

位相调制的实时联合变换相关器*

黄献烈 赖虹凯

(厦门大学物理学系, 厦门 361005)

摘 要 提出一种位相调制的实时联合变换相关器。它采用液晶显示屏作为输入器件, 用液晶光阀记录和显示联合功率谱。利用液晶显示屏上的光栅状结构的衍射级, 提高光能的利用率, 并充分利用液晶光阀的有效使用面积。采用成像透镜放大各衍射级的联合频谱, 适应液晶光阀较低的分辨率要求。在相关器的光路中插入两块倾斜的平行平面玻璃板, 以改变各衍射级的参考图像和目标图像之间的位相差。这种方法可产生比传统的实时联合变换相关器更好的输出相关性能。实验结果证实了该系统设计及性能分析的正确性。

关键词 实时联合变换相关器, 光学图像识别, 位相调制。

1 引 言

在实时目标识别和跟踪方面, 联合变换相关器(JTC)最近几年发展迅速。与传统的匹配滤波相关器不同, 在联合变换相关器中参考图像和目标图像同时从输入面输入, 不需要预先制作复空间匹配滤波器, 同时可以采用液晶显示屏等空间光调制器作为输入器件, 用液晶光阀记录和显示联合功率谱, 满足实时处理的要求^[1-3]。在提高实时联合变换相关器输出性能方面, 出现了振幅调制的^[4]、条纹调节的^[5]、互补参考图像的^[6]和啁啾编码的^[7]联合变换相关器等多种方法。这些方法各有特点, 适用于不同的场合。

在研究实时联合变换相关器中^[8], 发现读出光能和液晶光阀的有效使用面积未得到充分利用。为了提高光能的利用率, 改善相关输出性能, 本文提出一种位相调制的实时联合变换相关器, 充分利用液晶显示屏上光栅状结构的衍射级。利用成像透镜放大各衍射级的联合频谱以适应液晶光阀较低的分辨率要求。在参考图像和目标图像光路中分别加入一倾斜的平行平面玻璃板, 调节其取向使相关输出性能有了明显的提高。这种系统设计实用可行。

2 系统结构的原理

位相调制的实时联合变换相关器的实验系统如图 1 所示。一束 He-Ne 激光经针孔滤波器后扩束为一束平行光照射到液晶显示屏 LCD 上。参考图像预先存入计算机内存, 目标图像经由计算机控制从摄像机实时采样获得, 并利用计算机进行控制。使参考图像一直显示于显示

* 本工作得到福建省自然科学基金资助。

收稿日期: 1996 年 3 月 26 日; 收到修改稿日期: 1996 年 6 月 11 日

屏的右半部分, 而使目标图像显示于显示屏的左半部分。由于显示屏的分辨率远低于胶片, 所以图像经傅里叶变换透镜 FTL1 变换, 在后焦平面上呈现出联合图像的频谱和光栅状结构的衍射级。参考图像和目标图像分别经过一块倾斜的平行平面玻璃板 Gr 和 Gt, 调节玻璃板 Gr 和 Gt 的取向使相关输出性能最佳。采用成像透镜 IL 放大各衍射级的联合图像的频谱, 这些衍射级的联合功率谱写入液晶光阀 LCLV 上。用另一束平行的 He-Ne 激光去读出这些联合功率谱, 反射光经分束器 BS、另一傅里叶变换透镜 FTL2 和偏振器 P 得到相关输出。用面阵 CCD 进行接收, 通过图像卡采集到计算机中, 进行归一化和取阈值处理, 再送到监视器上。

