

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.01.019

# 动态背景中基于特征点引导的动目标快速检测方法

喻夏琼<sup>1</sup>, 陈向宁<sup>2</sup>

- (1. 装备指挥技术学院 研究生管理大队, 北京 101416;  
2. 装备指挥技术学院 光电装备系, 北京 101416)

**摘要:** 为解决传统方法的不足, 提出一种新方法实现动态背景中运动目标的快速检测。充分利用图像的特征点信息, 对传统的SSDA算法进行改进, 实现视频序列相邻帧间的配准。在经过配准的帧间, 利用特征点及其邻域的灰度信息求取小窗口的灰度差的总和, 则匹配误差较大的特征点必处在动目标区域, 据此检测出运动目标的位置。实验证明, 该算法具有简单、快速的优点, 可用于动态背景中的动目标检测, 也可用于图像的变化检测。

**关键词:** 动目标检测; 运动背景; 图像匹配; 序列相似性检测算法; Harris算子; 强角点

**中图分类号:** TP274 **文献标志码:** A

## Efficient Algorithm Based on Image Features for Moving Objects Detection in Dynamic Background

Yu Xiaqiong<sup>1</sup>, Chen Xiangning<sup>2</sup>

- (1. Administrant Brigade of Postgraduate, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;  
2. Dept. of Photoelectric Equipment, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** A new efficient algorithm for moving objects detection in dynamic background was put forward. Registration between consecutive frames was performed by using an improved SSDA algorithm based on full use of image features. After registration between frames, sum of absolute difference of pixel intensity between consecutive frames in range of every feature and its neighboring window was calculated and the position of moving objects was determined according to the rule that the feature from moving regions shows a larger registration error. Experiments show that the algorithm is simple and fast, which can be used for detection of the moving targets in dynamic background as well as change detection.

**Keywords:** moving object detection; moving background; image registration; SSDA; Harris detector; power angle point

### 0 引言

实际应用中经常存在摄像机运动的情况, 而运动背景中的运动检测一直未能很好地解决。从动态背景中检测运动的方法主要有3种: 利用传感器直接获取摄像机的运动参数、光流估计和利用几何变换配准然后差分<sup>[1]</sup>。其中, 传感器方法成本较高; 光流法计算量大, 不利于实时检测; 利用几何变换配准需要进行鲁棒的特征匹配, 且差分后易形成空洞。为克服上述方法的不足, 提高检测速度和鲁棒性, 笔者提出了一种基于特征点引导的运动背景中的动目标检测的新方法, 充分利用图像的特征点信息, 对当前的SSDA算法进行改进, 将匹配计算控制在特征点的邻域范围, 显著减小了帧间配准的计算量。在相邻帧配准的基础上, 利用特征点邻域的最大匹配误差实现变化检测。为进一步区分背景特征点和目标特征点, 利用三帧序列图像进行双重变化检测, 最终得到目标特征点的点集, 避免了帧间差分可能引起的空洞效应。

### 1 动目标检测方法基本思路

动目标检测的本质是利用图像帧间的差异, 将目标从背景中分离出来。帧间差分法通过帧间配准消除背景差异, 从而检测运动目标, 与背景减除法的思想类似。光流法考虑前后帧间所有像素或大部分像素点的位移, 分别对应稠密光流法和稀疏光流法。因此, 建立一个能快速有效区分背景和前景的标准是检测的关键。因为相邻帧间所有像素点的变化均会影响检测速度, 且不可能实现所有像素的匹配。分析相邻帧的特点可知, 在背景变化缓慢且目标运动速度不高的情况下, 背景及目标的特征点可以很好地保留, 且目标运动导致两类特征点之间存在这样的差异, 即背景特征点匹配时, 前后帧中目标特征点失配。基于这种差异而采用的思路是: 按时间选取三帧视频图像, 分别为 $I_{t-1}$ ,  $I_t$ ,  $I_{t+1}$ 。对帧 $I_t$ , 提取特征点, 获得特征点集 $F$ 。以特征点集 $F$ 作为引导, 利用改进的SSDA算法对 $I_t$ 和 $I_{t-1}$ 进行配准。配准后, 对于特征点集 $F$ 中的每一点及其邻域, 与

