

靶场光测图像实时判读系统设计与方法*

郭鹏宇^{1,2}, 丁少闻^{1,2}, 田尊华^{1,2}, 张红良^{1,2}, 张小虎^{1,2}

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:研究了靶场光学测量图像实时判读的若干关键技术,并据此设计实现了一套实时判读解算系统。目标自动捕获、跟踪和判读特征高精度定位是实时判读的难点问题,分别采用了形状相似度分析、在线区域跟踪学习、迭代轮廓匹配定位多判读点等技术;在此基础上,根据实时处理的时效性要求高、可并行程度强以及流程时序严格等特点,采纳分布式架构融合业务流程管理的软件体系结构设计模式,实现了数据与流程的集中管理、多站图像并行判读、数据驱动的解算方法自动选择与友好的用户界面。以航空靶场空中发射试验任务为例,通过实验验证了系统的可行性和时效性。该系统可扩展应用于各类靶场试验,满足用户实时获取并分析武器试验数据的需求。

关键词:靶场光学测量;图像实时判读;实时判读解算系统;航空靶场

中图分类号:TP391.41 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2014)02-0168-07

System design and method research for optical measurement images real-time interpretation in test ranges

GUO Pengyu^{1,2}, DING Shaowen^{1,2}, TIAN Zunhua^{1,2}, ZHANG Hongliang^{1,2}, ZHANG Xiaohu^{1,2}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Image Measurement and Vision Navigation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Some key issues of real-time interpretation for optical measurement images in test ranges to design were researched and a real-time interpretation and estimation system was realized. Automatic Target capture, tracking and high precision location for interpretation features are the questions under probe. Shape similarity analysis, online region tracking and learning, and iterative contour registration were respectively used to locate multiple interpretation points. Based on the characteristics of real-time processing, such as high efficiency requirement, strong parallelism capability, and rigorous sequence in time, the software architecture design pattern of distributed framework with business process management was adopted to achieve the centralized administration of data and process, multiple sites parallel interpretation, data-driven auto estimation method selection and friendly user interface. Take the aerial launching tests of the air ranges as an example, the feasibility and efficiency of the system was examined by the experiment. The system can be extended to various test ranges to meet the users' need of weapon test data's real-time gain and analysis.

Key words: test ranges optical measurement; real-time image interpretation; real-time interpretation and estimation system; air ranges

近年来靶场光学测量已基本实现图像采集的数字化和图像传输的实时化,但对实时光测图像の利用还停留在景象观察和事后判读的水平。为充分发挥光测图像客观、目标信息丰富的特点,提高光学测量在靶场测控的地位,亟须实现判读的实时化,满足实时处理的需求。而与事后处理相比,实时处理具有以下优点:(1)指控人员可根据实测结果实时调整试验方案,使试验任务更加灵活;(2)实时获取的数据为安控系统提供预警信

息,便于突发情况的及时处理;(3)大幅提高工作效率,使试验与分析同步进行,无须事后集中处理数据。

因此,图像实时判读将会成为靶场光学测量数据处理发展的必然方向。国内的新型光电经纬仪已具备实时输出脱靶量的能力^[1],瑞典 Image Systems 公司的 TrackEye 系列软件通过自动跟踪特征点或标志点完成实时判读^[2],但目前靶场光学测量数据处理仍以事后判读为主,主要原因是

* 收稿日期:2013-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11272347)

作者简介:郭鹏宇(1985—),男,辽宁丹东人,博士研究生,E-mail:pengyu.guo@nudt.edu.cn;

张小虎(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:zxh1302@hotmail.com

目标变化,即目标的位姿、形状、尺度与运动模糊等内在变化,以及环境变化,如光照与遮挡等外在变化,导致的自动跟踪误差大,实时数据处理精度低^[1]。因此亟须研究的是应对靶场目标内外在变化的自动捕获、跟踪与特征定位技术。目标捕获完成运动平台的进场检测以及分离试验中的有效载荷检测,根据像机是否运动,可分为两类方法^[3]: (1)静止像机目标捕获,主要包括帧差法,光流法,

背景建模法;(2)运动像机目标捕获,主要包括先帧间配准再按静止像机解决的方法,和基于模型的单帧识别方法;目标跟踪主要集中在基于在线学习的长时序列跟踪方法的研究^[4];判读特征可以选取点、线或面等特征。常用的点特征,根据其性质不同,针对几何合作标志^[5],局部不变性特征合作标志^[6],编码合作标志^[7]以及已知二维或三维模型的判读点^[8]有不同的定位方法。

