

利用复值核频域滤波实现图像的光电并行数学形态学矩心尺度-空间变换

张以谟 赵晓东 岳 兵 戴晓芳

(天津大学现代光学仪器研究所, 天津 300072)

提要 采用频域滤波的方法对图像进行光电混合数学形态学矩心尺度-空间变换, 其中用计算全息的方法设计和制作了复值核频域滤波器, 该滤波器作为数学形态学矩心尺度-空间光电系统中的结构元。用该方法实现了二值图像和灰阶图像的矩心尺度-空间变换。

关键词 复值核频域滤波, 矩心尺度-空间变换, 计算全息

数学形态学是数学的一个分支, 可描述图像的基本特征或基本结构, 已广泛应用于图像处理和计算机视觉等领域, 数学形态学的各种变换是基于输入图像和结构元之间的比较而实现的, 其特点是直接在空域中运算^[1]。数学形态学光电处理系统首先实现输入图像与结构元之间相关或卷积运算, 然后利用基于绝对强度的阈值器件进行取阈运算, 完成形态变换运算。

A. Fedor^[1] 提出一个具有奇对称结构元的相对强度数学形态学矩心尺度-空间光电系统, 该系统的基本结构为光学联合变换相关器, 系统是基于矩心尺度-空间映射理论, 在图像上寻找与结构元匹配的矩心点, 由矩心点组成的图像即为矩心图像, 对于不同的尺度可得到与其相对应的矩心图像。由于系统采用联合变换相关结构, 故可通过连续改变复值核 CGH 的半径得到输入图像的矩心图像。但该系统由于是在空域中放置输入图像和结构元, 这样就要求傅里叶透镜有较大的口径, 同时存在着难以解决的相关能量不匹配问题。即输入图像与复数核结构元两者间的光强相差悬殊引起相关现象不明显甚至消失。又由于该系统采用联合变换相关的方法, 中间谱面须放置空间光调制器, 但是目前空间光调制器的技术指标无法满足要求, 故该系统常采用计算机辅助实现第二次傅里叶变换。本文提出改变空域处理为频域处理, 同时由连续变化输入图像的尺寸而实现尺度变换, 实验发现效果良好, 同时克服了空域处理的缺点, 不存在能量不匹配问题, 不要求傅里叶透镜有较大的口径, 不需要计算机辅助实现第二次傅里叶变换, 这样就充分发挥了光学并行处理的优点。

本文给出了二值图像和灰阶图像的尺度-空间变换图像的实验结果。

1 矩心尺度-空间映射^[2]

尺度-空间映射是图像处理法之一, 产生一个关于尺度附加维的输入函数(图像)的映射。

* 国家自然科学基金和国家教委光电信息工程开放实验室资助项目。

收稿日期: 1995 年 7 月 11 日; 收到修改稿日期: 1995 年 11 月 21 日

在矩心尺度-空间映射中,复数核结构元的大小代表尺度,对应于每个尺度,我们得到一幅关于原始输入图像的矩心点图像,我们可用下面的方法获得该矩心点图像,用复数核结构元 $(x + iy)w(x, y; r)$ 与原始输入图像 $X(x, y)$ 作相关或卷积运算,然后对相关或卷积输出结果作零值取阈,取阈后的图像即为矩心点图像,其中 $w(x, y; r)$ 代表结构元形状,其必须为中心对称形状.当结构元大小由零连续变化到无穷时就得到全部矩心尺度-空间变换图像.因为在 x 方向上,物体的矩是物体和结构元实部的积,在 y 方向上,物体的矩是物体和结构元虚部的积,物体的矩心在二者为零之点,正是在这一点上,物体和结构元的相关或卷积为零值.

选择结构元为

$$b(x, y; r) = (x + iy)w(x, y; r) \quad (1)$$

这里 $w(x, y; r)$ 是窗口形状.令 $w(x, y; r)$ 为半径是 r 的圆,可写为

$$w(x, y; r) = \text{circ}[(x^2 + y^2)^{1/2}/r] \quad (2)$$

让 $w(x, y; r)$ 的半径从全部包含物体变至零,这样产生了矩心尺度-空间映射

$$Z(x, y; r) = \text{ZEROS}[b(x, y; r) * X(x, y)] \quad (3)$$

其中符号 $*$ 代表卷积.

矩心尺度-空间映射理论处理的是灰阶图像(二值图像可视为二阶灰阶图像),矩心尺度-空间映射图像具有很多有用的拓扑性质,可用于确定物体的位置和尺寸、对输入图像的居中变换、目标的识别与跟踪、区域与纹理的分割等.

