

# 纹理流线:一种有效的二维向量场可视化方法\*

周 璐<sup>1</sup>, 李晓梅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073);

<sup>2</sup>(装备技术指挥学院 电子技术系, 北京 101416)

E-mail: lu\_zhou@163.net

**摘要:** 向量场可视化是可视化研究的一个焦点. 流线能够很好地表现向量场的局部信息, 并被用于二维向量场的全局显示. 从信号分析的角度讨论了基于流线的全局向量场可视化方法的频域特点, 指出其结果图像视觉效果的优缺点. 在此基础上提出和分析了一种新的方法: 纹理流线方法. 新方法的频域意义更为明确, 计算简单且开销小.

**关键词:** 向量场可视化; 流线; 信号处理; 纹理合成技术

**中图法分类号:** TP391 **文献标识码:** A

向量场数据广泛产生于许多学科和领域中, 如计算流体力学、洋流分析、天气预报等等. 有效的向量场可视化方法一直是可视化研究中的一个挑战性问题. 流线是描绘向量场局部信息的一种有效手段, 一些方法利用流线计算能够有效地表现二维向量场的全局信息. 本文从信号分析的角度分析这些方法所产生的结果图像在频域上的优缺点, 并由此给出一种新的二维向量场可视化方法: 纹理流线方法. 新方法只需进行流线计算, 得到的结果类似于纹理方法, 而在实现上更为方便、灵活, 而且时空开销均小于前者.

本文第 1 节首先简要分析两种基于流线的二维向量场可视化方法及其频率特点. 第 2 节详述新方法及其分析. 第 3 节给出实验结果. 最后对该方法进行总结.

## 1 基于流线的二维向量场可视化方法和频率分析

设二维向量场  $f$  定义在开集  $E$  上,

$$f(u); E \rightarrow R^2, E \in R^2. \quad (1)$$

$f$  中一条过  $u_0 = (x_0, y_0)$  的流线  $s$  由微分方程

$$\frac{ds}{dt} = f(s), s \in E, s(0) = u_0 \quad (2)$$

定义解得的  $s$  是一条处处与向量场相切的曲线. 因此, 流线能够有效地表现向量场的局部信息. 利用密集流线表现向量场全局信息的主要问题在于初始点(种子点)的选择. 手工指定需要对向量场有先验知识, 而随机选择可能会遗漏重要特征.

两种基于流线计算的方法较好地解决了上述问题. 文献[1]中提出用“能量函数”来指导初始点的位置, 使得生成的流线足够多, 不会遗漏细节; 同时也保证了流线在图像中基本能够均匀分布, 不

\* 收稿日期: 1999-12-21; 修改日期: 2000-03-13

基金项目: 国家“九五”国防预研基金资助项目(16.1.4.5)

作者简介: 周璐(1973-), 女, 湖北武汉人, 博士, 助研, 主要研究领域为科学计算可视化; 李晓梅(1938-), 女, 安徽黟县人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为大规模并行计算, 科学计算可视化.

致引起视觉误差.图1是该方法生成的一个向量场的图像,局部流线密度(能量)和流线的灰度同时用来反映向量的大小.

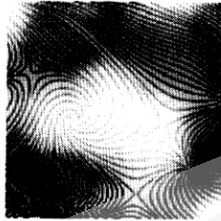


Fig.1 Dense streamlines guided by "Energy Function", vector magnitude are simultaneously represented by streamline density and intensity

图1 由“能量的数”指导生成的密集流线,流线的密度、灰度同时用来反映向量的大小

视觉心理学研究表明,视觉系统对图像的理解过程首先是信号分析,对图像的理解主要来源于低频信号,高频信号表现图像的细节(如边界);一个纹理要被分辨和理解,其低频信号分量必须有足够的能量.平面上一条灰度恒定的曲线可以看做是携带了两个方向的信息,即平行和垂直于该曲线的方向,其灰度信号有不同的频率分布.沿曲线方向的灰度信号是常值,而垂直方向则是脉冲信号.图2列出不同宽度脉冲信号和常值信号的频率分布(一维).可以看出,脉冲间隔越大,其频率分量在频域中的分布越均匀(冲激信号的频谱为常值1);反之,则在频域上表现为集中的频率分布.

