第37卷 第17期
Vol.37 No.17

计 算 机 工 程
Computer Engineering

2011年9月
September 2011

• 图形图像处理 •

文章编号：1000—3428(2011)17—0200—03 文献标识码：A 中图分类号：TP391

基于曲波变换的图像非线性增强改进算法

肖 丁，孙自强

(华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室，上海 200237)

摘 要：在传统曲波图像增强中，非线性增益函数通常需要调节多个参数。针对该问题，提出一种基于曲波变换的图像非线性增强改进算法。在处理低对比度图像前，对其空间域特征进行分析处理，将空间域非线性增强和曲波非线性增强处理相结合，通过较少的参数选择，结合曲波变换的多尺度特性，提高曲波增强方法的自适应度。实验结果证明，该算法具有较好的图像增强效果。

关键词：曲波变换；低对比度；图像增强；非线性变换；自适应

Improved Algorithm of Image Nonlinear Enhancement Based on Curvelet Transform

XIAO Ding, SUN Zi-qiang

(Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Processes, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

【Abstract】Aiming at the complication of modulating different parameters of nonlinear gain function on general image enhancement algorithm based on curvelet transform, an improved algorithm of image nonlinear enhancement based on curvelet transform is given in this paper. It analyzes and processes the spatial feature before low contrast image is processed, then combines the spatial nonlinear transform and curvelet nonlinear transform, through the choice of less parameters and combination of multiscale characteristic of curvelet transform to improve the self-adaption of curvelet enhancement. Experimental results demonstrate that the proposed method has better effect on image enhancement.

【Key words】curvelet transform; low contrast; image enhancement; nonlinear transform; self-adaption

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.17.067

1 概述

数字图像在产生过程中，常常受到成像设备和外部环境等影响，导致转换后的数字图像质量下降、对比度降低、细节模糊，影响了对图像内容的理解。为提高图像的对比度，改善图像的视觉效果，保证图像后续处理的正确性，需要对图像进行增强处理。图像增强方法一般分为空间域和变换域2类。空间域图像增强方法通过对图像空间像素点灰度值的变换来提升对比度，如线性变换、非线性变换、直方图均衡化等；变换域图像增强方法是由傅里叶变换而衍生的一系列方法，如小波变换和曲波变换。

小波变换以其低熵性、多分辨率、去相关性、选基灵活性等特点，及其在时域和频域都具有的表征信号局部特征的能力，在图像增强领域得到了广泛的应用。但是对于二维图像处理，小波变换的基是各向同性的，只能反映奇异点的位置和特性，在表示图像中的边界和线状特征时存在一定的局限。为了克服小波变换的缺点，文献[1]提出Curvelet变换，即第1代Curvelet变换，能有效地表示直线奇异性特征和曲线奇异性特征。其核心是子带分解和脊波变换，数字实现过程比较复杂，数据冗余量较大。因此，文献[2]提出了实现更简单、更便于理解的快速Curvelet变换，即第2代Curvelet变换。由于曲波变换具有良好的细节表征能力，很多学者[3-4]将其运用在低对比度图像的细节增强和边缘锐化处理上，取得了较好的效果。一般的非线性变换需调节多个参数，给图像的处理过程带来很多不便，且变换函数对曲波系数所有尺度层进行相同的变换，没有考虑到图像经曲波分解后不同尺度层上系数的不同分布特征，具有一定的局限性。文献[5]考虑到小波系数的相关性及图像中不可避免的噪声等特点，对高低频系数采用不同的处理方法，但是由于小波变换固有的缺陷，在图像的方向特征表达上存在一定的不足。为此，本文提出一种与曲波系数尺度相关的具有较少调节参数的图像非线性增强改进算法。

2 第2代曲波变换

以笛卡尔坐标系下的 $f[t_1,t_2](0\leqslant t_1,t_2<n)$ 为输入，Curvelet变换的离散形式为：

$$c^D(j,l,k):=\sum_{0\leqslant t_1,t_2<n} f[t_1,t_2]\overline{\varphi^D_{j,l,k}[t_1,t_2]} \tag{1}$$