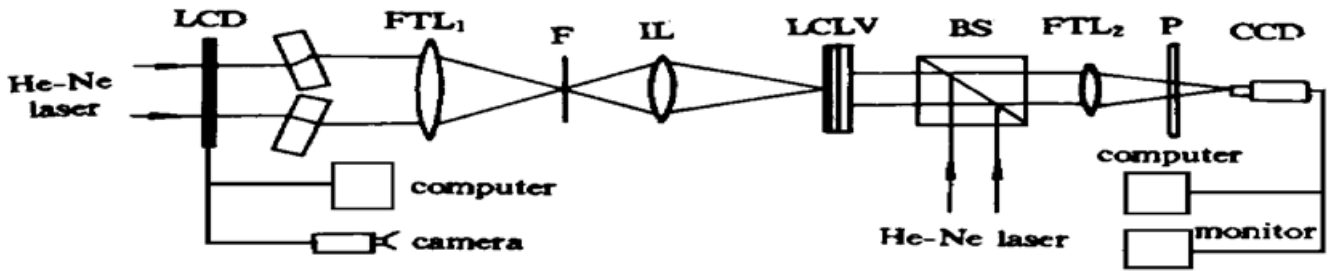


Fig. 1 Diagram of experimental system of phase-modulated real-time joint transform correlator

设液晶显示屏 LCD 上显示的参考图像和输入目标图像分别为 $r(x - x_0, y)$ 和 $t(x + x_0, y)$, 它们沿 X 轴相距为 $2x_0$, 液晶显示屏的光栅状结构为

$$\text{rect} \left(\frac{x}{X}, \frac{y}{Y} \right) * \sum_n \sum_m \delta(x - nK, y - mL)$$

其中算符 * 表示卷积运算, X 、 Y 为透射像素的宽度, K 、 L 为像素间距, $\text{rect}(x, y)$ 为矩形函数。显示屏上的参考图像 r 和目标图像 t 分别经过倾斜的平行平面玻璃板 Gr 和 Gt, 射到傅里叶变换透镜 FTL1 上, 如图 2 所示。为简单起见, 图中只画出显示屏的零级和正负一级衍射级。

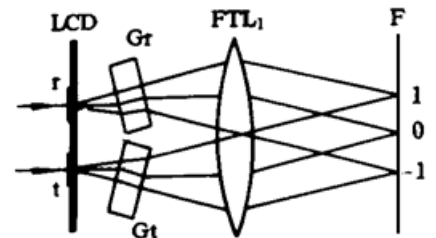


Fig. 2 Phase modulation by two oblique parallel plane glass plates

对第 (p, q) 衍射级, 参考图像 r 和目标图像 t 与傅里叶变换透镜 FTL1 的光学距离分别为 d_{rpq} 和 d_{tpq} 。由图 2 可见, 对不同的衍射级, $(d_{rpq} - d_{tpq})$ 的值是很不相同的。经两倾斜的平行平面玻璃板 Gr 和 Gt 的作用, 参考图像 r 和目标图像 t 沿 X 轴的距离变为 $2x'_0$ 。为使输出面的相关项能远离中央直流项, 通常使 $2x'_0 > 2x_0$ 。在傅里叶变换透镜的后焦平面 F 上的光场分布为

$$\begin{aligned} F \left(\frac{\alpha}{\mathcal{N}}, \frac{\beta}{\mathcal{N}} \right) &= \left[R \left(\frac{\alpha}{\mathcal{N}}, \frac{\beta}{\mathcal{N}} \right) \exp \left(-i2\pi \frac{\alpha}{\mathcal{N}} x'_0 \right) \exp \left[i \frac{k}{2f} \left[1 - \frac{d_{rpq}}{f} \right] (\alpha^2 + \beta^2) \right] \right. \\ &\quad \left. + T \left(\frac{\alpha}{\mathcal{N}}, \frac{\beta}{\mathcal{N}} \right) \exp \left(i2\pi \frac{\alpha}{\mathcal{N}} x'_0 \right) \exp \left[i \frac{k}{2f} \left[1 - \frac{d_{tpq}}{f} \right] (\alpha^2 + \beta^2) \right] \right] \\ &\quad * \frac{XY}{KL} \sum_p \sum_q \text{sinc} \left(\frac{X_p}{K}, \frac{Y_q}{L} \right) \delta \left(\frac{\alpha}{\mathcal{N}} - \frac{p}{K}, \frac{\beta}{\mathcal{N}} - \frac{q}{L} \right) \\ &= \frac{XY}{KL} \sum_p \sum_q \text{sinc} \left(\frac{X_p}{K}, \frac{Y_q}{L} \right) \left[R \left(\frac{\alpha}{\mathcal{N}} - \frac{p}{K}, \frac{\beta}{\mathcal{N}} - \frac{q}{L} \right) \exp \left[-i2\pi \left(\frac{\alpha}{\mathcal{N}} - \frac{p}{K} \right) x'_0 \right] \right. \\ &\quad \left. \times \exp \left[i\pi \mathcal{N} \left[1 - \frac{d_{rpq}}{f} \right] \left[\left(\frac{\alpha}{\mathcal{N}} - \frac{p}{K} \right)^2 + \left(\frac{\beta}{\mathcal{N}} - \frac{q}{L} \right)^2 \right] \right] \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + T\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}, \frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right) \exp\left[i2\pi\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}\right)x'_0\right] \\
& \times \exp\left\{i\pi\mathcal{M}\left[1 - \frac{d_{tpq}}{f}\right]\left[\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right)^2\right]\right\} \quad (1)
\end{aligned}$$

