

文章编号 1004-924X(2007)07-1137-06

基于傅里叶相位差的抗噪声位移估计算法

吴元昊^{1,2}, 于前洋¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种利用连续图像相位谱的差估计运动目标位移的抗噪声算法。根据傅里叶相移特性,用连续两幅图像相位谱差的周期性变化或剖面的斜率计算图像中运动物体的位移。向量滤波的应用在去除噪声的同时,有效保留了周期性信号在一个周期结束点的跳变性质。分段拟合是从周期性信号中计算斜率的合理方法。本算法在频域估计运动位移,能够克服背景光照变化的影响,克服 10% 的高斯白噪声,分辨率达到一个像素。

关键词:傅里叶变换;相位谱差;位移估计;向量滤波

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Denoising algorithm of displacement estimation based on phase difference of Fourier transform

WU Yuan-hao^{1,2}, YU Qian-yang¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A robust denoising algorithm for estimating the displacement of a moving target based on the phase difference of Fourier transform phase spectrum is presented. According to shift theorem of Fourier transform, the algorithm employs the phase spectrum difference in polar coordinates of the sequence of two frame images of a moving target to search displacement through detecting the period of the phase spectrum difference or computing the slope of its section. The vectorial filtering is used to reduce noise and keep the period characteristic, and the sectional fitting is used to compute the displacement of the slope. The experimental results show that the algorithm can give the displacement of moving target with the accuracy of 1 pixel.

Key words: Fourier transform; phase spectrum difference; displacement estimation; vectorial filtering

1 引言

运动目标的位移估计是数字视频图像跟踪处理技术的核心内容之一。为了克服从空间域出发(例如提取运动目标的特征向量或光流法),从局部角度判断运动目标整体位移而产生的某些局限性,本文合理地利用了傅里叶变换的全局性,利用它的位移特性来估算图像中物体在背景中的位置变化。如果物体在两幅图像中的相对位置发生了变化(仅仅是平移,而没有发生旋转等变化),图像中的其他信息保持不变时,对两幅图像进行傅里叶变换,得到他们的幅度谱是完全相同的,但是相位谱存在很大差别。这说明图像的相位谱记录了图像中运动物体的位置信息。通过分析两幅图像相位谱差的周期性变化,可以提取出运动目标的位移^[1-3]。

现有的图像采集系统中所获取的图像并不能完全满足上述理想化的要求。除了运动目标的位置发生变化之外,由于噪声的影响,背景甚至目标本身的形状也会发生变化,这都会使图像的相位谱产生混淆,从而影响相位谱差的周期性特征^[4,5]。研究发现,相位谱的混淆程度,不但与噪声的大小有关,还与图像的频段有直接的关系。图像相位谱的高频部分非常容易受到噪声的影响,而低频部分却可以抵抗一定数量级的噪声。充分利用低频部分的信息,同样可以准确地求出运动物体的位移。在去噪处理方面,为了保持相位谱差的周期性特点,同时不破坏每个周期末端的跳变特性,本文采用了向量滤波的方法,有效地去除了低频部分残留的噪声,同时保留了信号有效的原始信息。为了更好地处理实验数据,还设计了新的分段拟合方法,准确地描述了相位谱差的周期性。

2 算法原理

2.1 基础算法

取一图像序列中的连续两幅,分别定义为 $g_0(x, y)$ 和 $g_1(x, y)$ 。设在这两幅图像中有某个运动物体,在 x 方向上移动了 x_0 个像素,在 y 方向上移动了 y_0 个像素,则其相位差可以表示为^[6-7]

$$\phi_{\Delta}(f_x, f_y) = \phi_1(f_x, f_y) - \phi_0(f_x, f_y) =$$

$$2\pi(x_0 f_x + y_0 f_y), \quad (1)$$

这里 x_0, y_0 为所求结果,因此

当 $f_y = 0$ 时,

$$\phi(f_x, 0) = x_0 f_x \bmod(2\pi), \quad (2)$$

当 $f_x = 0$ 时,

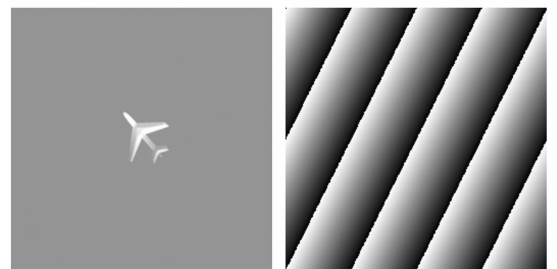
$$\phi(0, f_y) = y_0 f_y \bmod(2\pi), \quad (3)$$