其中，$\varphi^D_{j,l,k}$ 表示离散曲波波形。

采用一带通函数 $\psi(\omega_1)=\sqrt{\phi(\omega_1/2)^2-\phi(\omega_1)^2}$，其中，$0\leqslant\phi$ 1，定义：

$$\begin{cases}\psi_j(\omega_1)=\psi(2^{-j}\omega_1)\\ V_j(\omega):=\psi_j(\omega_1)V_j(\omega)\end{cases},\ j>0 \tag{2}$$

对于每一个 $\omega=(\omega_1,\omega_2),\omega_1>0$，有：

$$V_j(\boldsymbol{S}_{\theta_l}\omega)=V_j(2^{\lfloor j/2\rfloor}\omega_2/\omega_1-l) \tag{3}$$

其中，$\lfloor j/2\rfloor$ 表示 $j/2$ 取整；$\boldsymbol{S}_{\theta_l}$ 是一个剪切矩阵，$\boldsymbol{S}_{\theta_l}=\begin{pmatrix}1&0\\-\tan\theta_l&1\end{pmatrix}$，$\tan\theta_l:=l\cdot2^{\lfloor j/2\rfloor}$，$l=-2^{\lfloor j/2\rfloor},-2^{\lfloor j/2\rfloor}+1,\cdots,$

基金项目：上海市重点学科建设基金资助项目(B504)

作者简介：肖 丁(1985－)，女，硕士研究生，主研方向：图像处理；孙自强，教授

收稿日期：2011-03-21 **E-mail：**xiaoding9911@163.com

$2^{\lfloor j/2 \rfloor}-1$。$\theta_l$ 并非等间距，但是斜率是等间距的，针对每个 $\theta_l \in [-$ ，有：

$$\tilde{U}_{j,l}(\omega) := \psi_j(\omega_1) V_j(\boldsymbol{S}_{\theta_l}\omega) = \tilde{U}_j(\boldsymbol{S}_{\theta_l}\omega) \tag{4}$$

目前有 2 种快速离散曲波变换的实现方法，分别是 USFFT 算法和 Wrap 算法。文献[2]对这 2 种实现方法进行了比较，得出 Wrap 算法比 USFFT 算法具有更好的去噪效果，且运行速度比较高。

FDCT 基于 USFFT 方法，增加了 Wrap 步骤，实现过程如下[6]：

(1)对于给定的一个二维函数 $f(t_1,t_2)$ 进行二维 FFT 变换，得到 $\hat{f}[n_1,n_2], -n/2 \leqslant n_1,n_2 \leqslant n/2$。

(2)在频域，对于每一尺度 j 和角度 l，重采样 $\hat{f}[n_1,n_2]$，得到 $\hat{f}[n_1, n_2 - n_1\tan\theta_l]$，计算：

$$\hat{f}_{j,l}[n_1,n_2] = \tilde{U}_{j,l}(n_1,n_2)\cdot f[n_1, n_2 - n_1\tan\theta_l]$$

(3)围绕原点 Wrapping 局部化 $\hat{f}_{j,l}[n_1,n_2]$。

(4)对于每一 $\hat{f}_{j,l}[n_1,n_2]$ 进行二维逆 FFT 变换，即可得离散曲波系数 $c^D(j,l,k)$。

3　基于曲波变换的图像非线性增强改进算法

多数图像增强方法直接对图像进行全局或局部增强处理，没有事先对图像的分类做出判断。本文首先根据图像直方图灰度级的分布情况，对图像进行分类判断，采用非完全 Beta 变换实现对比度的全局增强；然后结合曲波变换，采用改进的非线性分段函数，实现图像的细节增强。

3.1　灰度图像的分类

根据直方图的灰度分布密度，可将图像按视觉效果进行分类：偏暗(PD)，中偏暗(MD)，中稍微偏暗(MDS)，中稍微偏亮(MBS)，中偏亮(MB)，偏亮(PB)和亮度分布比较均匀(GGLD)。分类的标准如图 1 所示。待处理图像的灰度分布范围一般为 0~255 级，图 1 将整个灰度空间划分为 6 个子空间：A_1~A_6。分布于待处理图像直方图中的第 i 个子空间的像素点个数用 $A_i(i=1,2,\cdots,6)$ 表示。