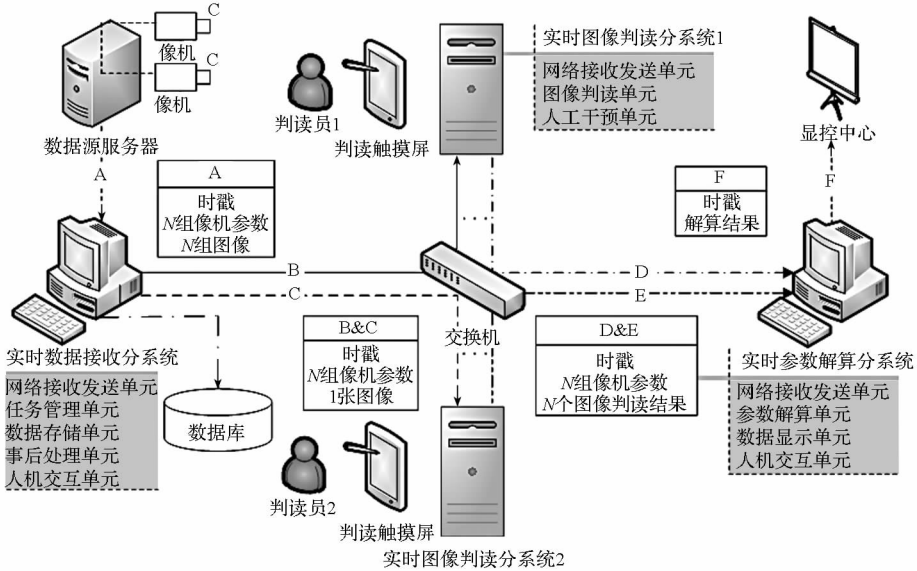


图1 分布式图像实时判读解算系统体系结构

Fig. 1 Architecture of distributed image real-time interpretation and estimation system

1 体系结构

靶场光测图像实时处理,具有时效性要求高,可并行程度强以及业务流程时序严格等特点,为了提高实时性和可扩展性,遵循负载均衡的设计理念,系统采用分布式架构模式,按照先判读后解算的处理时序,将图像实时判读解算系统松耦合分解为数据实时接收,图像实时判读,参数实时解算三个分系统,其组成结构如图1所示。考虑不同观测方式组合的多样化,以及多站点同时判读计算资源需求大,图像判读采用并行处理方式,每路判读分系统负责一个站点的判读任务,分系统的数量由观测平台的个数决定。全系统通过TCP/IP网络协议通信,外部输入数据源为系统提供任务所需的数据(图1链路A),由时戳和编号区分不同时刻和不同像机的判读任务数据源,解算结果外部输出到显控中心(图1链路F),供数据的解析和显示。

系统提供在线实时判读和离线事后判读两种工作模式。数据实时接收分系统,负责整套系统的业务流程管理,和从外部数据源接收判读任务

数据并将其通过像机编号拆分发送到图像判读分系统(图1链路B和C),同时将数据以任务管理的形式存储到数据库中,便于事后复现与判读;图像实时判读分系统,接收数据接收分系统转发的数据包,提取其中的图像信息完成单站点判读,并整合数据包的其他信息和图像判读结果发送给解算分系统(图1链路D和E),同时支持结果异常时的判读员人工干预;参数实时解算分系统,通过时戳对准技术判断观测信息来源于单站点还是多站点,自动选择单目测量和交会测量^[5]的解算方式,并将解算结果发送到显控中心。

2 图像实时判读方法

由于事后处理和实时处理的参数解算方法相同,且图像判读的精度和效率是影响全系统精确性和实时性的重要因素之一,而靶场试验的目标种类日趋多样化,根据不同类型目标的成像特性,应采用有针对性的判读方法以提高性能^[9]。因此,本节以航空靶场空中发射试验的光学测量为例,探讨光测图像实时判读方法,主要研究自动实时的飞行目标捕获、跟踪和高精度特征定位技术,

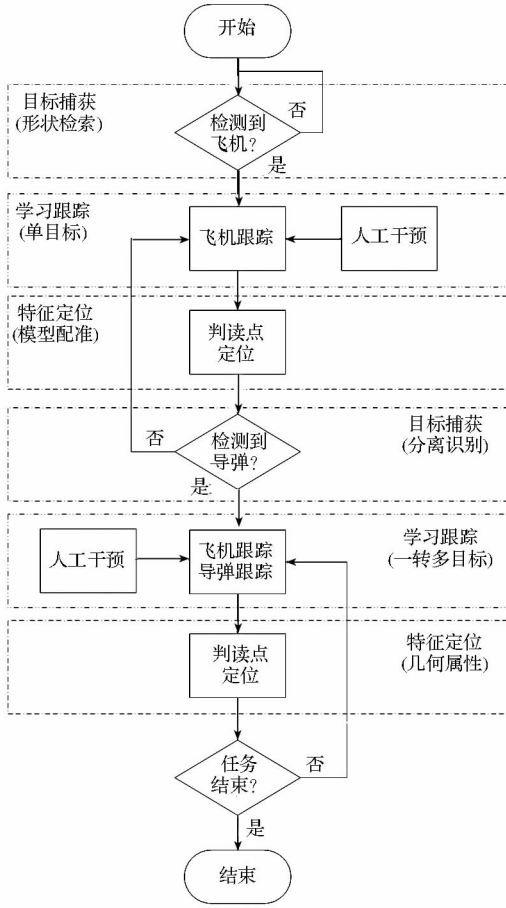


图 2 图像实时判读方法流程图

Fig. 2 Flow chart of image real-time interpretation method

基本思路是首先获取目标区域,再定位判读点,有利克服了单点跟踪易受噪声影响的缺点。图像实时判读方法流程如图 2 所示,三类虚线框代表了目标捕获、学习跟踪和特征定位三个算法单元。