收稿日期: 2010-07-17; 修回日期: 2010-09-25

基金项目: 863项目(2007AA701516-1)

作者简介: 喻夏琼(1983-), 女, 湖北人, 在读博士生, 从事图像处理、摄影测量与遥感、计算机视觉研究。

其对应的匹配区域进行匹配检测, 得到所有点的匹配误差曲线, 选取匹配误差较大的点作为目标特征点的候选点集  $V_1$ 。在  $I_t$  和  $I_{t+1}$  之间重复上述过程, 以

得到另一个目标特征点的点集  $V_2$ 。取  $V_1$  和  $V_2$  的交集, 从而确定目标的最终特征点集。动目标检测方法的原理及步骤如图 1。

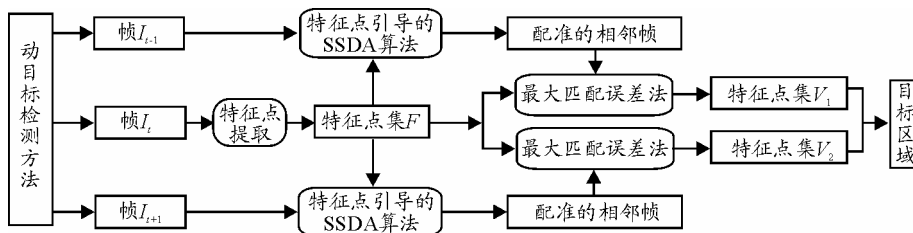


图 1 动目标检测方法

当前, 没有哪一种算法能适用于所有的情况, 笔者提出的算法也需要满足以下前提条件:

1) 图像中具有足够多的特征点。由于帧间配准利用特征点引导的 SSDA 方法, 匹配运算主要在特征点及其邻域进行, 若图像中的特征点过少, 则发生误匹配的几率很高。

2) 目标区域对应若干个特征点。若目标特征点过少甚至没有, 则帧间匹配后, 特征点匹配误差曲线峰值不明显, 即使检测出峰值, 也不属于目标特征点, 导致动目标检测错误。

3) 背景中的特征点数目远多于目标特征点个数。若背景中特征点过少或者没有, 则利用改进的 SSDA 进行帧间配准, 容易出现动目标区域配准而背景没有配准的情况。

实际上, 对于图像背景不会过于简单, 目标大小适中的视频序列图像, 大都可以满足上述条件。

## 2 基于特征点引导的 SSDA 匹配方法

动态场景中动目标检测的前提是将相邻帧的背景配准以补偿背景运动, 基于灰度和基于特征的匹配方法较为常用。基于灰度的方法在整个图像上搜索匹配位置, 而基于特征的方法则需要在各帧上提取特征。笔者提出的基于特征点引导的 SSDA 匹配方法只需要从待匹配图像中的一帧提取特征点, 考虑特征点及其邻域的灰度信息, 利用改进的 SSDA 匹配方法即可实现帧间的配准。

### 2.1 特征点提取方法

图像特征是由于景物的物理与几何特征使图像局部区域的灰度产生明显变化而形成的<sup>[2]</sup>。点特征因其信息量高, 可对视觉处理提供足够的约束; 相对图像总的像素点来说较少, 极大地提高了计算速度, 使实时处理成为可能。根据笔者的检测思路, 提取的特征点集必须同时包含背景特征点和目标特

征点。角点作为一类重要的特征点广泛存在于各种图像中, 它定义为二维图像亮度变化剧烈的点或图像边缘曲线上具有曲率极大值的点。

最普遍使用的角点定义由 Harris 提出<sup>[3]</sup>, 给出矩阵  $C$ , 其特征值是自相关函数的一阶曲率, 若两个曲率值都高, 就认为该点是特征点。矩阵  $C$  及 Harris 角点探测器的定义由式 (1) 和式 (2) 给出。

$$C(x, y) = \begin{pmatrix} G_{\sigma}(f_x^2) & G_{\sigma}(f_x f_y) \\ G_{\sigma}(f_x f_y) & G_{\sigma}(f_y^2) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R(x, y) = \det[C(x, y)] - k \cdot \text{trace}^2[C(x, y)] \quad (2)$$