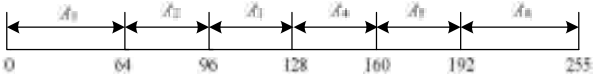


图 1　基于直方图的图像分类

设 $M=\max_{i=1}^{6} A_i$、$B_1=\sum_{i=2}^{6} A_i$、$B_2=\sum_{i=2}^{5} A_i$、$B_3=\sum_{i=1}^{5} A_i$、$B_4=A_1+A_6$、$B_5=A_2+A_3$、$B_6=A_4+A_5$，图像的分类见表 1。

表 1　基于直方图灰度级的图像分类

图像类别	灰度分布密度
PD	$(M=A_1)\&(A_1>B_1)$
MD	$(B_2>B_4)\&(B_5>B_6)\&(B_5>A_1)\&(B_5>A_6)\&(A_2>A_3)$
MDS	$(B_2>B_4)\&(B_5>B_6)\&(B_5>A_1)\&(B_5>A_6)\&(A_2<A_3)$
MBS	$(B_2>B_4)\&(B_5<B_6)\&(A_1<B_6)\&(B_6>A_6)\&(A_4>A_5)$
MB	$(B_2>B_4)\&(B_5<B_6)\&(A_1<B_6)\&(B_6>A_6)\&(A_4<A_5)$
PB	$(M=A_6)\&(A_6>B_3)$
GGLD	Else

3.2　空间域变换

对于低对比度图像出现的偏暗、偏亮或灰度过于集中等现象，空间域的增强处理方法通常采用灰度拉伸或压缩等变换来实线对比度的拉伸。Tubbs 将几种常用的非线性变换函数表示成归一化的非完全 Beta 函数，通过参数的调整可以自适应地实现图像的灰度变换。

归一化的非完全 Beta 函数定义为：

$$F(\alpha,\beta;u)=\frac{\int_0^u t^{\alpha-1}(1-t)^{\beta-1}\mathrm{d}t}{\int_0^1 t^{\alpha-1}(1-t)^{\beta-1}\mathrm{d}t} \tag{5}$$

其中，$0<\alpha$；$\beta<10$。通过对参数 α 和 β 的调整能够拟合不同的灰度变换曲线。根据基于直方图的分类标准，参数的取值范围如表 2 所示[7]。

表 2　参数的取值范围

参数	PD	MD	MDS	MBS	MB	PB
α	[0, 2]	[0, 2]	[0, 2]	[2, 4]	[2, 6]	[7, 9]
β	[7, 9]	[2, 6]	[2, 4]	[0, 2]	[0, 2]	[0, 2]

3.3　曲波域增强

3.3.1　非线性增强因子的改进

文献[3]提出采用非线性增强因子对图像的曲波系数进行非线性处理，然后通过曲波反变换实现图像的增强。其非线性增强函数为：

$$\begin{cases} y_c(x,\sigma)=1 & x<c\sigma \\ y_c(x,\sigma)=\dfrac{x-c\sigma}{c\sigma}\left(\dfrac{m}{c\sigma}\right)^p+\dfrac{2c\sigma-x}{c\sigma} & x<2c\sigma \\ y_c(x,\sigma)=\left(\dfrac{m}{x}\right)^p & 2c\sigma\leqslant x<c\sigma \\ y_c(x,\sigma)=\left(\dfrac{m}{x}\right)^s & x\geqslant m \end{cases} \tag{6}$$

其中，x 为曲波系数；σ 为噪声标准差；p 为非线性变换程度；m 为阈值；s 决定动态压缩范围；c 为正则化参数。

由于 Starck 算子涉及的调节参数有 4 个(c、p、s、m)，自适应程度不高，实验过程中需要反复调整参数，给实际应用带来了一定的复杂度。本文在非线性分段函数的基础上，提出了一种较为简单和复杂度更低的非线性增强函数：

$$\begin{cases} y=x_{j,l}-(G-1)\delta & x_{j,l}<-\delta \\ y=Gx_{j,l} & |x_{j,l}|\leqslant\delta \\ y=x_{j,l}+(G-1)\delta & x_{j,l}>\delta \end{cases} \tag{7}$$

