

实时高效联合变换相关器*

张以谟 秦玉文 黄战华 张 宏 赵晓东
(天津大学现代光学仪器研究所, 天津 300072)

摘 要 提出一种利用光学波分复用器实现实时高效联合变换相关的方案。通过计算机控制把输入面分为多个大小相等的窗口, 分别写入参考与目标图像, 利用光学波分复用器于相关系统中, 使对应不同窗口的读出光学信息在第一个焦面上形成联合功率谱阵列, 在输出面上可以实时地获得增强了的相关信号。实时高效联合变换相关系统既充分利用了读出光能又充分利用了光阀的有效面积。文中分析了系统原理, 给出了光学波分复用器的设计方案及实验结果。

关键词 实时联合变换相关, 光学模式识别, 光学自适应, 光电混合相关器。

1 引 言

在实时目标自动识别、跟踪方面, 匹配滤波相关与联合变换相关是两种重要的识别手段^[1, 2]。与匹配滤波相关器比较, 联合变换相关器因为具有如下优点而显得特别重要: (1) 在联合变换相关器中不需要匹配滤波器, 因而不存在制做匹配滤波器和精确复位的复杂问题; (2) 在傅里叶变换平面上不需要高分辨率的空间光调制器; (3) 参考图像可以实时输入, 而且当参考图像数据库中无目标图像时, 能够自动地把目标图像作为参考图像存入参考图像数据库中; (4) 联合变换相关器可以紧凑设计。作者在研究实时光电混合联合变换相关过程中^[3, 4], 发现读出光能和光阀的有效使用面积远未得到充分利用, 为了提高光能利用率、改善系统总体性能, 提出并研制成功光学波分复用器。把光学波分复用器用于实时光电混合系统, 在傅里叶变换平面上形成联合功率谱阵列, 液晶光阀(LCLV)的有效使用面积和读出光能得到了很好的利用, 输出面上获得的相关信号的信噪比有了明显的改善, 相关信号强度得到了增强, 实时光电混合联合变换相关器整体性能有了明显的提高。

2 光学波分复用器的设计

应用光学波分复用器的主要目的在于把从不同窗口读出的光学信号在频率域上完全分开, 使它们互不干扰, 在傅里叶变换平面上形成联合功率谱阵列, 以便使光阀的有效使用面积和读出光能得到充分利用。根据这一目的, 提出并研制成功透射式和反射式两种光学波分复用器, 透射式光学波分复用器采用楔镜阵列结构, 参数不可调, 反射式光学波分复用器采

* 国家 863 高技术计划资助项目和国家教委博士点基金资助项目。

收稿日期: 1994年5月2日

用反射镜阵列、参数可调。四通道透射式与反射式光学波分复用器分别如图 1(a)和图 2(a)