2.1 目标捕获

实时判读首先需要解决的是目标捕获,对于空中发射试验,需捕获的目标包括进场的飞机和分离的导弹。由于试验过程中,观测背景多为天空和戈壁等较为平坦的区域,使得目标的形状成为其最具判别力的特征。因此,采用形状分析的方法识别判读目标。

2.1.1 进场捕获

由 Canny 算子在实时图中检测边缘,得到边缘二值图像,再通过拓扑结构分析^[10]提取用于表征形状的区域轮廓 $C_{PR}(n)$,其中 $n \in N$ 表示单帧图像中提取的轮廓数量。

离线构建飞机目标形状样本库,记飞机目标轮廓模型为 $C_{PB}(m)$,其中 $m \in N^+$ 表示模型轮廓数量。为了提高检索效率,应尽量压缩样本库容量,根据飞机三维模型,分别以 45° 航向角和俯仰角为步长,范围为 $(0^\circ, 180^\circ)$ 渲染多视角图像。

由于图像强度信息随着观测距离的变化,呈现明显的不同且不可预知,而边界几何特征受观察视角的影响,加之空中发射试验观测距离远大于目标自身尺寸,可以由线性变换的仿射模型近似像机成像的非线性透视变换模型,因此本节通过仿射不变边界矩描述形状,在有观测噪声和视角变换的情况下检索形状,计算公式^[11]为式(1),

$$\begin{cases} I_1 = (n_{20}n_{02} - n_{11}^2)/n_{00}^4 \\ I_2 = (n_{30}^2n_{03}^2 - 6n_{30}n_{21}n_{12}n_{03} + 4n_{30}n_{12}^3 + 4n_{21}^3n_{03} - 3n_{21}^2n_{12}^2)/n_{00}^{10} \\ I_3 = [n_{20}(n_{21}n_{03} - n_{12}^2) - n_{11}(n_{30}n_{03} - n_{21}n_{12}) + n_{02}(n_{30}n_{12} - n_{21}^2)]/n_{00}^7 \end{cases} \quad (1)$$

式中归一化中心矩为式(2),

$$n_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{\frac{\gamma}{2}}} \quad \gamma = p + q + 1 \quad (2)$$

其中 $p + q$ 阶中心矩 μ_{pq} 由式(3)计算,且二值图像轮廓采样点强度 $f(x, y) = 1$ 。

$$\begin{cases} m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y) \\ \bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \\ \mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

离线计算 $C_{PB}(m)$ 的矩描述 $I_i^{PB}(m)$,其中 $i \in N^+$ 且 $i \leq 3$,则形状模型样本存储结构如图 3 所示。

t	v	k	l	p_1, \dots, p_k	q_1, \dots, q_l	I_1, I_2, I_3
飞机类型 样本标识	观测视角	轮廓 采样点数	预定义 判读点数	轮廓 采样点	预定义 判读点	仿射不变矩

图 3 形状模型样本数据结构

Fig. 3 Data structure of shape model samples

在线计算 $C_{PR}(n)$ 的矩描述 $I_i^{PR}(n)$,由于不变边界矩可能取非正数,如式(4)由修正后的卡方距离计算 $C_{PB}(m)$ 与 $C_{PR}(n)$ 之间的相似程度 $d(m, n)$,其中 ε 为除零修正量。 d 值越小说明两个形状越相似。

$$d(m, n) = \left| \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \frac{[I_i^{PB}(m) - I_i^{PR}(n)]^2}{I_i^{PB}(m) + I_i^{PR}(n) + \varepsilon} \right| \quad (4)$$

通过交叉验证,训练相似性阈值 δ ,并对大于 δ 的 $d(m, n)$ 置为无穷大,在单帧图像中采取非极小值抑制,最小 $d(m, n)$ 对应轮廓的外接矩即为飞机所在区域。

