

红外序列图像小目标检测与跟踪技术综述

许彬¹, 郑链¹, 王永学², 宋承天¹

(1. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081; 2. 河北工业大学理学院, 天津 300130)

摘要:指出了小目标检测与跟踪中存在的难点问题; 综合该领域近年来的研究成果, 按照检测与跟踪的先后次序, 将算法分为 DBT 和 TBD 两大类, 并给出相应的数学模型和各自的主流方法; 对两大类算法的执行性能进行了比较; 最后指出该领域可以深入研究的方向。

关键词:检测; 跟踪; 形态学; 小波; 匹配滤波; 小目标

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)05-0482-06

Survey of dim target detection and tracking in infrared image sequences

XU Bin¹, ZHENG Lian¹, WANG Yong-xue², SONG Cheng-tian¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Firstly, the difficulties of dim target detection are pointed out in this paper. Secondly, all methods are classified as DBT and TBD according to the order of detection and tracking, the mathematical models based on the two kinds of methods are presented and the mainstream methods of each kind of methods are also introduced. Thirdly, the executive performances of the two kinds of methods are compared. In the end, some promising research directions in this field are proposed.

Key words: Detection; Tracking; Morphology; Wavelet; Matching filtering; Dim target

0 引言

在现代的高技术战争中, 武器系统应具备极快的反应速度和良好的隐身性能, 远距离的红外目标探测技术能很好地满足这一条件, 它能及时地发现、跟踪目标, 实现迅速有效的攻击, 是机载武器系统发展的一个趋势^[1-3]。对于远距离目标, 在视场中常常是

以小目标的形态出现, 而且目标的对比度一般都很低, 要保证可靠、稳定地检测并跟踪目标是很困难的。

小目标是指在图像平面上占有的像元个数较少且信噪比较低的目标, 小目标可根据其不同性质分为两类: 低对比度的目标, 即灰度小目标; 像素少的目标, 即能量小目标。

在低信噪比情况下检测和跟踪未知位置和速度的运动小目标是红外搜索和跟踪系统中的一个重要

收稿日期: 2003-11-10; 修订日期: 2004-12-10

作者简介: 许彬(1979-), 男, 湖北武汉人, 博士生, 主要研究方向为图像处理、小波分析、分布式系统结构、DSP 系统设计等。

问题^[4],其主要困难在于:

- (1) 缺少关于背景的先验统计信息;
- (2) 目标的信噪比非常低以至于很难从单幅图像中检测出目标;
- (3) 目标可能会在未知时间点上出现或消失;
- (4) 无法得到形状、纹理等有用的目标特征;
- (5) 仅有的检测信息是目标的未知的亮度和移动速度。

因此,对低对比度小目标的检测与跟踪技术的研究,对于提高现代高技术武器的作战距离及反应速度具有重要意义,本文系统地分析了有关的文献,对近年来该领域的研究进行了综述。

1 检测与跟踪算法分类

传统的序列图像小目标检测与跟踪方法是先根据目标像素强度检测出目标,然后通过序列图像投影得到目标的运动轨迹,称之为 DBT (Detect-Before-Track) 算法;而 TBD (Track-Before-Detect) 则是在每一次扫描后将结果数字化存储起来,然后对假设航迹包含的点作没有信息损失的相关处理,经过若干帧的积累后,同时得到检测结果与目标的航迹。

1.1 DBT 方法

最简单的 DBT 方法是通过每个单帧图像进行阈值化处理,在阈值上的像素判定为可能的目标,然后通过关联多帧图像数据决定其是否为真正的目标,这类似于数字通信系统中的“hard-decision”^[5]。这类方法需要被处理的图像中的目标能量足够大,否则不能很好地检测出目标。