其中,  $f$  为输入图像的灰度值,  $f_x$  和  $f_y$  分别为沿  $x$  和  $y$  方向的一阶方向微分,  $G_{\sigma}$  为标准偏差为  $\sigma$  的高斯平滑滤波函数。Harris 最原始的定义是将矩阵的行列式与矩阵的迹 (带权重系数) 相减, 再将差值同预先给定的阈值进行比较。后来 Shi 和 Tomasi<sup>[4]</sup> 发现, 若两个特征值中较小的一个大于最小阈值, 则会得到强角点。Shi 和 Thmasi 的方法比较充分, 在很多情况下可以得到比使用 Harris 方法更好的结果。Shi 和 Tomasi 提出的强角点提取算子定义如下<sup>[5]</sup>:

$$\min(\lambda_1, \lambda_2) > \lambda_h \quad (3)$$

其中,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为矩阵的奇异值,  $\lambda_h$  为预先定义的阈值。对于输入图像的每个像素点, 应用该检测算子即可得到特征点。

由于实际应用中存在一些特殊情况, 例如目标为圆形时, 利用角点检测算子可能无法检测到目标对应的特征点, 这时可根据目标的先验信息, 利用形状检测算子, 或者将各种检测算子综合使用, 使提取的特征点集充分包含背景特征点和目标特征点。故笔者所提检测算法中特征点是一个广义的概念。但对一般的应用, 考虑角点已经足够。

### 2.2 特征点引导的自适应阈值 SSDA 匹配方法

常用的基于灰度的匹配算法有归一化积相关算

法 (Normalized Product Correlation, Nprod) 和平均绝对差算法 (Mean Absolute Difference, MAD)。Nprod 需要进行大量的乘法运算, 而 MAD 算法具有速度优势。基于 MAD 的匹配准则, 序列相似性检测算法 (SIMILARITY SEQUENTIAL DETECTION ALGORITHM, SSDA) 通过设定一个检测阈值, 避免了计算模板图像  $T$  和基准图像  $S$  重叠区域内的所有像素点的差值, 显著地提高了匹配速度<sup>[6]</sup>。其计算步骤如下:

1) 定义绝对误差值;

$$\varepsilon(i, j, x_k, y_k) = |S^{i,j}(x_k, y_k) - \bar{S}(i, j) - T(x_k, y_k) + \bar{T}| \quad (4)$$

其中

$$\bar{S}(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N S^{i,j}(x, y) \quad (5)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N T(x, y) \quad (6)$$

2) 确定检测阈值  $T_h$ ;

3) 在子图中随机选取像素点, 计算它同  $T$  中对应点的误差值  $\varepsilon$ , 然后把该差值同其它点对的差值累加起来, 当累加  $r$  此后误差超过检测阈值  $T_h$  时, 停止累加, 并记下次数  $r$ , 定义 SSDA 的检测曲面;

$$I(i, j) = \left\{ r \mid \min_{1 \leq r \leq MN} \left[ \sum_{k=1}^r \varepsilon(i, j, x_k, y_k) \geq T_h \right] \right\} \quad (7)$$

4) 选取值大的点作为匹配点, 因为在这点上需要很多次累加才使总误差超过。

为进一步提高 SSDA 算法的效率, 可从减小计算次数和减少搜索位置两方面考虑。减小计算次数, 阈值的设置是关键, 可选的改进方法有单调递增阈值算法和自适应阈值算法<sup>[7]</sup>。固定阈值和单调递增阈值算法, 阈值选择困难, 选取过大, 处理速度不高; 选取过小, 跟踪会不准确。自适应阈值 SSDA 在搜索过程中逐渐调整阈值, 稳定地减小在各个搜索位置参与计算的像素个数, 相比之下更为实用。减小搜索位置也有一些改进方法<sup>[8]</sup>: 采用粗细结合的均匀搜索, 即先每隔  $m$  点搜索匹配好坏, 然后在有极大匹配值周围的局部范围内对各参考点位置求匹配; 利用图像的相关性选择适当的点序列来计算匹配误差; 通过分析, 判定何时结束计算, 从而进行优化。但这些算法大都没有利用图像自身的特征。为了充分利用图像自身的特征, 提出了基于特征点引导的自适应阈值 SSDA 匹配方法, 对于给定的 2 帧图像  $I_{t-1}$  和  $I_t$ , 其基本执行步骤如下:

1) 检测图像  $I_t$  中的特征点, 构成特征点集  $F$ ;

2) 对  $F$  中所有特征点, 选择半径为  $r$  的邻域窗口, 形成新的模板图像;

3) 利用此模板图像, 在图像  $I_{t-1}$  上遍历, 利用自适应阈值 SSDA 完成匹配。

在 SSDA 算法中, 只考虑特征点集  $F$  中的各点及其邻域窗口内的像素, 忽略其余像素点, 相当于形成大小为  $n \times (2r+1) \times (2r+1)$  新模板。

### 3 最大匹配误差检测法

帧  $I_t$  中提取的特征点可以分为背景特征点和目标特征点 2 类。改进的 SSDA 算法实现相邻帧配准, 是以绝大部分特征点来自背景为前提。因此, 匹配误差较大的区域主要来自于帧  $I_t$  中运动目标对应的特征点, 以及在上一帧  $I_{t-1}$  中被遮挡的背景特征点, 对应于帧差法, 则相当于目标及空洞所在区域, 将这两类点组成的集合记为  $V_1$ 。

针对特征点集  $F$  中的每个点及其邻域, 利用差绝对值和 (SAD) 作为匹配测度, 定义各特征点邻域的匹配误差。设点集  $F$  中特征点的个数为  $n$ , 对任意特征点  $P_k \in F, k=1, 2, 3 \dots n, T_k$  是以  $P_k$  为中心, 半径为  $r$  的邻域,  $T'_k$  由为配准后  $T_k$  在帧  $I_{t-1}$  对应的区域, 则匹配误差可表示为:

$$S_k = \sum_{i=1}^{2r+1} \sum_{j=1}^{2r+1} |T_k(i, j) - T'_k(i, j)| \quad (8)$$

根据式 (8), 可得到特征点集  $F$  中所有点及其邻域的匹配误差, 形成一条误差变化曲线。给定检测阈值  $T$ , 构造一个匹配误差分类器, 分类准则为:

$$S_k > T \Rightarrow P_k \in V_1 \quad (9)$$

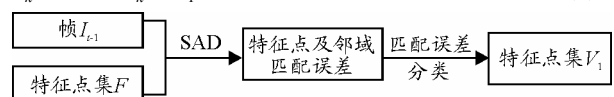


图 2 匹配误差检测法

利用匹配误差检测法得到的特征点集  $V_1$ , 包含了空洞及动目标区域对应的特征点, 为了进一步消除空洞的影响, 提出一种基于三帧双重检测的方法。其检测原理如图 3。

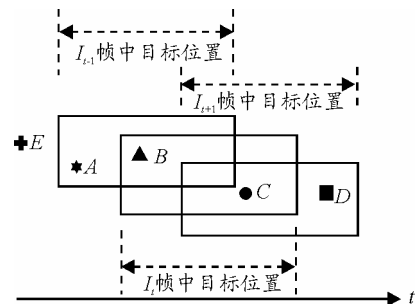


图 3 三帧双重匹配误差检测法

如图 3, 对于帧  $I_t$  中提取的特征点集  $F$ , 其中的特征点根据背景及目标在不同时刻的位置关系, 可分为 5 种类型, 分别记为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  和  $E$ 。其中,  $B$ 、 $C$  为目标特征点, 而  $A$ 、 $D$ 、 $E$  对应背景特征点。对于特征点集  $F$  和帧  $I_{t-1}$ , 经过如图 2 所示的最大匹配误差检测, 得到点集  $V_1 = \{A, B, C\}$ , 同理, 若对特征点集  $F$  和帧  $I_{t+1}$  进行最大匹配误差检测, 得到点集  $V_2 = \{B, C, D\}$ 。通过对  $V_1$  和  $V_2$  求交集  $V$ , 即可得到  $V = \{B, C\}$ , 对应运动目标的真实位置。