2.1.2 分离捕获

图 4 所示是导弹分离捕获过程, $t - 1$ 和 t 时

刻对应的图像分别为 I_{t-1} 和 I_t , 已知飞机目标区域 $R_p(x, y, l, w)$, 其中 (x, y) 为区域左上角图像坐标, l 和 w 为区域的长和宽, 根据 l, w 和比例系数 c 在飞机平台周围获得增广区域 $R_a[x - cl, y - cw, (2c + 1)l, (2c + 1)w]$, 在时间序列上以 $I_t(R_a)$ 为尺度基准, $I_{t-1}(R_a)$ 进行尺度归一化 $I'_{t-1}(R_a)$, 从而计算相邻两时刻增广区域的灰度差值矩阵 $M_{df} = \text{abs}[I'_{t-1}(R_a), I_t(R_a)]$, 其中符号 abs 表示矩阵元素取绝对值。

在分析 M_{df} 时根据导弹是回转体目标, 多视角观测的几何特征基本相同, 且飞机与导弹具有明显的形状紧凑性差异, 首先计算 M_{df} 中大于阈值 δ 的像素外接矩 $R(x, y, l, w)$, 再求 R 的长宽比 $r = l/w$, 并定义以下判别准则:

(1) 根据目标的型号, 可确定导弹和飞机的长宽比 r_p 和 r_m , 满足 $r > r_p$ 且 $r - r_m < \varepsilon$ 的 r 对应的区域 R 即为导弹目标。

(2) 机载导弹, 包括滑翔式发射的空空导弹和抛投式发射的空地导弹两类, 前者具有明显的尾焰特征, 而后者没有。对于空空导弹, 选择尾焰区域, 即统计 $I_t(R_a)$ 中灰度强度值较大的区域, 作为判读特征; 对于空地导弹, 选择弹体区域, 作为判读特征。

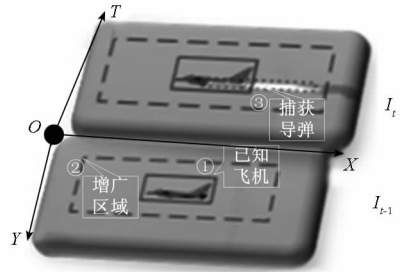


图4 导弹分离捕获示意图

Fig. 4 Sketch chart of missile separation capture

2.2 学习跟踪

空中发射试验, 主要包括飞机巡航, 机弹分离, 导弹巡航与遇靶四个阶段, 执行飞机单目标和一转多目标两个跟踪过程。由目标捕获得到初始飞机区域, 学习其特征作为跟踪的初始值, 进而转向单目标在线跟踪; 若在飞机周围捕获到导弹目标, 则由导弹区域初始化跟踪器, 进入一转多目标跟踪; 当跟踪漂移时通过判读员干预, 更新区域特征, 从而引导正确的判读位置。

2.2.1 在线跟踪

跟踪学习检测算法^[12] (Tracking-Learning-Detection, TLD), 将跟踪问题分解为跟踪、检测、融合、学习四个模块, 通过融合跟踪器和检测器的结果, 利用基于结构约束的学习算法 PN-Learning 在线学习目标新的外观, 在长时间任意目标跟踪

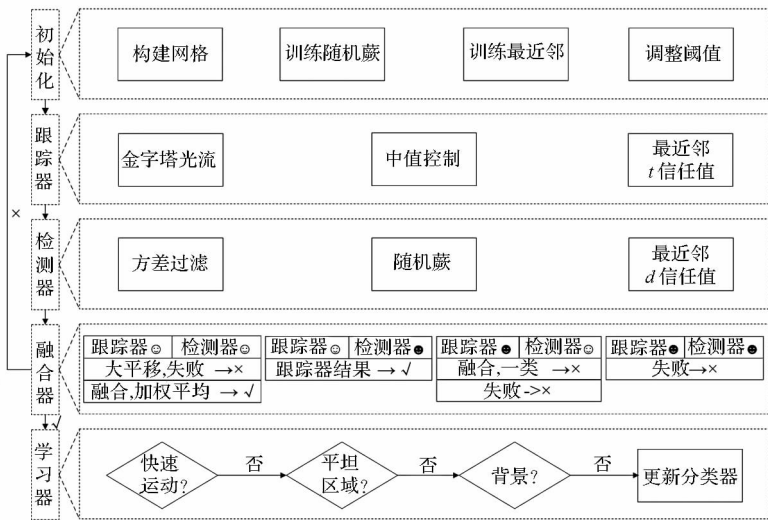


图5 在线跟踪流程图

Fig. 5 Flow chart of online tracking

问题上取得了很好的效果。

目标跟踪过程, 首先根据目标可能发生的尺度变化, 构建尺度空间, 根据捕获到的目标, 在半监督学习框架下, 训练初始的随机蕨和最近邻分类器, 并通过交叉验证的方法调整阈值参数; 循环跟踪过程中, 将原算法顺序执行的跟踪器和检测

器并行化提高了运算速度; 整合器依据二者的成功标志和信任水平生成最终结果; 若目标在时间序列上符合运动连续性约束即在线学习。算法流程如图5所示, ⊙和⊙符号是成功和失败标志, √和×分别表示是否学习。