在 DBT 算法中,没有对多帧图像的综合处理。一般可假设噪声为零均值正态分布 $N(0,1)$,当目标在一个像素点上出现时,平均像素强度随目标强度 (A) 而增加,其分布变为 $N(A,1)$ 。

$$H_1: Y = n + A \quad \text{目标存在}$$

$$H_0: Y = n \quad \text{目标不存在}$$

对于单个像素,其检测概率、误警率和目标丢失概率分别为:

$$P_d = \Psi(A - \xi), P_{fa} = \Psi(-\xi), P_{miss} = \Psi(\xi - A),$$

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-x^2/2} dx$$

式中 t 是阈值; $\psi(t)$ 是高斯分布函数。

1.1.1 数学形态学方法

数学形态学是一种用于数字图像处理和识别的理论和方法^[6],能够去除高频噪声和背景边缘高频分量的干扰,是一种有效的小目标检测方法。它的主要内容是设计一整套算子来描述图像的各个像元之间的关系,常用的运算包括开、闭、腐蚀、膨胀等。数学形态法对图像序列进行处理的方法,即膨胀累加的检测方法,运用形态膨胀运算使同一目标处于不同帧上的能量实现有效累加^[7]。

参考文献[8]设计了一种基于数学形态学的红外灰度图像小目标检测算法,并用 FPGA 硬件实现;参考文献[9,10]分别提出了两种基于顺序形态滤波的红外小目标检测算法;参考文献[11]提出了一种基于形态学 Top-Hat 算子的小目标检测方法;参考文献[12]构造了由几种形态学运算组成的非线性算子,结合刚性小平面的三维分析技术快速检测出红外图像中的小目标;参考文献[13]提出了一种基于膨胀累加的检测方法;参考文献[14]应用目标大小的先验知识来压缩背景混乱、消除噪声。

通常,点目标的检测采用多帧累加方法来提高信噪比,该方法对运动速度较快的目标不能实现有效的能量累加,而数学形态法则很好地克服了这一点,并能很容易地检测出低信噪比及快速运动的点目标。

1.1.2 小波分析法

红外背景往往呈大面积的连续分布状态,在红外辐射的强度上也呈渐变过渡状态,从而使得它们的红外图像在图像灰度空间分布上具有较大的相关性,是一种缓慢变化且非平稳的二维随机过程。目标的红外辐射强度与其周围自然背景的辐射强度无关,且一般都高于背景的辐射强度,可以认为背景处在图像信号的低频部分,而目标处在图像信号的高频部分,通过小波变换将红外图像的低频部分和高频部分进行分离,然后对各高频分量进行分析,可以将目标检测出来。

参考文献[15,16]采用小波变换实现增强图像、抑制噪声,然后检测目标;参考文献[17,18]通过对图像信号作多尺度的小波变换,检测弱小目标和提取不同分辨率下背景纹理的能量特征;参考文献[19]通过一种鲁棒的小波多尺度图像配准过程消除主场或背

景运动的影响;参考文献[20]采用小波滤波器对每帧图像滤波,提高目标的信噪比,剔除部分噪声点,降低了算法的运算量;参考文献[21]提出一种针对低可观测时变目标的小波算法;参考文献[22]指出,在经过小波变换滤波后,可以利用不同分解尺度上的评估信息将目标从背景中分离出来;参考文献[23]指出小波和双通道滤波理论领域的先进性,提出新一代小波算子及小波滤波算法。

利用小波变换实现频率选择和多尺度分解,可以起到抑制背景噪声和增强目标的作用,极大地提高信噪比,从而提高单帧图像中目标检测概率,降低误检测。同时,当时间分辨率高时,适合于分析高频信号,可以更加精确估计信号所在的位置;当频率分辨率低时,适合于分析低频信号,可以观察过程的全貌,这使得基于小波变换的检测算法具有较好的鲁棒性。

1.1.3 基于像素分析的方法

基于像素分析的方法是根据图像中像素灰度模式的变化来实现运动目标检测、识别与跟踪。

基于像素分析方法中最直接的方法是对前后两帧图像进行差分,这种方法的前提条件是传感器与目标之间的运动是平行移动,在较短的时间间隔里背景灰度基本保持不变,利用前后两帧图像的差分图像信息检测出运动目标。

参考文献[24]分析评估了移动背景下探测和跟踪亚像元的六种算法(单差、双差、线性内插、抛物线内插差、空间差及空间滤波)的性能;参考文献[25]用计算像素小邻域上灰度差的加权平均再用梯度进行归一化,以此作为运动的度量;参考文献[26]利用三帧差图像来检测复杂景物环境中的运动目标;参考文献[27]采用一组时间上的高阶差分来抑制背景干扰,并得到目标的运动轨迹。

