

基于序列图像的运动目标检测新算法

闫可平¹, 陈洪亮², 文海龙³, 李建勋³

(1. 成都飞机设计研究所, 成都 610091; 2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;
3. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 基于SURF帧间配准和运动历史图像构建, 提出了一种基于序列图像的运动目标检测新方法。针对运动检测容易出现虚警的情况, 结合多帧关联思想和碰撞检测理论提出多帧碰撞检测算法, 以剔除虚假运动目标。在标准测试集上测试序列仿真验证, 结果表明, 该运动目标检测算法具备较高的查全率以及极高的检测精度和极低的虚警率。

关键词: 运动检测; 碰撞检测; 多帧关联; SURF配准; 序列图像

中图分类号: V249.2 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2017)06-0008-05

A New Algorithm for Moving Target Detection Based on Image Sequences

YAN Ke-ping¹, CHEN Hong-liang², WEN Hai-long³, LI Jian-xun³

(1. Chengdu Aircraft Design & Research Institute, AVIC, Chengdu 610091, China; 2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 3. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: On the basis of SURF registration and history motion image building, a new algorithm for moving target detection based on image sequence was proposed. To deal with the problem of false alarm in motion detection, a multi-frame collision detection algorithm was put forward to eliminate the false moving target, which combining multi-frame association with collision detection theory. Simulation was made by using standard test sequences. The results show that the moving target detection algorithm has high recall ratio, high detection precision and very low false alarm probability.

Key words: motion detection; collision detection; multi-frame association; SURF registration; image sequence

0 引言

基于图像序列的运动目标检测技术在社会生产生活中应用广泛, 如人脸识别、飞机检测和跟踪及国家安全保障等^[1]。在军事领域, 基于图像序列的运动目标检测、识别和跟踪应用于飞机、导弹和舰艇等军事目标的监控和跟踪。在视频监控系统中, 尤其是安防领域, 运动目标检测、识别和跟踪在大型公共广场、机场、码头等人流密集场所对目标监控、预防犯罪和组织犯罪作用明显, 很好地弥补了安保人员不足的缺陷^[2]。

运动目标检测是指从图像序列中将感兴趣的运动目标区域与背景分离。通常, 根据摄像机与场景的相对位置是否移动, 将检测分为静态背景检测和动态背

景检测。常见的静态背景检测方法有帧差、背景差、光流法和基于神经网络的方法等; 而动态背景下的运动目标检测研究相对较少, 仍有很多问题需要解决。运动目标检测的几种常用方法如下。

1) 帧间差分^[3]。差分法就是相邻几帧图像相减, 帧间差分法简单高效、动态性强, 但易受光照影响, 难以提取完整目标区域, 在目标内部会留有许多空洞。帧差结果也依赖选择的帧间间隔, 较快运动时运动轮廓会变大, 较慢时难以得到运动边界。

2) 背景估计^[4-5]。基于背景估计的检测方法, 是为了解决帧差无法获取完整目标这个缺点。背景估计法用一帧图像作为背景, 然后将后续帧与背景做帧差以及后续处理。

3) 动态背景目标检测。静态背景下的运动目标检测相对简单, 技术也比较成熟, 动态背景下背景和前景均发生了相对位移和运动, 如何根据图像序列中的信息有效区分出运动的前景和背景, 同时保持较高的

准确度是目前的一大难题。

由于配准算法精度有限、运动估计误差和图像灰度不均等原因,运动检测难免有误。许多非运动区域会被误检测为运动前景,即导致虚警,本文致力于解决该问题。

1 运动目标检测框架

静态背景下的运动检测经典算法包括帧差或背景估计,而动态背景问题可根据全局运动补偿策略转化为静态处理,全局运动补偿可采用仿射、平移、透视变换等^[6]模型计算运动矢量补偿背景运动,其难点在于特征点提取和匹配,获得全局运动参数的最优解,以及误匹配对模型和参数估计的影响等。

基于上述分析,本文提出了一种运动检测框架,如图1所示。该框架适合于静态背景或动态背景下的运动目标检测问题。



图1 运动检测框架

Fig.1 Motion detecting framework

运动检测框架的具体算法设计如下。

算法1 运动检测框架算法设计。

输入:依次输入图像序列。

输出:所有待检验运动目标前景。

- 1) 提取 SURF 特征点,完成帧间匹配,得到粗匹配特征点。
- 2) 求得仿射变换矩阵,估计全局运动。RANSAC (Random Sample Consensus) 剔除外点,获得精确仿射模型。
- 3) 得到上一帧图像的仿射变换图与下一帧帧差,构建运动历史图像。
- 4) 形态学处理,分割前景。
- 5) 多帧碰撞检测算法检验。