跟踪器和检测器融合学习的在线跟踪模式,

可以很好解决飞机目标失拍后进场,低帧率视频以及目标形变跟踪等问题。

2.2.2 人工干预

由于在线实时跟踪很难事先预计目标自身的变化和外在环境的变化,特别是在长航时任务中误判和漏检的情况尤为多见,为了既保证系统的正确性又不影响系统的实时性,在错误发生时由判读员提供干预信息,干预不阻断系统的连续运行,当系统收到干预信息后,在下一帧即时更新区域特征库。更新的策略包括,增加目标和删除目标,前者将人工干预区域作为正样本添加到学习器在线更新分类器;后者通过在样本库中删除与当前目标区域相似的样本达到删除虚警目标的效果,如图 6 所示。

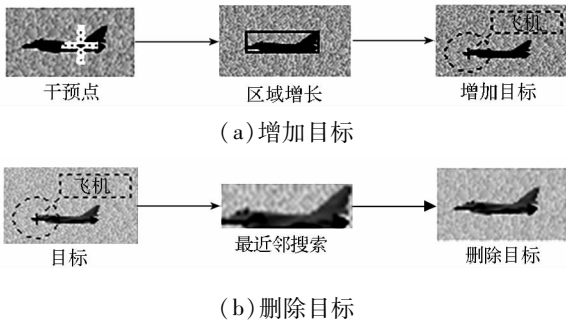


图 6 干预流程

Fig. 6 Interference process

2.3 特征定位

在目标潜在区域中提取目标实时轮廓,通过与二维轮廓模型配准实现判读点特征定位,从而为基于点模式的位姿估计解算方法提供像点坐标。为适应需多像点解算的单目位姿估计方法,且导弹目标在图像上面积较小,定位多点对其解算意义不大,本节着重探讨飞机目标的多判读特征点定位方法。首先在相似变换假设下求解粗配准关系,再迭代优化单应矩阵,最后通过变换关系投影预先定义的模型兴趣点到实时图像上,实现判读点定位。而导弹目标,可通过几何方法定位弹尖或弹尾判读点。

2.3.1 粗配准

已知飞机轮廓的二维模型 C_{PB} ,从判读目标潜在区域获取飞机二维实时轮廓 C_{PR} , $\mathbf{x}_{cb}(x_{cb}, y_{cb}, 1)$ 和 $\mathbf{x}_{cr}(x_{cr}, y_{cr}, 1)$ 分别是 C_{PB} 和 C_{PR} 上的离散采样点集合。

首先,判断 C_{PB} 与 C_{PR} 是否存在镜像变换,由转动惯量计算主轴 $l(C_{PB})$ 和 $l(C_{PR})$,并分别计算 \mathbf{x}_{cb} 、 \mathbf{x}_{cr} 到 $l(C_{PB})$ 、 $l(C_{PR})$ 的垂足 \mathbf{v}_{cb} 、 \mathbf{v}_{cr} ,与距离 \mathbf{d}_{cb} 、 \mathbf{d}_{cr} ,据此构造距离点集 $\mathbf{D}_{cb}(\mathbf{v}_{cb}, \mathbf{d}_{cb})$ 和

$\mathbf{D}_{cr}(\mathbf{v}_{cr}, \mathbf{d}_{cr})$;分别拟合直线 $L_{cb}(\mathbf{D}_{cb})$ 和 $L_{cr}(\mathbf{D}_{cr})$,并计算斜率 $k_{cb}(L_{cb})$ 和 $k_{cr}(L_{cr})$ 。若 $k_{cb}k_{cr} < 0$,则镜像 C_{PB} ;否则保持不变。此过程可理解为计算主轴的主方向。

其次,在相似变换关系假设下,求解 C_{PB} 与 C_{PR} 初始配准关系 $H_s(s, \theta, \mathbf{t})$,其中标量 s 是均匀缩放, θ 是旋转角度,向量 \mathbf{t} 是 2 维平移矢量(t_x, t_y)。同样采用区域转动惯量计算方法求得模型和判读实时图像的目标质心分别为 $\mathbf{c}(C_{PB})$ 和 $\mathbf{c}(C_{PR})$,以及主轴与 x 轴夹角 $\alpha(C_{PB})$ 和 $\alpha(C_{PR})$ 。累加轮廓上相邻两点间的欧式距离求得目标区域周长 $p(C_{PB})$ 和 $p(C_{PR})$ 。则初始的 s, θ 由式(5)可得。

$$s = \frac{p(C_{PR})}{p(C_{PB})} \quad \theta = \frac{\alpha(C_{PR})}{\alpha(C_{PB})} \quad (5)$$

最后,由式(6)在已知 s, θ 的条件下,可由线性求解 \mathbf{t} 。

$$[t \quad 1]^T = \mathbf{x}_{cr} - [sR \quad \mathbf{0}^T]^T \mathbf{x}_{cb} \quad (6)$$

