

改进的曲波变换图像融合方法

宋江山,徐建强,司书春

(山东大学物理学院,山东 济南 250100)

摘要:考虑将曲波变换引入图像融合能够更好地提取原始图像,对一种新的图像融合方法—曲波变换图像融合法进行了研究。将图像序列进行曲波变换后,通过对所有图像的高频进行逆变换及域值处理来获得区域图。根据区域图中高频区域的边界点在每张图层上的活跃度不同求得区域边界的图层分布,利用插值获得高频区域的区域分布图。通过高频区域的膨胀求得整幅图的区域分布图,然后在曲波变换的变换域,利用区域分布图对多尺度的高频系数采用高斯加权求和;对低频系数采用取平均值的规则完成图像的融合。进行了图像融合实验,实验结果表明,与传统的小波变换及基于像素的曲波变换相比,提出的方法获得的融合图像边缘更清晰,更接近参考图像。

关键词:图像处理;图像融合;景深扩展;曲波变换;小波变换

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Improved image fusion method based on curvelet transform

SONG Jiang-shan, XU Jian-qiang, SI Shu-chun

(Physics College of Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: To extract the original features of a image exactly, a new image fusion method based on the curvelet transform is proposed. A series of original images are decomposed by the curvelet transform, and then a region image is obtained by an inverse-curvelet-transform and a domain processing. For the edges of high frequency areas, the edge distribution image is obtained by the activity of every area in different images and the region image is gotten by an interpolation. Finally, the image fusion is accomplished by Gaussian distribution sums for high frequency coefficients and by mean values for low frequency coefficients in the transform domain. A image fusion experiment is undertaken, and the experiment results indicate that the proposed method can obtain a better fusion image with high contrast, clear edges and more closed to a reference image as compared with that of conventional wavelet transform and pixel-based curvelet transform methods.

Key words: image processing; image fusion; extended depth of field; curvelet transform; wavelet transform

1 引言

由于光学传感器景深的限制,用光学系统拍

摄相对较大物体时难免会因为景深的问题引起图像某些部分因离焦而模糊,于是景深扩展成为一种非常重要的提取传感器有用信息的方法。景深扩展的方法很多,其中波前编码^[1,2]是一种软件

硬件相结合的景深扩展方法,该方法可较好地扩展景深,但同时会增加背景噪音,因此必须在拍摄时添加相应的硬件,而且对于普通方法拍摄出来的图片也无法进行处理。景深扩展的软件处理方法是拍摄一系列的图片,每张图片分别聚焦于物体不同部分,然后把这一系列的图片经过某种图像融合算法合成一张全聚焦的图片。用于景深扩展的图像融合算法^[3],常用的是基于高斯金字塔变换^[4]和小波变换^[5,6]的方法,但这两种方法方向性差,对于含有奇异曲线的图像逼近速度较慢,而曲波变换由于对曲线逼近速度快^[7],在图像融合方面比其它变换结果要好^[8],因此很受关注。针对一般图像融合过程对噪音有较高的敏感性,而且对物体边缘,往往会由于有高频向低频区域的扩散,而错误地选择模糊的物体边缘,而不是低频的背景的问题,对此,本文提出一种基于区域的融合规则,即采用一定的方法将图像划分成不同的区域,利用区域分布图进行图像融合,来降低噪音的影响并解决高频扩散到低频引起的低频点误选问题。

2 处理过程

进行图像处理可先对源图像进行曲波变换,从而得到曲波频域上的图像;然后通过所有图像的频域图像得到一张深度图,根据合成法则,用频域分布图和所有图像的频域图像合成最终图像的频域图;最后由曲波逆变换得到最终图像。

2.1 曲波变换

曲波是1999年 E. J. Candes 和 D. L. Donoho 为解决边界表征问题而提出的^[9]。当时曲波的定义是基于窗口(局部)的脊波,由于曲波的数字实现比较复杂,需要子带分解,平滑分块,正规化和脊波分析等,而且脊波金字塔的分界也带来了大量冗余,所以,2002年两人再次提出了一种全新的曲波的数字实现^[7],见图1。与小波相比,曲波有更多的方向性,进行图像融合时在同等条件下比小波变换收敛要快,更能用较少的系数逼近曲线的奇点,因此更适用于对图像的特征和处理。

