

联合变换相关器中参数之间的协调关系

王玉荣

(山东大学光学系, 济南 250100)

李 骏 胡家升

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 本文从物理光学的基本理论出发, 推导出了联合变换相关器的图像输入面、功率谱面及相关信号探测面上各参量之间的协调关系式, 并进行了分析讨论。

关键词: 联合变换相关; 功率谱; 分辨率

1 引言

联合变换相关技术^[1]是光/电混合图像识别中一种很有发展潜力的技术, 在目标识别与跟踪、末制导、工业在线检测及机器人视觉等方面具有广阔的应用前景。近几年来, 由于空间光调制器等关键器件的迅速发展, 对联合变换相关技术的研究十分活跃; 国外已提出了多种联合变换相关器结构形式和实现方法^[2,3]。联合变换相关器的图像输入面、功率谱面及相关信号探测面上各参量的选择会直接影响相关器的性能, 它们之间必须满足一定的关系, 这是建立联合变换相关器时应当考虑的。因此导出它们之间的关系式, 对联合变换相关技术的研究具有重要意义。

2 联合变换相关器的基本原理

图1是联合变换相关器的基本原理示意图:

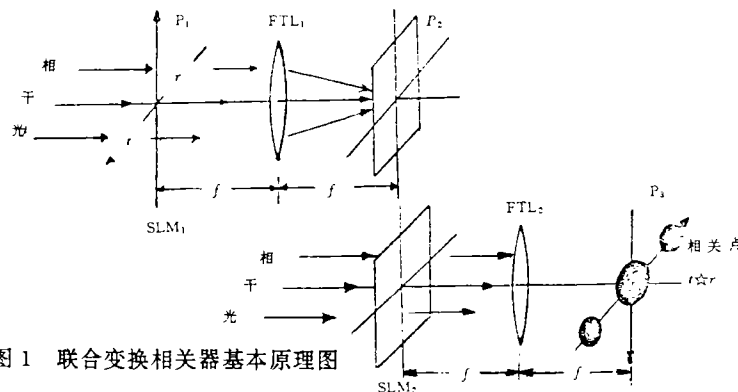


图1 联合变换相关器基本原理图

目标图像和参考图像分别用 $t(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 表示, 它们由位于输入面 P_1 上的空间光调制器 SLM_1 , 同时输入, 整个输入图像表示为:

$$g(x_1, y_1) = t(x_1 - x_r, y_1 - y_r) + r(x_r, y_r) \quad (1)$$

式中 (x_t, y_t) 和 (x_r, y_r) 分别是目标图像和参考图像在输入面上的位置坐标, 两图像之间的距离为:

$$L_{tr} = \sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2} \quad (2)$$

用准直相干光照明, 在频谱面 P_2 上得到两图像的联合傅立叶变换谱:

$$G(u, v) = F\{g(x_1, y_1)\} = F(u, v)\exp[-i2\pi(ux_t + vy_t)] + R(u, v)\exp[-i2\pi(ux_r + vy_r)] \quad (3)$$

式中 $u = x_2/\lambda f, v = y_2/\lambda f, f$ 是傅立叶变换透镜 (FTL) 的焦距, (x_2, y_2) 是频谱面 P_2 上的坐标; 探测器探测到的强度分布为:

$$G(u, v)G^*(u, v) = T(u, v)T^*(u, v) + R(u, v)R^*(u, v) + T(u, v)R^*(u, v)\exp\{-i2\pi[u(x_t - x_r) + v(y_t - y_r)]\} + T^*(u, v)R(u, v)\exp\{i2\pi[u(x_t - x_r) + v(y_t - y_r)]\} \quad (4)$$

它是目标图像和参考图像的傅立叶变换谱形成的干涉图样, 称之为联合变换功率谱 (Joint transform Power Spectrum—JTPS), 由位于频谱面 P_2 上的空间光调制器 SLM_2 接收, 再经过一次傅立叶变换, 在输出面 P_3 上得到相关输出:

$$I_t(x_3, y_3) = F\{G(u, v) \cdot G^*(u, v)\} = [t \star t] + [r \star r] + [t \star r] \star \delta[x_3 - (x_t - x_r), y_3 - (y_t - y_r)] + [r \star t] \star \delta[x_3 + (x_t - x_r), y_3 + (y_t - y_r)] \quad (5)$$

式中第一项和第二项分别是目标图像和参考图像的自相关, 位于坐标原点处, 形成零级光斑; 第三项和第四项是目标图像和参考图像的互相关, 分别位于 $[(x_t - x_r), (y_t - y_r)]$ 和 $[-(x_t - x_r), -(y_t - y_r)]$ 处, 它们正是所要探测的相关信号。

3 图像输入面、功率谱面及相关信号探测面上各参量之间的相互关系

3.1 相关信号的方位与输入图像方位之间的关系:

由 (5) 式可知: 联合变换相关器产生的两个相关信号的位置坐标分别为:

$$\left. \begin{array}{l} x_{c1} = (x_t - x_r) \\ y_{c1} = (y_t - y_r) \end{array} \right\} \text{和} \left. \begin{array}{l} x_{c2} = -(x_t - x_r) \\ y_{c2} = -(y_t - y_r) \end{array} \right\} \quad (6)$$