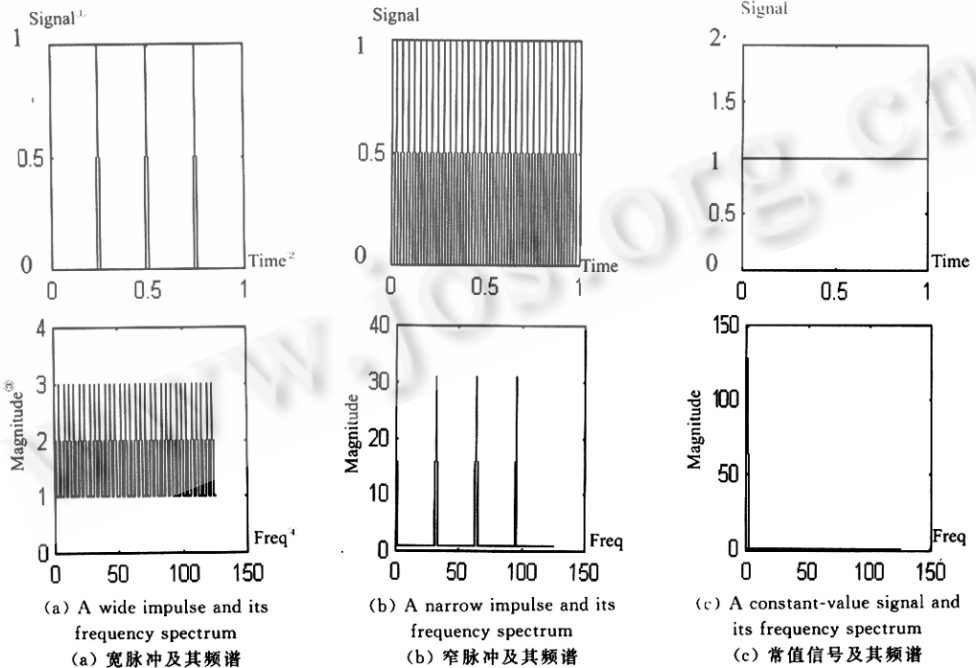


Fig.2 Impulse and constant-value signals and their frequency spectrums

图2 脉冲和常值信号及其频谱

流线图中,大部分区域内邻近流线近似于平行,随着流线密度的增加,垂直方向的脉冲信号间隔变小;当密度进一步增加(距离趋于像素大小)时,垂直和平行于流线的灰度信号的频率分布趋于一致,就会引起视觉上的错觉,如图1左下角.因此,这种方法中流线的密度仍然受到限制;并且由于“能量函数”随着流线的加入而修改,流线的生成是一个动态过程,不能满足实时显示的需要.

LIC (linear integral convolution)<sup>[2,3]</sup>是另一种有效的方法,其过程如图3所示.输入的白噪声纹理是在频率域上均匀分布的灰度信号,在每一像素点处计算流线,沿流线方向对输入纹理进行卷积,得到输出纹理中对应像素的灰度值.卷积核为低通滤波函数.由于卷积计算的频率意义是两个信号的频谱相乘,LIC方法的频域含义是利用流线的输入均匀纹理进行各向异性滤波,使得输出纹理的灰度信号在沿流线方向集中在低频区,而在垂直方向的信号保持均匀分布,从而分辨出每一像素点处的向量场方向.

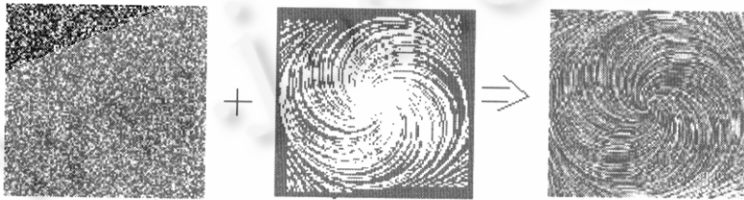


Fig. 3 Process of LIC

图3 LIC过程

LIC方法中卷积核的长度决定输出结果的细节程度.固定长度的卷积核使得输出图像中的纹理表现出均匀性,从而无法表现向量的大小(如图6(a),7(a)所示);“多频纹理”<sup>[4]</sup>方法通过预处理中对流场的分析调制输入纹理,使之具有不同的频带特征,可使输出纹理部分地反映出流场的大小.