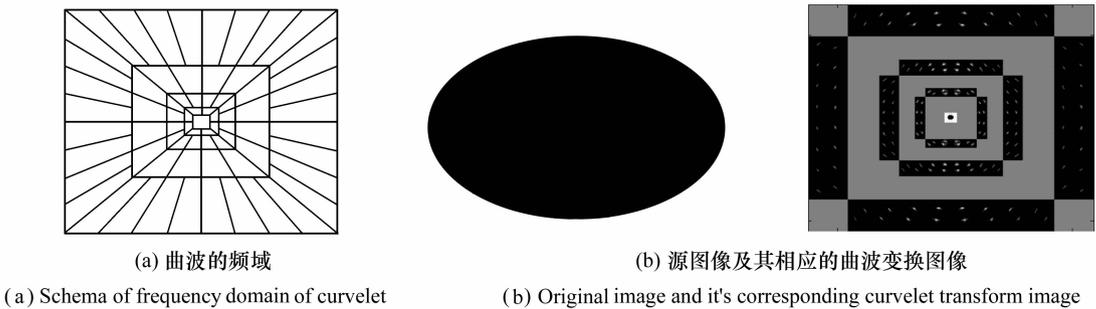


图1 曲波变换示意图及举例

Fig. 1 Curvelet transform scheme and an example

定义二维实空间为 R^2 , 自变量为 X , 频域自变量为 w , 频域下极坐标为 r, θ 。另定义两个平滑、非负、实值的窗口 $W(r)$ 和 $V(t)$ 分别称做半径窗和角窗, 均满足容许性条件:

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W^2(2^j r) = 1, r \in (3/4, 3/2), \quad (1)$$

$$\sum_{l=-\infty}^{\infty} V^2(t-l) = 1, t \in (-1/2, 1/2), \quad (2)$$

对于每个 $j \geq j_0$, 定义在频域上的窗口 U_j :

$$U_j(r, \theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j} r) V\left(\frac{2^{[j/2]} \theta}{2\pi}\right), \quad (3)$$

其中 $[j/2]$ 表示 $j/2$ 的整数部分。

定义母曲波为 $\varphi_j(x)$, 其傅里叶变换 $\varphi_j(w) = U_j(w)$ 。定义曲波:

$$\varphi_{j,l,k}(x) = \varphi_j(\mathbf{R}_{\theta_l}(x - x_k^{(j,l)})),$$

其中 j 是尺度参数, l 是方向参数, k 是位置参数, \mathbf{R} 是旋转矩阵。

这样, 曲波系数:

$$c(j, l, k) := \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle = \int f(x) \overline{\varphi_{j,l,k}(x)} dx, \quad (4)$$

具体的实现见参考文献[7]。

2.2 区域处理

对一张源图像进行曲波变换,就会得到几组高频图像和一张低频图像,分别代表源图像的高频系数和低频系数。将低频图像全部置零,然后再进行曲波的逆变换,就会得到一张只有高频空域的图像。

对所有源图像进行这种变换,并将所得的所

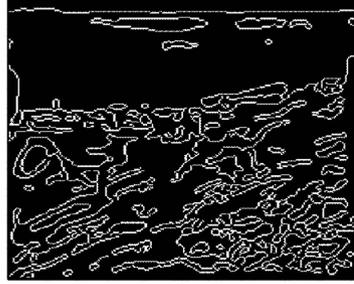
有高频空域图像进行域值处理,然后叠加。叠加后的图像就是高频区域图,见图2(a)。大于某个域值的区域被称为高频区域(图2(a)白色部分),小于域值的区域被称为低频区域(图2(a)黑色部分)。

