

基于 SVD 的相位相关方法在空间运动目标检测中的应用

赵丹培¹⁾ 王延杰²⁾

¹⁾(北京航空航天大学宇航学院图像中心, 北京 100083) ²⁾(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130031)

摘要 相位相关方法是在两幅相似图像之间检测纯平移运动的一种比较传统的直接估计法,但由于它庞大的计算量使它无法满足实时系统的要求,并且它只能进行整数平移值的检测,因此需找到一种更好的运动估值方法。由于相位相关矩阵在没有噪声干扰的纯平移运动中是一个秩为1的矩阵,所以根据这一性质,提出了一种低复杂度的亚像素平移运动检测方法——基于奇异值分解(SVD)的相位相关方法。该方法是根据傅里叶变换的平移性质,利用最小二乘法进行线性度估计,其运算速度较传统的相位相关方法提高了近3倍。由于它利用的是频域的相位信息,对图像灰度不敏感,因此它具有很强的噪声抑制能力和抗遮挡能力,使它不仅更适合应用于受噪声和云层污染严重的空间目标的平移检测,而且能实现空间目标的精确定位。

关键词 相位相关方法 傅里叶变换 奇异值分解 亚像素

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)01-0098-06

Application of Phase Correlation in the Spatial Object Orientation Based on SVD

ZHAO Dan-pei¹⁾, WANG Yan-jie²⁾

¹⁾(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

²⁾(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031)

Abstract The phase correlation method provides straightforward estimation of rigid translational motion between two similar images. It is often claimed that the original method is best suited to identify integer pixel displacement. Experimental results show that the phase correlation matrix is rank one for a noise-free rigid translation model. The property leads to a new low complexity method for non-integer translational motion. This method based on singular value decomposition estimates the slope of phase by a least-squares fit and well-known Fourier shift property whose speed is nearly three times as quickly as original method. The method is robust in the presence of noise and shelter because of using phase information in the frequency domain. Experiments prove that this method can effectively restrain noise and accurately detect the shift of object sheltered, which resolved the problem of object shift detection for images seriously polluted by noise and cloud in the space. It provides a strong basis for accurate object orientation.

Keywords phase correlation, Fourier transform, singular value decomposition, subpixel

1 引言

随着科技的发展,目标的实时检测和定位已成

为现代图像处理领域中的一重要技术。对于实时图像测量系统来说,能否准确测量出目标位置是跟踪目标的关键,并且应用运动估值的方法检测出两帧相似图像之间的目标平移运动已经成为许多图像

收稿日期:2005-07-15; 改回日期:2005-11-03

第一作者简介:赵丹培(1977~),女。2006年获中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位,现在北京航空航天大学宇航学院图像处理中心从事博士后研究工作。主要从事基于DSP的实时图像处理及小波变换、傅里叶变换等频域图像处理方法在实时图像处理系统中的应用等的研究。E-mail: zhaodanpei@buaa.edu.cn

处理研究的热门课题。目前,已经发展了许多运动检测方法,主要包括块匹配法,像素递归法和相位相关法。其中块匹配法是较简单的一种,它是将图像分成固定大小的块,并假设这些块作相互独立的平移运动;像素递归算法是基于微分运算的像素微分法,它的优点是运算量较小,容易满足实时处理的要求,但其缺陷是对噪声比较敏感,而且运动量较大时误差较大,所以一般适合于小运动量、低噪声的估值;相位相关技术最早是由 Kuglin 和 Hines^[1]提出的,是一种基于傅氏功率谱的频域相关技术,由于它是利用互功率谱中的相位信息来进行图像匹配,其对图像间的亮度变化不敏感,且具有一定的抗干扰能力,因此有较高的匹配精度,但由于该算法运算量很大,无法满足图像处理系统的实时性要求,所以一直以来无法应用到实际的实时检测中。从仿真实验发现,频域下的图像处理方法能够解决空域下棘手甚至是无法解决的问题,并可以提高图像处理系统的测量水平,但目前国内的实时图像处理系统所应用的目标检测算法大部分还都是基于时域的算法,少数基于频域的算法也是传统的相位相关算法,无法实时给出目标的位置信息。针对这种情况,本文通过对无噪声干扰的情况下的相位相关矩阵的特性的分析,提出了一种基于奇异值分解的相位相关算法。与传统的相位相关算法相比,由于本算法利用了独特的秩为1的抗噪声估计法和最小二乘法,因而使它具有更强的抗噪声性能和更快的检测速度,更适合应用到实时图像处理系统。