## 2 纹理流线方法

### 2.1 原理和算法描述

由上述讨论可知,利用密集流线表现向量场的全局特征,必须在各点使垂直和平行向量场的两个方向的灰度信号的频率分布有足够的差异.为此,我们提出一种新的算法:利用图形硬件的纹理功能直接给流线赋以低频纹理\* (亮度),而每条流线的颜色(灰度)值随机产生;最终图像上一点的值由其颜色值和纹理值相乘得到.由于流线带有纹理属性,故该方法称为纹理流线方法.算法的类C语言描述如下:

```

for all pixels  $p$ 
    set HitCount[ $p$ ]=0;
for all pixels  $p$ 
    if (HitCount[ $p$ ]==0) //保证每个像素都被画到
    {
        compute field line  $L$  starting from center of  $p$ ; //计算流线
        Map predefined texture  $T$  to  $L$ ; //将低频纹理映射到流线
        draw textured  $L$  in random color  $C$ ; //绘制纹理流线
    }

```

\* 文中“低频纹理”是指能量集中在低频区的纹理信号.

```

for each pixel  $pp$  passed by  $L$ 
    HitCount[ $pp$ ]+=1;
}

```

## 2.2 算法说明和分析

算法保证每个像素被至少一条流线经过,所以流线足够密. 流线计算采用自适应步长的 Runge-Kutta 方法,以保证精度和速度. 低频纹理可通过对随机信号进行低通滤波得到. 图4(a)~(d)列出了一个一维随机信号及其经1-阶到3-阶 B 样条函数滤波的结果及其频率分布,可以看出,得到的结果类似于2-阶到4-阶 B 样条函数的值作为纹理信号.

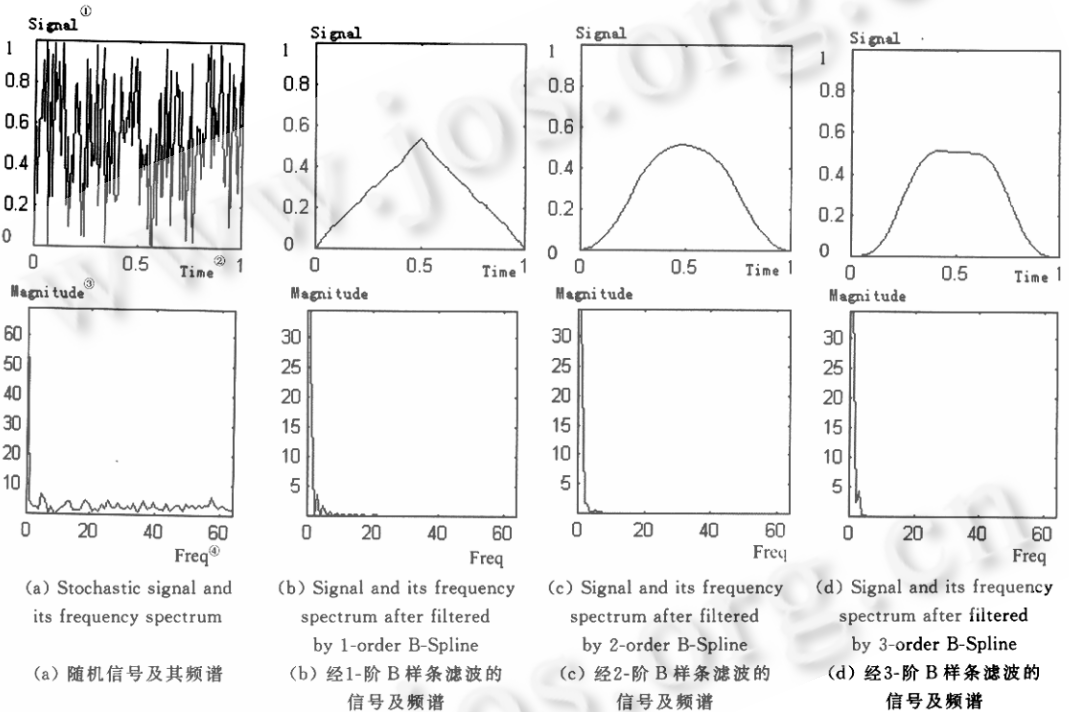


Fig. 4 Stochastic, filtered signals and their frequency spectrums

图4 随机信号、滤波结果和频谱

值随机产生的颜色保证流线之间(垂直方向)灰度信号频率的均匀分布;沿流线方向的灰度信号等于预定义低频信号乘以常数值,由图5(a)和图5(b)可以看出,该操作不改变信号的低频特征而仅改变能量聚集程度;因此,该方法的实质是在垂直于流线方向上增加噪声信号.

纹理映射的一个优点是易于实现多频纹理. 在流线计算时根据各点的向量大小对纹理进行伸缩,如图5(b)和图5(c)所示,纹理拉伸(中间进行线性插值)的频率效果是使能量在低频区域更加集中. 这一点在动画实现中也非常有用. 在 LIC 方法中,动画实现通过卷积核的平移来实现,但固定的核长度使得纹理的流动只能反映向量的方向(前或后),而不能表现真实的速度大小. 特别是对环形向量场,内外层相同的线速度可能使人产生内外层反向旋转的错觉. 而通过向量大小控制纹理伸缩,可以使纹理运动正确地反映向量的大小.

