

doi: 10.7690/bgzd.2025.03.014

一种基于图像变化检测的目标毁伤评估方法

徐永会¹, 袁诗桐²

(1. 陆军炮兵防空兵学院机械工程系, 合肥 230031; 2. 陆军炮兵防空兵学院学员二大队, 合肥 230031)

摘要: 针对目标毁伤评估是指挥员实施科学决策、正确指挥的重要依据, 提出一种基于高斯混合模型和 EM 算法的图像变化检测算法。通过检测目标打击前后的图像变化率, 评估判断目标毁伤情况; 同时考虑图像的灰度和纹理特性, 构建差分融合图像, 针对差分融合图像的变化像元和非变化像元, 构建高斯混合模型, 采用 EM 算法计算模型参数; 用最小错误率的贝叶斯决策, 对差分融合图像进行变化检测。实验结果表明: 该方法合理可靠, 目标毁伤评估实用性强。

关键词: 毁伤评估; 变化检测; 高斯混合模型; EM 算法

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

A Target Damage Assessment Method Based on Image Change Detection

Xu Yonghui¹, Yuan Shitong²(1. Department of Mechanical Engineering, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031, China;
2. No. 2 Student Brigade, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031, China)

Abstract: Target damage assessment is an important basis for commanders to make scientific decisions and command correctly. An image change detection algorithm based on Gaussian mixture model and EM algorithm is proposed. The damage of the target is evaluated by detecting the image change rate before and after the attack of the target, and the difference fusion image is constructed by considering the gray and texture characteristics of the image at the same time, and the Gaussian mixture model is constructed for the changed pixels and the non-changed pixels of the difference fusion image, and the model parameters are calculated by the EM algorithm; Bayesian decision with minimum error rate is used to detect the change of the difference fusion image. The experimental results show that the method is reasonable and reliable, and the target damage assessment is practical.

Keywords: damage assessment; change detection; Gauss hybrid model; EM algorithm

0 引言

目标毁伤评估是现代化战争的重要环节, 快速、精准的毁伤评估是指挥员实施科学决策、正确指挥的重要依据, 特别是随着精确制导打击技术的广泛应用, 目标毁伤评估已成为决策是否再打击的关键环节, 为规划作战资源的高效利用提供支撑。笔者基于高斯混合模型和 EM 算法的图像变化检测算法, 同时考虑图像的灰度和纹理特性, 构建差分融合图像; 针对差分融合图像的变化像元和非变化像元, 构建高斯混合模型, 采用 EM 算法计算模型参数; 用最小错误率的贝叶斯决策对差分融合图像进行变化检测。

1 图像变化检测应用现状简析

图像变化检测是指对目标同一区域不同时相的 2 幅或多幅图像, 采用一系列方法, 确定图像中感兴趣区域的变化部分, 并进行分析处理的过程。随

着信息技术的发展, 图像变化检测越来越受到人们的关注, 已被广泛应用于军事和民用领域^[1]。其中, 在军事领域的重要应用之一就是基于图像变化检测进行目标毁伤评估, 其核心在于研究目标打击前后的图像变化检测。

1.1 基于图像变化检测进行目标毁伤评估的优点

采用检测图像变化进行毁伤评估具有显著优点, 主要体现在 3 方面: 1) 获取目标影像资料的手段多样, 图像资源丰富, 获取目标影像资料的常用手段有利用卫星、侦察机、无人机等平台搭载的红外、可见光、微光、激光等观测器材拍摄记录目标影像资料; 2) 利用计算机处理图像速度快、效率高; 3) 图像处理的方法多、前景大^[1]。

1.2 图像变化检测的典型方法简介

一个完整的图像变化检测过程一般包括图像预处理、变化信息获取、检测结果分析 3 部分。图像

收稿日期: 2024-07-07; 修回日期: 2024-08-14

第一作者: 徐永会(1988—), 男, 山东人, 硕士。

预处理主要是对多时相图像进行图像配准和辐射校正，减少辐射变化和图像错位对图像变化检测结果的影响。检测结果分析是根据变化检测的结果，对地物或目标进行定性或定量分析。变化信息获取是图像变化检测过程的关键和核心，是图像变化检测研究的主要内容，分为构建差异图和确定变化阈值 2 个关键步骤^[2]。典型的检测方法有：

