

# 用计算全息(CGH)制作的楔环探测器 (WRD)及其在模式识别中的应用

刘利人 王天及

(中国科学院广州电子技术研究所, 广州 510070)

## 提 要

提出用计算机制全息图配合 CCD 器件制成具有楔环探测器功能的 CGH/WRD 系统。它将取样、探测功能相分离, 充分利用 CGH 的灵活性, 亦可适用于其他形状的探测。文中详述了系统的设计思想及实现方法并给出了其用于模式识别的实验结果。

关键词 CGH, 光模式识别, CCD.

## 1 引 言

用具有楔环形取样单元的探测器取样傅里叶衍射频谱可以形成傅里叶系数特征空间, 取样自相关谱则形成弦分布特征空间, 上述过程在光学模式识别中起着关键作用。现有的半导体楔环探测器件(WRD)存在以下的缺点: 1. 结构特殊, 不适于其他场合作为一般的光电探测器件; 2. 结构复杂、价格昂贵; 3. 器件改进受半导体工艺水平的限制。本文利用计算机制全息图配合 CCD 器件制成 CGH/WRD 系统, 很好地模拟了半导体 WRD 功能, 同时其设置尺寸和价格大为减小。

## 2 CGH/WRD 在模式识别中的应用

### 2.1 CGH/WRD 的概念

楔环探测器的概念最早是由 Stanley 和 Lendaris<sup>[1]</sup> 引入的, 而由 RSI (Recognition Systems, Inc.) 开发制成产品<sup>[2]</sup>。并在实验室和工业中得到广泛应用<sup>[3~5]</sup>。本文介绍的 CGH/WRD 是针对现有半导体 WRD 不足之处, 利用计算机制全息图及 CCD 探测技术设计制成的仿 WRD 功能系统。它将原 WRD 的取样及探测功能相分离, 分别由 CGH 制成的光学元件及 CCD 探测器于不同平面上完成。图 1 为系统示意图。

输入物体的谱面在 P<sub>2</sub> 上形成, P<sub>2</sub> 上放有利用 CGH 技术制成的楔环形取样光学元件。图 2 为其结构示意图。它将 P<sub>2</sub> 上各小域中的光信号衍射到 P<sub>3</sub> 上不同位置, P<sub>3</sub> 上 CCD 器件及随后的 A/D 电路、微机系统完成光电转换及数字化处理过程。当 P<sub>2</sub> 为 FT 平面或自相关谱面时, 取样的结果分别为傅氏系数或弦分布特征空间。由于采用了 CGH 技术制作用于完成取样功能的光学元件, 不再因探测器的具体形状已定而限于对相应形状的光场进行取样。只需变更 CGH 形式, 亦可对光场源进行其它形状要求的采样。

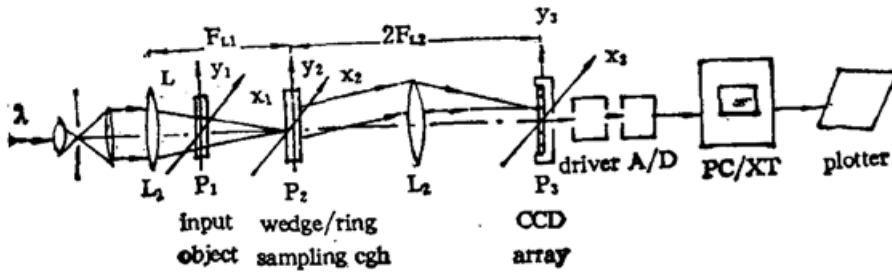


Fig. 1 Schematic of the CGH/WRD system

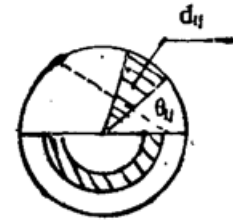


Fig. 2 Schematic of the Wedge Ring-shaped sampler

## 2.2 CGH/WRD 在傅里叶频谱面取样中的应用

在傅里叶光学中,有以下结论:

$$|F(u, v)|^2 = |F(-u, -v)|^2 \quad (1)$$

$$|\mathcal{F}[f(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta)]|^2 = |F(u \cos \theta - v \sin \theta, u \sin \theta + v \cos \theta)|^2 \quad (2)$$

$$|\mathcal{F}[f(ax, ay)]|^2 = \{(1/a)^2 F(u/a, v/a)\}^2 \quad (3)$$

式中:  $F(u, v) = \mathcal{F}[f(x, y)]$ ,  $\mathcal{F}$  是傅里叶变换符. 用楔/环形取样器取样 FT 功率谱, 楔/环域完成以下的光强积分:

(楔域)

$$M_j = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \int_{\theta_j}^{\theta_j + \Delta \theta} |F(\rho, \theta)|^2 \rho d\theta d\rho, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

(环域)

$$M_k = \int_0^{2\pi} \int_{\rho_k}^{\rho_k + \Delta \rho} |F(\rho, \theta)|^2 \rho d\rho d\theta, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

FT 谱随输入物体而旋转 [(2) 式], 但环域输出是对角度  $\theta$  积分的结果, 故具有旋转不变性. 而楔域的输出则具尺寸扩缩不变性 [(3)、(4) 式]. 由于功率谱具中心对称性 [(1) 式], 可将楔/环形取样单元分别置于 FT 的上/下半平面, 这样制成的 CGH 取样器并不会造成信息的遗漏.

## 2.3 CGH/WRD 在生成弦分布特征空间中的应用

弦函数的概念及弦变换观测空间的光学实现方法, 已有文献介绍<sup>[6~7]</sup>, 这里仅给出其结论: 图象的自相关函数是其功率谱的傅氏变换结果, 而弦分布函数与自相关函数的关系见下式:

$$f_m(r) = R(r \cos \theta, r \sin \theta) r d\theta \quad (6)$$

$$f_a(\theta) = R(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr \quad (7)$$

其中  $R(r \cos \theta, r \sin \theta) = P(x, y) \otimes P(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{P(u, v) \cdot P^*(u, v)\}$  即为输入物体的自相关谱.  $\otimes$  为相关运算符.  $P(x, y)$  为图像函数.  $f_m(r)$ 、 $f_a(\theta)$  是弦长及弦取向角分布函数. 故得到弦分布函数方法如下: 首先用干板记录下输入物体的功率谱, 经反差倒转处理后置于 P1, 则在 P2 得原物体的自相关谱. 用楔环取样器取样分别得  $f_m(r)$  和  $f_a(\theta)$ . 由上两式可知,  $f_m(r)$  与角度  $\theta$  无关, 即对输入物体的旋转具不变性, 而  $f_a(\theta)$  则与弦长无关, 即对输入物体尺寸扩缩具不变性. CGH 元件将谱面上光强信息衍射到后焦面, 探测单元接收到的光强与相应取样单元内的光强积分成正比, 对正实输入物体探测值取平方根即得  $f_m(r)$  或  $f_a(\theta)$  的实际值.

### 3 CGH/WRD 取样器的设计制作

#### 3.1 CGH/WRD 取样器的设计思想

CGH/WRD 取样器的作用在于将  $P_2$  取样面上不同楔/环形小单元域内的光场按不同的角度衍射开去, 由透镜  $L_2$  会聚到  $P_3$  不同位置. 其理论依据是多缝夫琅和费衍射. 设 CGH 中每一小域光栅由下式描述(矩形光栅):

$$g(x) = \left[ \text{Rect}\left(\frac{x}{\Delta x}\right) * \text{Comb}\left(\frac{x}{d}\right) \right] \text{Rect}\left(\frac{x}{L}\right) \quad (9)$$