2.3.2 迭代优化

在初始配准的基础上通过迭代最近点算法^[8](Iterative Closest Point, ICP)优化求解单应矩阵,根据变换矩阵将模型上预先定义的兴趣点(例如机头点,翼尖点等) $\mathbf{x}_b(x_b, y_b, 1)$ 投影到实时图像 $\mathbf{x}_r(x_r, y_r, 1)$ 上,实现多判读点高精度定位。迭代步骤如下:

(1) 令迭代次数 $k = 0$;

(2) 以初始配准关系 H_s 为初值,变换模型轮廓采样点集合 \mathbf{x}_{cb} 到 \mathbf{x}_{cb}^k ;

(3) 通过快速近似最近邻搜索^[13] 计算 $\text{ass}(i, j) = \text{FANN}(\mathbf{x}_{cr}, \mathbf{x}_{cb}^k)$,其中 $i \leq \text{size}(\mathbf{x}_{cr})$, $j \leq \text{size}(\mathbf{x}_{cb}^k)$,分别为 \mathbf{x}_{cr} 和 \mathbf{x}_{cb}^k 的轮廓采样点索引, size 函数计算点集容量。按式(7)计算最近邻点对距离 d_k ,同时根据点对对应关系由 RANSAC 鲁棒估计单应变换矩阵 H_k ;

$$d_k = \sqrt{\sum_{i=1, \text{ass}(i, j)}^{\text{size}(\mathbf{x}_{cr})} \|\mathbf{x}_{cr}(i) - \mathbf{x}_{cb}^k(j)\|^2} \quad (7)$$

(4) 当 $k \geq 1$ 时,若 $k \geq 10$ 或 $\Delta d = \|d_k - d_{k-1}\| < \varepsilon$,则迭代停止,由式(8)计算优化后的单应矩阵 H ,定位的判读点 $\mathbf{x}_r = H\mathbf{x}_b$;否则,令 $k = k + 1$,根据 H_{k-1} 变换 \mathbf{x}_{cb}^{k-1} 到 \mathbf{x}_{cb}^k ,返回步骤(3)。

$$H = \left(\prod_{i=0}^k H_i \right) H_s \quad (8)$$

3 实验结果

本节以航空靶场空中发射试验为场景,仿真生成 2000 张 720×576 分辨率的数字图像序列。通

过 VS2008 开发环境由 VC++ 语言实现了图像实时判读分系统。实验平台选择 Windows X86 32 位 PC 机, CPU Intel Core i5 - 3470, 主频 3.20GHz, 内存 3.46GB。

