

四通道实时联合变换相关器*

张以谟 秦玉文 黄战华 张 宏 葛宝臻

(天津大学现代光学仪器研究所, 天津 300072)

廖江红 翁兆恒

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘 要 提出把光学波阵面分割复用器用于单通道实时光电混合联合变换相关系统实现四通道实时相关, 使单通道系统扩展为具有多个独立通道的系统, 使系统的容量和处理速度提高数倍, 使系统的性能得以改善。给出了新系统的设计方案、工作原理和实验结果。

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

光学相关识别具有大容量、并行性、高速度等优点, 在机器人视觉、目标跟踪、导弹制导、光学自适应等领域有着重要的应用前景, 受到了人们的普遍重视与关注^[1, 2], 而其中的联合变换相关器(JTC) 由于具有结构简单、不需要制作匹配滤波器、可以进行实时相关运算等优点受到了人们的加倍关注^[3~4]。作者在研究实时光电混合联合变换相关过程中^[5], 为了改善系统性能, 提高光阑有效面积使用率和光能利用率, 提出并研制成功透射式与反射式两种类型的光学波阵面分割复用器^[6], 通过对波阵面进行分割, 把单通道的光学运算系统扩展为具有四个通道的系统, 把系统的处理容量和处理速度提高了四倍。用计算机控制把输入面分成大小相等的四个窗口, 在每个窗口分别写入参考图像与目标图像, 利用光学波阵面分割复用器把不同窗口对应的光学信息, 在空间域和频率域上完全分开, 使其在第一个傅里叶平面上形成独立的联合功率谱, 在输出平面上给出完全分开的相关输出, 实现了四通道实时联合变换相关。

2 四通道联合变换相关器系统结构

图 1 为把透射式光学波阵面分割复用器用于单通道实时光电混合联合变换相关系统^[5]实现的四通道实时相关系统原理图。对于四通道实时联合变换相关系统而言, 监视器屏幕由计

* 国家 863 高技术计划和国家教委博士点基金资助项目。

** 在本文中, 为与通信学中的术语“波分复用”(Wavelength division multiplex)相区别, 把文献[6]中的“波分复用器”(Wavefront division multiplexer)改称为“波阵面分割复用器”。

收稿日期:1994年5月27日; 收到修改稿日期:1994年8月30日

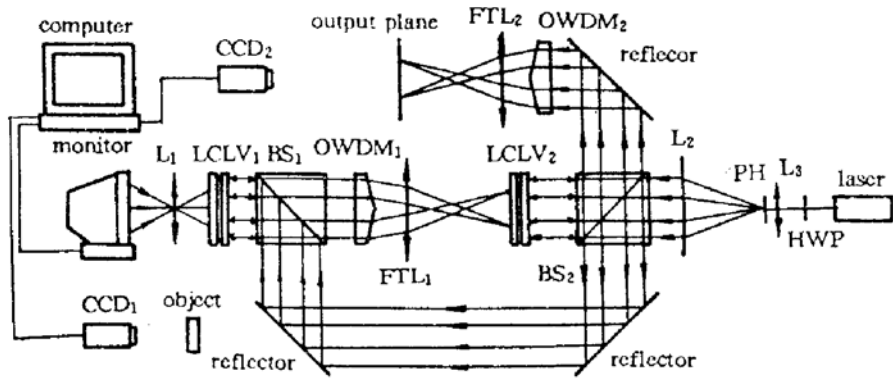


Fig. 1 Diagram of the four-channel real-time hybrid JTC

计算机控制分为四个大小相等的窗口，在每个窗口实时写入参考与目标图像，如图 2(a)所示，而在单通道的情况下，则是在整个屏幕上写入一个参考图像与一个目标图像，如图 2(b)所示。