式中,  $\Delta x$  是栅线宽度,  $d$  是栅线间距,  $L$  是光栅有效范围长度,  $*$  是卷积符号. 梳状函数  $\text{Comb}(x/d) = |d| \sum \delta(x - nd)$ . 将此小光栅置于  $P_2$  上, 它的傅氏谱便在  $P_3$  上得到:

$$G(u) = \mathcal{F}\{g(x)\} = L \cdot \Delta X \cdot d [\text{sinc}(u\Delta X) \text{Comb}(ud)] * \text{sinc}(uL). \quad (10)$$

由上式, 一、二级取样衍射点分别位于  $P_3$  如下位置:  $X_{31} = \lambda f_{L2}/d$ ,  $X_{32} = 2\lambda f_{L2}/d$ . 为防止相邻亮斑重叠, 需考虑衍射斑大小:

$$\Delta X_s = \lambda f_{L2}/L \quad (11)$$

综上所述, 绘制具有适当参数  $d$  和  $\theta$  (光栅间距及取向角) 的单元光栅, 需考虑: CCD 光敏面的有效范围, 系统焦距, 衍射斑大小及一、二级衍射图案不致相叠. 本文设计制作了两种形式的 CGH: 一种产生阵列式衍射图案, 是配合 CCD 探测器使用的, 便于对取样结果做定量分析, 另一种形成同心圆式的衍射图案, 作为直观演示用. 两种形式的 CGH 都具有图 2 所示的结构. 其上、下半圆分别由楔、环形取样单元组成, 每一单元光栅具特定间距  $d_{ij}$  及取向角  $\theta_{ij}$ , 两个参量中的下标  $(i, j)$  对应于  $P_3$  面相应的衍射亮点. 圆的半径由输入图象的最高空间频率所决定:

$$R \geq \lambda f_{L1} u_{\max}$$

#### 1) 具有矩形阵列式衍射图案的 CGH

利用此 CGH 要得到图 3 形式取样衍射结果. 为满足上述条件取:  $H' > b$ , 从而有:  $2H' > H$ . 以保证 CGH 的一、二级衍射图案不致相叠. 设变量  $h(i, j)$  标定  $P_3$  平面上衍射斑点  $(i, j)$  与光轴的距离, 从图 3 得:  $h(i, j) = [H - (i - 0.5)s] / \cos[\theta(i, j)]$ .

其中:

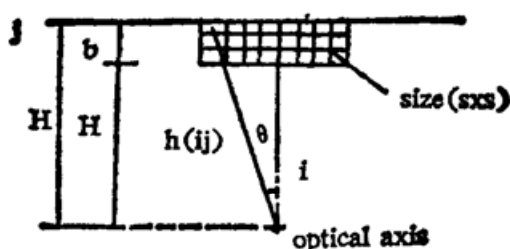


Fig. 3 Geometry of the rectangular diffraction array

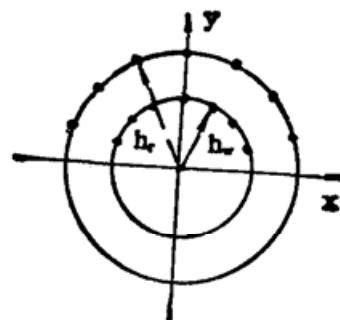


Fig. 4 Geometry of the Concentric diffraction pattern

$$\theta(i, j) = \alpha \tan \{(j - 0.5)s / [H - (i - 0.5)s]\} \quad (12)$$

而由多缝夫朗和费衍射理论知: 相应单元光栅间距为:

$$d(i, j) = \{\lambda f_{L2} / [H - (i - 0.5)s]\} \cos[\theta(i, j)] \quad (13)$$