2 傅里叶变换及其基本性质

尽管传统的目标检测算法都是在时域进行的,但通过分析傅里叶变换的特性能够从理论上论证在频域下也能够进行运动目标的检测。离散傅里叶变换是频域检测的重要手段,因为对数字图像进行2维离散傅里叶变换就可以得到该图像的频谱,同时它还可建立离散时域与离散频域之间的联系,所以被广泛应用在数字信号处理和数字图像处理中。对于一个图像尺寸为 $M \times N$ 的函数 $f(x, y)$ 的2维离散傅里叶变换由下式给出:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right]$$

$$u = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad v = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

2维傅里叶变换的基本性质如下^[2]:

(1) 可分离性质

2维傅里叶变换可以分成两步,每一步一个1维傅里叶变换,即

$$F(x, v) = M \left[\frac{1}{MN} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp(-j2\pi vy/N) \right]$$

$$F(u, v) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} F(x, v) \exp(-j2\pi ux/M)$$

(2) 平移性质

$$f(x, y) \exp[j2\pi(u_0 x/M + v_0 y/N)] \Leftrightarrow F(u - u_0, v - v_0) \quad (1)$$

$$f(x - x_0, y - y_0) \Leftrightarrow F(u, v) \exp[-j2\pi(ux_0/M + vy_0/N)] \quad (2)$$

式(1)、式(2)说明,在空间域中图像原点平移到 (x_0, y_0) 时,其对应的频谱 $F(u, v)$ 要乘上一个指数项 $\exp[-j2\pi(ux_0/M + vy_0/N)]$,而在频域中,当原点平移到 (u_0, v_0) 时,其对应的 $f(x, y)$ 要乘上一个指数项 $\exp[j2\pi(u_0 x/M + v_0 y/N)]$ 。分析2维傅里叶变换的平移性可知,当在空间域中 $f(x, y)$ 产生移动时,在频域中只产生相移变化,而且傅里叶变换的幅值不会发生变化。

(3) 共轭对称性

$$F(u, v) = F^*(-u, -v) \quad (3)$$

$$|F(u, v)| = |F(-u, -v)|$$

利用这个性质只要求出一半像元,就可知道整个变换域。

3 利用基于SVD分解的相位相关技术检测图像平移运动矢量的原理

3.1 相位相关技术及其特性

相位相关技术是一种基于傅里叶平移特性的十分简单的方法,它表明两个函数在时域坐标上的平移变化,对应于在傅里叶域内的线性相位变化。由于相位相关只利用相位信息,且它只强调轮廓和边缘信息,而忽略低频分量,其与图像的明暗度和光的强弱变化无关,所以较时域的检测方法更具有抗噪声性和准确性。相位相关技术具有以下特性^[1,3]:

(1) 具有较大的位移检测范围 理论上,当两幅图像仅存在平移变化时,该算法能检测的 x, y 方向的范围分别为图像长宽的一半;

(2) 具有尖锐的相关峰 当两幅图像确实相关时,由于检测结果表现为 δ 脉冲函数,且有非常尖锐的相关峰,因此能实现图像的精确匹配;

(3) 对图像灰度依赖小 由于相位相关函数不受灰度值及其刻度变化等这些误差因素的影响,因

此当两幅要匹配的图像间还存在某一灰度差时,这种差别的检测结果中只表现为 δ 脉冲函数上叠加一个衡量,另由于其对图像灰度依赖小,因此具有很强的抗图像遮挡能力;