1.1 基于 SURF 算法的帧间匹配

在实际的应用场景和测试序列中,视频序列的背景通常是动态移动的,因此首要问题是帧间序列配准。图像的匹配算法有很多种,例如经典的 SIFT^[7]算法、SURF^[8]算法等。考虑视频图像序列帧频高,因此选择运算效率高、鲁棒效果好的 SURF 算法作为帧间匹配算法。

基于最近邻次近邻距离比的方法判断两个特征点是否匹配,具体采用欧式距离计算特征点相似性,两个 SURF 特征 f_α 和 f_β 之间的欧式距离定义为

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^{64} (v_\alpha(i) - v_\beta(i))^2} \quad (1)$$

式中, $v(i)$ 是 SURF 特征描述子的第 i 个分量,欧式距离越小,表明特征 f_α 和 f_β 之间的相似程度越高。为了增强匹配点可靠性,在待匹配图像上选取与 f_α 相似度仅次于 f_β 的另外一个特征 f_x 。记 f_α 和 f_β 相似度为 N_N , f_x 同 f_α 的相似度记为 S_{NN} 。设阈值为 ε , f_α 和 f_β 是否匹配的判定标准是

$$\begin{cases} \varepsilon \geq \frac{N_N}{S_{NN}} & \text{Accept} \\ \varepsilon < \frac{N_N}{S_{NN}} & \text{Expel} \end{cases} \quad (2)$$

一般设定阈值 ε 在 $[0.5, 0.7]$ 区间比较理想。只有当特征点的最近距离与次近距离之比满足条件,才认为两个特征点匹配。通过 SURF 粗匹配后的匹配效果如图2所示。



图2 帧间序列配准

Fig.2 Inter frame sequence alignment

由于目标在运动,背景也在运动,所以此时不可避免地会发生一些误匹配,而这些误匹配主要发生在运动的前景区域。所以,本文的运动检测的核心问题之一就是找出这些发生误匹配的区域,即可确定出运动前景。

1.2 仿射变换与全局运动估计

仿射模型是描述全局背景运动的最佳模型之一,它能够准确地描述摄像机的平移、旋转和缩放等多种运动。采用六参数的仿射变换模型^[9],既能有效地描述背景和摄像机的运动状态,又能降低运算复杂度。

六参数的仿射模型为

$$\begin{bmatrix} f'_x \\ f'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 f_x^{t-1} + a_1 f_y^{t-1} + a_2 \\ a_3 f_x^{t-1} + a_4 f_y^{t-1} + a_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: f'_x 是第 t 帧图像序列中某点的 x 坐标, f'_y 是第 t 帧序列该点的 y 坐标; $\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix}$ 表示帧间旋转和缩放; $\begin{pmatrix} a_2 \\ a_5 \end{pmatrix}$ 表示帧间平移。

此时得到的特征点大部分分布在背景上,小部分在目标上。仿射变换时估计的背景运动,前景目标的匹配点易发生误匹配,影响估计的准确性,可以采用 RANSAC 的方法剔除目标上的异常匹配点,更好地估计仿射变换参数,逼近仿射变换模型。

RANSAC 方法是一种具有较强鲁棒性的模型参数

估计方法,通过反复选择数据中一组随机子集来验证模型。本文采取六参数的仿射变换模型,至少需要3对特征匹配。

1.3 构建运动历史图像和形态学处理

找到仿射变换模型后,得到上一帧图像配准后的仿射变换图,然后再与下一副图像做帧差。由于配准帧差步骤不可避免需要牺牲一部分边界图像,因此对配准帧差图像进行裁剪,左右各裁剪10%,上下各裁剪7.5%,本文主要考虑裁剪后区域内的运动目标检测。帧差后二值化图像,本文算法中,经验阈值就取得了很好的效果,这里取阈值为15。