在图 1 中，由 He-Ne 激光器输出的激光束 ($\lambda = 633 \text{ nm}$) 经针孔滤波器 PH 后再经扩束准直系统被扩束为一束平行光，偏振分束镜 BS₂ 将其分为两束(偏振方向不同)分别作为液晶光阀 LCLV₁ 和 LCLV₂ 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 FTL₁ 和 FTL₂ 均为焦距 $f = 500 \text{ mm}$ 的傅里叶透镜组。监视器屏幕由计算机控制被分为大小相等的四个窗口，在每个窗口内分别实时地写入参考与目标图像，参考图像由参考图像数据库获得，目标图像由实时采样 CCD₁ 获得。成像透镜 L₁ 把显示于监视器整个屏幕上的图像成像到液晶光阀 LCLV₁ 上，即把图像写到液晶光阀 LCLV₁ 上，用一束 He-Ne 光去读写到 LCLV₁ 上的图像，读出光束经偏振分束 BS₁ 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。读出图像经第一个光学波阵面分割复用器 OWDM₁ 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 FTL₁ 变换后，不同窗口的图像在傅里叶平面上形成独立的联合变换功率谱，并被记录在第二块液晶光阀 LCLV₂ 上。用另一束光去读记录在 LCLV₂ 上的功率谱，读出光经偏振分束镜 BS₂ 后给出所需要的信息，完成强度分布到振幅分布的转换，再经第二个光学波阵面分割复用器 OWDM₂ 后，对应不同窗口的联合功率谱被分开，并沿不同的方向传播，最后经傅里叶透镜 FTL₂ 变换后，在输出面上给出完全分开的四组相关输出。

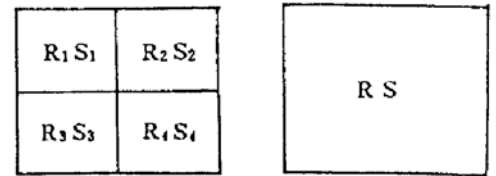


Fig. 2 The input planes of the four-channel and the one-channel system

(a) The input plane of the four-channel system, (b) The input plane of the one-channel system

3 理论分析

为了既能说明问题，而又不致于把数学分析表达式弄得太复杂，从输入到最后获得相关输出这一过程，以任意一个窗口 j 为例进行分析。图 3 所示为四通道联合变换相关器示意图，但下面进行的理论分析适合于利用光学波阵面分割复用器把单通道系统变为任意多个通道的情况。设第 j 个窗口的中心位于坐标 (x_{jc}, y_{jc}) ，为了数学公式

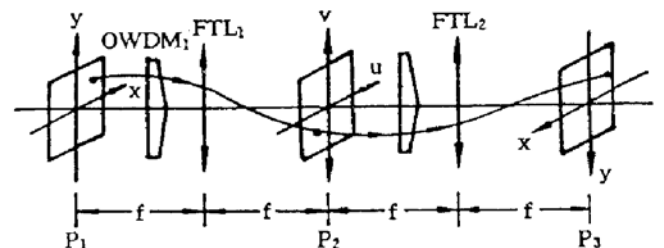


Fig. 3 Schematic representation of an four-windows high-efficiency JTC

推导与书写的方便设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 $r(x - x_{jc} + x_0, y - y_{jc})$ 和 $s(x - x_{jc} - x_0, y - y_{jc})$, 经过光学波阵面分割复用器后, 可以分别写成如下形式

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

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

再经傅里叶透镜 FTL_1 变换后可以写为:

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

$S(u, v)$ 和 $R(u, v)$ 分别为参考图像 $r(x, y)$ 与目标图像 $s(x, y)$ 的傅里叶变换, $u = x_2/\lambda f$ 和 $v = y_2/\lambda f$ 为在傅里叶透镜 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阵面分割复用器后的传播方向角, 它们的大小仅与透射式光学波阵面分割复用器的参数有关。在 P_2 面上联合频谱的强度(即联合功率谱)分布可以写为:

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

从 $LCLV_2$ 读出的光学信息, 经第二块光学波阵面分割复用器后可写为:

$$I_j(u, v) \exp [2\pi i(u \cos \alpha_j + v \cos \beta_j)f] \quad (5)$$

最后经傅里叶透镜 FTL_2 变换后得到相关输出为

$$c_j(x, y) = s(x + x_{jc}, y + y_{jc}) \star s(x + x_{jc}, y + y_{jc}) + r(x + x_{jc}, y + y_{jc}) \star r(x + x_{jc}, y + y_{jc}) + s(x + x_{jc} - 2x_0, y + y_{jc}) \star r(x + x_{jc}, y + y_{jc}) + r(x + x_{jc}, y + y_{jc}) \star s(x + x_{jc} - 2x_0, y + y_{jc}) \quad (6)$$

其中 \star 表示相关运算符, 在推导过程中假设两个傅里叶透镜 FTL_1 和 FTL_2 的焦距相等。从(6)式可以看出, 最后在输出平面上给出的输出包含三部分内容, 即第一、第二项是零级, 位于 $(-x_{jc}, -y_{jc})$, 第三、四项分别位于 $(-x_{jc} - 2x_0, -y_{jc})$ 和 $(-x_{jc} + 2x_0, -y_{jc})$ 是一对互相关项。

如果实时输入目标沿水平方向和竖直分别移动 Δx , Δy (对应于 CCD 摄像机靶面上目标位置变化像素点数), 在液晶光阀上目标相应的位置变化分别为 Δx_i , Δy_i , 则在相关输出面上相应的 ± 1 级相关峰和零级之间的距离变化为:

$$\Delta x_0 = \Delta x_i \quad (7)$$

$$\Delta y_0 = \Delta y_i \quad (8)$$

目标位移的像素数 $(\Delta x, \Delta y)$ 和由相关峰位置变化测得的像素数 $(\Delta x', \Delta y')$ 之间有如下关系:

$$\Delta x' = (M_1 \cdot M_2 \cdot M) \Delta x \quad (9)$$

$$\Delta y' = (M_1 \cdot M_2 \cdot M) \Delta y \quad (10)$$

式中 M_1 为从监视器到 $LCLV_1$ 写入面的像放大率, M_2 为从相关输出面到采集相关输出的摄像机 CCD_2 靶面的像放大率, M 为监视器屏幕大小与 CCD 靶面大小之比(实验中所用二个 CCD 完全相同), 如果两傅里叶透镜 FTL_1 和 FTL_2 的焦距不同, (9)式与(10)式括号中的项还应乘上一个因子 f_2/f_1 , f_1 和 f_2 分别为两傅里叶透镜 FTL_1 和 FTL_2 的焦距。

4 实验结果与讨论

采用图 1 所示的四通道实时联合变换相关系统，对二值参考与目标图像进行了实验研究。实验中监视器屏幕由计算机控制分为大小相等的四个窗口，参考图像由参考图像数据库输入，目标图像经 CCD 摄像机和图像卡实时输入，两个光学波阵面分割复用器 $OWDM_1$ 和 $OWDM_2$ 均采用透射式 2×2 楔镜阵列结构。图 4 给出了四个通道的参考图像均为飞机且实时输入目标图像也为飞机时的实验结果，图 5 给出了四个通道的参考图像分别为飞机、坦克、小汽车和卡车、目标图像为卡车时的实验结果。由图 4 和图 5 可知，对于任意一个通道而言，当参考图像与目标图像相同时，在输出面上相应的输出位置上给出相关输出，而当参考图像与目标图像不同时，在输出面上相应的输出位置上只有非常弱的互相关输出或者是没有相关输出。