1) 基于图像算术运算的变化检测方法：该方法在对 2 幅或多幅不同时期图像进行几何配准或辐射校正的基础上，对相应像素的灰度、纹理等内容进行差值或比值计算，得到差值图像，确定差值图像的变化阈值，对各像素进行变化元与非变化元分类。

2) 基于图像分类的变化检测方法：该方法先对 2 幅或多幅图像进行单独分类和标记，再对分类结果进行比较，提取发生变化的区域。

3) 基于统计模型的变化检测方法：在构建 2 幅或多幅不同时期图像的差异图基础上，对差异图的变化像元和非变化像元建立统计模型，通过统计模型判断差异图中像元是否发生变化，以提取图像变化信息。

4) 基于融合思想的变化检测方法：该方法将不同方法计算得到的差异图或同一差异图的不同变化阈值分割方法进行融合，实现多种变化检测方法的优势集成，提高图像变化检测精度和效率。

5) 基于特征描述的变化检测方法：首先对 2 幅或多幅不同时期的图像进行边缘、角点等图像特征或目标的结构、纹理等特征的提取，构建图像特征或目标特征的差异图，实现对图像或目标变化信息的提取。

2 一种基于图像变化检测的目标毁伤评估方法的提出

笔者将方法 1)、3)、4)相结合，同时考虑图像的灰度和纹理特征，构建差分融合图像，在此基础上针对差分融合图像的变化元和非变化元建立高斯混合模型^[3]，用 EM 算法解得模型参数，最后用最小错误率的贝叶斯决策检测图像的变化元与非变化元^[4]。

2.1 产生纹理差分图像

梯度向量可作为描述图像局部灰度变化的纹理特征。对于像元 i ，其 2 个时相的梯度向量的互相关定义为：

$$C_{12}(i) = f'_1(i) \cdot f'_2(i) = \|f'_1(i)\| \cdot \|f'_2(i)\| \cdot \cos \theta。 \quad (1)$$

定义不同时相图像的梯度纹理差值度量：

$$R_i(i) = 1 - \sum_{\mu \in M_i} 2C_{12}(\mu) / \sum_{\mu \in M_i} (C_{11}(\mu) + C_{22}(\mu))。 \quad (2)$$

式中 M_i 为表征点 i 处的领域。该纹理差值对于不同时相图像的光照条件的变化，具有一定的稳健性；但对图像平坦区不合适 ($R_i(i)$ 接近 1)，需要引入新的约束。为度量 2 个图像中区域分布的平衡性，定义像元 i 平坦性的函数：

$$s(i) = \frac{\sum_{x_i^1 \in M_i} |x_i^1 - x_{\text{mean}}^1|}{\sum_{x_i^1 \in M_i} x_i^1} + \frac{\sum_{x_i^2 \in M_i} |x_i^2 - x_{\text{mean}}^2|}{\sum_{x_i^2 \in M_i} x_i^2}。 \quad (3)$$

式中： x_i^1 和 x_i^2 分别为 2 幅图像中点 i 处的灰度值； M_i 为点 i 的邻域。 $s(i)$ 越小表明区域越平坦；设置合适的门限值 Th ，就可以排除平衡区域对梯度差值的影响。由此，可以获得差分图像的产生公式：

$$x_i = \{x_i^j : i \in \text{image}\}。 \quad (4)$$

式中：

$$\begin{cases} x_i^j = 0 & \text{if } s(i) \leq \text{Th} \\ x_i^j = 255 \times R_i(i) & \text{if } s(i) > \text{Th} \end{cases}。$$

2.2 初始的融合二值化分类

在纹理差分图像与灰度差分图像互不影响的前提下，融合后的图像条件分布表示为：

$$p(x_i, x_d/C_l) = p(x_i/C_l) \times p(x_d/C_l)。 \quad (5)$$

若分别得到纹理差分图像和灰度差分图像的先验概率分布函数 $p(x_i/C_l)$ 和 $p(x_d/C_l)$ ，通过式(4)利用最大似然分类可实现融合图像的初始分类^[5]。