帧差中帧间时间间隔选择比较困难,取决于目标大小和运动速度等情况。传统的帧差及其相关的方法只能检测出运动位置,运动历史图像(Motion History Image, MHI)^[9]则提供更多的运动属性,可以更有效地求得运动前景^[10]。在本文运动检测算法中,求得上一帧仿射变换图,再与当前帧做配准帧差,构建运动历史图。MHI中将发生运动的像素点设为当前时间戳,较久前运动的像素点被剔除,这样,超过设定持续时间的轮廓将被清空,进而更新前景区域。更新运动历史图像模型为

$$mhi(x, y) = \begin{cases} T_{\text{timestamp}} & \text{if } silhouette(x, y) \neq 0 \\ 0 & \text{if } silhouette(x, y) = 0 \text{ and} \\ & mhi < (T_{\text{timestamp}} - D_{\text{duration}}) \\ mhi(x, y) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $silhouette$ 是具有非0像素,发生了运动的轮廓掩码; mhi 是更新的运动历史图; $T_{\text{timestamp}}$ 是毫秒级时间戳; D_{duration} 是在 $T_{\text{timestamp}}$ 时间戳运动历史图所能表示的时间片段。

构建运动历史图以后,再做形态学处理,下采样膨胀去空洞再进行上采样、连通性分析、查找轮廓,之后绘制提纯后的各个前景区域的最小外接矩形,将前景区域依次显示和分割出来。图3所示为Vivid egTest01测试序列第444~第446帧图像的粗检测前景(图3a~图3c)和外接矩形表示结果(图3d~图3f)。

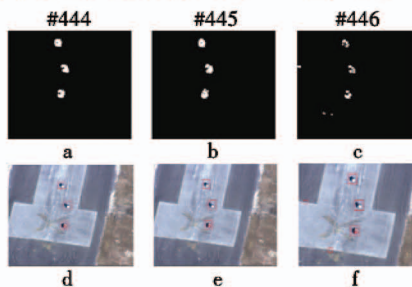


图3 粗检测结果

Fig. 3 Coarse detection results

由图3可以看到,根据本文的算法,所有的运动区

域基本可以检测出来,但第446帧出现了两次虚警。通过设定面积阈值,可以滤掉一部分小点,但是面积稍大的虚警依然存在,如第446帧检测结果(图3f)。下一节致力于解决此问题。

2 多帧碰撞检测去虚警

通过上文可以检测出所有的运动前景区域。但是,以上方法由于误匹配、估计误差、图像畸变等原因,许多背景部分也将其检测为运动前景,不可避免地产生一些虚警。

多帧关联算法作为一种经典关联算法,其思想是假设真实目标连续出现,而虚假检测目标断断续续出现,根据统计得到的当前前景目标连续出现的次数,即可区分出真实运动前景和虚警,进而检验待定的运动前景区域。

碰撞检测是计算机图像学,尤其是游戏开发中经常处理的情景,例如判断前方是否有障碍以及是否命中目标等,都属于碰撞检测。当物体形状比较复杂时,可采用组合碰撞检测的方法,复杂物体简化成基本形状,大致判断它们是否发生碰撞。

2.1 GJK 碰撞检测算法

GJK是一种经典的用于碰撞检测的迭代算法,GJK算法的最初目的是计算两个凸体之间的距离,在两个物体穿透深度比较小的情况下,可用其判定物体之间的碰撞^[11]。

GJK算法中使用了明可夫斯基和的概念:假设有两个物体A和B,它们的明可夫斯基和就是物体A上的所有点和物体B上的所有点的和集,如果两个物体都是凸体,它们的明可夫斯基和也是凸体。

明可夫斯基和公式为

$$A + B = \{a + b | a \in A, b \in B\} \quad (5)$$

根据明可夫斯基和可以推导出明可夫斯基差为

$$A - B = A + (-B) = \{a + (-b) | a \in A, b \in B\} = \{a - b | a \in A, b \in B\} \quad (6)$$

明可夫斯基差在两物体间的碰撞检测中起着十分重要的作用,存在如下结论:当且仅当A和B的明可夫斯基差包含原点时,A和B发生碰撞^[12]。

图4a中两个物体进行明可夫斯基差操作,将得到图4b的形状。可以根据明可夫斯基差后形成的凸包是否包含原点来判断两个物体是否碰撞,图4b中图形不包含原点,所以图4a两个物体未发生碰撞。

物体包含无穷多个点,如果计算所有的点做差,运算量太大也过于复杂。由于是凸体,可以只对它们的顶点执行明可夫斯基差操作。在本文中利用已经找到的运动前景的最小外接矩形,验证两个矩形是否发生