由(12)式给出取向角度等于  $\theta(i, j)$ 。(12)~(13)式正是绘制 CGH 图的依据。

## 2) 具有同心圆式衍射图案的 CGH

要在  $P_3$  面上得到图 4 形式的衍射图案, 楔形单元光栅间距都取作  $d_w$ , 仅变栅线与  $X$  轴的夹角  $\theta$  以使衍射亮斑在  $P_3$  上相互分离; 环域单元光栅栅距皆取  $d_r$ , 仅变取向角  $\theta$ 。楔/环形单元光栅的一级衍射半径  $h_w, h_r$  满足下式:  $h_w = \lambda f_{L2} / d_w$ ,  $h_r = \lambda f_{L2} / d_r$ 。为避免一、二级衍射斑重叠, 选择:  $2h_w - h_r \geq S_d$ ,  $h_r - h_w > S_d$ 。其中  $S_d$  是衍射斑的最大半径。由(11)式知:  $S_d = \Delta X_3 = \lambda f_{L2} / L$ 。  $L$  为 CGH 光学元件的半径。设分别有  $M$  个楔/环形衍射单元, 则第  $i$  楔域内光栅平行线的方程为:

$$Y = K(i)(x - x_0) \quad (14)$$

$$\text{第一象限:} \quad K(i) = \tan[\pi(i - 0.5) / M + \pi/2] \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (15)$$

$$\text{第二象限:} \quad K(i) = \tan[\pi(i - 0.5) / M - \pi/2]$$

环形单元光栅, 除间距不同外, 其角度的变化与楔形单元相同。

## 3.2 CGH/WRD 取样器的制作

采用 Roland Dxy-800 绘图仪绘制 CGH 原图。按前述设计思想编程, 由微机控制绘图仪绘制出 CGH 原图, 将之缩制到全息干板即得 CGH 光学元件。

### 1) 具有同心圆式衍射图案 CGH

系统透镜参数:  $f_{L1} = 40 \text{ cm}$ ,  $f_{L2} = 65 \text{ cm}$ 。照明波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ , CGH 原图参数:  $R = 12.8 \text{ cm}$ , 楔/环域内光栅间距分别为:  $d_w = 0.107 \text{ cm}$ ,  $d_r = 0.076 \text{ cm}$ 。经 32.5:1 微缩, 得光学 CGH 元件具有以下参数:  $2R = 0.79 \text{ cm}$ ,  $d_w = 0.0033(\text{cm})$ ,  $d_r = 0.0023 \text{ cm}$ 。

### 2) 具有矩形阵列式衍射图案的 CGH

取  $S = 0.15 \text{ cm}$ ,  $m_1 = 3$ ,  $m_2 = 8$ , 透镜焦距及照明光波长同(1), 取  $H = 1.60 \text{ cm}$ , 光栅间距及取向角度由(17)、(18)式定, CGH 原图参数:  $2R = 25.6 \text{ cm}$ , 最小栅线间距  $d_{\min} = 0.081 \text{ cm}$ 。经 32.5:1 缩微得光学元件有以下参数:  $2r = 0.79 \text{ cm}$ ,  $d_{\min} = 0.0025(\text{cm})$ 。

## 3.3 CGH/WRD 实验制作结果

图 5(a)是  $m = 10$  同心圆式 CGH 光学元件在平面光照射下, 于后焦面上得到的衍射图案。(由内往外数)第 1、2 圆分别对应于 CGH 的楔/环形单元的输出。第 3 圆是楔形单元的二级衍射图案, 三、四象限内出现的衍射亮斑为负级衍射图案。各亮点基本分离, 另外第二个圆上衍射亮斑的大小不同乃缘于各环形域的面积大小和所包含的条纹数目不等。图

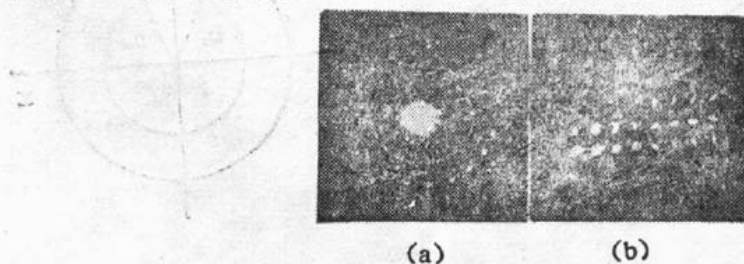


Fig. 5 Output planes for concentric ( $m = 10$ ) (a) and rectangular ( $m_1 = 3$ ,  $m_2 = 8$ ) (b) CGH optical elements while illuminated with a plane wave

5(b)是  $m_1=3$ ,  $m_2=8$  阵列式 CGH 光学元件在平面光照射下, 于后焦面上形成的衍射图案. 第一、二象限衍射亮斑分别对应于楔/环形单元输出, 同样可见衍射亮斑大小相异, 亦缘于环形单元面积和条纹数不等.