由于得到的相角是在 $[-\pi, \pi]$ 之间的,所以当 $\phi_{\Delta}(f_x, f_y) > \pi$ 的时候,相当于被减去 2π 的整数倍,控制在 $[-\pi, \pi]$ 之间。因此在 $[-\pi, \pi]$ 之间显示为 x_0, y_0 个周期性的变化过程。从周期的个数,可以得到 x_0, y_0 的数值,再通过曲线的变化方向,就可以求出 x_0, y_0 的符号。如果把整个处理后的数据重新标定,用图像的形式表示出来,那么就on应该出现条纹状的相位图谱,如图 1(b) 所示。

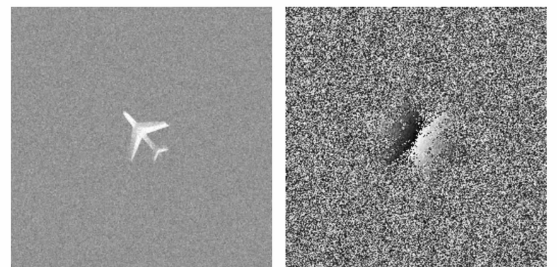
2.2 抗噪声理论

2.2.1 中心低频法

如图 1 所示,在理想状态下,相位差的周期性变化分布在整个相位谱上,在高频和低频部分没有任何区别。噪声存在的时候,噪声会混淆高频部分的信息,对低频部分的影响比较小。这是由



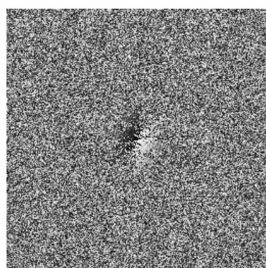
(a) 原图像 (b) 原图像相位谱差
(a) Original image (b) Phase spectrum difference of original image



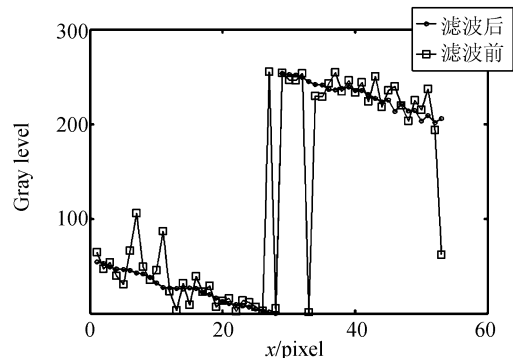
(c) 带有 5% 高斯噪声的图像 (d) 5% 高斯噪声图像相位谱差
(c) Image with noise variance of 12.8 (d) Phase spectrum difference of (c)



(e)带有 10% 高斯噪声的图像
(e)Image with noise variance of 25.6



(f) 10% 高斯噪声图像相位谱差
(f) Phase spectrum difference of (e)

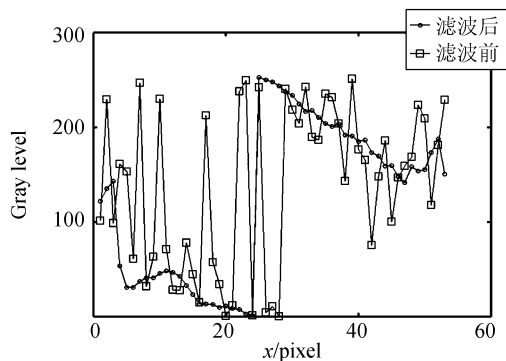


(l) 5% 高斯噪声图像相位谱差中心垂直方向剖面
(l) Vertical section of the center of phase spectrum difference of (c)



(g) 向量滤波前(d)的中心
(g)Center of (d) before vectorial filtering

(h) 向量滤波后(d)的中心
(h)Center of (d) after vectorial filtering

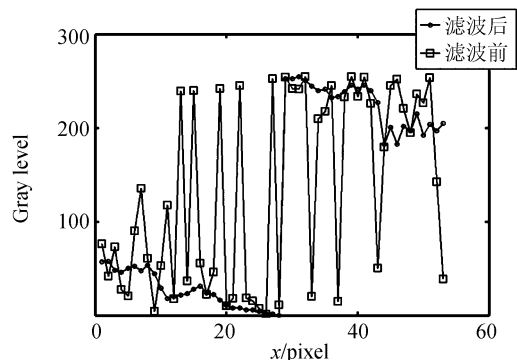


(m) 10% 高斯噪声图像相位谱差中心水平方向剖面
(m) Horizontal section of the center of phase spectrum difference of (e)