碰撞,只需对这些矩形的 4 个顶点执行明可夫斯基差,然后求解差后形成的所有点集的凸包,判断凸包是否包含原点,即可判断前景外接矩形是否发生碰撞。

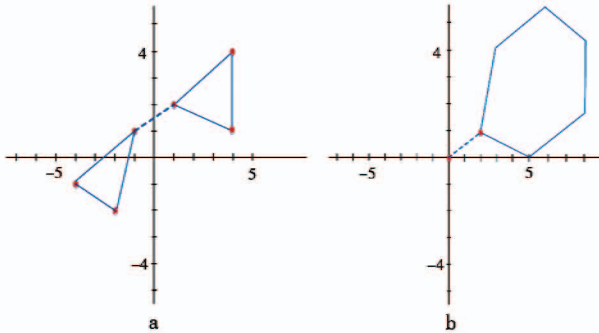


图 4 GJK 碰撞检测

Fig.4 GJK collision detection

2.2 多帧碰撞检测算法实现

基本思想:多帧碰撞检测算法是多帧关联算法和 GJK 碰撞检测算法的巧妙组合,假设将连续多帧中的同一运动目标的前景放在同一帧中做连续碰撞检测。算法执行时,依次验证当前帧中的每一个运动前景区域,将该运动前景与前面几帧中的每个运动区域依次做碰撞检测。如果连续几帧都能检测到碰撞,则说明该运动前景连续出现,再根据多帧关联思想,连续出现的前景是真实目标,反之则为虚警。

多帧碰撞检测如图 5 所示。



图 5 多帧碰撞检测

Fig.5 Multi-frame collision detection

由以上思想可知,只需要考虑当前帧之前的连续几帧,早些时候图像帧的信息无参考价值,继续存储将浪费很多存储空间。通常视频序列帧数非常多,如果不将这些早前帧中无用信息剔除,系统中保存的无用信息就会越来越多,长此以往会造成内存溢出,系统崩溃,无法达到长时间的检测效果。

优化数据结构:本文采用以下策略来优化存储运动区域数据的数据结构,构造定长的双端队列,当前帧运动信息队尾入队,另一端队首帧运动信息时间过去太久失效,出队。这样,只需维护一个固定长度的双端队列即可完成多帧关联碰撞检测算法,节省了存储空间。双端队列数据结构如图 6 所示。



图 6 双端队列数据结构

Fig.6 Data structure of double ended queue

具体实现:多帧碰撞检测算法借助于 C++ 标准模板库 STL 中双端队列容器 deque 实现。构造定长的二维双端队列 deque 容器 frameDq,frameDq 中存放的是一系列动态数组 vector < CVPoint > mvRegion, vector 中存放的是一帧图像中所有的运动前景的最小外接矩形。选择双端队列 deque 容器的另一个原因是它支持随机访问,方便计算,提高了系统开发效率,而单向队列 queue 不支持随机访问,本文算法实现起来计算略复杂。

算法 2 多帧碰撞检测算法伪代码。

输入:当前帧待验证的多个运动前景区域。

输出:真实运动前景目标。

```
deque < vector < CVPoint >> frameDq;
```

```
vector < CVPoint > mvRegion;
```

If frameNum < DQ_LEN frameNum 为当前帧序列号,DQ_LEN 为 frameDq 长度,

For $i = 1, 2, \dots, num$, num 为当前帧粗检测运动区域数量

第 i 个运动区域存入 mvRegion

END

frameDq 队尾入队 mvRegion 数据

Else

int collisionCount = 0; collisionCount 记录连续多帧检测到的碰撞次数

bool isCollision = false; isCollision 记录当前帧是否检测到碰撞

For $j = 1, 2, \dots, num$, 检验第 j 个区域是否真实, num 为当前帧运动区域数量,

For $m = 1, 2, \dots, DQ_LEN$ 与前面 DQ_LEN 帧做碰撞检测

kthSize = frameDq[$m - 1$].size(); kthSize 是 frameDq 第 m 个元素的容量大小

For $n = 1, 2, \dots, kthSize$; 与前面第 DQ_LEN - m 帧所有 kthSize 个矩形碰撞

当前帧第 j 个区域与前面第 DQ_LEN - m 帧第 n 个矩形做 GJK 碰撞

If GJK 检测到碰撞

isCollision = true;

break;

END

If isCollision == true

collisionCount ++;

END

If collisionCount == DQ_LEN 连续多帧检测到碰撞

当前运动区域为真实运动目标,绘制前景
 Else
 当前运动区域为虚警,忽略
 第 j 个运动区域存入 moveRegion
 END
 frameDq 队尾入队 moveRegion 数据
 frameDq 队首元素出队。