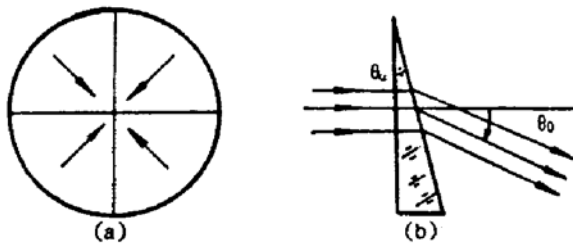


Fig. 1 Transmissive four-channel optical wavefront-division multiplexer

(a) Structure, (b) Working principle

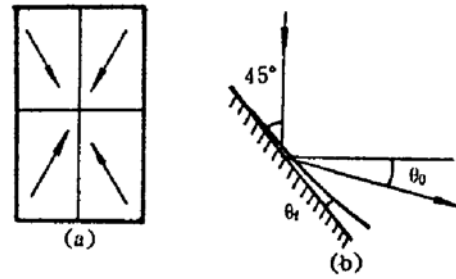


Fig. 2 Reflectible four-channel optical wavefront-division multiplexer

(a) Structure, (b) Working principle

所示。在图 1(a)中,箭头的方向表示光束通过楔镜阵列中各个棱镜后传播方向相对于原传播方向的偏转方向;在图 2(a)中,箭头方向表示反射镜阵列中各个反射镜的倾角方向,即光束经过反射镜反射后相对于 90° 反射方向的偏转方向。在图 1(b)和图 2(b)中分别给出了透射式与反射式光学波分复用器的工作原理图。光学波分复用器的性能参数主要表现在以下四个方面。1) 像差,要求波像差小于 $\lambda/4 \sim \lambda/8$ 。2) 光束偏转角,对于透射式光学波分复用器, $\theta_0 = (n - 1)\theta_a$, 对于反射式光学波分复用器, $\theta_0 = 2\theta_r$, θ_0 应等于或大于每个通道所对应的最大角频率, n 是楔镜玻璃的折射率, θ_a 是楔镜的楔角, θ_r 是反射镜的倾角,如图 1(b)和图 2(b)所示。3) 最大通道数 $N \approx (\theta_{\max}/\theta_0)2$, 其中 θ_{\max} 是整个系统对应的最大角频率。4) 通光口径,每块楔镜或反射镜的有效口径不小于每个通道的通光口径。

3 系统结构与理论分析

3.1 系统结构与原理

图 3 为用两块液晶光阀作为接口器件,利用光学波分复用器在傅里叶平面上给出联合功率谱

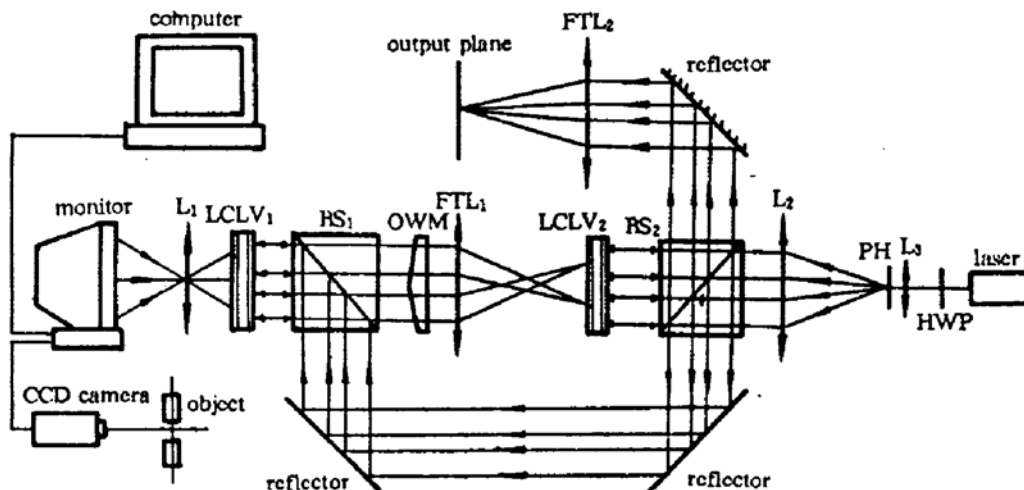


Fig. 3 Diagram of the real-time high-efficiency hybrid joint-transform correlator

阵列结构的实时高效联合变换相关器系统原理图。由 He-Ne 激光器输出的激光束 ($\lambda = 633 \text{ nm}$) 经针孔滤波器 PH 后扩束为一束平行光,偏振分束镜 BS_2 将其分为两束(偏振方向不同)分别作为液晶光阀 $LCLV_1$ 和 $LCLV_2$ 的读出光,转动针孔滤波器前面的二分之一波片 HWP 可以改变二读出光的强度之比。系统中两傅里叶透镜均为焦距 $f = 500 \text{ mm}$ 的透镜组。由数字计

计算机控制把监视器屏幕分为大小相等的多个窗口, 在每个窗口内分别实时地写入参考图像与由 CCD 摄像机获得的目标图像。成像透镜 L_1 把显示于监视器整个屏幕上的图像成像到液晶光阀 $LCLV_1$ 上, 即把图像写到液晶光阀 $LCLV_1$ 上, 用一束 He-Ne 光去读写到 $LCLV_1$ 上的图像, 读出光束经偏振分束棱镜 BS_1 后给出所需要的输出图像, 完成非相干光学图像到相干光学图像的转换。读出图像经光学波分复用器后, 不同窗口的图像被分开, 并沿不同的方向传播, 经傅里叶透镜 FTL_1 变换后, 每个窗口的图像在傅里叶平面上形成独立的联合变换功率谱, 不同窗口的图像在傅里叶平面上形成联合功率谱阵列。联合功率谱阵列被记录在第二块液晶光阀 $LCLV_2$ 上, 用另一束光去读记录在 $LCLV_2$ 上的功率谱阵列, 读出光经偏振分束棱镜 BS_2 后给出所需要的信息, 完成强度分布到振幅分的转换, 最后经傅里叶透镜 FTL_2 变换后, 在输出面上获得增强了的相关输出。