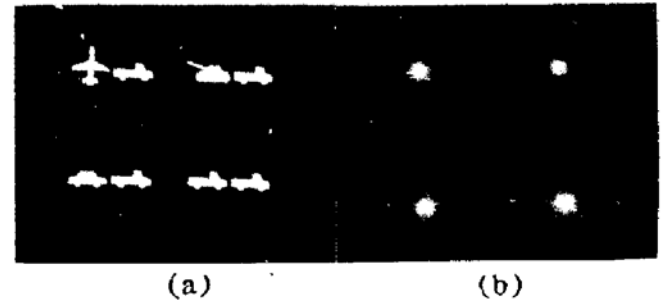
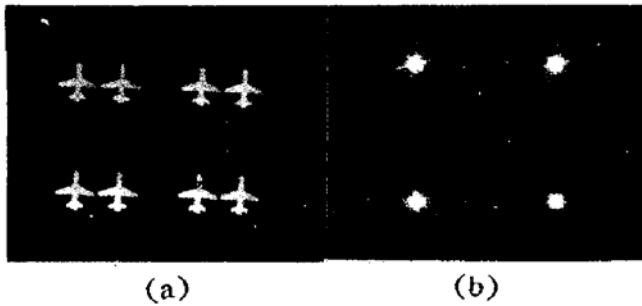


Fig. 4 Experimental results of the four-channel real-time hybrid JTC

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

(a) The input images, (b) The correlation output

(a) The input images, (b) The correlation output

图 1 所示的四通道实时联合变换系统可以工作于两种不同的状态。当四个通道的参考图像为同一参考图像，而四个通道实时输入的目标图像来自 CCD 摄像机连续的四帧时，四通道系统可以象单通道系统一样工作，工作速度为原来的四倍；当四个通道的参考图像为不同的参考图像，而四个通道实时输入的目标图像来自 CCD 摄像机的同一帧时，四通道系统可以象四个独立通道一样工作。图 6 和图 7 分别给出了目标沿水平方向与竖直方向运动时，获得的相关峰位置变化曲线， $\Delta x'$ 与 Δx 以及 $\Delta y'$ 与 Δy 之间有良好的线性关系，比例因子为 0.63。在输入参考图像与目标图像大小不变的情况下，由四通道系统获得的实验结果与由单通道系统获得的实验结果完全相同。

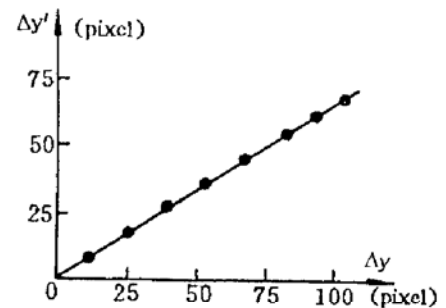
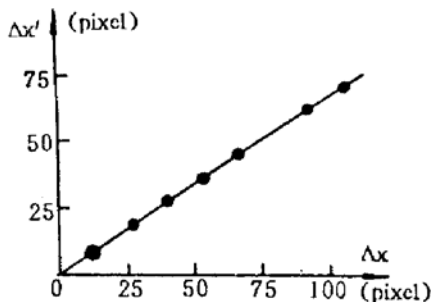


Fig. 6 Correlation peak location as a function of the object's translation in the x direction

Fig. 7 Correlation peak location as a function of the object's translation in the y direction

用透射式光学波阵面分割复用器实现的四通道实时相关系统，其处理容量并不严格的

是单通道系统的四倍。具体说明如下:第一块光阀上写入的参考图像与目标图像中心距离越大,记录在第二块光阀上的联合功率谱频率就越高,但光阀的分辨率有限,这就限制了第一块光阀上写入的二图像中心距离的大小,从而限制了光阀的有效使用面积。第一块光阀上写入的二图像中心距离的大小,必须保证二图像的联合功率谱能被第二块光阀所分辨,光阀的有效分辨率约为 25 lp/mm 左右,为满足这一要求,在单通道系统中选取第一块光阀的使用面积约为 $12 \times 10 \text{ mm}^2$,在四通道系统中选取第一块光阀的使用面积约为 $24 \times 20 \text{ mm}^2$,从而可以知道,单通道系统的最大存储容量约为 $300 \times 250 \text{ bit}$,四通道系统的最大存储容量约为 $600 \times 500 \text{ bit}$,而通过图像卡与监视器匹配后系统中所用 CCD 摄像机的有效像素数为 512×512 ,由此可知,虽然工作于四通道实时相关状态时,光阀的有效使用面积是单通道系统的四倍,但系统的最大存储容量还未得到充分的利用,系统的实际存储容量为单通道系统的 3 倍多。如果利用更高分辨率的 CCD 摄像机和监视器,则四通道系统的容量可以提高到单通道系统的四倍。