### 4 实验及结果

采用两组动态背景下的运动目标序列图像进行测试 (图像来源: <http://www.ces.clemson.edu/~stb/images/> 和 <http://iris.usc.edu/Vision-Users/OldUsers/icohen/projects/vsam/stabilization.htm>), 对应单个和多个运动目标的情况, 分帧间配准和最大匹配误差检测 2 个阶段进行。选取序列图像中相邻的三帧分别如图 4 和图 5, 对中间一帧, 在选取的模板范围内 (图中矩形框) 提取角点, 利

用基于角点引导的 SSDA 改进算法进行帧间配准, 两图中 (a) 和 (c) 中矩形框的区域对应第 2 帧选取的模板在第 1 帧和第 3 帧中的匹配位置。由图 4 可知, 角点分布情况基本满足算法的要求, 匹配结果正确。图 5 中, 由于 2 个运动目标在图像中所占比例较大, 目标对应特征点多, 理论上匹配结果可能不准确。实际上, 分析背景区域配准和目标区域配准两种情况, 由于目标大部分特征点邻域灰度值变化不大, 而背景特征点分布广泛且邻域灰度值变化大, 当背景对应特征点配准时, 即使目标对应的特征点比例较大, 对式 (4) 所定义的绝对误差值贡献很小, 而在目标区域配准时, 背景对应特征点对绝对误差值的贡献较大, 最终的匹配结果依然准确。因此, 笔者提出的算法的前提条件较为严格, 可以增强算法的鲁棒性, 实际中可根据具体情况适当放宽算法的条件。对几种配准算法的比较结果如表 1 所示, 可知, 笔者提出的算法速度最快, 且匹配结果准确。