3.2 理论分析

为了简化数学表达, 更易于直观理解, 从 $LCLV_1$ 的读出图像到在第一个傅里叶透镜 FTL_1 的焦平面上获得功率谱这一变换过程, 仅以任意一个窗口为例进行分析。图 4 所示为把监视器屏幕分为四窗口时的实时高效联合变换相关示意图, 而下面进行的理论分析适合于把监视器屏幕分为任意多窗口时的情况。设第 j 个窗口的中心位于坐标 (x_{j0}, y_{j0}) , 参考图像与目标图像中心相距 $2x_0$, 则参考图像 $r(x, y)$ 和目标图像 $s(x, y)$ 可以分别写为 $r(x - x_{j0} + x_0, y - y_{j0})$ 和 $s(x - x_{j0} - x_0, y - y_{j0})$, 经过光学波分复用器后, 可以分别写成如下形式:

$$r(x - x_{j0} + x_0, y - y_{j0}) \exp[-2\pi i(x \cos \alpha_j + y \cos \beta_j)/\lambda] \quad (1)$$

$$s(x - x_{j0} - x_0, y - y_{j0}) \exp[-2\pi i(x \cos \alpha_j + y \cos \beta_j)/\lambda] \quad (2)$$

再经第一个傅里叶透镜 FTL_1 变换后可以写为

$$F_j(u, v) = R(u + \cos \alpha_j/\lambda, v + \cos \beta_j/\lambda) \exp[-2\pi i(u + \cos \alpha_j/\lambda)(x_{j0} + x_0) - 2\pi i(v + \cos \beta_j/\lambda)y_{j0}] + S(u + \cos \alpha_j/\lambda, v + \cos \beta_j/\lambda) \exp[-2\pi i(u + \cos \alpha_j/\lambda)(x_{j0} - x_0) - 2\pi i(v + \cos \beta_j/\lambda)y_{j0}] \quad (3)$$

$R(u, v)$ 和 $S(u, v)$ 是参考图像 $r(x, y)$ 与目标图像 $s(x, y)$ 的傅里叶变换, $u = x_2/\lambda f, v = y_2/\lambda f$ 是在第一个傅里叶透镜 FTL_1 的焦平面 (P_2) 上的空间频率, α_j 和 β_j 表示第 j 个窗口的图像透过光学波分复用器后的传播方向角。在 P_2 面上联合频谱的强度 (即联合功率谱) 分布可以写为

$$I_j(u, v) = |F(u, v)|^2 = |R|^2 + |S|^2 + RS^* \exp[4\pi i(u + \cos \alpha_j/\lambda)x_0] + R^*S \exp[-4\pi i(u + \cos \alpha_j/\lambda)x_0] \quad (4)$$

傅里叶平面上的联合功率谱阵列可以写为如下形式

$$I(u, v) = \sum I_j(u, v) = \sum |R|^2 + \sum |S|^2 + \sum RS^* \exp[4\pi i(u + \cos \alpha_j/\lambda)x_0] + \sum R^*S \exp[-4\pi i(u + \cos \alpha_j/\lambda)x_0]. \quad (5)$$