另一种基于像素分析的方法是光流法,光流法利用图像中目标的运动是由目标像素亮度运动确定,推导出瞬时光流场(瞬时速度场),然后根据光流场进行目标运动检测。参考文献[28]给出了运动约束方程:

$$f_x \frac{dx}{dt} + f_y \frac{dy}{dt} + f_t = 0$$

以后所有光流法的研究都是基于这一约束方程;参考文献[29]指出光流计算存在病态解问题,必须引入附加条件才能确定光流的唯一解;参考文献[30~33]提

出了几种应用光流法检测运动目标的方法;参考文献[34]提出了两种计算光流场的新方法,并和其他光流场计算方法进行了比较。

光流法的理论和算法存在以下几方面的问题:约束方程只有在梯度很大的点上才严格成立^[35];计算的不稳定性;运算量大,难以实时实现等,上述问题限制了光流法的理论和算法的应用。

1.1.4 基于变换的方法

该方法利用某一种形式的变换来实现目标的检测与跟踪,对数学理论的依赖性较强,如小波理论的发展使得基于小波变换的方法得到了广泛深入的应用。

基于 Fourier 变换的方法也是其中比较典型的方法之一,它利用了对图像序列进行 Fourier 变换时,其结果的频谱幅度不变而相位谱的变化是一个常数这一性质,来检测运动目标;另外,参考文献[36, 37]分别用 Hartley 变换和余弦面积变换(CAT)来实现目标检测与跟踪;参考文献[38, 39]用 Hough 变换实现目标检测与跟踪;参考文献[40]将 Wigner Ville 分布和 Hough 变换技术相结合,实现目标检测;参考文献[41]设计了一种将 Hadamard 变换与数学形态学滤波方法相结合的运动目标跟踪系统。这些算法的特点是结构简单、运算速度快,具有较低信噪比下的目标检测能力,是工程应用较多的方法。

1.2 TBD 方法

TBD 方法是在目标检测前,已经对大量的候选目标轨迹进行评估,提高了在恒虚警率(CFAR)下的目标检测能力,这个特点使其更适合于低信噪比背景下弱小目标的检测。

当目标的信噪比较低,不能获得理想的检测结果时,TBD 算法在连续帧里面使用目标路径信息来综合目标能量,同时还能减少噪声,定义

$$Z^k(r) = \mathbf{Z} = (Z(r, 1) = Z_1, \dots, Z(r, k) = Z_k)^T$$

为在空间点 r 、时间点 t_k 上所有度量的串联,因而 \mathbf{Z} 是一个维数为 $n = k(i \times j)$ 的三维数据矩阵。令 $\Phi^T \mathbf{Z} \in \mathcal{R}^n$ 定义一个线性函数,可以得到一个处理后的图像 $\mathbf{Y} = \Phi^T \mathbf{Z}$ 。

对于每一个运动假设 Φ , 矩阵 \mathbf{Y} 是一个综合产生的测试统计图像,可以用这些新产生图像与 DBT 检

测算法产生的结果对比,以决定 DBT 算法与 TBD 算法之间的性能差异^[42]。

由于矩阵 Φ 的行是正交的,矩阵 Y 的元素也是独立高斯随机变量,其分布在 H_0 和 H_1 下分别为 $N(0,1)$ 和 $N(\sqrt{k}A,1)$,对于矩阵 Y 的单个像素,其检测概率、误警率和目标丢失率分别描述为:

$$P_d = \Psi(\sqrt{k}A - \tau), P_{fa} = \Psi(-\tau) \text{ 和}$$

$$P_{miss} = \Psi(\tau - \sqrt{k}A)$$

1.2.1 三维匹配滤波方法

三维匹配滤波方法是针对所有可能的运动情况,设计相应的多个三维匹配滤波器,对每个滤波器的滤波结果进行统计,选出使输出信噪比最高的滤波器,根据该滤波器所对应的运动状态确定目标在图像中的位置和运动轨迹,其中三维是指二维平面和一维时间。