其中，阈值门限 $\delta=\max(|x_{j,l}|)\dfrac{\mathrm{e}^{(-j)}}{1+\mathrm{e}^{(-j)}}$；增益因子 $G=\dfrac{c}{1+\mathrm{e}^{(-j)}}$；$x_{j,l}$ 为尺度 j 上的曲波系数；c 增益修正因子。传统的非线性分段函数 G 为增益常数，阈值门限 $\delta=t\times\max(|x_{j,l}|)$，$0<t<1$。该增强函数只需调节一个参数 c，增强了算法的自适应性。

由于曲波系数在各尺度上的分布不同，为增强细小特征，本文根据曲波系数和尺度自适应地产生相应的阈值门限 δ，增益因子与尺度结合，不同的尺度增强因子也不同，有效地利用曲波系数的多尺度特性，实现图像的对比度增强。

3.3.2　高频系数的处理

图像信号经 Curvelet 变换后得到的曲波系数分为低频子带系数和不同尺度各方向下的中高频子带系数，低频部分为图像的基本信息(概貌)，中高频部分包含图像的细节信息、边缘特征和噪声成分。图像在采集生成过程中不可避免地包含一些噪声，且噪声产生的曲波系数小又多，主要分布在曲波系数的高频部分。结合曲波变换以上特点，本文算法对不同频带采取不同的处理方法：对中低频子带曲波系数采用非线性变换，高频系数采用阈值函数保留细节的同时实现图像

的降噪处理。文献[8]提出软阈值函数：

$$C_S=\begin{cases}\text{sign}(C_{i,j})(|C_{i,j}|-\lambda) & |C_{i,j}|\geqslant\lambda\\ 0 & |C_{i,j}|<\lambda\end{cases} \tag{8}$$

其中，阈值 $\lambda=\sigma\sqrt{\ln(N\times M)}$；sign(·)为符号函数；$C_{i,j}$ 是曲波变换后的系数；N 和 M 为图像的大小；σ 为噪声标准差。

3.4 改进的图像增强算法

假设二维图像 $f(i,j)$，本文算法具体如下：

Step1 采用式(9)对 $f(i,j)$ 进行归一化处理。

$$g(i,j)=\frac{f(i,j)-\min(f(i,j))}{\max(f(i,j))-\min(f(i,j))} \tag{9}$$

Step2 对归一化处理后的图像，根据直方图的图像分类获取相应的参数 α 和 β，进行非完全 Beta 函数变换 $g'(i,j)=F(g(i,j))$。

Step3 将 $g'(i,j)$ 进行反归一化处理，得到空域增强的图像 $x(i,j)$。

Step4 对图像 $x(i,j)$ 进行曲波变换。

Step5 对分解后的低频和中频曲波系数采用式(7)进行非线性增强变换；对分解后的高频曲波系数进行软阈值降噪处理。

Step6 曲波反变换得到目的图像 $x'(i,j)$。

4 实验与分析

本文利用 Matlab 工具，以 291×240 像素的 Pout 图像为实验对象，图像的对比度和信息熵作为对图像增强效果的判断标准，结合不同的曲波系数增强函数，验证本文算法的增强效果。

对于 $M\times N$ 的图像，对比度的计算公式如下：

$$C_{\text{CONTRAST}}=\sqrt{\sum_{m=0}^{M}\sum_{n=0}^{N}(X-\overline{X})^2/(M\times N)} \tag{10}$$