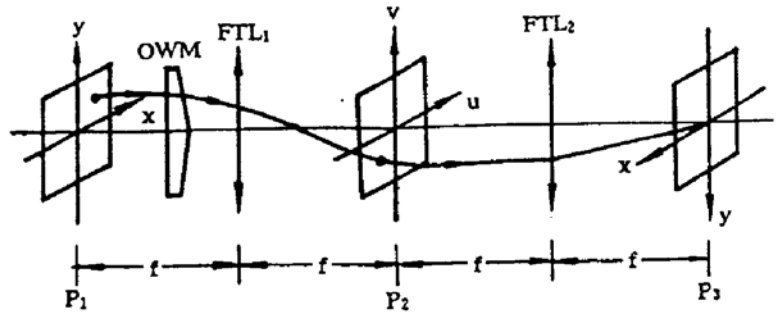


Fig. 4 Schematic representation of an four-windows high-efficiency JTC

联合功率谱阵列被记录在第二块液晶光阀 LCLV₂ 上, 从 LCLV₂ 读出的光学信息, 经偏振分束镜后给出所需要的光学信息, 完成强度分布到振幅分布的转化, 经第二块傅里叶透镜 FTL₂ 变换后, 在其傅里叶平面 P₃ 上获得增强了的相关信号:

$$c(x, y) = \sum r(x, y) \star r(x, y) + \sum s(x, y) \star s(x, y) + \sum s(x - 2x_0, y) \star r(x, y) + \sum s(x, y) \star r(x - 2x_0, y) \quad (6)$$

其中 \star 表示相关算符, 在推导过程中假设两个傅里叶透镜的焦距相等。从(6)式可以看出, 最后输出包含三部分内容, 即第一、第二项是零级, 位于输出平面的中心, 第三和第四项分别位于 $2x_0$ 和 $-2x_0$ 是一对互相关项, 相关信号强度增强的倍数等于窗口个数。

4 实验结果与讨论

采用图 3 所示的实时高效联合变换相关系统, 对二值参考与目标图像进行了实验研究。实验中监视器的屏幕由计算机控制被分为四个窗口, 目标图像经 CCD 摄像机和图像卡实时输入, 波分复用器采用透射式 2×2 楔镜阵列结构。图 5 给出了当参考图像与实时输入目标图像相同时由普通光电混合联合变换相关器获得的实验结果, 图 6 给出了当参考图像与实时输入目标图像相同时由实时高效联合变换相关器获得的实验结果, 比较图 5 和图 6 可以看出, 实时高效联合变换相关器给出增强了的相关输出