两个相关信号到原点的距离相等, 可表示为:

$$L_{co} = \sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2} = L_{tr} \quad (7)$$

由以上两式可以看出: 两个相关信号总是关于坐标原点对称分布, 与参考图像和目标图像在输入面上是否对称分布无关; 二者的分布方位与两图像的分布方位相同; 到原点的距离与两图像之间的距离相等 (这是在两个傅立叶变换透镜焦距相等的情况下得出的结论; 若两透镜焦距不等, 上述关系式中只增加一个系数, 因而上述结果并不失一般性)。图 2 是几种情况下, 相关信号方位与两图像方位之间关系的示意图:

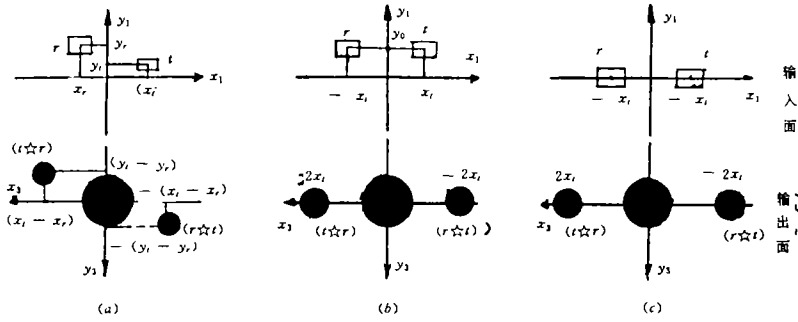


图 2 相关信号方位与两图像方位之间关系示意图

3.2 相关信号与零级光斑分离的条件

如图 3 (a) 所示, 目标图像和参考图像之间的距离为 L_r , 它们在 x 轴方向上的横向宽度分别为 Δ_t 和 Δ_r , 这样 (5) 式中各项在输出面上沿 x 方向的宽度分别为^[4]:

- 第一项: $2\Delta_t$, 位于坐标原点处,
- 第二项: $2\Delta_r$, 位于坐标原点处,
- 第三项: $\Delta_r + \Delta_t$, 位于 $[(x_t - x_r), 0]$ 处,
- 第四项: $\Delta_r + \Delta_t$, 位于 $[-(x_t - x_r), 0]$ 处,

由第一项和第二项形成的位于原点处的零级光斑的宽度为 $2\Delta_t$ 和 $2\Delta_r$ 中的较大者。整个输出面上的分布情况如图 3 (b) 所示:

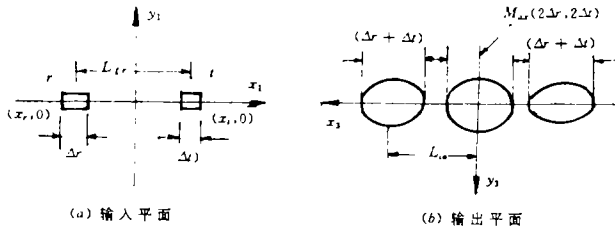


图 3 相关信号与零级衍射光斑分离条件示意图

如果要探测到与零级衍射光斑分离开的相关信号, 那么二者中心间的距离应满足下式:

$$L_{co} \geq L_{min} = \frac{1}{2} M_{ax}(2\Delta_r, 2\Delta_t) + \frac{1}{2} (\Delta_r + \Delta_t) = \frac{1}{2} [M_{ax}(2\Delta_r, 2\Delta_t) + \Delta_r + \Delta_t] \quad (8)$$

其中, L_{min} 是二者刚好相接但没重选 时的距离。由 (7)、(8) 两式可得:

$$L_r \geq \frac{1}{2} [M_{ax}(2\Delta_r, 2\Delta_t) + \Delta_r + \Delta_t] \quad (9)$$

此式表明了要使相关信号与零级光斑分离, 两个输入图像间的距离和图像横向宽度之间应满足的关系^[1]。

设参考图像的横向宽度 Δ_r 大于等于目标图像的横向宽度 Δ_t , 在 (9) 式中以 Δ_r 代替 Δ_t 得:

$$L_r \geq 2\Delta_r \quad (10)$$

3.3 功率谱探测器离焦量、输入面上两图像间距离以及图像横向宽度之间的关系

在实际的相关器中, 很难做到联合变换功率谱的探测面严格与傅立叶变换谱面重合, 总

有一定的离焦量；虽然适当的离焦量可以改善相关信号的质量^[5]，但离焦量必须在一定的限度内。

考虑如图 4 所示的准联合傅立叶变换系统：

图中 L_v 是两图像之间的距离， Δ 是图像的横向宽度；功率谱探测面 P_2 与透镜后焦面之间的距离为 δ ，在 P_2 面上谱偏移光轴的距离为 a ，二者之间的关系为：

$$a = \frac{\delta}{f} \cdot \frac{L_v}{2} \quad (11)$$

为了确保目标图像和参考图像的谱在 P_2 面上能较好地交迭，偏移量 a 应当小于物体谱的主瓣 (mainLobe) 宽度的四分之一，即：

$$a \geq \frac{1}{4} \cdot \frac{2\lambda f}{\Delta} = \frac{\lambda f}{2\Delta} \quad (12)$$