离线构造的部分飞机目标样本如图 7(a) 所示, 其中三维模型来源于谷歌的 Trimble 3D 模型库^[14]。

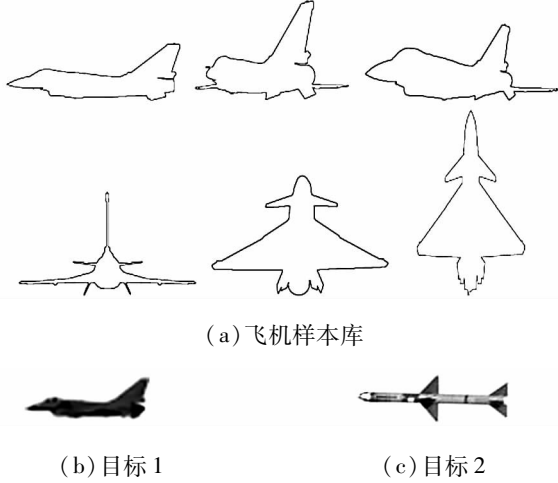


图 7 飞机样本库与待检索目标

Fig. 7 Sets of plane and targets to retrieve

对目标边界像素增加水平为 (μ, σ) 的高斯白噪声, 在样本库中检索图 7(b) 和 7(c) 所示目标, 与部分模型相似度如表 1 所示。

图 8 展示了飞机进场捕获与导弹分离捕获结果, 以及在线区域跟踪结果。捕获结果由限定框标记, 跟踪结果通过十字丝标记的判读点给出。

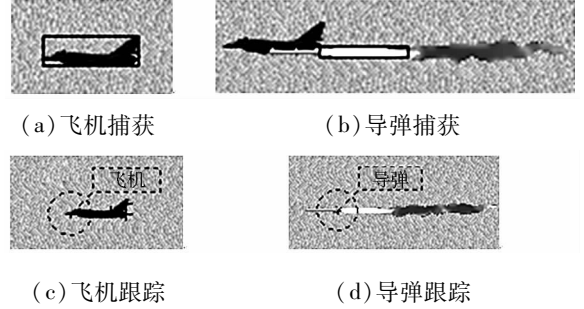


图 8 捕获与跟踪结果

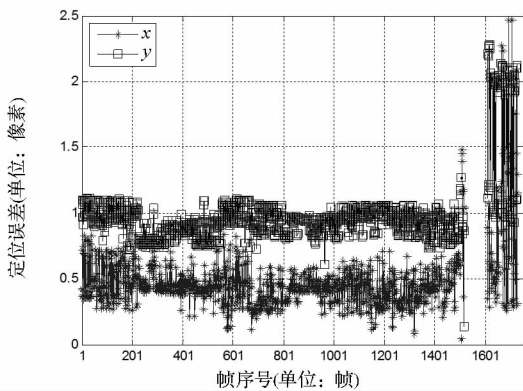
Fig. 8 Results of capture and tracking

飞机目标预先定义的 4 个判读点分别是机头、机身、尾翼尖和尾喷口, 编号为 P1 至 P4; 导弹目标选择弹尾一个判读点 M1, 图 9 是目标判读点 P2 和 M1 定位精度分析结果, 前 1500 帧无导弹目

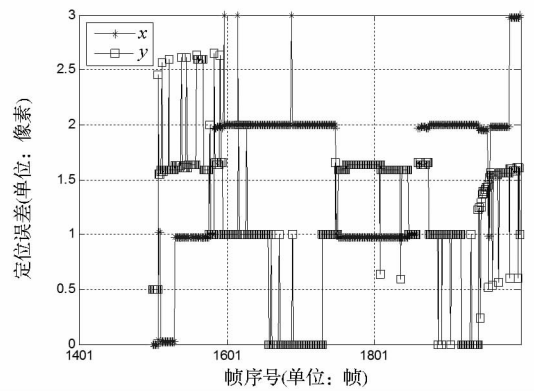
表 1 形状相似性检索结果

Tab. 1 Results of shape similarity retrieval

目标	噪声	图像	I ₁	I ₂	I ₃	模型	图像	I ₁	I ₂	I ₃	相似度
1	(0.0, 0.0)		5.43×10^{-2}	-1.73×10^{-5}	-1.24×10^{-3}	(1, 3)		8.17×10^{-2}	-5.41×10^{-5}	3.08×10^{-3}	2.36×10^{-3}
1	(0.0, 0.5)		5.92×10^{-2}	-2.12×10^{-5}	-1.45×10^{-3}	(1, 3)		8.17×10^{-2}	-5.41×10^{-5}	3.08×10^{-3}	1.50×10^{-3}
1	(0.0, 1.0)		6.67×10^{-2}	-3.17×10^{-5}	-1.75×10^{-3}	(1, 4)		1.72×10^{-1}	2.65×10^{-3}	2.29×10^{-2}	1.28×10^{-2}
2	(0.0, 0.0)		1.80×10^{-1}	-1.92×10^{-5}	2.44×10^{-3}	(1, 3)		8.17×10^{-2}	-5.41×10^{-5}	3.08×10^{-3}	1.84×10^{-2}
2	(0.0, 0.5)		1.91×10^{-1}	-2.09×10^{-5}	2.60×10^{-3}	(1, 2)		8.43×10^{-2}	-4.26×10^{-6}	1.19×10^{-3}	2.04×10^{-2}
2	(0.0, 1.0)		2.03×10^{-1}	-2.15×10^{-5}	2.69×10^{-3}	(1, 6)		9.59×10^{-2}	1.92×10^{-4}	-4.40×10^{-3}	1.89×10^{-2}



(a) P2 判读点定位精度



(b) M1 判读点定位精度

图 9 目标判读点定位精度分析

Fig. 9 Location precision analysis for target interpretation points

标, 第 1501 帧到第 1612 帧由于机弹分离引起的目标遮挡影响目标判读, 需要靠预测给出判读点, 这里未给出定位精度分析。实验过程中保持旁向观测, 飞机目标与其样本库形状较为相似, 粗配准

可以提供一个较好的初值, 迭代次数不多于 2 次。

仿真数据源记录的目标判读真值点坐标为 Xb_{it} 和 Yb_{it} , 而实时判读记录的目标判读点坐标为 Xr_{it} 和 Yr_{it} , 其中 t 表示帧编号, i 表示判读点标号, M

为判读帧数, N 为判读点个数, 对于飞机目标 N 等于 4, 对于导弹目标 N 等于 1, 则由式(9)统计标准差得到的飞机目标和导弹目标判读点定位精度如表 2 所示, 判读点的高精度定位可以提高解算精度。