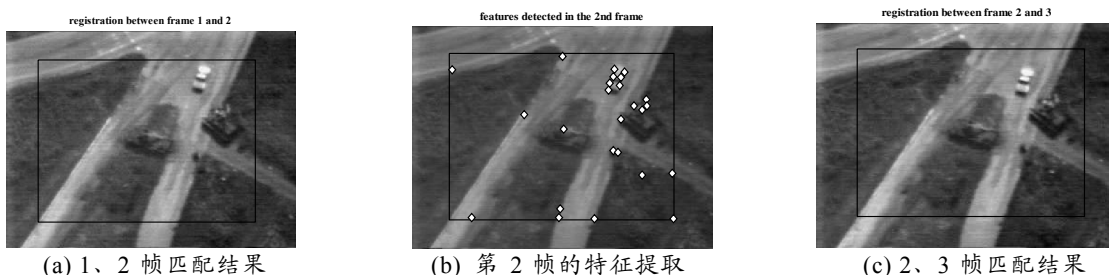


图 4 单目标角点提取及 SSDA 匹配

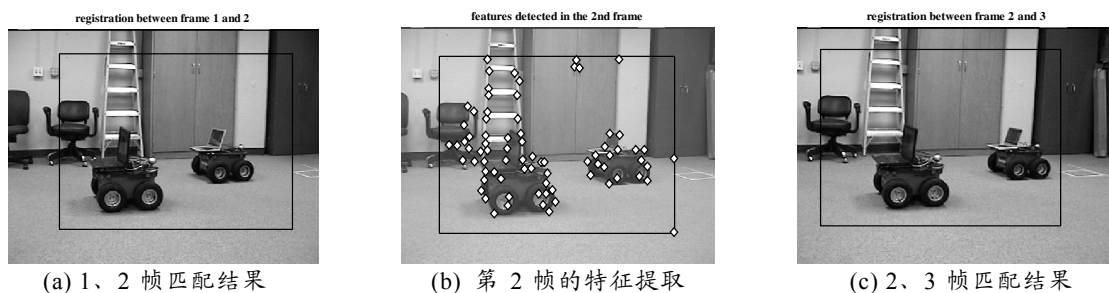


图 5 多目标角点提取及 SSDA 匹配

表 1 配准算法的比较

视频序列	第 1 组			第 2 组		
配准算法	真实位置	匹配位置	运算时间/s	真实位置	匹配位置	运算时间/s
Nprod	(35,32)	(35,32)	11.546 9	(26,54)	(26,54)	11.375
MAD		(35,32)	5.718 8		(26,54)	5.640 6
SSDA		(35,31)	3.109 4		(26,54)	3.109 4
本文算法		(35,32)	2.734 4		(26,54)	2.375

相邻帧匹配后, 利用笔者提出的特征点邻域最大匹配误差检测法, 提取运动目标对应的特征点集。图 6 和图 7 为两组图像序列相邻帧配准后, 特征点及邻域的匹配误差曲线。图中的横轴表示所提取的角点的索引值, 纵坐标对应由式 (7) 定义的该角点

邻域的匹配误差值。第 1 组图像中的目标较小, 对应特征点数少, 运动目标对应的特征点与背景特征点处的匹配误差差异明显, 而第 2 组图像中目标大, 对应特征点多, 故特征点邻域匹配误差峰值较多, 通过设置检测阈值, 可达到较好的分类效果。

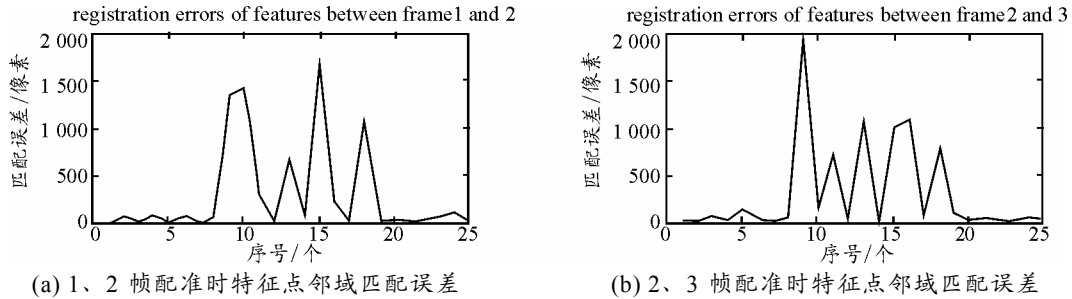


图 6 单目标序列图像特征点邻域匹配误差

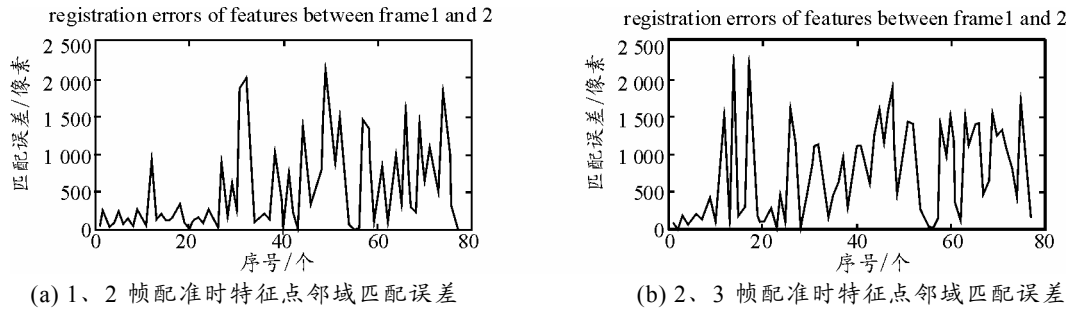


图 7 多目标序列图像特征点邻域匹配误差

根据图 6(a) 和图 7(a), 得到第 1、2 帧对应的运动目标特征点集  $V_1$ , 如图 8(a) 和 9(a)。根据图 6(b) 和图 7(b), 得到第 2、3 帧对应的运动目标特征点集  $V_2$ , 如图 8(b) 和 9(b)。8(c) 和 9(c) 为  $V_1$  和  $V_2$  的交