2 复值核结构元谱面上 CGH 的设计与制作

在数学形态学矩心尺度-空间光电并行处理中,由于要用复值核 $(x + iy)$ 的傅里叶变换作为频域滤波器,以实现 $(x + iy)$ 型复振幅波振面结构元与输入图像的卷积运算,而目前用 CGH 制作该滤波器是最有效的方法之一,故采用该方法.

目前已有多种 CGH 的制作方法^[3~5],由于是在谱面上制作 CGH,故要求振幅与位相的再现精度高,噪声小,综合考虑,实验中采用 Burckhardt 方法^[3,5]制作谱面上的 CGH.

3 光电并行处理系统结构

数学形态学矩心尺度-空间光电系统的基本结构如图 1 所示.

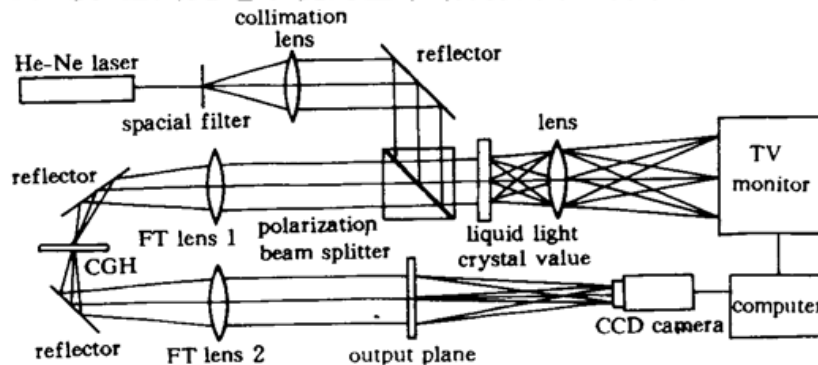


Fig. 1 Optical-electronic system of centroid scale-space transformation

首先由计算机将被处理的图像输入监视器,再经成像物镜将图像成像在液晶光阀的输入面上,由 He-Ne 激光器发出的相干光经准直镜成为相干平行光束,经由偏振光棱镜在液晶光

阀的输出面将输入图像读出, 经过 FTL_1 傅里叶变换得到输入图像的谱, 经过 CGH 的滤波后再经过 FTL_2 傅里叶变换在输出像面上得到复值核结构元与输入图像之间的卷积, 经由 CCD 摄像机将卷积结果送入计算机, 经计算机取阈便完成了一次尺度-空间变换。当图像大小作连续变化时, 就可得到全部尺度-空间上的变换图像。

设液晶光阀输出面上图像为 $f(x, y)$, 它代表系统的输入图像, 复值核结构元为 $b(x, y; r = 0.5)$, 同时用 FT 代表傅里叶变换, 则

$$F(u, v) = FT[f(x, y)] \quad (4)$$

$$B(u, v) = FT[b(x, y; r = 0.5)] \quad (5)$$

现制作 $B(u, v)$ 的 CGH, 并将之放置在第一块傅里叶透镜的谱面上, 则在谱面上的 +1 级衍射的复振幅分布为

$$H(u, v) = F(u, v) \times B(u, v) \quad (6)$$

再经第二次傅里叶变换, 在输出面上复振幅分布为

$$FT[H(u, v)] = f(x, y) * b(x, y; r = 0.5) \quad (7)$$

当对卷积输出作零阈值处理后, 即得到输入图像 $f(x, y)$ 的对应于尺度 $r = 0.5$ 的尺度-空间图像。

当对输入图像缩放 e 倍时, (4) 式变为

$$F_e(u, v) = FT[f(x/e, y/e)] \quad (8)$$

(6)和(7)式变为

$$H_e(u, v) = F_e(u, v) * B(u, v) \quad (9)$$

$$FT[H_e(u, v)] = f(x/e, y/e) * b(x, y; r = 0.5) \quad (10)$$

最后对输出结果(10)式再缩放 $1/e$ 倍可得

$$f(x, y) * b(e \times x, e \times y; r = 0.5) = f(x, y) * b(x, y; r = 0.5 \times e) \quad (11)$$

由(11)式可以看出, 经过对输入图像和输出图像的缩放变换, 对于固定半径 $r = 0.5 \text{ mm}$ 的复值核结构元 CGH, 可实现全部尺度-空间变换, 即 $r = 0.5 \times e$ 。