三维匹配滤波器的典型例子是速度滤波器,其原理见参考文献[43~46],它们分别对各种三维匹配滤波器的应用进行了描述;参考文献[47]引入起伏目标幅度模型,用 Kalman 滤波对目标参数进行估计;参考文献[48]把三维匹配滤波器运动目标检测算法改进为递推形式,减少了运算量和存储空间;参考文献[49]将目标的运动模型扩展到恒定加速度的情况,提出了一种基于线性变系数差分方程的运动目标检测方法;参考文献[50]分析了三维匹配滤波器在红外图像中抑制杂波和增强目标的优势;参考文献[51]用谐振平面方向滤波器对由二维空间和一维时间组成的三维图像数据在空间域进行滤波;参考文献[52,53]用一个并行三维方向滤波器组在频域上对三维数据进行 FFT 滤波实现图像增强,然后检测出目标运动轨迹。

三维匹配滤波方法是目前应用较为广泛的一种算法,它把运动点目标检测问题转换为三维变换域中寻找匹配滤波器的问题,这使得它具有很好的低信噪比下运动小目标的检测能力。

1.2.2 动态规划方法

动态规划算法(DPA)先定义一种目标状态作为一组可能的目标轨迹,每条轨迹以递归方式被跟踪并赋予一个值,根据该值确定给定帧图像上的像元所属的轨迹。轨迹的得分计算基于两个因素:一是目标能量,二是特征距离。

参考文献[54]最早基于目标运动的状态变量,将动态规划用于小目标检测,其后,参考文献[55]对该算法的检测性能进行了详尽的分析;参考文献[56]提出了一种基于动态规划的简单算法,并分析了其检测与跟踪性能,最近,参考文献[57]在此基础上,用极值理论得到该算法在不同性能尺度(如检测概率和误警率等)下的表达式;参考文献[58]给出了基于有限分布的极值分析下的误警率和跟踪概率的渐进表达式;参考文献[59]根据所定义的一种距离,运用动态规划的方法找出目标及其运动轨迹;参考文献[60]提出了方向加权的动态规划算法和二值航迹关联的方法;参考文献[61]利用动态规划方法积累目标能量。

动态规划方法将小目标的轨迹搜索问题转换为最优寻迹问题,沿目标轨迹积累能量,是基于像素级的操作运算,便于硬件实现。

1.2.3 高阶相关方法

高阶相关法利用目标轨迹点的时空相关性,通过计算不同帧之间的高阶相关性,在三维图像中检测出直线或是曲线轨迹。

参考文献[62]综合目标的运动状态,提出一种高阶时空相关方法,提取目标轨迹上的序列信息并去除背景噪声;参考文献[63,64]分别提出两种基于神经网络的高阶时空相关方法,后者与传统的 3D 滤波算法作了比较;参考文献[65]通过利用高阶相关方法的特性确定场景中的单个跟踪轨迹。

将高阶相关与神经网络技术相结合是目前的一种趋势,它能够发挥各自优点,实现高性能的检测与跟踪。

1.2.4 基于投影变换和三维搜索的方法

该方法一般是由投影法确定目标轨迹在三维空间中的大致范围,然后用三维搜索法实现检测。参考文献[66]将二维图像序列按时间轴方向投影,然后对投影图像进行门限处理,最后通过变换检测出轨迹;参考文献[67]则提出一种启发式搜索的实时处理方法。此类方法的主要优点是避免了投影法因损失 SNR 造成的处理能力下降,同时减少了三维搜索的计算量。

1.2.5 基于多级假设检验方法

多级假设检验法(MSHT)将众多可能的目标轨迹以树的结构组织起来,通过对序列中达到每帧图像

的树同时进行假设检验,以随时去掉没有通过检验的树,减少运算量和存储量。参考文献[68]首次提出这种多级假设检验算法;参考文献[69]提出一种在通用序贯处理器上的替代算法以减少计算量。

2 性能分析

综合分析以上各个文献中提出的算法环境和执行结果之后,可以得出如下结论:

(1) DBT 算法得到一个观测结果列表,根据目标的运动假设,将它们和已经存在的轨迹相关联,由此决定哪些轨迹足以确定是否是目标,即通过二元决策得到目标,因而具有较高的误检率。

(2) DBT 算法一般将预处理后的图像投影到单帧图像上,以改善检测性能,但参考文献[70]指出,对于一个未投影的 10 dB 数据而言,一个最优投影方法相对于多维最优匹配滤波器有不可恢复的 3 dB 性能损失,这在很大程度上影响了检测性能。