纹理流线方法的计算开销主要是流线计算,一维流线纹理只在初始化时计算一次,因而时间和

空间开销均小于 LIC 方法,在一般的微机(如 PII/233)上也能达到1~2帧/秒的显示速度,可用于动画.并且由于纹理映射直接作用于流线,避免了纹理合成方法中对非规则向量场的复杂二维纹理变换,因而可以直接应用于各种二维向量场.

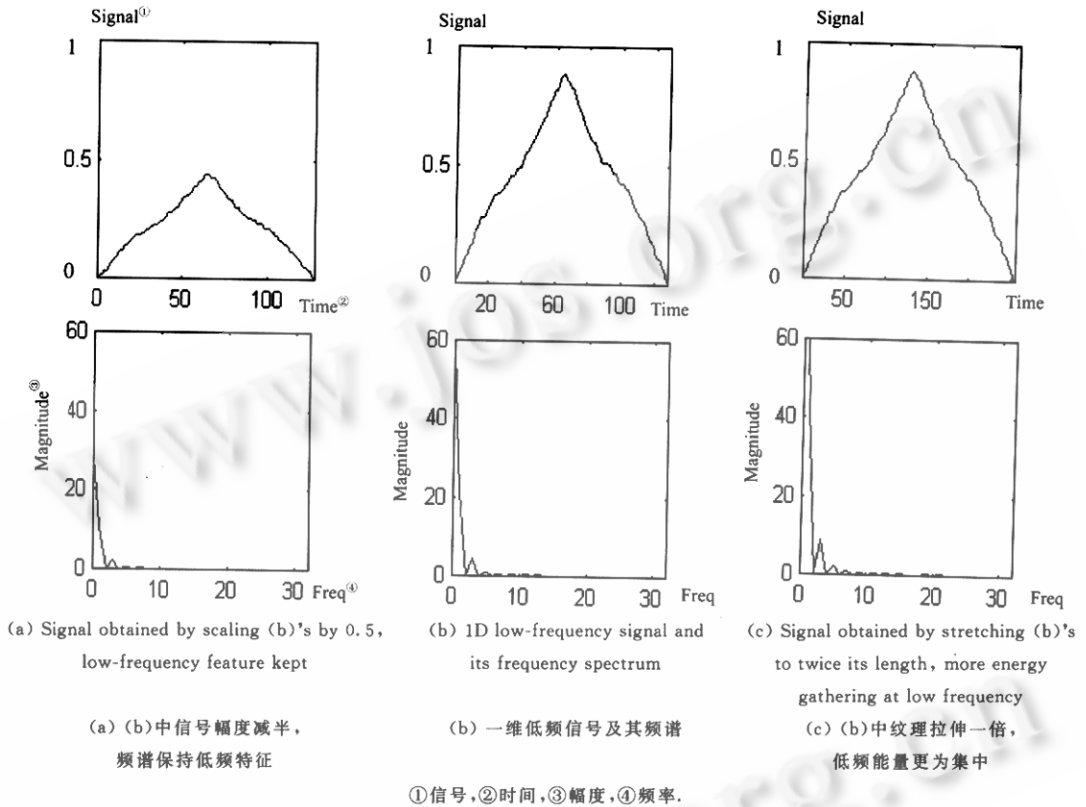


Fig. 5 Frequency effect of scaling and stretching of signal

图5 信号与常数相乘和伸缩变换的频率效果

### 3 实验结果

图6和图7给出两个向量场的可视化结果.作为对比,图6(a)和图7(a)分别给出 LIC 方法生成的图像.图6(b)和图6(c)的结果分别采用常数纹理(1-阶 B 样条函数)和噪声滤波纹理绘制,可以看出,即使是常数纹理产生的图像也有令人满意的结果.图7(b)和图7(c)分别是由不同长度纹理生成的两幅图像,明显地,较长的纹理产生较强的运动模糊的感觉.由于纹理映射时根据向量大小进行了纹理伸缩,因此,由图像中可以明显地看出向量大小的分布(周围部分向量大小大于中心部分),而 LIC 图像则无此效果.

### 4 结论

本文从信号分析的角度分析了基于流线的二维向量场可视化方法的视觉原理和不足,并提出纹理流线方法.新方法具有如下特点:

- 频域意义明显,不仅能反映向量场方向,而且能反映大小信息;

- 实现方便、灵活,可以直接用于非规则向量场显示;
- 绘制速度快,能以满足动画的帧速率绘制和显示.