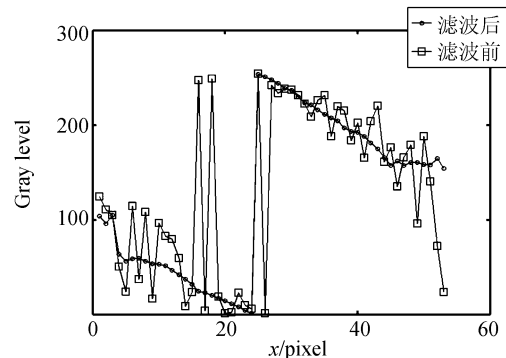


(i) 向量滤波前(f)的中心
(i)Center of (f) before vectorial filtering

(j) 向量滤波后(f)的中心
(j)Center of (f) after vectorial filtering



(n) 10% 高斯噪声图像相位谱差中心垂直方向剖面
(n) Vertical section of the center of phase spectrum difference of (e)



(k) 5% 高斯噪声图像相位谱差中心水平方向剖面
(k) Horizontal section of the center of phase spectrum difference of (c)

图 1 理想图像实验

Fig. 1 Experiment of ideal-scene images

傅里叶变换的特殊性质决定的,当图像上相邻两点的灰度值的差较大时,在图像的相位谱上体现的是高频信息,分布在相位谱的高频部分;相反,当图像上相邻两点的灰度值的差较小时,在图像

相位谱上体现的是低频信息,分布在相位谱的低频部分。由于噪声改变了图像上部分像素的灰度值,同时也改变了灰度值之间的大小关系,所以相位谱上频率的分布发生了变化。分析原始图像,还可以发现,绝大多数的像素并没有出现在灰度值突变的区域(高频区域),而是处于灰度值变化相对平滑的区域(低频区域)。也就是说,噪声将部分低频信息转化成高频信息,因此,对高频信息的混淆很大,而对低频影响相对小些。利用这个特点,本文用相位谱的低频信息来计算运动目标的位移。

2.2.2 向量滤波

相位差的图像中从黑逐渐过渡到白或从暗逐渐过渡到亮的变化对应于相位值从 $-\pi$ 逐渐过渡到 π 的变化,但是在图像上最黑到最白的部分存在一个从 $-\pi$ 突然到 π 的相位跳跃,从而形成了明暗相间的条纹。由于相位跳跃的存在,要求在去除噪声影响的同时,还要能增强或至少保持条纹的清晰度,这也是相位差图像降噪处理的困难所在。

用向量滤波方法对相位值 φ 做如下的映射:

$$\{(\varphi)\} \longrightarrow \{(\cos \varphi, \sin \varphi)\}, \quad (4)$$

也就是对相位差图像中的每一个像素都取相应的余弦和正弦值,将像素值 φ 映射到一个二维向量空间,两个分量分别为 $\cos \varphi$ 和 $\sin \varphi$,这样 $\cos \varphi$ 和 $\sin \varphi$ 在原来相位值 φ 的相位跳跃处仍然呈连续周期变化状态。令

$$k_1 = \cos \varphi, \quad (5)$$

$$k_2 = \sin \varphi. \quad (6)$$

这时可以选择任何一种方法对余弦和正弦图像分别做滤波。本文选择简单易行的均匀滤波:

$$K_1(i, j) = \frac{1}{k^2} \sum_{(i, j) \in \omega} k_1(i, j), \quad (7)$$

$$K_2(i, j) = \frac{1}{k^2} \sum_{(i, j) \in \omega} k_2(i, j). \quad (8)$$

K_1 和 K_2 分别是滤波后的余弦和正弦图像值, k 为以 (i, j) 为中心的滤波窗口 ω 的尺寸。

最后,通过如下的逆映射便可得到滤波后的相位差图像的相位值:

$$\{(K_1, K_2)\} \longrightarrow \{\phi\}, \quad (9)$$

$$\phi = \arctan(K_1/K_2). \quad (10)$$

2.2.3 分段拟和

向量滤波后,相位差的噪声得到了抑制,呈明

显的周期性变化状,此时不能直接对其截面进行拟合并求其斜率,本文采用了分段拟合的方法得到最后结果。分段拟合步骤如下:

(1)从最左边的像素点开始搜索,灰度值的差小于阈值的连续点作为一段。

(2)当某一点的灰度值与前一点的差大于阈值时,将这一点作为下一段的开始,一直搜索到最右边一个像素。

(3)统计每一段的像素数,如果小于3个像素,则忽略该段;如果大于等于3个像素,则记录像素的个数,再由有效个数的总和,计算权值。

(4)用最小二乘法分别拟合各段数据,将得到的各段数据的结果乘以该段数据的权值,得到最后结果。

3 实验结果与分析

3.1 理想图像实验

理想图像为两幅 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的8位灰度图像,图中有一个物体,分别向上移动了4个pixel,向左移动了2个pixel。在实验中,分别向图中加入5%和10%的高斯噪声,单位以灰度级计算,提取中心低频 $53 \text{ pixel} \times 53 \text{ pixel}$ 的图像,采用向量滤波和分段拟合的方法来估计目标的运动。为了更好地显示相位谱的差,可把数据从 $[-\pi, \pi]$ 拉伸到 $[0, 255]$,用图像的形式表示出来,结果如图1。

3.2 真实场景图像实验

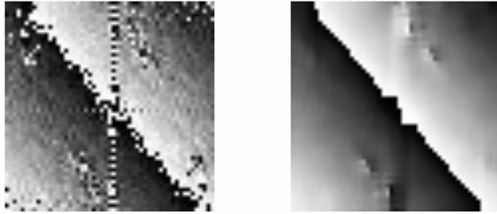
在真实场景采集的图像中,可能存在各种不同的背景变化和噪声,这些因素都会使相位谱发生变化,从而对图像中目标的位移估计结果产生影响。本文采用向量滤波器有效抑制现场噪声,实验采用了互联网上下载的一段美国F18战斗机突破音障的飞行录像,大小为 $720 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。在图2和图3中,飞机的背景天空发生了明显的明暗变化,音障层的形状也有所改变,这些都会对计算结果产生部分影响。对相位差进行向量滤波之后,显著地去除了这些因素的影响。实验结果为图2(b)中的目标相对于图2(a),整体向下移动了15个pixel,向右移动了9个pixel;图3(b)中的目标相对于图3(a),整体向下移动了11个pixel,向左移动了11个pixel。



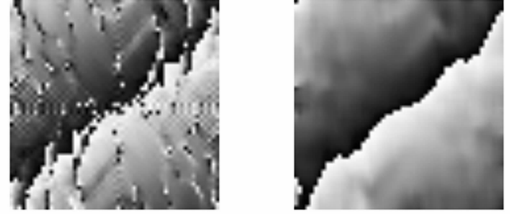
(a) (b) 连续视频中的相邻两帧
(a) (b) Two frames from a sequence



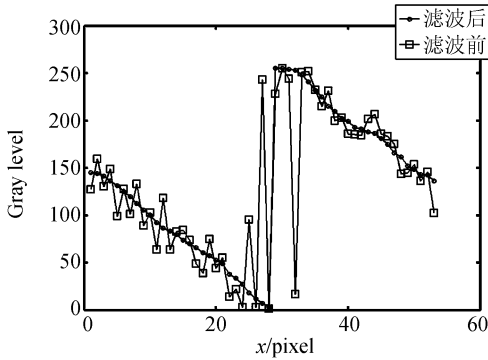
(a) (b) 连续视频中的相邻两帧
(a) (b) Two frames from a sequence



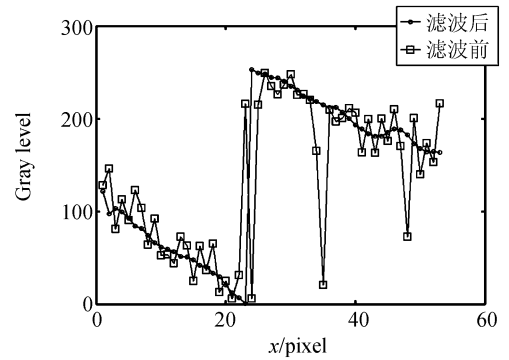
(c) 向量滤波前两幅图像
相位谱差中心
(c) Center of phase
spectrum difference of
two images before
vectorial filtering
(d) 向量滤波后两幅图像
相位谱差中心
(d) Center of phase
spectrum difference
of two images after
vectorial filtering