先对高频区域进行处理,使用canny算法求得区域图里区域的边界,见图2(b);然后对边界上面每一个点都进行求取边界所属图层的操作。



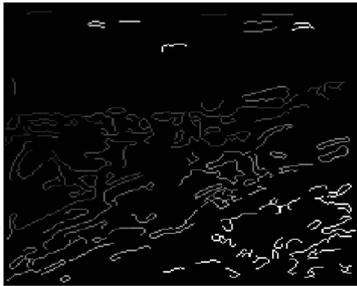
(a) 高频区域图

(a) High frequency regions



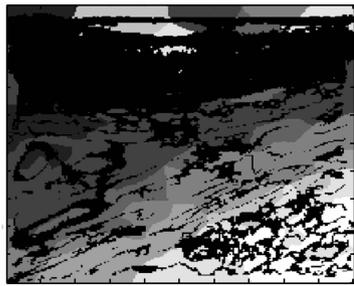
(b) 区域边界

(b) Region edges



(c) 边缘分布图

(c) Edge distribution image



(d) 区域分布图

(d) Region distribution image

图2 区域处理

Fig. 2 Region processing

计算每个区域的骨架,是采用文献[10]中所用的一种算法来进行的。为了计算边界上每个点所属的图层,引入一个点在每个图层上的活跃度的概念。一个边界点的活跃度定义为:一边界点到区域骨架的最近距离为半径,画一个圆,圆和区域的交集为此点的活跃度计算区域。点 (i,j) 在第 k 张图层上的活跃度可以用如下公式计算:

$$P(i,j,k) = \oint_{\text{area}(i,j)} \text{Freq}(k)^2, \quad (5)$$

其中 $\text{area}(i,j)$ 为点 (i,j) 的活跃度计算区域, $\text{Freq}(k)$ 为在第 k 张高频的空域的图像上 $\text{area}(i,j)$ 所对应点的灰度值。

以活跃度最高的图层的序号作为该点的最佳分布图层,写入边缘分布图,见图2(c)。将边缘分布图进行噪声去除,然后通过线性插值得到高频区域的区域分布图,见图2(d)。

低频区域所属图层,是由离它最近的高频区域决定的,所以可采用对高频区域膨胀的方式来填满整幅图片得到整幅图像的区域分布图。

2.3 图像融合

本文按照区域分布图,由源图像的变换域图像,经过融合规则,得到最终图像的变换域图像,然后经过逆变换得到最终图像。

融合规则分两部分,对于低频部分,采用所有

系数取平均值的方式。对于高频部分,则按照区域分布图来处理:由于曲波变换是一种多尺度分析,变换域上一个点可能对应于图像空间域上的几个点,这样融合图像变换域上某点 (x',y') 的值可采用这个点对应的空间域上所有点在深度图上对应的图层变换域上相应位置的值的加权平均。公式如下:

$$DF(x',y') = \sum_{x,y} F(x',y',z(x,y))P(x,y,x',y')$$

其中 $DF(x',y')$ 是融合图像变换域的值; (x,y) 是 (x',y') 对应于空间域上的点; $z(x,y)$ 是 (x,y) 对应的深度图里的值,即 (x,y) 对应的图层; $F(x',y',z(x,y))$ 是图层 z 进行曲波变换后,与融合图像点 (x',y') 同尺度,同方向性,同位置的变换域的值; $P(x,y,x',y')$ 是 F 的权值。

权值 P 的取值,采用高斯分布模型:

$$P(x,y,x',y') = \int_{t=x-0.5}^{x+0.5} \int_{v=y-0.5}^{y+0.5} \frac{1}{2\pi\sigma_t\sigma_v} e^{-[(t-x_0)^2/2\sigma_t^2 + (v-y_0)^2/2\sigma_v^2]} ,$$

$$\sum_{x,y} P(x,y,x',y') = 1$$

其中 (x_0,y_0) 是 (x',y') 对应空间域的中心点位置, σ_t,σ_v 分别是高斯分布的 x,y 方向的扩散半径。

3 实验结果与分析

采用常用的闹钟图像进行图像融合实验,图像大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,256级灰度。实验结果如图3,其中图3(a),3(b)为待融合图像,图3(c),3(d),3(e)分别为采用小波变换(采用Symlet 4母小波)、基于像素的曲波变换及本文方法所得的结果。为了便于比较,小波变换和曲波变换均采用了5级变换。可以看出,小波融合方法得到的图像3(c)有一定的模糊,图像3(d)比3(c)更清晰,细节更好;本文方法得到的图像3(e)边缘最清晰,对比度最好,与参考图像最接近。