通过以上方法可以完成无论是动态背景还是静态背景下的运动目标检测,准确检测出视场区域内的所有运动目标,剔除了虚警,同时保持了很高的检测精度。

多帧碰撞检测算法检验前景区域前后对比如图7所示。

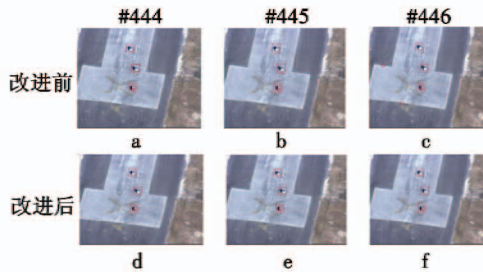


图7 多帧碰撞前后对比

Fig. 7 Comparison before and after multi-frame collision

3 实验结果

本文实验的操作系统是 Windows 7,处理器是 Intel (R) Core(TM) 2 Duo CPU T6500,实验平台是 VS2012 和 Opencv2.4.4。为了更好地理解跟踪算法性能评价,有必要收集一个具有代表性的测试视频库。Vivid egTest 航拍测试序列^[13]包括了单目标和多目标,可见光图像和红外图像,静态背景和动态背景等多种复杂情况。此外,测试序列中旋转、光照、尺度、目标遮挡和交互重叠等问题也给检测精度带来了巨大挑战,所以采用此序列验证本文的算法。

3.1 检测评价指标

本文算法采用了目标检测算法常用的精度 $P_{\text{Precision}}$ 和查全率 R_{Recall} 作为评价指标^[14],算式分别为

$$\begin{cases} P_{\text{Precision}} = \frac{N_{\text{detect}}^{\text{right}}}{N_{\text{detect}}} \\ R_{\text{Recall}} = \frac{N_{\text{detect}}^{\text{right}}}{N_{\text{all}}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $N_{\text{detect}}^{\text{right}}$ 是检测出来的真实运动目标; N_{detect} 是总的运动目标; N_{all} 是所有帧实际运动目标总数。

此外,引入了虚警率 A_{Alarm} 指标评价多帧碰撞检测算法降低虚警率的有效性,即 $A_{\text{Alarm}} = \frac{N_{\text{detect}} - N_{\text{detect}}^{\text{right}}}{N_{\text{frame}}}$, N_{frame} 为序列总帧数。

3.2 实验结果及分析

Vivid egTest01 测试序列是可见光图像,随着图像序列的变化,图像背景和多个车辆前景都在不断移动,车辆的运动姿态也在发生调整。由于配准帧差步骤不可避免需要牺牲一部分边界图像,图像边界的目标将不予以考虑。

egTest02 测试集,由于该场景中相机移动,随着序列的推进目标的尺度越来越小。Vivid pkTest02 测试集合,内含一个车队的热红外数据。车辆彼此追逐交错之外,测试序列中还有诸多树木遮挡和阴影以及相机的自动曝光等,本文算法对于以上序列都可以准确检测,检测结果如图8所示。

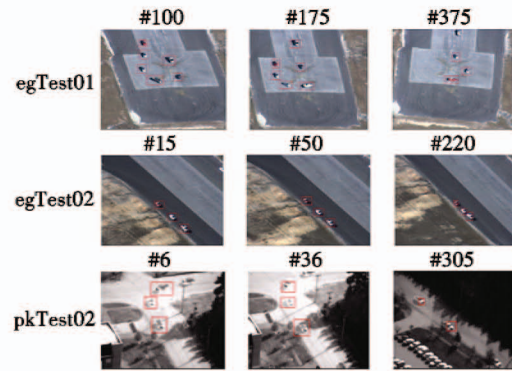


图8 运动检测结果

Fig. 8 Motion detection results

为了得到检测算法的准确性,统计了多次实验多组测试序列结果,如表1所示。

表1 多组检测统计数据

Table 1 Statistic detection results

序列	帧数	精度/%	查全率/%	虚警率/%
egTest01	700	99.79	97.28	0.71
egTest02	300	99.67	93.89	0.33
pkTest02	500	99.69	95.56	0.80
平均	500	99.72	96.58	0.61

由表1可知,本文提出的运动检测框架以及多帧碰撞检测可以准确有效地检测到所有运动目标,并且可以保持极高的精度和查全率。此外,虚警率极低也是本文算法的一大优势,3个测试序列平均虚警率仅为0.61%,这正是得益于本文提出的多帧碰撞检测算法的有效性。有时由于运动缓慢、光照变化等原因不可避免地会漏检个别目标,所以查全率会受影响,略低于检测精度,同时,还有前景目标在连续帧间有重叠部分的限制,这一点也是需要说明的。本文的统计实验数据也很好说明了这一点。