其中，$\overline{X}$ 是图像 X 的灰度均值。

信息熵是衡量图像质量的重要指标，熵值反映携带信息量的大小。

$$H=-\sum_{i=1}^{L}p(k)\text{lb}p(k) \tag{11}$$

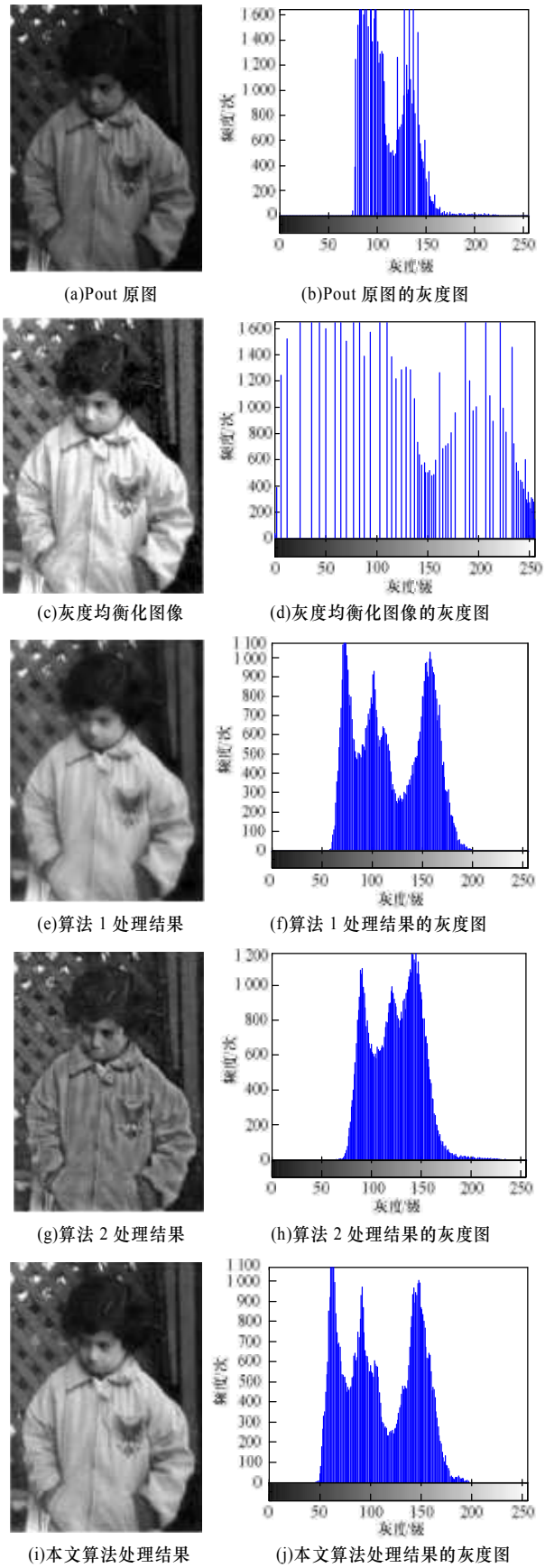
其中，$p(k)$ 为灰度值为 k 的灰度级出现的概率；L 为图像的总灰度级数。

在实验中，通过对 pout 图像的直方图分布特点，结合表 2，判断图像为中稍微偏暗(MDS)图像，选取非完全 Beta 函数的参数 $\alpha=1.1$、$\beta=2.5$。设算法 1 中曲波系数的增强函数为常用非线性分段函数，$G=0.4$、$t=0.15$；设算法 2 为 Starck 增强函数，$p=0.5$、$s=0.6$、$c=0.6$ 及 $m=0.6$；本文算法增益修正因子 $c=0.67$。各种算法增强后的对比度和信息熵如表 3 所示。可以看出，本文算法的对比度和信息熵明显优于算法 1 和算法 2。

表 3 不同算法增强后的对比度和信息熵

算法	对比度	信息熵
原图	23.181 0	5.759 9
算法 1	35.285 6	6.823 3
算法 2	24.936 2	6.549 1
本文算法	35.985 8	6.853 4

在视觉效果上，各算法处理后的图像及其灰度直方图分布如图 2 所示。灰度均衡化后图像整体对比度有很大的提高，但是处理后的图像灰度级出现简并现象，丢失一些灰度级信息。算法 1 处理后的图像灰度级得到拉伸，但是图像出现一些模糊的现象。算法 2 处理后的图像边缘细节明显，但是灰度分布变化不大，对比度改善不是太明显。本文算法处理后的图像视觉效果较好，具有丰富的边缘细节信息，灰度分布也得到有效拉伸，实现了对比度的增强。



(a)Pout 原图 (b)Pout 原图的灰度图

(c)灰度均衡化图像 (d)灰度均衡化图像的灰度图

(e)算法 1 处理结果 (f)算法 1 处理结果的灰度图

(g)算法 2 处理结果 (h)算法 2 处理结果的灰度图

(i)本文算法处理结果 (j)本文算法处理结果的灰度图

图 2 不同算法对 Pout 图像增强的效果对比

(下转第 205 页)