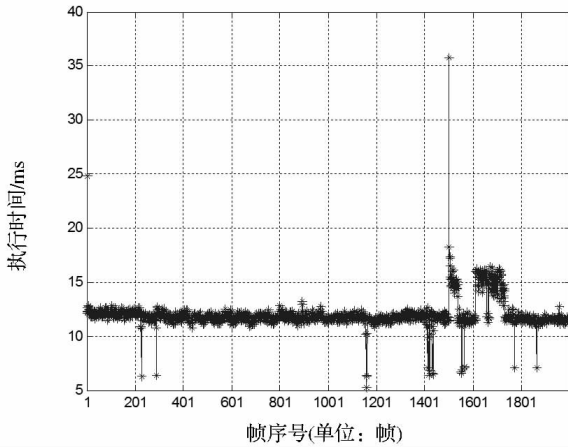
$$\begin{cases} \delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Xb_{ij} - Xr_{ij})^2}{(MN - 1)}} \\ \delta_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Yb_{ij} - Yr_{ij})^2}{(MN - 1)}} \end{cases} \quad (9)$$

表 2 目标判读点定位精度统计结果

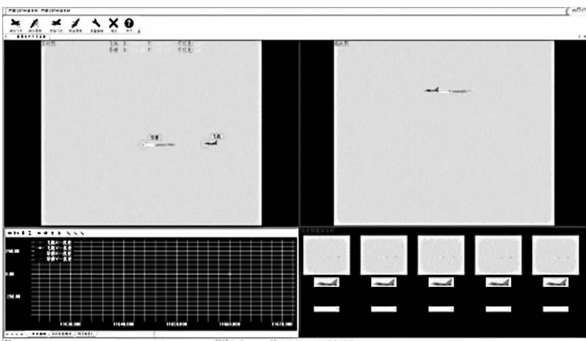
Tab.2 Statistical results of target interpretation points location precision

飞机(σ_x, σ_y)	导弹(σ_x, σ_y)
(0.5, 0.7)	(1.7, 1.3)

系统执行效果如图 10 所示, 图 10(a) 记录了单帧执行时间, 可得平均执行时间为 12ms, 其中首帧初始化需要较多的执行时间, 且由于第 1501 帧检测到机弹分离, 从而转向多目标跟踪, 因此执行时间有所增加; 图 10(b) 展示了系统用户界面, 主要由菜单栏和视窗组成。菜单栏包括人工干预和系统配置按钮; 视窗从左至右, 从上至下依次为实时图、模型图、曲线图以及历史和目标图像。



(a) 单帧执行时间



(b) 用户界面

图 10 系统执行效果

Fig.10 Performance of system

4 结论

本文针对传统的靶场光测图像事后判读的不足, 设计并实现了一套全新的分布式图像实时判读解算系统, 对其中的图像实时判读分系统中的关键技术进行了详细讨论, 由仿真实验验证了系统的正确性和时效性。后续将进一步讨论基于运动场分割的分离目标检测算法, 和稀疏轮廓配准与三维模型匹配等提高判读点定位精度的技术方法, 以及通过更完善的实拍实验指导算法改进和系统优化。通过模型的更新, 该系统可扩展应用于各类靶场试验, 满足用户实时判读的需求。

参考文献 (References)

- [1] 张小虎. 靶场图像运动目标检测与跟踪定位技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006. ZHANG Xiaohu. Researches on moving target detection and tracking for images of shooting ranges[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2006. (in Chinese)
- [2] Image Systems. TrackEye [EB/OL]. (2013 - 08). <http://www.imagesystems.se/>.
- [3] 刘晓春, 于起峰, 雷志辉, 等. 机载平台野外立体场景弱小变化目标检测[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(6): 130 - 135. LIU Xiaochun, YU Qifeng, LEI Zhihui, et al. Dim changing target detection of outside stereo scene for airborne platform[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(6): 130 - 135. (in Chinese)
- [4] Wu Y, Lim J, Yang M H. Online object tracking: a benchmark[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2013:2411 - 2418.
- [5] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. YU Qifeng, SHANG Yang. Videometrics: principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [6] Schweiger F, Zeisl B, Georgel P F. Maximum detector response markers for SIFT and SURF [C]//Proceedings of Vision, Modeling and Visualization Workshop, 2009:145 - 154.
- [7] Ahn S J, Rauh W. Circular coded target for automation of optical 3D-measurement and camera calibration [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2001, 15(6): 905 - 919.
- [8] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3 - D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239 - 256.
- [9] 王鲲鹏. 靶场图像目标检测跟踪与定姿技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010. WANG Kumpeng. Researches on auto target detection, tracking and 3 - D pose measurement for imagery of shooting range[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2010. (in Chinese)
- [10] Suzuki S. Topological structural analysis of digitized binary images by border following [C]//Proceedings of Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 30(1): 32 - 46.
- [11] Flusser J, Suk T. Pattern recognition by affine moment invariants[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(1): 167 - 174.
- [12] Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J. Tracking-learning-detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(7): 1409 - 1422.
- [13] Muja M, Lowe D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration [C]//Proceedings of VisApp International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2009: 331 - 340.
- [14] Google. Trimble 3D warehouse [EB/OL]. (2013 - 05). <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>.