集, 即最后检测得到的运动目标对应的特征点集。可见, 检测结果显示了当前帧中的动目标区域, 点集求交避免了空洞的干扰, 无论对于单运动区域, 还是多个运动区域, 都能用特征点集正确地标示。

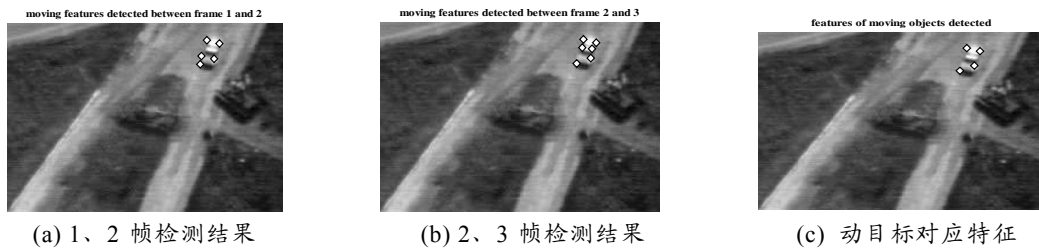


图 8 单目标序列图像动目标检测结果

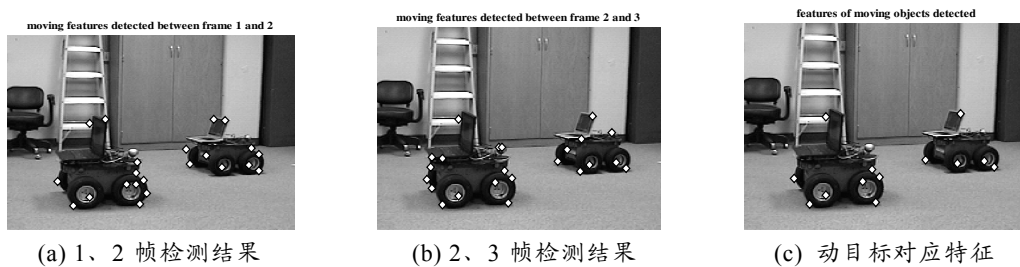


图 9 多目标序列图像动目标检测结果

### 5 结论

该算法利用特征点引导的自适应阈值 SSDA 算法进行相邻帧间的匹配, 充分利用了图像的特征信息, 避免了在整个图像上的相关运算, 自适应阈值也有利于减少计算次数和搜索位置。相比基于几何变换的帧间配准, 特征检测只需在中间帧上进行, 利用三帧双重匹配误差检测法, 避免了空洞的形成。实验结果表明, 该方法具有计算简单, 快速的优点,

能够检测出运动背景中运动的单目标及多目标的区域。结合主动轮廓的跟踪方法, 利用检测结果作为主动轮廓方法的初始值, 可望得到更加精确的运动目标轮廓, 实现动目标的精确跟踪。

### 参考文献:

[1] Shoichi ARAKI, Takashi MATSUOKA, Naokazu YOKOYA, et al. Real-time tracking of multiple moving object contours in a moving camera image sequence[J].

IEICE TRANS. INF. & SYST, 2000, E83-D(7): 1583-1591.

[2] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997: 121.

[3] 张红源, 陈自力. 图像匹配经典算法及其改进方法研究[J]. 兵工自动化, 2008, 27(9): 91-94.

[4] Shi J. and Tomasi C. Good features to track[C]. In Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994: 593-600.

[5] Hiroki Sugano, Ryusuke Miyamoto. Parallel Implementation of Good Feature Extraction for Tracking

on the Cell Processor with OpenCV Interface[C]. In Proc. of Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal, 2009: 1326-1329.

[6] D. I. Barnea, H F Silverman. A Class of Algorithms for Fast Digital Registration[J]. IEEE Transactions on Computers C-21, 1972: 179-186.

[7] 沈晓芳, 向建勇, 董维科. 基于图像边缘特征的SSDA算法[J]. 电子科技, 2009, 22(3): 16-18.

[8] 孙立功, 饶文碧, 阎保定. 基于改进SSDA的彩色目标识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(28): 73-74.