其中 $\frac{\alpha}{\mathcal{M}}, \frac{\beta}{\mathcal{M}}$ 为空间频率分量, $R\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}}, \frac{\beta}{\mathcal{M}}\right)$ 和 $T\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}}, \frac{\beta}{\mathcal{M}}\right)$ 分别为 $r(x, y)$ 和 $t(x, y)$ 的傅里叶变换。频谱 $F\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}}, \frac{\beta}{\mathcal{M}}\right)$ 经成像透镜 IL 放大后写入液晶光阀, 其功率谱 $G\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}}, \frac{\beta}{\mathcal{M}}\right)$ 正比于 $\left|F\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}}, \frac{\beta}{\mathcal{M}}\right)\right|^2$ 。由于液晶显示屏的衍射级间距比联合图像的频谱宽度大得多, 各衍射级的联合频谱不互相重叠, 则

$$\begin{aligned}
G\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}}, \frac{\beta}{\mathcal{M}}\right) &= \sum_p \sum_q \text{sinc}^2\left(\frac{X_p}{K}, \frac{Y_q}{L}\right) \left[\left| R\left[\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}, \frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right] \right|^2 + \left| T\left[\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}, \frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right] \right|^2 \right. \\
& + R\left[\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}, \frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right] T^*\left[\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}, \frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right] \exp\left[-i2\pi\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}\right)2x'_0\right] \\
& \times \exp\left[-i\pi\lambda(d_{rpq} - d_{tpq})\left[\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right)^2\right]\right] \\
& + R^*\left[\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}, \frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right] T\left[\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}, \frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right] \exp\left[i2\pi\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}\right)2x'_0\right] \\
& \times \exp\left\{i\pi\lambda(d_{rpq} - d_{tpq})\left[\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}} - \frac{p}{K}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{\mathcal{M}} - \frac{q}{L}\right)^2\right]\right\} \quad (2)
\end{aligned}$$

其中略去常数项因子。从液晶光阀读出的功率谱 $G\left(\frac{\alpha}{\mathcal{M}}, \frac{\beta}{\mathcal{M}}\right)$ 经逆傅里叶变换得输出为

$$\begin{aligned}
x', y' &= \sum_p \sum_q \text{sinc}^2\left[\frac{X_p}{K}, \frac{Y_q}{L}\right] \left\{ r(x', y') \otimes r(x', y') + t(x', y') \otimes t(x', y') \right. \\
& + r(x', y') \otimes t(x', y') * \delta(x' - 2x'_0, y') * \frac{1}{i\lambda(d_{rpq} - d_{tpq})} \exp\left[-\frac{\pi(x'^2 + y'^2)}{i\lambda(d_{rpq} - d_{tpq})}\right] \\
& \left. + t(x', y') \otimes r(x', y') * \delta(x' + 2x'_0, y') * \frac{1}{i\lambda(d_{tpq} - d_{rpq})} \exp\left[-\frac{\pi(x'^2 + y'^2)}{i\lambda(d_{tpq} - d_{rpq})}\right] \right\} \quad (3)
\end{aligned}$$