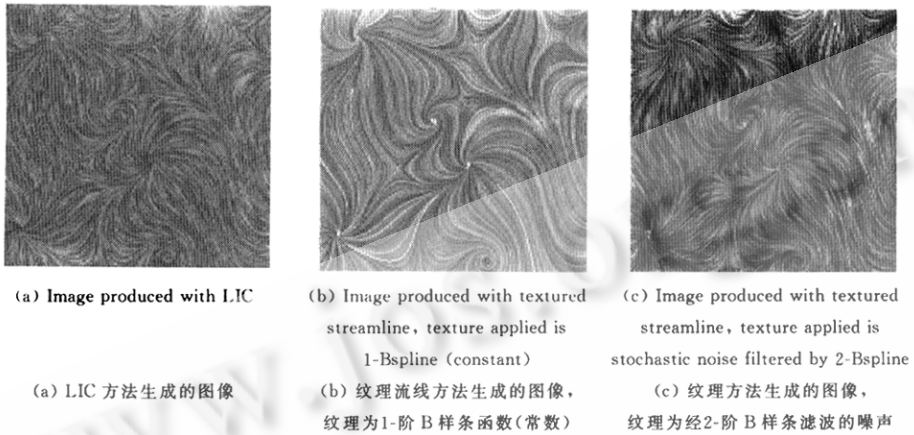


Fig. 6 Visualization result of LIC and textured streamline for vector field 1

图6 向量场1的LIC与纹理流线方法可视化结果

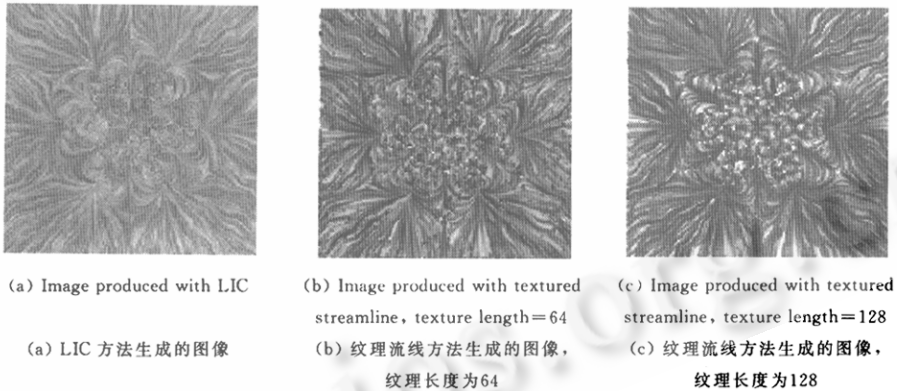


Fig. 7 Visualization result of LIC and textured streamline for vector field 2

图7 向量场2的LIC与纹理流线方法可视化结果

References:

[1] Turk, G., Banks, D. Image-Guided streamline placement. Computer Graphics, 1996,30(4):453~460.

[2] Cabral, B., Leedom, L. Imaging vector fields using line integral convolution. Computer Graphics, 1993,27(4):263~272.

[3] Stalling, D., Hege, H-C. Fast and resolution independent line integral convolution. Computer Graphics, 1995,29(4):249~256.

[4] Kiu, Ming-Hoe, Banks, D.C. Multi-Frequency noise for LIC. In: Yagel, R., Nielson, G. M., eds. Proceedings of the IEEE Visualization'96. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1996. 121~126.

## Textured Streamline: an Efficient Visualization Method for 2-Dimension Vector Fields\*

ZHOU Lu<sup>1</sup>, LI Xiao-mei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China);

<sup>2</sup>(Department of Electronics Technology, Institute of Equipment and Command Technology, Beijing 101416, China)

E-mail: lu-zhou@163.net

**Abstract:** Vector field visualization has been a focus of visualization research. Streamlines provide good representation of local information, and are also utilized to give global vision in 2-Dimension vector fields. In this paper, streamline-based methods are analyzed in signal processing aspect, and their efficiency and inefficiency in frequency domain are pointed out. A new method, textured streamline, is proposed and analyzed. The new method has clearer meaning in frequency domain, and can be implemented more easily with lower cost.

**Key words:** vector field visualization; streamline; signal processing; texture synthesis

\* Received December 21, 1999; accepted March 13, 2000

Supported by the Defence Pre-Research Project of the 'Ninth Five-Year-Plan' of China under Grant No. 16.1.4.5  
© 中国科学院软件研究所 <http://www.jos.org.cn>