(3) TBD 算法考虑到时间信息与空间信息的相关性,因而计算量要大于 DBT 算法,但在较高信噪比条件下,DBT 算法的性能要相对优越些。

(4) 在较高信噪比条件下,检测帧数的增加导致检测概率迅速增大,DBT 算法和 TBD 算法都能在几帧内确定目标;而在低信噪比条件下,TBD 算法能在帧数增加的情况下得到很好的检测性能。

(5) 通常,在低信噪比时,在相同的检测环境下,通过使用像素统计的方法分析 DBT 和 TBD 算法的性能,可知 TBD 算法在检测概率、误警率和丢失概率上都要优于 DBT 算法。

总而言之,TBD 算法在某种程度上是以图像帧数的累加换取目标的可能轨迹信息,来获得更好的检测与跟踪性能的;随着芯片工艺和硬件结构的不断改进,算法在芯片上的运行速度将越来越快,耗时会越来越来少,当算法的实时性不再是检测与跟踪算法的一个主要考虑因素时,TBD 算法将是更好的选择。

3 总结与展望

目前,针对复杂背景下的小目标检测与跟踪问题,已经提出了大量的算法,但真正成熟的应用并不

多,还需要深入研究、探索,例如:

(1) 应用数据融合技术,在分布式探测系统里融合多个或多种探测器数据,得到单个探测器无法得到的信息,从而提高检测与跟踪性能;

(2) 红外探测系统与其他探测系统配合使用,充分发挥各自优势,如用雷达系统给出目标出现的最大概率区,再由红外系统完成精确的检测与跟踪;

(3) 小波理论的深入研究,将能更好地发挥其数学显微镜特点应用于小目标检测;

(4) 算法的实时实现技术研究,在现有的硬件技术基础上充分开发算法的实时性;

(5) 探测器坐标系抖动补偿算法和图像预处理算法的研究,进一步提高目标红外图像的效果;

最后,需要指出的是,小目标的检测与跟踪的研究发展很快,新的方法层出不穷,如,参考文献[71,72]提到的最优时空非线性滤波法(ONF),是传统的扩展卡尔曼滤波和多维时空匹配滤波的发展,具有很好的杂波抑制能力和实时计算性能;参考文献[73]提出了一种基于多帧的微弱点状动目标的非参数检测技术;参考文献[74]提出了 CFAR 和 TBD 联合检测的思想,引进平滑度的概念以消除一些伪航迹,等等。总之,随着新方法的不断涌现,小目标检测与跟踪方法的研究必将逐步走向应用。

参考文献:

- [1] 张红,李锋.第四代战斗机武器火控系统总体技术分析[J].电光与控制,2000,(3):33-38.
- [2] 霍曼,孙滨生.F22 飞机航空电子系统概述[D].国防情报 970093.1997.1-22.
- [3] 邹盛怀.航空火控系统的高新技术[J].电光与控制.1997,(4):1-10.
- [4] Askar H, Li Xiaofeng, Li Zaiming. Performance analysis of dim moving point target detection algorithms [A]. International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions. 2002 IEEE[C]. 2002,2. 229-242.
- [5] Askar H. Performance analysis of dim moving point target detection algorithms[A]. International Conference on Communication, Circuits and Systems and West Sino Expositions. 2002 IEEE[C]. 2002,1. 605-609.
- [6] Seera J. Image analysis and mathematical morphology [M]. New York: Academic Press, 1982.