4 实验结果

本实验的目的是以复值核傅里叶变换作为频域滤波器通过矩心尺度-空间变换光电系统(图 1)实现二值图像(图 2)和灰阶图像(图 3)的光电并行尺度-空间变换。

4.1 二值图像处理的结果

图 2 中, (a) 为输入图像, (b1), (c1), (d1), (e1), (f1), (g1) 分别代表复数核半径 $r = 0.5 \text{ mm}$, 1.5 mm , 2.0 mm , 2.5 mm , 4.0 mm , 5.0 mm 时的与输入图像之间的卷积输出, (b2), (c2), (d2), (e2), (f2), (g2) 分别代表复数核半径 $r = 0.5 \text{ mm}$, 1.5 mm , 2.0 mm , 2.5 mm , 4.0 mm , 5.0 mm 时的输入图像的尺度-空间变换图像。

由图 2 (b2) ~ (g2) 可以看出随着复数核由小变大输入图像(a)的尺度-空间变换图像的变化情况。在小尺度情况下, 尺度-空间变换图像反映了二值图像清楚轮廓(b2), 随着尺度的变大, 输入图像中的方形区域与圆形区域变化成两个点, 并且在两区域之间出现了亮区(d2), 当尺度变得很大时, 尺度-空间变换图像就变成了一个点(g2)。这些结果充分说明了通过复值核频域滤波器实现二值图像的光学并行尺度-空间变换的正确性。

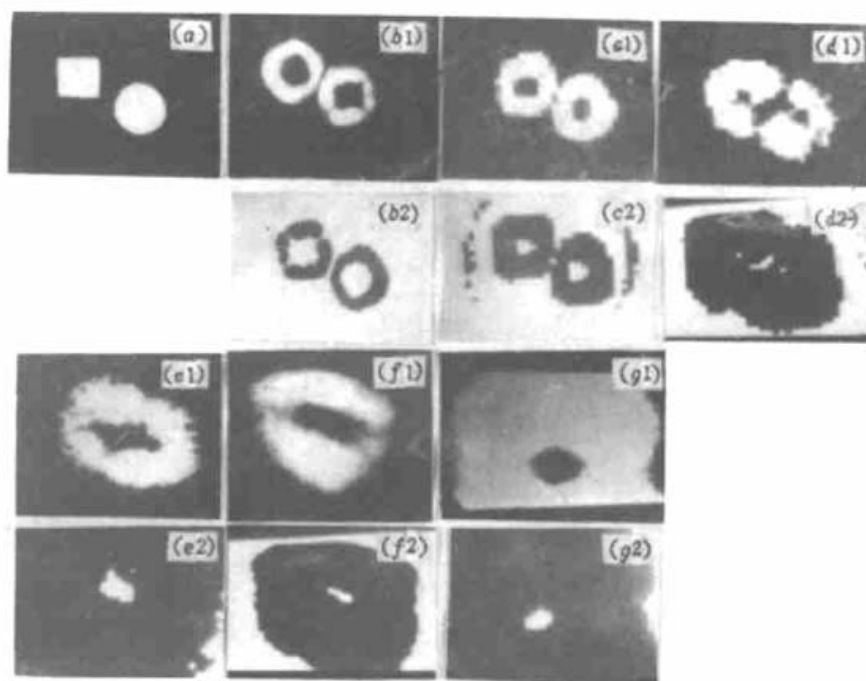


Fig. 2 Experimental results of binary image

(a) input image; (b1) ~ (g1), convolution results for r being 0.5, 1.5, 2.0, 2.5, 4.0, and 5.0 mm;
 (b2) ~ (g2); scale-space maps of the input image for r being 0.5, 1.5, 2.0, 2.5, 4.0, and 5.0 mm