其中算符 \otimes 表示相关运算。为简单起见, 式中略去因平面 (α, β) 的位移所引起的线性相移。因输出是用平方律探测器测量, 所以对结果无影响。

由(3)式可见, 输出含有三个部分, 前两项分别是参考图像 $r(x, y)$ 和目标图像 $t(x, y)$ 的自相关, 重迭于输出平面的中心; 第三、四项分别是 $r(x, y)$ 和 $t(x, y)$ 的互相关, 位于 $(x' = 2x'_0, y' = 0)$ 和 $(x' = -2x'_0, y' = 0)$ 。这是一对共轭的互相关, 光学图像识别只需探测其中一项即可。

位相调制的实时联合变换相关器的特点是利用(3)式第三、四项中的二次位相因子 $\frac{\pm 1}{i\lambda(d_{rpq} - d_{tpq})} \exp\left[\pm \frac{\pi(x'^2 + y'^2)}{i\lambda(d_{rpq} - d_{tpq})}\right]$ 的调制作用来改善相关输出性能。因为对不同的 (p, q) 衍射级, $(d_{rpq} - d_{tpq})$ 不同。当它们的相关输出叠加时, 通过调节倾斜的平行平面玻璃板 G_r 和 G_t 的取向, 可以达到最佳的相关输出性能, 使相关峰变窄, 峰噪比提高, 相似图像的识别能力增大。

3 光学实验结果

位相调制的实时联合变换相关器的实验系统见图 1。液晶显示屏的分辨率为 3.08 lp/mm。液晶光阀为上海光学仪器研究所生产的硒化镉交流液晶光阀,分辨率为 40 lp/mm。光阀的工作状态为 150 Hz, 2.1 V。参考图像为字符 F, 目标图像分别为字符 F 和 E, 液晶显示屏上的字符大小约为 $4.8 \times 3.6 \text{ mm}^2$, 两图像间距为 19 mm, 频谱放大系统的放大率为 4 倍。平行平面玻璃板 G_r 和 G_t 采用 JJP-2 型平行平晶, G_r 的厚度为 15.75 mm, 与光轴夹角约为 $+20^\circ$; G_t 的厚度为 15.62 mm, 与光轴夹角约为 -20° 。写入液晶光阀的各衍射级的联合功率谱如图 3 所示。

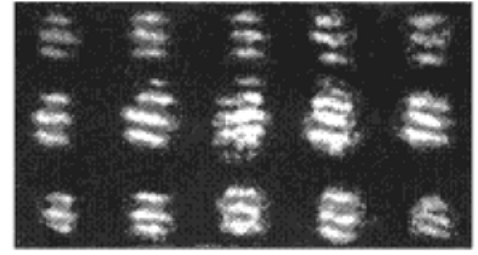


Fig. 3 Joint power spectrum of the diffraction orders

进行了两组对比实验, 一组是一般的联合变换相关, 另一组是位相调制的联合变换相关。当目标图像与参考图像均为字符 F 时, 由面阵 CCD 接收并显示在监视器屏幕上的相关输出的实验结果如图 4 所示。当目标图像为字符 E, 参考图像为字符 F 时, 同样进行了对比实验, 最后由图像卡将相关输出的图像信息转换为数字信息。表 1 列出了光学实验的结果。表中输出能量用联合字符的能量归一化。峰噪比(PNR)定义为相关峰强度与周围(输入图像的大小)的噪声强度平均值之比。识别力(ACR)定义为自相关(字符 F-F)峰强度与互相关(字符 F-E)峰强度之比。