(4) 图像旋转对匹配效果影响较大 由于图像旋转,其傅里叶变换的频谱也随之旋转,当图像旋转大于 5° 时,其相关峰值衰减为零,故应该采取措施减小旋转变化的影响。

3.2 SVD 分解

当图像 A 是大小为 $M \times N$ 矩阵时,其秩为 R ,则 A 可以用奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 法分解为一系列 $M \times N$ 大小的单位秩的矩阵加权和。由于矩阵的奇异值分解是一种正交变换,因此在一个矩阵 A 与其奇异值 σ 及奇异向量 μ 与 ν 之间,若将所有的行向量 μ 并排成矩阵 U ,所有的行向量 ν 并排成矩阵 V ,则存在下列关系式:

$$\begin{cases} AV = U\Sigma \\ A^T U = V\Sigma \end{cases} \quad (4)$$

其中,矩阵 Σ 的主对角线即是对应的 σ 值,其余元素为零。 U 和 V 均是 Unitary 矩阵,即矩阵内的列向量均两两相互正交,且列向量的长度均为 1,因此,矩阵 A 可写成 $A = U\Sigma V^T$,将 A 展开得 $A = R \sum_{i=1}^R \sigma U_i V_i^T$,上式就称为 A 的奇异值分解,它为图像的展开式,虽此展开式只适合 R 个基图像,但每一个基图像可用相应的奇异值加权。文中提出的算法就是基于这种奇异值分解,将相位相关矩阵分解成两个奇异矩阵。根据在无噪声干扰情况下,相位相关矩阵的秩为 1 的特性,相位相关矩阵经过 SVD 分解就能被分解成水平方向和垂直方向的奇异向量,若对这两个方向的奇异向量进行最小二乘的线性估计,就可分别得到两个方向的相位斜率,即得到平移矢量。

3.3 基于 SVD 分解的相位相关算法的实现

由于相位相关矩阵对于无噪声的纯平移模板是一个秩为 1 的矩阵,且通过 SVD 分解就可以将这个矩阵分解成水平和垂直两个方向的奇异向量,从而能有效地滤除噪声。这种低复杂度的亚像素平移检测方法就是根据这一性质提出的,具体的实现方法如下^[4]:

给出两幅 2 维的图像 A 和 B ,并且它们之间只存在简单的纯平移关系,用 \hat{A} 表示 A 的傅里叶变换, \hat{B} 表示 B 的傅里叶变换,则它们之间的关系可用下式表示:

$$\hat{B}(k, l) = \hat{A}(k, l) \exp\{-j(ka + lb)\}$$

其中, (k, l) 表示傅里叶域的坐标, (a, b) 表示在图像 A 和 B 之间水平和垂直方向的相对平移的值。为了用相位相关方法确定 (a, b) 的值,需首先通过 \hat{A} 和 \hat{B} 之间的归一化互功率谱来确定相位相关矩阵,即

$$Q(k, l) = \frac{\hat{B}(k, l)\hat{A}^*(k, l)}{|\hat{B}(k, l)\hat{A}^*(k, l)|} = \exp\{-j(ka + lb)\}$$

对于相位相关矩阵 Q ,由于在没有噪声的情况下是一个秩为 1 的矩阵,所以 Q 的每一个元素都能被分解成 $Q(k, l) = \exp(-jka) \exp(-jlb)$,即 $q_a(k) = \exp(-jka)$, $q_b(l) = \exp(-jlb)$ 。如果相位相关矩阵能被改写为 $Q = q_a q_b^H$,则 $\hat{B} = (q_a q_b^H) \hat{A}$,也就是将 Q 分解为水平方向和垂直方向的两个向量。其中 $(\cdot)^H$ 代表了一个复数共轭的转置,“ \circ ”表示一个像素对应一个像素的乘积。确定两幅含有噪声干扰的图像之间的平移的方法就是通过寻找归一化相位相关矩阵 Q 的秩为 1 的估计值矩阵,这样就能在很大程度上降低噪声的干扰。寻找 Q 的秩为 1 的估计值矩阵的最直接方法就是利用奇异值分解,即按照水平和垂直的方向将相位相关矩阵分解成这两个方向的奇异向量,这样线性相位的系数就能通过这两个奇异向量独立的被确定。由此,就能在一个较大范围内估计出水平和垂直方向的非整数的平移值。为了确定 Q 的两个奇异向量的线性相位系数,本文采用最小二乘法展开奇异向量的相位分量来进行线性估计。对于大小为 $M \times N$ 的矩阵 Q ,它的频域坐标变量与时域坐标变量的关系为 $k = 2\pi x/M$, $l = 2\pi y/N$ 。对于奇异向量 ν ,可以建立以下一组方程式^[5]:

$$W[\mu \quad c]^T = unwrap\{\angle \nu\}$$

其中, W 是一个行向量 $[w \cdots 1]$, $w = \{0, 1, 2, \dots, (s-1)\}$, s 代表 ν 的长度, μ 表示拟合直线的斜率, c 表示拟合直线的横坐标。根据最小二乘法拟合出的最佳值为

$$\begin{bmatrix} \mu \\ c \end{bmatrix} = (W^T W)^{-1} W^T unwrap\{\angle \nu\}$$