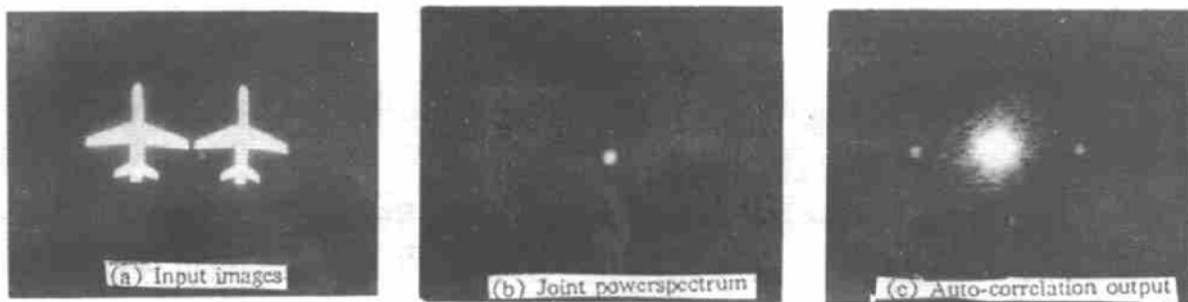


Fig. 5 Experimental results of the real-time hybrid JTC

(a) Input images, (b) Joint power spectrum, (c) Auto-correlation output

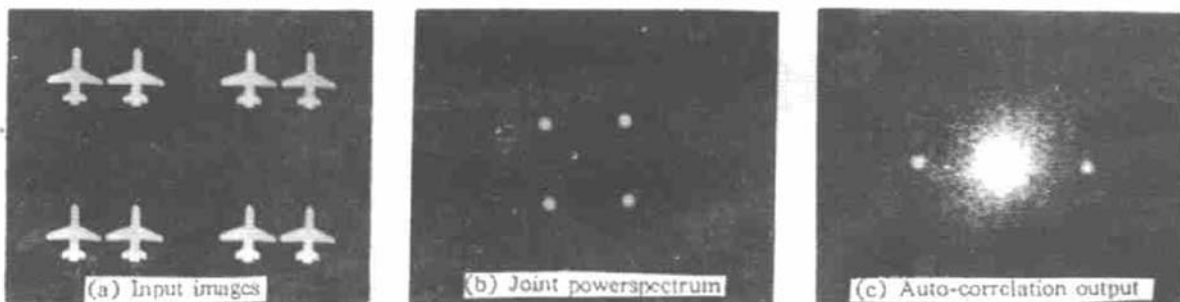


Fig. 6 Experimental results of the real-time high-efficiency JTC

(a) Input images, (b) Joint power spectral array, (c) Auto-correlation output

测量数据表明, 利用光学波分复用器后, 输出相关信号强度约为同样写入光强和读出光强条件下不用光学波分复用器时的 3.2 倍。而按理论计算的结果, 此时的相关强度应为不用光学波分复用器时同样条件下的 4 倍。理论与实验结果的这一差别, 主要是因为两块液晶光阀的不均匀性造成的, 液晶光阀的不均匀性表现在不同的面元对光强、外加电压和频率有不同的响应曲线, 这就使得记录在第二块液晶光阀上的联合功率谱阵列上的不同谱无法同时处于最佳读出状态, 选用表面均匀性更好的液晶光阀将有助于进一步增强输出相关信号的强度。

值得指出的是, 实时高效联合变换相关给出的相关增强输出不同于简单地把读出光加强

时的相关输出, 读出光加强时随机信号也随之加强, 而利用光学波分复用器实现的联合功率谱阵列, 对应不同窗口的联合功率谱产生的随机信号是不同的, 相叠加的结果仅是相关信号和零级信号增强, 因而从这种意义上讲, 实时高效联合变换相关系统, 提高了联合变换相关输出的信噪比。联合变换相关已成为一种重要的光学信息处理手段^[5], 因而这里提出的实时高效联合变换相关系统亦可用于相应的光学处理系统中。

结 论 利用计算机进行控制, 用光学波分复用器产生功率谱阵列结构, 实现了实时高效联合变换相关。这一系统能充分利用读出光能和光阀的有效使用面积, 在输出面上给出增强的相关输出, 使联合变换相关系统的处理性能有所改善, 实验结果与理论分析基本一致。

参 考 文 献

- [1] B. Javidi, C. J. Kou, Joint transform image correlation using a binary spatial light modulator at the Fourier plane. *Appl. Opt.*, 1988, 27(4): 663~665
- [2] M. S. Alam, M. A. Karim, Fringe-adjusted joint transform correlation. *Appl. Opt.*, 1993, 32(23): 4344~4350
- [3] 秦玉文, 黄战华, 张以谟, 实时光电混合联合变换相关器单元的实验研究. *光学学报*, 1994, 14(8): 829~833
- [4] 张以谟, 秦玉文, 黄战华, 四通道实时光电混合联合变换相关器的研究. '93 光计算应用技术研讨会, 山东曲阜, 79~80
- [5] B. Javidi, J. L. Horner, Multifunction nonlinear signal processor; deconvolution and correlation. *Opt. Eng.*, 1989, 28(8): 837~843

Real-Time High-Efficiency Joint Transform Correlator

Zhang Yimo Qin Yuwen Huang Zhanhu Zhang Hong Zhao Xiaodong

(*Institute of Contemporary Optical Instruments Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072*)

(Received 2 May 1994)

Abstract A technique of using optical wavefront-division multiplexer to realize high-efficiency joint transform correlation is proposed in this paper. The input plane of the system is divided into many equal parts by computer, and in every part the reference and the input images are displayed side by side. An optical wavefront-division multiplexer used in this system makes the optical information read out from different parts to form a power spectral array at the focal plane of the first Fourier transform lens. As a result, enhanced optical correlation signal is obtained at the output plane. The proposed real-time high-efficiency joint transform correlator (JTC) can use the physical area of the liquid crystal light valves (LCLVs) as well as the readout light more efficiently. The principle of the system has been analyzed. The design of the optical wavefront-division multiplexer and the experimental results of the system are given.

Key words real-time joint transform correlator, optical pattern recognition, optical self-adaptation, hybrid optical correlator.