(上接第 43 页)

### 3 结论

综上所述, 维修过程逻辑网是一个有唯一起始点和结束点的状态机 Petri 网, 其中任意的状态都是可达的, 不会发生死锁现象, 从而保证了维修过程模型的合理性。当建立了维修过程逻辑网模型, 并已证明其正确性之后, 就可以把维修过程逻辑网模型转换为维修过程 Petri 网模型。

主要过程为:

- 1) 按照维修过程逻辑网模型的结构建立有色 Petri 网的基本结构;
- 2) 分析应该设置哪些颜色和函数;
- 3) 进行仿真分析。主要借用相关的 Petri 网仿真工具进行仿真分析。

### 参考文献:

[1] 郝建平, 等. 虚拟维修仿真实理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[2] 蒋双双, 刘鹏远, 张锡恩. 一种基于 Petri 网的虚拟维修过程建模方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2488-2491.

[3] 曲长征, 陶凤和, 张柳, 等. 基于赋时有色 Petri 网的维修过程模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23(4): 8-10.

[4] 曲长征, 郝建平, 刘继民. 考虑资源约束的复杂维修任务时间预计模型[J]. 军械工程学院学报, 2009, 21(3): 6-10.

[5] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[6] 王胜德, 黄进. 基于优先级时间有色 Petri 网的装备维修过程模型研究[J]. 国防技术基础, 2006(9): 32-35.

[7] 马麟, 吕川. Petri 网在维修工作分析中的应用研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(3): 249-253.

[8] 赵吉昌, 李星新, 田成龙, 等. 基于 NGRAIN 的装备虚拟维修训练研究与实现[J]. 四川兵工学报, 2009(9): 25-27.

(上接第 59 页)

表 1 2 种控制策略下跟踪效果

输入位置 (X轴输入/°, Y轴输入/°)		输入位置1 (12, 6)	输入位置2 (15, 15)	输入位置3 (20, 25)	输入位置4 (32, 36)
单轴跟踪稳态误差	X轴输出/°	-0.003 5	-0.045 1	-0.064 5	-0.330 1
	Y轴输出/°	-0.014 2	-0.066 7	-0.162	-0.480 2
耦合跟踪稳态误差	X轴输出/°	-0.001 1	-0.022 1	-0.048 3	-0.399 7
	Y轴输出/°	-0.000 9	-0.044 7	-0.140 8	-0.279 5
跟踪稳态轮廓误差 $\epsilon$	单轴跟踪/°	-0.001 2	-0.077	-0.174 1	-0.125 3
	CCC跟踪/°	-0.000 8	-0.005 3	-0.144 7	-0.111 5

### 4 结论

在对雷达伺服数学建模的仿真的基础上, 运用运动轮廓误差的分析方法对跟踪效果进行比较。在试验中应用变增益交叉耦合情况下的轮廓误差比单轴跟踪时明显要小, 表明变增益交叉耦合控制能有效提高雷达伺服系统的精度, 减小系统误差。

### 参考文献:

[1] Feng.L, Koren.Y, Borenstein.J. Cross-coupling motion controller for mobile robots [J]. Control Systems Magazine, IEEE, 1993, 13(6): 35-43.

[2] Srinivasan.K, Fosdick.R. Multivariable analysis and controller design for coordinated multi-axial motion

control[R]. Proceedings of the American Control Conference, 1988, 88(3): 95-101.

[3] Hsu, Pau-Lo, Yeh, Syh-Shiuh. Precision control and compensation of servomotors and machine tools via the disturbance observer[J]. Mechatronic/IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 420-429.

[4] Su.Ke-Han, Cheng.Ming-Yang. Contouring accuracy improvement using cross-coupled control and position error compensator[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 10(48): 1444-1453.

[5] Zhao, Guo-Yong, et.al. High-precision cross-coupled control approach based on NURBS curve interpolator[J]. Dalian Ligong Daxue Xuebao/Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(2): 210-214.

[6] 张今朝, 刘国海. 多电机同步系统的多模型辨识[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 138-142.