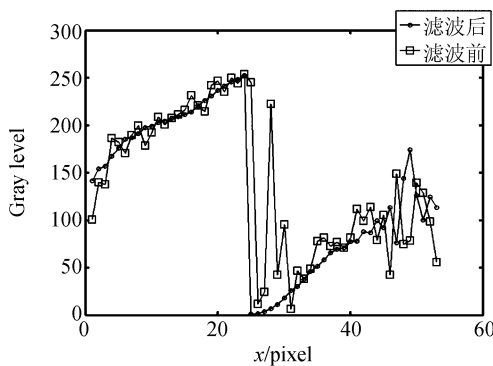
(c) 向量滤波前两幅图像
相位谱差中心
(c) Center of phase
spectrum difference
of two images before
vectorial filtering
(d) 向量滤波后两幅图像
相位谱差中心
(d) Center of phase
spectrum difference
of two images after
vectorial filtering



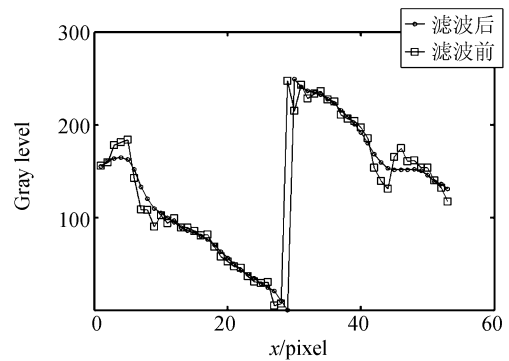
(e) 两幅图像相位谱差中心水平方向剖面
(e) Horizontal section of the center of phase spectrum
difference of two images



(e) 两幅图像相位谱差中心水平方向剖面
(e) Horizontal section of the center of phase spectrum
difference of two images



(f) 两幅图像相位谱差中心垂直方向剖面
(f) Vertical section of the center of phase spectrum
difference of two images



(f) 两幅图像相位谱差中心垂直方向剖面
(f) Vertical section of the center of phase spectrum
difference of two images

图 2 真实场景图像实验一

Fig. 2 One experiment of real-scene images

图 3 真实场景图像实验二

Fig. 3 Another experiment of real-scene images

4 结 论

本文提出了一种从频域出发,估计运动物体位移的方法。在频域估计位移具有整体性强的特点,能够克服背景光照和目标亮度变化的影响;向

量滤波和分段拟合能够克服其对噪声过于敏感的弱点,使算法趋于实用化。实验表明,该算法能够稳定的估计连续图像中运动目标的位移,精度达到一个 pixel,能够克服 10% 的高斯噪声,是一种有效的位移频域估计方法。

参考文献:

- [1] STONE H, ORCHARD M, CHANG E, *et al.*. A fast direct Fourier-based algorithm for subpixel registration of images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(10): 2235-2243.
- [2] LUCCHESI L. A frequency domain technique based on energy radial projections for robust estimation of global 2D affine transformations[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 81: 72-116.
- [3] STONE H, TAO B, MCGUIRE M. Analysis of image registration noise due to rotationally dependent aliasing[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2003, 14: 114-135.
- [4] BELKASIM S, GHAZAL A, BASIR O. Phase-based optimal image thresholding[J]. *Digital Signal Processing*, 2003, 13: 636-655.
- [5] MISHRA J, FELLOUS J, SEJNOWSKI T. Selective attention through phase relationship of excitatory and inhibitory input synchrony in a model cortical neuron[J]. *Neural Networks*, 2006, 19: 1329-1346.
- [6] STURZL W, MALLOT H. Efficient visual homing based on Fourier transformed panoramic images[J]. *Robotics and Autonomous Systems*. 2006, 54: 300-313.
- [7] WU Y H, YU Q Y. Displacement estimation by the phase-shiftings of Fourier transform in present white noise[J]. *SPIE*, 2006, 6027: 456-463.
- [8] 马晶,徐科华,谭立英. 基于相位相关的深空光通信扩展信标跟踪技术研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(3): 515-519.
MA J, XU K H, TAN L Y. Extend-beacon tracking for deep space optical communication based on phase-correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 515-519. (in Chinese)
- [9] 罗诗途,王艳玲,张玘,等. 车载图像跟踪系统中电子稳像算法的研究[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(1): 95-103.
LUO SH T, WANG Y L, ZHANG Q, *et al.*. Electronic image stabilizing algorithm for image tracking system on vehicle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (1): 95-103. (in Chinese)

作者简介: 吴元昊(1977—),男,吉林长春人,长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事数字图像处理、视频图像跟踪等方面的研究。E-mail: kennth07@163.com

于前洋(1941—),男,湖北人,研究员,博士生导师,研究方向为仪器自动控制和图像处理。