4 结束语

针对运动目标检测问题,本文提出了基于序列配

(下转第27页)

- [2] 王志鹏,张军,刘强. LAAS 地面站伪距纠正量误差完好性监测算法研究[J]. 电子与信息学报,2009,31(1):196-200.
- [3] 李亮,赵琳,丁继成,等. 提高 LAAS 空间信号可用性的完好性监测新膨胀算法[J]. 航空学报,2011,32(4):664-671.
- [4] XUE R, WANG Z L. A novel LAAS pseudo-range error over-bound method based on improved pseudo-range error distribution model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(3):638-645.
- [5] 牛飞,马刘海,刘芹丽,等. 电离层异常状态下的自适应平滑滤波算法及性能分析[J]. 测绘科学技术学报,2015,32(4):331-335.
- [6] ZHAO L, LI L, SUN M, et al. Novel adaptive Hatch filter to mitigate the effects of ionosphere and multipath on LAAS[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(6):1046-1053.
- [7] 徐轲,赵修斌,庞春雷,等. 卫星着陆系统差分基准站 B 值分析与处理算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):50-53.
- [8] WU X L, ZHOU J H, WANG G, et al. Multipath error detection and correction for GEO/IGSO satellites[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(7):1297-1306.
- [9] 常志巧,胡小工,郭睿,等. CNMC 与 Hatch 滤波方法比较及其在北斗相对定位中的精度分析[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2015,45(7):079508-1-079508-9.
- [10] 徐君毅,李金龙,何海波,等. 基于观测值加权相位平滑伪距的北斗伪距差分定位[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(4):123-126.
- [11] 赵琳,武晓雯,李亮,等. 基于 Hatch 滤波法的 GPS 伪距差分定位分析[J]. 遥测遥控,2011,32(6):58-62.
- [12] 孙正明,高井祥,王坚. GPS 双频相位平滑伪距权重因子的探讨[J]. 海洋测绘,2007,27(4):13-16.
- [13] 陈金平. GPS 完善性增强研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2001.

(上接第 12 页)

准和运动历史图像的检测框架来完成运动目标检测。针对运动检测容易出现虚警的情况,提出了多帧碰撞检测算法来检验所有待定的运动前景,降低虚警。通过多组测试序列的验证和数据统计分析,本文提出的运动检测算法保持了较高的查全率以及极高的检测精度和极低的虚警率,取得了很好的实验效果,在军事目标的监控和跟踪以及安防领域具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] GOSHTASBY A A, NIKOLOV S. Image fusion: advances in the state of the art[J]. Information Fusion, 2007, 8(2):114-118.
- [2] 潘翔鹤. 基于 DM642 的智能视频监控系统的研究与开发[D]. 上海:东华大学,2009.
- [3] NERI A, COLONNESE S, RUSSO G, et al. Automatic moving object and background separation[J]. Signal Processing, 1998, 66(2):219-232.
- [4] RIDDER C, MUNKELT O, KIRCHNER H. Adaptive background estimation and foreground detection using Kalman-filtering[C]//Proceedings of International Conference on Recent Advances in Mechatronics, 1995:193-199.
- [5] FRIEDMAN N, RUSSELL S. Image segmentation in video sequences: a probabilistic approach[C]//Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, 1997:175-181.
- [6] 聂炬,陈怀民. 一种鲁棒的背景配准方法[J]. 计算机工程与应用,2010(6):194-196.
- [7] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [8] BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOL L. SURF: speeded up robust features[C]//The 9th European Conference on Computer Vision, 2006:404-417.
- [9] BRADSKI G R, DAVIS J W. Motion segmentation and pose recognition with motion history gradients[J]. Machine Vision and Applications, 2002, 13(3):174-184.
- [10] 王亮芬,周东翔,梁华,等. 动摄像机下基于 SIFT 特征匹配和 MHI 的目标检测[J]. 计算机工程与科学,2010(1):67-70.
- [11] GJK-distance & closest points[Z]. In Game Development, 2010.
- [12] ERICSON C. Real-time collision detection[M]. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [13] COLLINS R, ZHOU X H, TEH S K. An open source tracking testbed and evaluation web site[C]//IEEE International Workshop on Performance Evaluation of Tracking and Surveillance, 2005:11-18.
- [14] GOYETTE N, JODOIN P M, PORIKLI F, et al. Change-detection. net: a new change detection benchmark dataset[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2012. doi: 10.1109/CVPRW.2012.6238919.