因灰度差分图像和纹理差分图像二者的求解方法和原理相同，以灰度差分图像获取其统计参数为例进行说明。

因灰度差分图像仅由变化和非变化 2 类像元表示，故可用有限的混合密度模型来表示^[6]。图像中某个像元 x_d^i 的类条件密度函数为：

$$p(x_d^i | \Theta) = \sum_{k=1}^K \tau_k p_k(x_d^i | \theta_k)。 \quad (6)$$

式中： $\Theta = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ 为混合模型的参数矢量； τ_k 为混合系数，表示各成分的先验概率，

满足 $\sum_{k=1}^K \tau_k = 1$ ， $\tau_k \geq 0$ 。在混合高斯模型条件下，式

中的参数 $\theta_k = (\mu_k, \sigma_k^2)$ 分别为第 k 个混合成分的均值矢量和协方差矩阵。对于已知分布形式的参数，要判定其是非随机的未知常量，可通过解算密度函数

最大化的极大似然估计来实现:

$$\left. \begin{aligned} p(x_d|\Theta) &= \prod_{i=1}^N p(x_d^i|\Theta) = L(\Theta|x_d) \\ \Theta^* &= \arg \max L(\Theta|x_d) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 N 为图像中所有像素点数目。直接解算式(7)最大化时, 会出现这种模糊性—得到多根的超越方程, 这是因为缺乏先验知识, 既不清楚数据 x_d^i 由哪个混合组分产生, 又不清楚 x_d^i 影响哪个混合组分。为解决这一问题, 采用 EM 算法, 即在给定的观测数据不完全的情况下, 从观测值中求取数据统计分布参数的极大似然估计^[7]。

对于观测值 x_d 称为“不完全数据”, 式(7)为“不完全数据的似然函数”; 定义 y 为“丢失数据”, $z=\{x_d, y\}$ 为“完全数据”, 其联合密度函数(完全数据的似然函数)为:

$$L(\Theta|z) = L(\Theta|x_d, y) = p(x_d, y|\Theta) \quad (8)$$

对于该式, 如果将此完全数据的似然函数看做 x_d 和 Θ 固定, 因自变量 y 为随机变量, 则其似然函数也是随机变量。直接对随机变量做最大化计算较难, 可通过优化其基本期望实现, 这就是 EM 算法的基本思路^[8-9]。

EM 迭代基本步骤如下:

E-step:

$$Q(\Theta|\Theta^{(t-1)}) = E[\log p(x_d|\Theta)|x_d, \Theta^{(t-1)}]; \quad (9)$$

M-step:

$$\Theta^{(t)} = \arg \max Q(\Theta|\Theta^{(t-1)}) \quad (10)$$

式中 t 为迭代次数。

在混合高斯模型中, 引入表征指派观测数据与混合成分对应关系的变量作为丢失数据, 并推算其概率密度公式^[10], 于此推导出利用 EM 算法解算混合高斯模型的迭代公式:

$$\left. \begin{aligned} n_k^t &= \sum_{i=1}^N p(k|x_d^i, \Theta^t) \\ \tau_k^{t+1} &= \frac{1}{N} n_k^t \\ \mu_k^{t+1} &= \frac{1}{n_k^t} \sum_{i=1}^N x_d^i p(k|x_d^i, \Theta^t) \\ (\sigma_k^2)^{t+1} &= \frac{1}{n_k^t} \sum_{i=1}^N x_d^i p(k|x_d^i, \Theta^t) (x_d^i - \mu_k^{t+1})(x_d^i - \mu_k^{t+1})^T \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中:

$$p(k|x_d^i, \Theta^t) = \tau_k^t p_k(x_d^i|\theta_k^t) / \sum_{j=1}^K \tau_j^t p_j(x_d^i|\theta_j^t), \text{ 表示样}$$