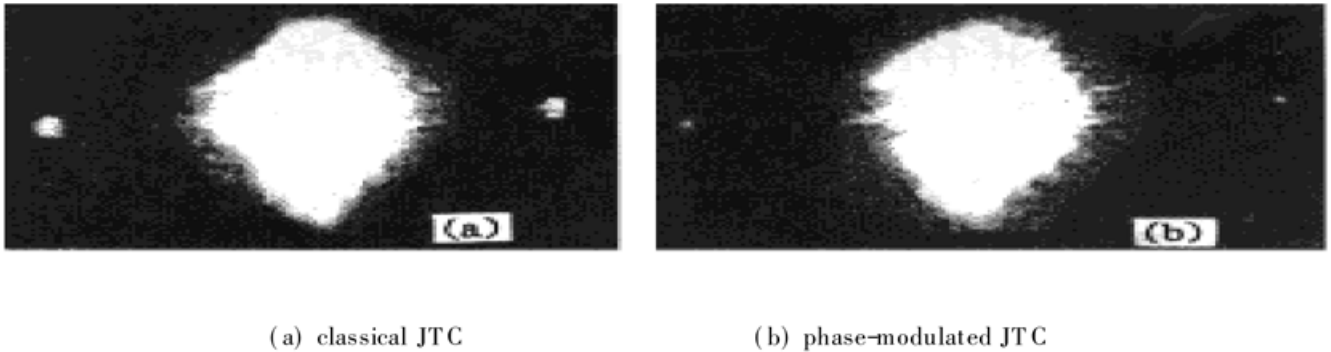


Fig. 4 Optical experimental results

Table 1. Optical experimental results for two joint transform correlations

JTC	I_{FF}	FWHM	I_{FE}	ACR	PNR
phase-modulated	140	(1, 2)	124	1.13	2.3
classical	229	(6, 8)	218	1.05	2.1

I_{FF} : auto-correlation peak intensity, I_{FE} : cross-correlation peak intensity, FWHM: the full width of the auto-correlation signal at half its peak value, ACR: auto-correlation peak intensity to cross-correlation peak intensity ratio, PNR: auto-correlation peak intensity to noise intensity ratio.

由表 1 可见, 位相调制的联合变换相关器与一般的联合变换相关器相比, 相关峰宽度(FWHM)由(6, 8)变为(1, 2), 变窄四倍以上; 图像识别力 ACR 由 1.05 变为 1.13, 使不易识别的相似图像变得容易识别。由图 4 也可以清楚地看出, 相关峰的宽度明显变窄, 这对多目标识别更加有利。而且位相调制的联合变换相关器与一般的联合变换相关器相比, 相关峰

与输出平面中心的距离变大,有利于减少很强的中心项对相关区的影响,提高图像识别的可靠性。总之,位相调制的联合变换相关器性能明显优于一般的联合变换相关器。光学实验结果证实了这一实验系统的设计和性能分析的正确性。这一实验系统在图像识别、目标跟踪和机器人视觉等领域中将有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Yu F. T. S., Lu X. J., A real-time programmable joint transform correlator. *Opt. Commun.*, 1984, **52**(1) : 10~ 16
- [2] Tan E. C., Yu F. T. S., Gregory D. A. *et al.*, Data association multiple target tracking using a phase-modulated liquid crystal television. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(9) : 1114~ 1121
- [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] Feng D., Zhao H., Xia S., Amplitude-modulated JTC for improving correlation discrimination. *Opt. Commun.*, 1991, **86**(3, 4) : 260~ 264
- [5] Alam M. S., Karim M. A., Fringe-adjusted joint transform correlation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(23) : 4344~ 4350
- [6] Chen Z, Zhang Y, Mu G, Complementary-reference joint transform correlator. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(32) : 7622~ 7626
- [7] Tang Q., Javidi B., Technique for reducing the redundant and self-correlation terms in joint transform correlators. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(11) : 1911~ 1918
- [8] 黄献烈, 赖虹凯, 曹国强, 实时高通滤波的联合变换相关器. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1996, **35**(3) : 348~ 353

Phase-Modulated Real-Time Joint Transform Correlator

Huang Xianlie Lai Hongkai

(*Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005*)

(Received 26 March 1996; revised 11 June 1996)

Abstract A phase-modulated real-time joint transform correlator is proposed, in which a liquid crystal display screen is adopted as an input device and the joint power spectrum is recorded and displayed by a liquid crystal light valve. The diffraction orders of the grating-type structure on the liquid crystal display screen are utilized in this system. As a result, it can use the light energy as well as the physical area of the liquid crystal light valve more efficiently. In order to suit low-resolution of the liquid crystal light valve, an imaging lens is applied to amplifying joint frequency spectrum of the diffraction orders. The two oblique parallel plane glass plates are inserted in the correlator to manipulate the phase differences between the reference image and the target image of the diffraction orders. This technique yields better output correlation performances than the classical real-time joint transform correlator. The experimental results verified the correctness of the system design and performance analysis.

Key words real-time joint transform correlator, optical pattern recognition, phase modulation.