则求出的拟合直线的斜率 μ 就是平移的值。当 $\nu = q_a$ 时, ν 就表示水平方向的分量, $a = -\mu(M/2\pi)$; 当 $\nu = q_b$ 时, ν 就表示垂直方向的分量, $b = -\mu(N/2\pi)$ 。

由于噪声和边缘效应的影响,致使数据量很大,因此需要采用一种优化处理方法来先屏蔽掉 Q 中幅值小于给定阈值的数据,然后以 R 为半径,屏蔽掉距离中心直流分量在此半径区域以外的频率数据, R 选择 $0.6N/2$ 左右的数值, N 是 x, y 方向的最

小采样值。傅里叶变换的周期性不仅决定了相位谱在 2 维平面的某些地方存在间断点或相位跳变,而且具有正和负两个极性的可能,可称这种相位分布为折叠位相图,为了解决这个问题,可将折叠位相值平移 2π ,这样就能得到连续的相位图。

线性拟合的质量将依靠分解的相位向量的线性度。在实际操作中, Q 的奇异值向量的固有特征值滤波器的特性不仅能使分解算法的数据进一步减少噪声,而且只需要做 1 维的分解,这样比矩阵 Q 的 2 维分解要简单得多。这种方法的主要特性就是利用相位相关矩阵的 SVD 分解来分离出相位的水平和垂直分量,并对水平和垂直分量做线性拟合,以求得出拟合直线的斜率,进而确定平移值。

3.4 平移方向的确定

为了便于观察,可用平移值的符号来代表平移的方向,如以图像原点为中心,在时域的待匹配图像相对于原始图像向右、向下平移时,则其在频域分解的相位向量是一条递减的直线,平移值为正值;在时域的待匹配图像相对于原始图像向左、向上平移时,其在频域分解的相位向量是一条递增的直线,且平移值为负值,也就是时域上的位移,对应于频域上斜率的改变。根据这种特性就能很容易判断出目标的平移方向。

3.5 实验与分析

为了验证本文方法在空间运动目标检测中的有效性,利用实际拍摄的两幅有噪声干扰的图像进行了检测实验(如图 1 所示)。

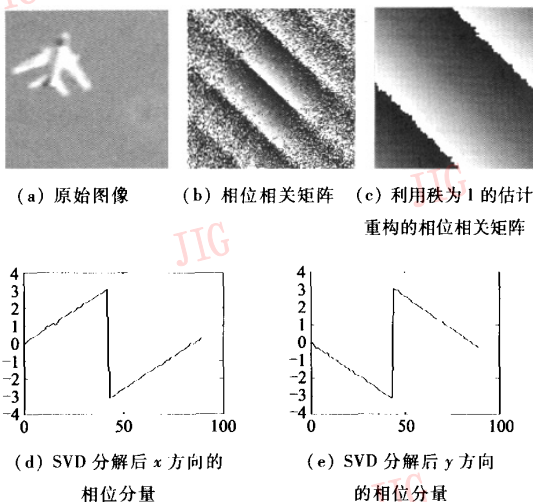


图 1 本文方法对实际的含有噪声干扰的运动目标的检测实验

Fig. 1 The experiment of detecting moving object included noise

图 1(a) 显示的是图像大小为 256×256 pixels 的有噪声干扰的原始图像。图 1(b) 显示的是存在平移关系的两幅图像的相位相关矩阵 Q 。图 1(c) 是经过 SVD 分解后,由主要的奇异向量重构成的 Q 的秩为 1 的估计矩阵,它是将相位向量中的距离中心直流分量在 80 pixels 以上的高频分量屏蔽掉,用来抑制明显的噪声区域。从图中可以发现,在图 1(b) 中的相位条纹受噪声污染严重,模糊不清,而在图 1(c) 中经过处理的相位条纹则变得非常清晰,这样经过最小二乘的估计值后就能准确地确定出平移的大小和方向。图 1(d) 和图 1(e) 分别显示的是相位相关矩阵经过 SVD 分解后在 x 方向和在 y 方向的相位分量。若在经过 SVD 分解后的 x 方向和 y 方向的相位分量中各截取一段,再利用最小二乘法估计截取的线段的斜率,则得到的斜率值就为水平和垂直方向的平移值,即 $\Delta x = -2.9797, \Delta y = 3.0071$ 。该实验表明,待匹配图像相对于原始图像向左平移了 3 pixels,向上平移了 3 pixels。

