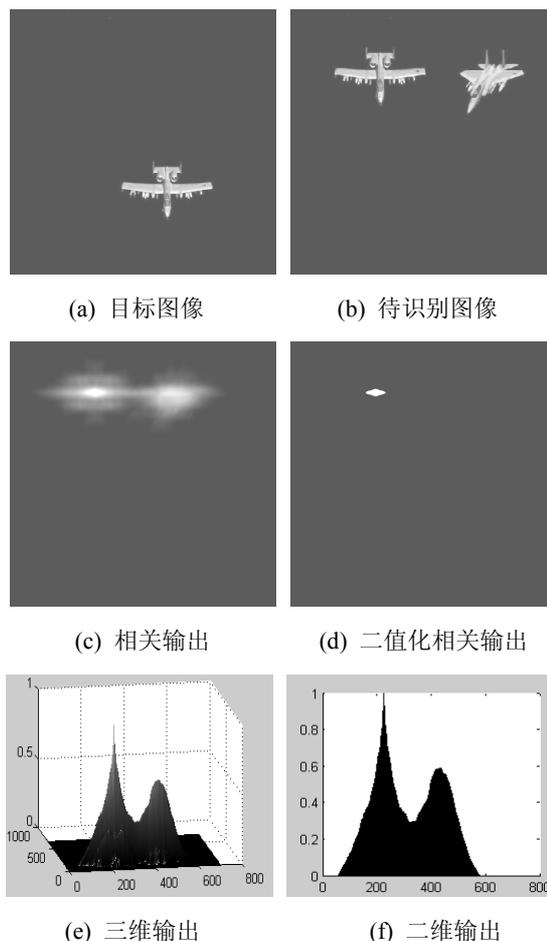
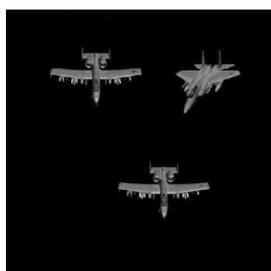


图 2 匹配滤波相关器的仿真结果

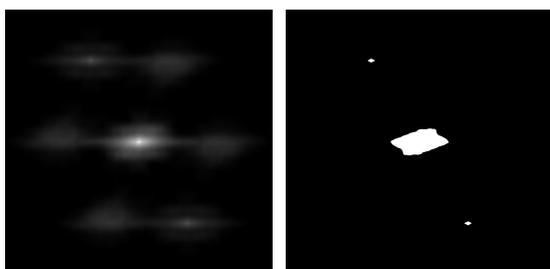
到频谱矩阵 TA1, 然后进行空间滤波, 即通过 TA1 点乘 MF, 得到滤波后的频谱矩阵 FF, 在对 FF 进行逆傅里叶变换就可以得到相关输出矩阵 OU, 并进行归一化处理, 图 2c 的仿真的结果。图 2e 是输出结果的三维图可以观察到对应出有锐利的相关峰, 图 2f 为输出结果的二维图, 可以清楚的判断出输出图像二值化的阈值, 选取阈值为 0.6 对输出图像进行二值化, 可以得到图 2d 的结果。

2.2 联合变换相关器的仿真

联合变换相关器的目标图像和待识别图像放置于同一平面上, 同时输入。图 3 所示为联合变换相关器的仿真结果。将图 3a 的 500×500 灰度图片作为输入联合图像, 读入计算机存储于矩阵 P1, 对 P1 进行傅里叶变换, 得到它们的联合傅里叶频谱矩阵 F1, 再对 F1 取复共轭, 得到矩阵 F2, 用 F1 和 F2 点乘, 就得到联合功率谱矩阵 FF, 再对 FF 进行逆傅里叶变换, 就能得到相关输出的矩阵 O。再进归一化, 就可以得到图 3b 的原始相关输出, 取阈值为 0.25 得到对原始输出进行二值化处理, 得到图 3c 的结果。图 3d 和图 3e 分别为原始输出强度分布的三维图和二维图, 通过二维图可以清晰的比较互相关峰相对于中央的之相关项非常微弱, 影响判别结果, 零级干扰是比较严重的, 这 and 实际实验的结果是一致的。

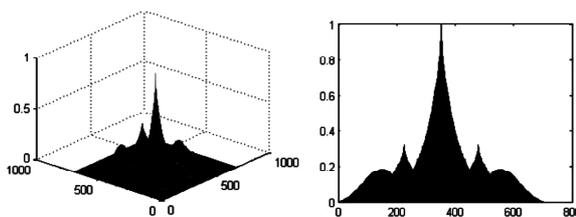


(a) 输入联合图像



(b) 原始相关输出

(c) 二值化相关输出

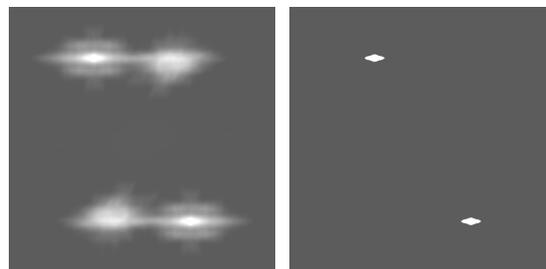


(d) 原始输出三维图

(e) 原始输出二维图

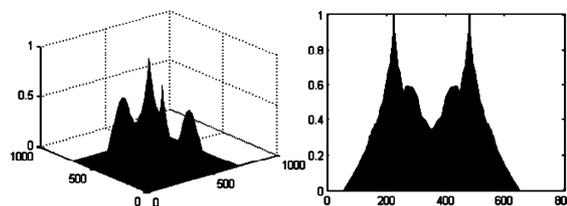
图 3 联合变换相关器的仿真结果

在实验中, 为了更有效地实现图像识别, 必须采取措施来消除零级强干扰, 进而相对提高±1 级互相关峰的峰值高度。通过采用功率谱相减法来消除零级强干扰^[4], 在频谱面上对联合功率谱进行处理, 从而消除输出面上零级强干扰, 消除零级强干扰后的相关输出图像如图 4 所示。



(a) 相关输出

(b) 二值化相关输出



(c) 三维相关输出

(d) 二维相关输出

图 4 消除零级干扰后的相关输出

3 结论

本文利用 MATLAB 软件对匹配滤波相关器和联合变换相关器的图像识别进行了仿真实验研究。匹配滤波相关器图像识别, 有很高的信噪比, 识别率较高, 而联合变换相关器由于产生很强的自相关的零级, 容易干扰识别, 同时造成了有效能量的损失, 因而在识别之前如果能除去零级, 将会提高识别能力。而联合变换相关器无需制作匹配滤波器, 但存在零级强干扰现象, 运用功率谱相减法对实验中的零级强干扰进行了消除, 提高了图像识别能力。基于 MATLAB 的图像识别仿真实验, 对进行实际的光学图像识别实验研究具