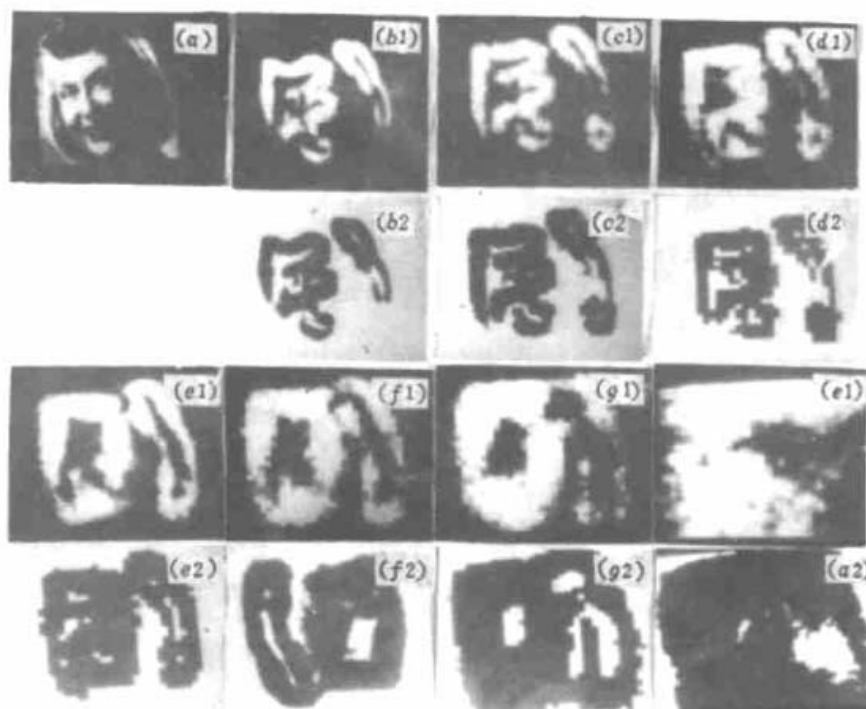


Fig. 3 Experimental results of grey level image

(a) input image; (b1) ~ (h1); convolution results for r being 0.5, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, and 5.0 mm;
 (b2) ~ (h2); scale-space maps of the input image for r being 0.5, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, and 5.0 mm

4.2 灰阶图像处理结果

图 3 中, (a) 为输入图像, (b1), (c1), (d1), (e1), (f1), (g1), (h1) 分别代表复数核半径 $r = 0.5$ mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 5.0 mm 时的与输入图像之间的卷积输出, (b2), (c2), (d2), (e2), (f2), (g2), (h2) 分别代表复数核半径 $r = 0.5$ mm, 1.5

mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 5.0 mm 时的输入图像的尺度-空间变换图像。

由图 3 (b2) ~ (h2) 可以看出随着复数核由小变大输入图像(a) 的尺度-空间变换图像的变化情况。在小尺度情况下,尺度-空间变换图像反映了灰阶图像灰度级为常值的区域的清楚轮廓(b2),随着尺度的变大,输入图像中灰度级为常值的区域不断按照其拓朴规律演变(c2) ~ (h2),这些结果充分说明了通过复值核频域滤波器实现灰阶图像的光学并行尺度-空间变换的正确性。

综上所述,本文提出用频域滤波取代空域滤波的方法实现图像的尺度-空间变换,滤波器是复数核结构元的傅里叶变换,由 CGH 实现。从实验结果可知,该方法有以下优点:(1) 该方法处理的图像与空域处理^[2]相比有较高的质量;(2) 该方法充分体现出光学并行处理的优点,计算机只起到取阈的作用,而在空域处理中,第二次傅里叶变换须用计算机模拟;(3) 和空域处理相比,该方法解决了输入图像与结构元之间的光强匹配问题;(4) 该方法对二值图像与灰阶图像均能实现尺度-空间操作。

由于用复数核的傅里叶变换作为滤波器,而目前用 CGH 是最有效的方法之一。故本文采用 CGH 作为滤波器,但该光学系统要求的 CGH 精度高,噪声小,因此 CGH 的设计与制作有较大难度。

参 考 文 献

- 1 Adam Fedor, Mark O. Freeman. Optical multiscale morphological processor using a complex-valued kernel. *Appl. Opt.*, 1992, 31(20): 4042
- 2 Mark O. Freeman, Bahaa E. A. Saleh. Centroid scale-space maps. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, 8(9): 1474
- 3 虞祖良, 金国藩 著. 计算机制作全息图. 北京: 清华大学出版社, 1984
- 4 WaiHon Lee. Sampled Fourier transform hologram generated by computer. *Appl. Opt.*, 1970, 9(3): 639
- 5 C. W. Burckhart. A Simplification of Lee's Method of Generating Hologram by Computer. *Appl. Opt.*, 1970, 9: 1949

Mathematical Morphological Centroid Scale-space Optical-electronic Hybrid Image Parallel Transformation Using the Approach of Optical Frequency Filtering by a Complex-valued Kernel

Zhang Yimo Zhao Xiaodong Yue Bing Dai Xiaofang

(Institute of Optoelectronics and Precision Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract In this paper an approach of frequency-domain filtering has been proposed to implement mathematical morphological centroid scale-space optical-electronic hybrid image parallel transformation, in which the filter has been designed and made by means of CGH (computer generated holograms). This filter is used as a structure element of the mathematical morphological centroid scale-space optical-electronic hybrid image parallel processing system. The binary and grey level image centroid scale-space transformation has been implemented using this approach.

Key words complex-valued kernel of frequency filtering, centroid scale-space transformation, computer-generated holograms