#### 4 CGH 应用实例及结果讨论

作为应用测试, 用本系统对一组汉字的傅氏频谱进行取样, 图 6 即为同心圆式 CGH 取样得到的演示图片. 其结果十分直观: 楔形单元输出反映字型的空间取向, 环形单元输出则体现空间频率的大小. 图 7 中的弦分布曲线是采用阵列式 CGH 取样字型的自相关谱, 由 CCD 微机系统经光/电、A/D 及数字化处理由绘图仪绘制的弦分布函数曲线. 实验结果表明, 此 CGH/WRD 系统能很好地模拟半导体 WRD 的功能. 但由于受绘图仪分辨率 (0.15 mm) 的限制——所绘栅线间距不宜小于 0.6 mm, 从而限制了系统的进一步小型化, 此倘有待改进. 另外此系统由于将取样与探测功能相分离, 可充分利用 CGH 的灵活性, 根据具体探测形状变更 CGH 形式, 具有普适性.

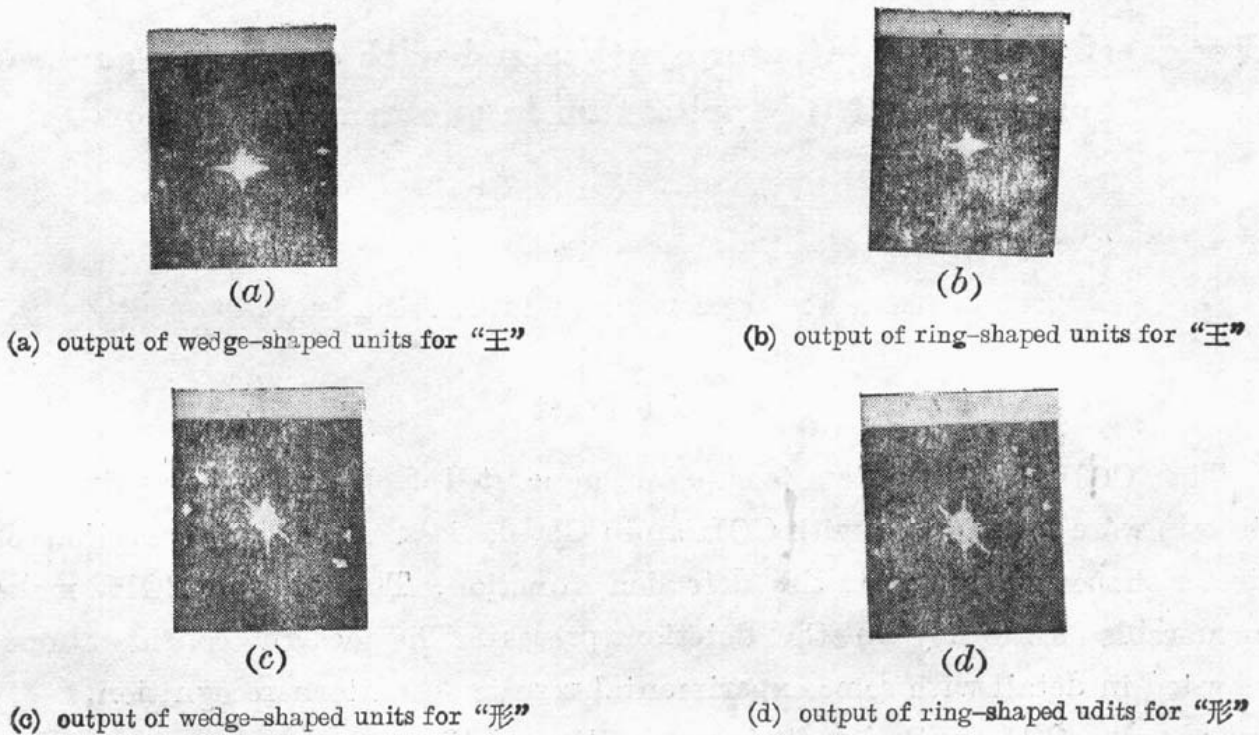


Fig. 6 Sampling results for the FT spectrum of the chinese characters “王” and “形”

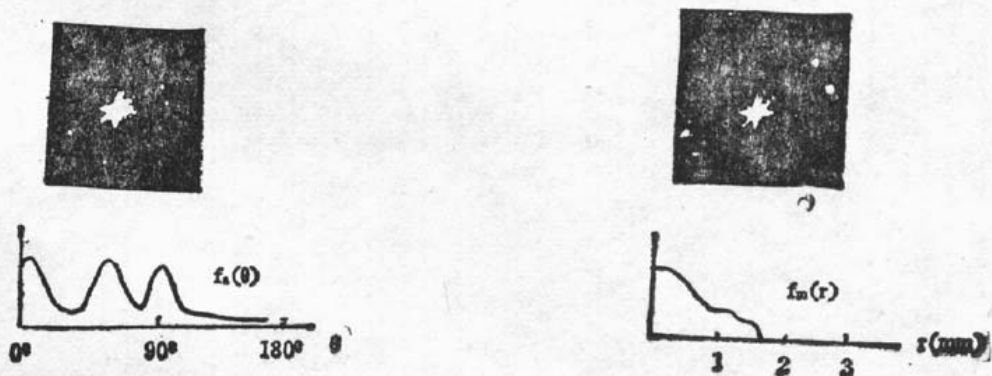


Fig. 7

## 参 考 文 献

- [1] G. Lendaris, G. Stanley, Diffraction-Pattern Sampling for Automatic Pattern Recognition. *Proc. IEEE*, 1970, **58**(2):198~203
- [2] H. Kasdan, D. Mead, Optical Computing On the Factory Floor. *Electro-Optical System Design*, 1976, **248** (6):36~39
- [3] D. Cassent, Optical Signal Processing. *Chapter 8 in Optical Data Processing*, Vol 23 of Topics in Applied Physics, D. Cassent, Editor, Berlin: Springer-Verlag, 1978
- [4] D. Cassent, W. T. Chang, Generalized Chord Transformation for Distortion-Invariant Optical Pattern Recognition., *Appl. Opt.*, 1983, **22** (13):2087~2094.
- [5] D. Cassent, V. Sharma, Feature extractors for distortion-invariant robot vision. *Opt. Engng.*, 1984, **23** (5):492~498
- [6] D. H. Moore, D. J. Parker, Analysis Of Global Pattern Features. *Pattern Recognition*, Pergamon Press Oxford, 1974, Vol. 6, pp149~164, Printed in Great Britain.
- [7] D. G. Nichol, Hybrid Optical Digital Computation Of Global Chord Functions. *Opt. Commun.*, 1982, **43** (3):168~170

## Wedge-ring shaped detector synthesized with computer-generated hologram and its application in pattern recognition

LIU LIREN      WANG TIANJI

(Guangzhou Institute of Electronic Technology Academia Sinica, Guangzhou 510070)

(Received 19 August 1991; revised 11 November 1991)

### Abstract

The CGH/WRD system (computer generated hologram/wedge-ring shaped detector) were synthesized with CGH and CCD devices. It allows separation of the detector shape function from the detection function. The use of CGH makes it considerable flexibility in the detection process. The design considerations are presented in detail with some experimental results on pattern recognition.

**Key words** CGH, optical pattern recognition, CCD.