- [7] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Image Processing, Analysis, and Machine Vision, 2nd ed [M]. US: Thomson Asia Pte Ltd, 2002, 559-599.
- [8] Wang Yang, Zhen Qinbo, Zhang Junping. Real-time detection of small target in IR grey image based on mathematical morphology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1):28-31.
- [9] Ye Bin, Peng Jiaxiong. Small target detection based on energy accumulation and order morphology filtering in infrared image [J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(A)(3):251-255.
- [10] Ye Bin, Peng Jiaxiong. Moving small target detection based on order morphology filtering in infrared image sequences [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2001, 16(3):315-319.
- [11] Ye Bin, Peng Jiaxiong. Small target detection method based on morphology top-hat operator[J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(A)(7):638-642.
- [12] Zhang Yan, Zhang Guilin. A morphology based on detection of small moving target in infrared image sequence[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 1997, 12(4):276-279.
- [13] 朱海陵, 卢焕章, 常青. 低信噪比下两种点目标检测算法的研究[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1):5-7.
- [14] Li Jicheng, Shen Zhenkang, Lan Tao. Detection of spot target in infrared clutter with morphological filter[A]. IEEE Aerospace and Electronics Conference, 1996 NAECON[C]. 1996, 1. 168-172.
- [15] Li Guokuan, Peng Jiaxiong, Li Hong. Small target detection based on multi-wavelet transform[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 2000, 28(1):72-75.
- [16] Zuo Zhen, Zhang Tianxu. Algorithm based on wavelet transform for small target detection on sea surface in infrared image [J]. Infrared and Laser Engineering, 1998, 27(3):42-45.
- [17] Li Guokuan, Peng Jiaxiong, Li Hong. Infrared imaging dim target detection based on wavelet transform[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 2000, 28(5):69-71.
- [18] Sheng Wen, Deng bin, Liu Jian. Multi-resolution distance map based small target detection in infrared image[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(1):42-45.
- [19] Li Hong, Zheng Chengyong, Gao Jingli. Detecting small moving object based on wavelet multi-scale image registration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(3):268-270.
- [20] Li Hongyan, Wu Chengke. Detecting dim small targets in image sequences based on wavelet transforms and genetic algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(4):439-442.
- [21] Davidson G, Griffiths H D. Wavelet detection scheme for small target in sea clutter[J]. IEEE Electronics Letters, 2002, 38(19):1128-1130.
- [22] Giuseppe Boccignone. Small target detection using wavelets [A]. IEEE 1998 Fourteenth International Conference on Pattern Recognition[C]. 1998, 1776-1778.
- [23] Barry Sherlock. Wavelet-based feature extraction for target recognition and minefield detection. final progress report on onr grant N000149910091[R]. 2002.
- [24] Cassasent D. Sub-pixel target detection and tracking[A]. Proc of the SPIE[C]. 1986, 726. 1206-1210.
- [25] Iranni M, Rousso B, Peleg S. Detection and tracking multiple moving objects using temporal integration [A]. Second European Conference on Computer Vision[C]. 1992. 282-287.
- [26] 杨威, 张田文. 复杂景物环境下运动目标检测的新方法[J]. 计算机研究与发展, 1998, 35(8):724-728.
- [27] Rauch H E, Futtner W I, Kemmer D B. Background suppression and tracking with a staring Mosaic sensor[J]. Optical Engineering, 1981, 20(1):128-133.
- [28] Horn B K, Schunck B G. The image flow constraint equation [J]. CVGIP, 1986, 35(3):26-31.
- [29] Horn B K, Schunck B G. Determining optical flow[R]. MIT: AI Memo AI Lab MIT, 1986. 88-93.
- [30] Uras S, Giroso F, Verri A. A computational approach to motion perception[J]. Biol Cybern, 1988, 60:79-87.
- [31] Reichardt W E, Schlögl R W. A two dimensional field theory for motion computation[J]. Biol Cybern, 1988, 60:23-25.
- [32] Markandey V. Motion estimation for moving target detection [J]. IEEE Trans on AES, 1996, 32(3):866-874.
- [33] 李晓春, 孙陪懋, 金国藩, 等. 复杂场景中动目标图像分割的一种快速算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(8):59-64.
- [34] Bimbo A D, Nesi P, Jorge L C Sanz. Optical flow computation using extended constraints[J]. IEEE Trans Image Processing, 1996, 5(5):720-739.
- [35] Verri A, Poggio T. Motion field and optical flow: qualitative properties[J]. IEEE Trans PAMI, 1989, 11(5):477-489.
- [36] Mahmoud S A. Motion analysis of multiple moving object using hartley transform[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1991, 21:280-287.
- [37] Mahmoud S A. Motion detection and estimation of multiple moving object in an image sequence using cosine area transform (CAT)[J]. IEE Proc, 1991, 138(5):351-356.
- [38] Falconer D G. Target tracking with the Hough transform[A]. Proceedings of 11th Asilomar Conference on Circuits, System, and Computer[C]. 1977. 249-252.
- [39] Snyder W E, Rajola S A. Tracking acquisition of sub-pixel target. BATI ASUS Series[Z]. 1983. 227-233.
- [40] Dong Yongqiang, Tao Ran, Zhou Siyong, et al. SAR moving target detection and imaging based on WHH Transform[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999, 8(1):94-100.