将 (11) 式代入到 (12) 式中得：

$$\delta \leq \frac{f^2 \cdot \lambda}{L_v \cdot \Delta} \quad (13a)$$

或

$$L_v \leq \frac{f^2 \cdot \lambda}{\delta \cdot \Delta} \quad (13b)$$

(13) 式给出了谱探测面的离焦量 δ 、输入面上两图像之间的距离 L_v 以及图像的横向宽度 Δ 三者之间的关系；(13a) 式表明：当 Δ 和 L_v 给定时，探测面的离焦量 δ 必须小于一定值；(13b) 式表明：当 Δ 和 δ 给定后，目标图像和参考图像之间的距离应小于某一值。

3.4 对谱面探测器的分辨率要求

联合变换相关器对谱探测器的分辨率有一定的要求。我们知道，物光束和参考光束在谱面上形成的联合功率谱实质上就是类光栅结构的干涉条纹，设其空间频率为 Ω ，则在 L_2 的后焦面上， ± 1 级衍射光斑与零级光斑之间的距离为：

$$L_{co} = \lambda \cdot \Omega \cdot f \quad (14)$$

其中 f 是傅立叶变换透镜的焦距， λ 是读出光波波长。将 (7) 式代入 (14) 式得：

$$\Omega = L_v / \lambda f \quad (15)$$

谱探测器的分辨率 Ω' 应满足：

$$\Omega' \geq \Omega = L_v / \lambda f \quad (16)$$

此式就是谱探测器的分辨率与输入面上两图像距离之间应当满足的关系。

4 讨 论

由前面的分析可知：联合变换相关器中三个面上各参量之间存在相互制约的关系，在建立相关器时应充分考虑这些关系。从 (6) 式可以看出，如果参考图像固定不动，当目标图像运动时，相关信号的位置也随着作线性变化，从而由相关信号位置的变化可以判断目标图像的运动情况。由 (9) 和 (10) 式可知，欲得到与零级衍射光斑分离的相关信号，输入面上两

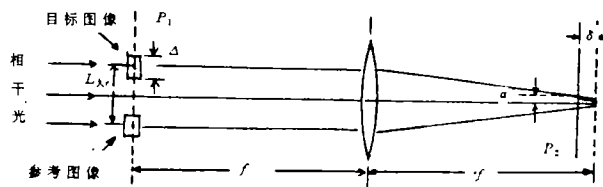


图 4 准联合傅立叶变换系统

图像之间的距离越大越好,但是从(13)和(16)式可以看出,两图像间的距离越大,对离焦量要求越严格,所需谱探测器的分辨率也越大,这就要求具有更高分辨率的探测器,同时也给调整带来更大的困难;此外,只有在(13)式和(9)式同时满足的情况下,才能保证既可以得到与零级衍射光斑分离的、可探测的相关信号,又保证系统满足平移不变性。在使用联合变换相关器单纯进行目标图像识别时,平移不变性问题还不是很突出,但当进行目标跟踪时,就必须加以充分考虑。

我们已经建立了一套联合变换相关器实验系统,并进行了大量的实验研究,得到了满意的实验结果,在实验上证明了上面所推导的关系式及分析的正确性^[7]。

参 考 文 献

- [1] C. S. Weaver and T. W. Goodman, A Technique for Optical Convolver Two Functions Appl. Opt. , 1966, 5: 1248-1249
- [2] B. Javidi, Joseph L. Horner , Single Moudulator Join Ttransform Correlator Architecture. Appl. Opt. , 1989, 28: 411-413
- [3] Eddy. C. Tam, F. T. S. Yu, Don A. Gregory, Autonomous Real-time Object Tracking with an Adaptive Joint Transform Correlator. Proc. SPIE, 1989, 1098: 253-261
- [4] J. W. Goodman, 傅立叶光学导论. 中译本, 第7.5节, 科学出版社, 1979: 194
- [5] F. T. S. Yu and chenHuazhang , Nonconventional Joint Transform Correlator. Opt. Lett. , 1988, 14: 922
- [6] 赵凯华, 钟锡华, 光学. 下册, 北京: 北京大学出版社, 1982, 56
- [7] 王玉荣, 光/电混合图像识别中的联合变换相关技术. 光学机械, 1992, (2): 79-83

Relationship of Parameters in Joint Transform Correlator

Wang Yurong

(Department of Optics, Shandong University, Jinan250100)

Li Jun Hu Jiasheng

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanism,
Chinese Academy of Sciences, Changchun130021)

Abstract

Relationship among the parametrs in image input plane, power spectrum plane and correlation signal detecting plane of joint transform correlator is studied.

Key Words: Joint transform correlation, Power spectrum, Resolution.