为了验证本文方法的抗噪声性能,利用两幅人为添加了严重噪声干扰的图像进行了抗噪性的检测实验(如图 2 所示)。

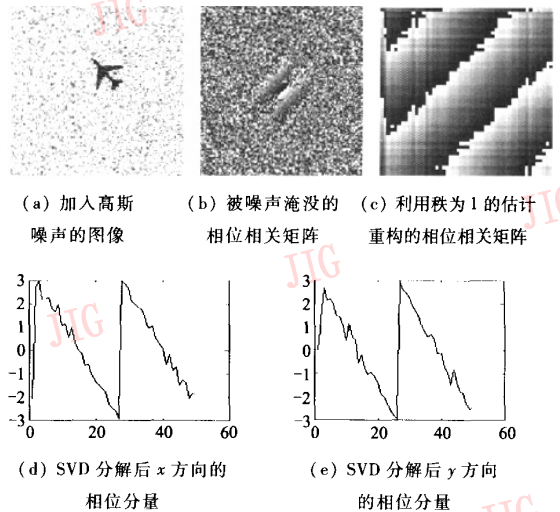


图 2 本文方法对人工添加严重噪声干扰的运动目标的检测实验

Fig. 2 The experiment of detecting moving object added serious noise

图 2(a) 显示的是大小为 128×128 pixels 的加入了均值为 0, 均方差为 0.07 的高斯噪声的图像。图 2(b) 显示的是两幅图像的相位相关矩阵 Q , 由该

图可以发现,相位相关矩阵 Q 的有效值几乎完全被淹没在噪声当中。图 2(c) 显示的是经过 SVD 分解后,由主要的奇异向量重构成的矩阵 Q 的秩为一的估计矩阵,它是通过将相位向量中距离中心直流分量在 50pixels 以上的高频分量屏蔽掉来抑制噪声的。对比图 2(b) 可以发现,几乎被淹没在噪声中的相位条纹在图 2(c) 中变得相对清晰。图 2(d) 和图 2(e) 分别显示的是相位相关矩阵经过 SVD 分解后在 x 方向和在 y 方向的相位分量。若在经过 SVD 分解后 x 方向和 y 方向的相位差曲线中各截取一段,再利用最小二乘法估计截取的线段的斜率,则得到的斜率值就为水平和垂直方向的平移值,即 $\Delta x = -4.9825, \Delta y = -5.0376$ 。该实验表明,待匹配图像相对于原始图像向左平移了 5pixels,向下平移了 5pixels。

为了验证频域下基于 SVD 分解的相位相关算法具有良好的抗遮挡性能,还利用如下图像进行了检测实验(如图 3 所示)。

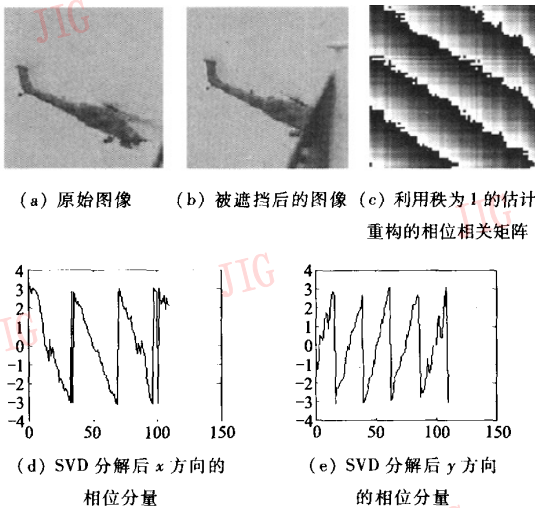


图 3 本文方法对被严重遮挡的运动目标的检测实验

Fig. 3 The experiment of detecting moving object sheltered seriously

图 3(a) 和图 3(b) 分别是大小为 128×128 pixels 的原始图像和被遮挡的图像,从图 3(b) 可以看出,遮挡面积接近 35% 左右,这种情况在时域下是无法正确检测出目标的偏移量的;图 3(c) 显示的是经过 SVD 分解后,由主要的奇异向量重构成的矩阵 Q 的秩为一的估计矩阵,由该图可以看出经过优化处理后重构的矩阵条纹非常清晰。图 3(d) 和