应用光学波阵面分割复用器,还可以进一步实现更多通道实时相关,只是相应的光学波阵面分割复用器的加工相对于四通道而言要麻烦一些。应用光学波阵面分割复用器实现的多通道相关系统,与普通的多通道系统相比较其优越性在于:1) 节省了大量元器件,因而节省了费用;2) 不同通道的信息处理时采用同一器件,这相当于不同通道的器件有相同的响应速度和工作点,便于实验结果的采集、分析和处理;3) 提高了光阀有效面积的使用率;4) 提高了光能的利用效率;5) 由于元器件的减少,多通道系统的调节因素减少,易于调节;6) 多通道系统的体积大为减小,使系统变得紧凑。

应用光学波阵面分割复用器实现的多通道系统,由于结构紧凑,系统对外界振动变得不敏感。对于如图 1 所示的四通道系统,当把系统放置于木桌上进行工作时,其工作状态与把系统放置于全息防震台上工作时的工作状态相比较,看不出有任何明显的变化。

在目前用光学波阵面分割复用器实现的四通道系统中,对监视器屏幕的分割由软件控制来完成,每秒由计算机送至监视器屏幕显示的图像仅有 6~7 帧,如改用硬件电路来实现对监视器屏幕进行高速分割,则系统的处理速度可以达到 20 frame/s 以上。影响系统处理速度的关键因素是液晶光阀的响应速度不够快,随着液晶光阀响应速度的提高,系统的处理速度将得到提高,如果采用快速响应的铁电液晶光阀,则系统的处理速度至少可以提高两个数量级。

小 结 把光学波阵面分割复用器应用于单通道实时联合变换相关系统,可以实现多通道实时相关,充分利用光阀的有效使用面积,提高光能的利用效率,节约大量元器件,使系统结构紧凑,对外界随机震动因素变得不敏感,并且因为不同的通道有相同的响应速度,使得中间及最后结果的采集、分析、处理变得方便。实验所获得的结果证明了这种方案的可行性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] D. Psaltis, E. G. Paek, S. S. Venkatesh, Optical image correlation with a binary spatial light modulator. *Opt. Eng.*, 1984, 23(6): 698~704
- [2] D. L. Flannery, J. S. Loomis, M. E. Milkovich *et al.*, Application of binary phase-only correlation to machine

vision. *Opt. Eng.*, 1988, 27(4): 309~320

- [3] E. C. Tam, F. T. S. Yu, D. A. Gregory *et al.*, Autonomous real-time object tracking with an adaptive joint transform correlator. *Opt. Eng.*, 1990, 29(4): 314~320
- [4] J. C. Kirsch, D. A. Gregory, Video rate optical correlation using a magneto-optic spatial light modulator. *Opt. Eng.*, 1990, 29(9): 1122~1128
- [5] 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
- [6] 张以谟, 秦玉文, 黄战华等, 实时高效联合变换相关器. *光学学报*, 1994, 15(7):

Four-Channel Real-Time Hybrid Joint Transform Correlator

Zhang Yimo Qin Yuwen Huang Zhanhu Zhang Hong Ge Baozhen

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

Liao Jianghong Wong Zhaoheng

(*Changchuen Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Changchuen 130022*)

(Received 27 May 1994; revised 30 August 1994)

Abstract A technique of using optical wavefront-division multiplexer in one-channel real-time hybrid joint transform correlation system to realize four-channel real-time correlation is proposed in this paper. By means of this technique, the one-channel system can be made into a multi-channel system, the system capacity and processing speed can be several times higher of that before, and the system performance can be improved. The design and the working principle of the new system is described. The experimental results are given.

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