(a) 待融合图像
(a) Right focused



(b) 待融合图像
(b) Left focused



(c) 小波变换法融合结果
(c) Result of wavelet method



(d) 参考文献[8]方法融合结果
(d) Result of method in paper [8]



(e) 本文方法融合结果
(e) Result of method of this paper

图3 图像融合结果

Fig. 3 Results of image fusion

表1 对第一组源图像的结果分析

Tab.1 Evaluation of image fusion results

Sample one	Entropy	Cross-entropy	Mean square error
Classic wavelet method	4.857 8	0.036 5	9.621 1
Curvelet method of paper [8]	4.910 0	0.043 4	4.088 4
Method of this paper	4.930 0	0.062 0	3.520 1

表1使用熵(entropy)、交叉熵(cross-entropy)和均方误差(mse)对结果进行了客观评价^[11],可以看出本文方法的各项指标均是最好的,证实了本文方法的有效性。

4 结 论

曲波变换作为一种新的多尺度几何分析工具,不仅具有良好的多尺度、空域和频域局部特

性,还具有方向特性,能将图像分解到不同方向频带范围内,更为精确地表示图像边缘的方向,有效、稀疏地表示图像特征。本文针对多聚焦图像进行图像融合时,采用传统的基于像素的小波变换和金字塔变换产生的融合错误问题,提出了一种新的曲波图像融合方法,采用区域的融合规则,在得到更精确的融合结果的同时,有效降低了高频扩散的噪声,使融合图像更接近参考图像,融合效果更好。

参考文献:

- [1] DOWSKI E R, Jr., CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Appl. Optics*, 1995, April, (10):1859-1866.
- [2] CHEN Y P, ZHANG W Z, ZHAO T Y, et al.. Imaging characteristics of wavefront coding systems within spatial domain [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2007, (8):1425-1429.
- [3] WANG ZH J, DJEMEL Z, COSTAS A, et al.. A comparative analysis of image fusion methods[J]. *IEEE T. Geosci. Remote*, 2005, 43(6):1391-1402.
- [4] BURT P J, ADELSON E H. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *IEEE T. Commu.*, 1983, 31(4):532-540.
- [5] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition; the wavelet representation[J]. *IEEE T. Pattern Anal. (TPAMI)*, 1989, 11(7):674-693.
- [6] DAVID A Y. Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform[J]. *J. Opt. Society America*, 1995, 12(9):1834-1841.
- [7] CANDES E J, DONOHO D L. New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with C2 singularities [J]. *Commun. Pure and Appl. Math.*, 2004, 57(2):219-266.
- [8] LI H H, GUO L, LIU H. Research on image fusion based on the second generation curvelet transform[J]. *Acta Opt. Sinica*, 2006, (5):657-662.
- [9] STARCK J L, CANDES E J, DONOHO D L. The curvelet transform for image denoising[J]. *IEEE T. Image Process.*, 2002, 11(6):670-684.
- [10] LAM L, LEE S W, SUEN C Y. Thinning methodologies-A comprehensive survey[J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 1992, 14(9):879-880.
- [11] TSAI V J D. Evaluation of multiresolution image fusion algorithm[J]. 2004 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings: Science for Society: Exploring and Managing a Changing Planet*, 2004:621-624

作者简介:宋江山(1988—),男,山东东营人,硕士,主要研究方向为测试计量、数字图像处理。

E-mail:jiangshan00000@gmail.com

徐建强(1962—),男,山东济南人,教授,主要研究方向为现代光电测试技术和数字图像处理。

E-mail:jqu@sdu.edu.cn