本 x_d^i 第 k 类的后验概率, t 为迭代次数, $k=1, 2$ 。

通过循环迭代的方式, 解算得到灰度差分图像的统计参数, 同理亦然解算纹理差分图像的统计参数; 而后, 根据最大似然方法运用式(7)对融合后图像的初始分类, 据此得到融合后图像的统计参数。

2.3 最终的融合二值化分类

假设融合后图像中变化像元与非变化像元符合混合高斯分布, 所有像素的各类特征条件独立, 由一个 Markov 随机场实现真实类别的标号, 而且各类别概率密度函数等价^[11]。则可采用 ICM 简化方法, 求解满足式(12)中的分类标记 C_l :

$$\begin{aligned} C_k &= \arg \max_{C_l \in C} \{p(C_l|x_d, x_t)\} = \\ &\arg \max_{C_l \in C} \{p(C_l)p(x_d|C_l)p(x_t|C_l)\} \end{aligned} \quad (12)$$

自适应参数统计的融合差分图像的分类算法描述如下:

- 1) 根据初始化分类得到融合后图像的统计参数估计值 $\theta = (\mu_1, \mu_1, \sigma_1^2, \sigma_2^2)$ 。
- 2) 根据权值 $w_{ij}^{(p)}$, 利用改进的 EM 算法, 计算融合差分图像中的统计参数 $\theta = (\mu_1, \mu_1, \sigma_1^2, \sigma_2^2)$ 。
- 3) 根据估计参数, 对差分图像进行最大似然估计分类。
- 4) 运用 ICM 算法, 对差分图像进行 MAP 分类。
- 5) 利用分类结果计算权值 $w_{ij}^{(p+1)}$ 。
- 6) 判断权值收敛性。若收敛, 结束参数估计; 否则返回 2) 再次迭代。

3 实验结果与分析

3.1 目标毁伤等级划分

目标毁伤等级是根据对目标的毁伤程度对毁伤效果划分的级别。以《XXX 教程》规定的毁伤效果判定标准为例, 目标毁伤等级划分为“轻度毁伤、中度毁伤、重度毁伤、歼灭或摧毁”4 个等级。其中, 轻度毁伤为 $a\% \sim b\%$; 中度毁伤为 $b\% \sim c\%$; 重度毁伤为 $c\% \sim d\%$; 歼灭或摧毁大于 $d\%$ 。

3.2 试验结果

以伊拉克巴格达南部一处军事基地为例进行目标的图像变化检测实验。图 1-2 是伊拉克巴格达南部一处军事基地(北纬 $33^\circ 22' 10.28''$, 东经 $44^\circ 19' 01.19''$)