图 3(e) 分别为相位相关矩阵经过 SVD 分解后在 x 方向和在 y 方向的相位分量,由该两图可以看出,两个方向的相位分量都有很好的线性度。经过最小二乘估计,其平移值为 $\Delta x = 3.8282, \Delta y = 5.3918$,也就是被遮挡图像相对于原始图像向右平移了 4pixels,向下平移了 5pixels。

该实验表明尽管待匹配图像被严重遮挡,遮挡面积在 35% 以上,但通过这种算法仍然能够准确计算出平移矢量,而且有很高的精度。

为了验证基于 SVD 的相位相关方法在性能上的优势,从定位精度、计算速度、抗噪性和抗遮挡等方面与传统的相位相关方法进行了对比实验,实验结果见表 1。

表 1 基于 SVD 的相位相关方法与传统相位相关方法在性能上的比较

Tab.1 The comparison of basic performance between phase correlation method based on SVD and traditional phase correlation method

	传统相位相关方法	基于 SVD 的相位相关方法
定位精度	整数	亚像素
计算速度	基于 SVD 的相位相关方法的计算速度是传统相位相关方法的 3 倍	
抗噪性(均值为 0,均方差为 0.07 的高斯噪声)	得到错误结果	得到正确结果
抗遮挡能力	很弱,当遮挡面积超过 10%,则无法正确给出检测结果	较强,遮挡面积超过 35% 仍能正确给出检测结果

以上实验证明,该方法无论对于含有噪声的空间目标图像、人为添加严重噪声干扰的图像,还是被严重遮挡的图像,都得到了比较好的检测结果,与传统的相位相关方法相比,该方法不仅提高了计算速度和定位精度,同时对噪声、遮挡等干扰也有了更加明显的抑制作用,这更证明了该方法的有效性和实用性。

4 结 论

本文提出的这种用于检测两帧相似图像之间的平移运动的方法,是传统的相位相关技术的扩展,而且具有在更大的范围内检测非整数平移矢量的优势。这种检测方法最主要的特征是先利用相位相关

矩阵的SVD分解把平移矢量分解成水平方向分量和垂直方向分量;然后通过这两个被分离出来的分量的相位线性拟合,就能够确定平移矢量的大小和方向。这种方法有以下4个优势:(1)能直接计算出非整数平移,而不用空域插值或匹配;(2)通过分离水平和垂直方向的平移估计,数据的相位分解被减少到1维,由于极大地减少了计算量,因而可明显提高检测速度;(3)由于这种频域检测方法利用的是相位信息,所以两幅图像由于光照、灰度不均等因素影响而产生的差异不会对检测结果产生影响,并且有很强的抗遮挡性能,而时域的方法则无法避免这些情况所产生的误差;(4)这种方法是其他亚像素图像匹配方法的补充,不仅具有更好的抗噪性和检测精度,而且通过实验也可以看出,这种方法在噪声、遮挡存在的情况下更能显示出其良好的性能。

参考文献 (References)

1 Kuglin C D, Hines D C. The phase correlation image alignment

method[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Cybernetics and Society[C], New York, 1975: 163 ~ 165.

- 2 Ye Wu, Wang Jian-xin. The motion detection methods of TV signals based on Fourier transform[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 1997, 25(9): 62 ~ 66. [叶梧, 王建新. 基于傅里叶变换的电视信号运动检测方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1997, 25(9): 62 ~ 66.]
- 3 Foroosh H, Zerubia J B, Berthod M. Extension of phase correlation to subpixel Registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(3): 188 ~ 200.
- 4 Hoge W S, Mamata Hatsuho, Maier Stephan E. Efficient construction of histology slide mosaics via phase correlation Registration of high resolution tiles[A]. In: IEEE International Conference on Image Processing[C], Barcelona, Spain, 2003: 1117 ~ 1120.
- 5 Hong W S. Subspace identification extension to the phase correlation method[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(2): 277 ~ 280.