被美军打击前后不同时相的卫星照片，截取含有一栋军事建筑的局部图像，对该建筑物进行图像变化检测^[12]。

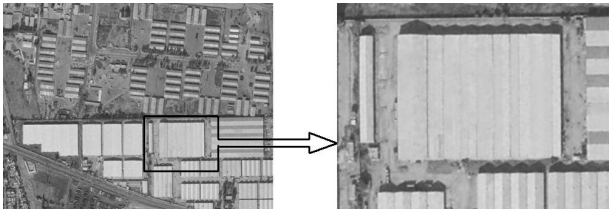


图 1 巴格达军事基地遭打击前的卫星图片

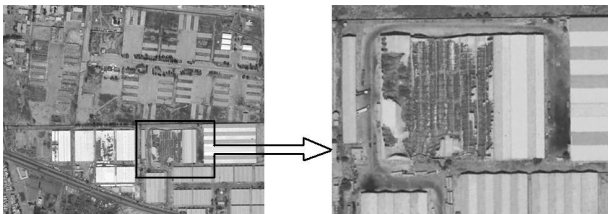


图 2 巴格达军事基地遭打击后的卫星图片

首先利用改进的 Canny 算子对包含目标的图像进行边缘检测，检测结果参如图 3 所示。根据边缘检测结果对目标轮廓进行提取，并在原图上定位目标，如图 4 所示。

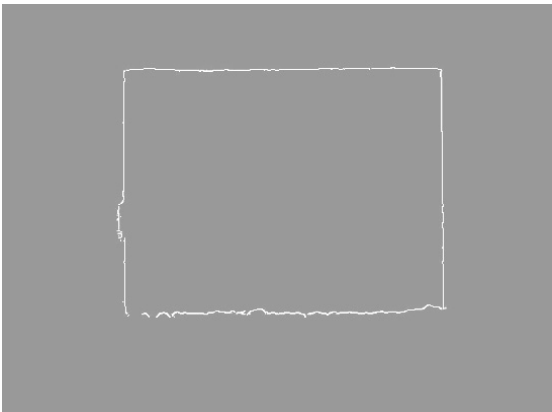


图 3 目标轮廓提取结果

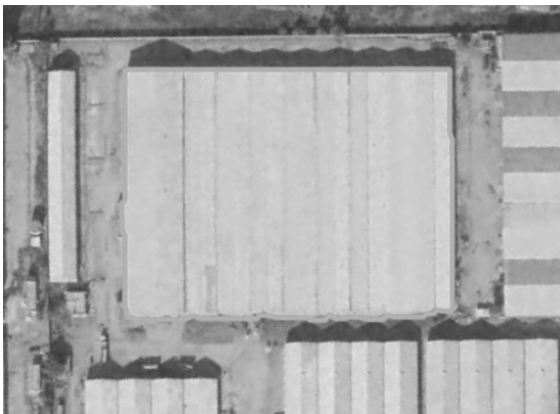


图 4 目标定位结果

按照相同方法在配准后打击后的图像上定位目标。得到的图像变化如图 5 所示。

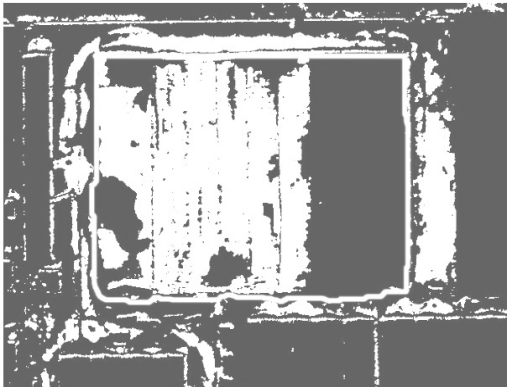


图 5 图像最终变化二值图

最终求得目标面积变化 $\Delta S=58\ 949$ ，目标面积 $S_1=112\ 352$ ，则目标面积变化率为 52.46%，对照《XXX 教程》规定的毁伤效果判定标准，该目标遭打击后达到重度毁伤。

3.3 实验分析

利用笔者所提算法，根据图像的灰度和纹理信息，构建差分融合图像，建立高斯混合模型，计算图像变化检测，用于目标毁伤评估具有明显的 2 个优点：1) 不受评估人员的主观判断影响，通过定量计算，直接得出图像变化的具体数值，评估结果更加精准；2) 该方法可利用计算机技术实现自动提取目标图像特征，并进行图像变化检测计算，提高目标毁伤评估的效率。

4 结束语

笔者提出的图像变化检测方法利用图像的灰度和纹理信息，构建差分融合图像，建立高斯混合模型，进行变化检测计算。类似的方法还有许多需要研究，主要包括差分图像构建、高斯混合模型构建及参数计算、二元决策分类 3 方面，这也是图像变化检测研究的重要内容，为进一步研究基于图像变化检测的目标毁伤评估指明了方向。

参考文献：

[1] 李峰, 石全, 孙正. 目标毁伤效果评估技术研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2018(9): 67-72.

[2] 古振泉. 基于概率统计的遥感图像变化检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.

[3] 王立玲, 刘超杰, 马东, 等. 改进自适应混合高斯模型和帧间差分的运动目标检测[J]. 机床与液压, 2022, 50(21): 26-32.

[4] 吴婷. 基于 EM 算法的高斯混合模型在鸢尾花数据集的应用[J]. 网络安全技术用, 2022(4): 47-49.