

图像匹配综合实验与仿真系统研究

杨小冈¹, 左森², 黄先祥¹, 郭风华², 夏克寒²

(1.第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2.二炮装备研究院, 北京 100085)



摘要: 结合景像匹配制导领域研究的主要内容, 设计并实现了一个多源图像匹配综合实验与仿真系统。介绍了系统的结构组成及工作原理, 分析了系统的主要功能, 从仿真策略、基准图制备、实时图生成三个方面给出了该系统采用的关键技术。应用实验表明, 该系统运行可靠, 为图像匹配相关应用领域的研究提供了良好的技术支持。

关键词: 图像匹配; 仿真系统; 关键技术; 应用实验

中图分类号: TP 391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2010) 06-1360-05

Integral Experiment and Simulation System for Image Matching

YANG Xiao-gang¹, ZUO Sen², HUANG Xian-xiang¹, GUO Feng-hua², XIA Ke-han²

(1. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China; 2. Academe of The Second Artillery Equipment, Beijing 100085, China)

Abstract: According to the main problems of scene matching guidance research field, an integral experiment and simulation system for multi-source image matching was designed and developed. The structure and operating principle of the system were introduced. The key technique of the system was given based on three aspect, simulation strategy, reference image preparation, and real-time image production. The practical applications show that the system is reliable, and provide a good technical platform for the study of image matching related field.

Key words: image matching; simulation system; key technique; application experiment

引言

由于仿真具有高效、可靠、安全、经济、保密和在可控环境内多次重复运用的特点, 因而成为导弹武器系统研制中必不可少的重要手段^[1,2]。对于飞行器景像匹配制导系统来讲, 利用图像匹配仿真技术, 主要可以完成以下工作:

- 匹配算法的性能验证与评估;
- 基准图的适配度估计(可匹配性检验)、可用性分析;
- 景像匹配制导系统的优化、定型实验。

伴随着图像匹配技术研究的不断深入, 有关图像匹配仿真的理论、方法与技术也受到国内研究人员的日益重视, 取得了一些实用性的研究成果^[3-8]。典型的有北航建立的针对MIF的景像匹配系统实时仿真平台^[8]: 由两台计算机和一台高性能服务器组成局域网结构, 包括数据采集模块、仿真实时图的生成模块、图像预处理模块、融合算法模块、匹配算法模块等多个模块。利用该平台可以对不同的融合算法及匹配算法的性能进行评估, 但其主要采用基于基准图的实时图生成策略, 且设计时并未考虑景像匹配制导系统的其它重要研究内容, 如基准图的可匹配性检验、图像的特征提取、算法的鲁棒性分析等问题。总体而言, 国内研究大多数是基于

纯数字仿真, 很少有 CCD 相机等硬件设备参与, 且仿真的内容较为单一、仿真研究与工程背景联系不够密切, 大部分仅仅停留在算法性能验证这一层次。针对这些问题, 本文结合图像匹配制导领域的主要研究内容, 设计并实现了一个多源图像匹配试验与仿真系统, 该系统可有效完成匹配算法的性能评估、基准图的适配性估计、实时图的可匹配性检验等功能, 为研究的深入开展、相关理论与方法在导弹武器系统中的实用化与工程化, 提供了有效的技术支持与服务平台。

1 系统结构与功能分析

图像匹配仿真就是在实验室环境下, 借助计算机或其它辅助设备, 完成基准图与实时图的仿真制备, 进而模拟实现基准图与实时图的匹配, 得到定位或识别结果, 从而验证匹配算法或匹配系统其它组成部分的性能指标。综合集成景像匹配制导技术中的各项重要研究内容, 如景像匹配区的选定、基准图的预处理、特征基准图的生成、基准图的适配性估计、匹配算法性能评估、典型目标区影像库的建立等^[4,7-10], 我们设计并构建了图像匹配综合试验与仿真系统。

1.1 系统结构组成

系统由软、硬件两大部分组成, 通过一台千兆交换机, 构成高速局域网结构。从功能上讲, 系统可分为五个子系统, 即投影摄像子系统、基准图制备与场景生成子系统、图像预处理与特征提取子系统、匹配仿真与性能评估子系统、影像库子系统。图1给出了系统的结构示意图。

收稿日期: 2008-10-10

修回日期: 2009-01-13

基金项目: 中国博士后科学基金(20070420939); 国家自然科学基金(60772151)

作者简介: 杨小冈(1978-), 男, 陕西蓝田人, 博士后, 研究方向为精确制导及图像处理技术; 左森(1977-), 男, 河南安阳人, 博士, 研究方向为图像处理与装备信息系统研究; 黄先祥(1940-), 男, 江苏如东人, 中国工程院院士, 研究方向为兵器发射理论与仿真技术研究。

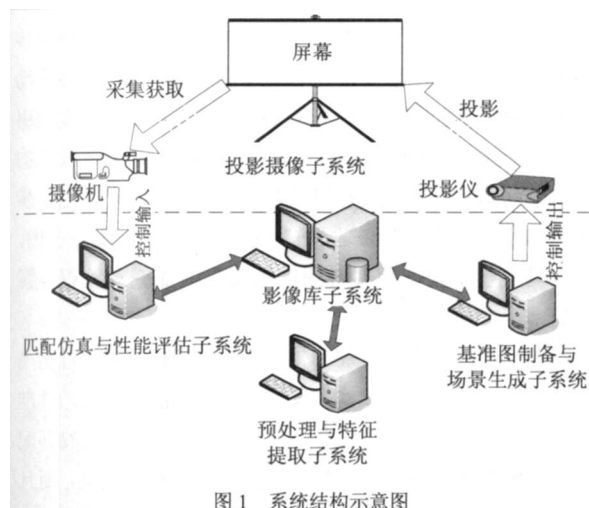


图 1 系统结构示意图

(1) 硬件结构 系统硬件主要由以下两部分组成:

(a) 投影摄像系统,主要由投影仪、屏幕、CCD 摄像头、支架、精密转台及控制器、图像采集卡、实验基座组成。

(b) 计算机局域网系统,由 HP-xw8200 图像处理工作站及三台高性能 PC 机、网络交换机组成。工作站用于完成大幅卫星影像的分析处理及场景的模拟生成;其它几台 PC 机分别完成图像的预处理与特征提取、匹配仿真与性能评估、系统图像资源以及典型目标区各种景像的管理。

(2) 软件组成 依据四台计算机的分工,软件部分主要包括:(a) 基准图制备与场景生成软件;(b) 图像预处理与特征提取软件;(c) 匹配仿真与性能评估软件;(d) 影像库软件。

上述软件除嵌入系统中的转台控制模块、图像采集应用模块、Lortran7 大气模型属购买产品外,其它部分均在 C++Builder 软件平台上自行开发实现。

1.2 系统功能分析

依据具体任务,系统的各功能子系统可单独工作、协同工作,也可分布式运行。以下介绍本仿真系统的主要功能。

(1) 投影摄像子系统 该子系统简称 PCS (Projection and Camera Sub-system),主要功能是辅助实现飞行场景的仿真生成,实时图像采集。通过精密转台及控制器可实现图像的定量旋转畸变;图像采集卡及其应用软件可完成多分辨率、多种亮度与对比度下的实时图采集。该子系统的投影部分与“基准图制备与场景生成子系统”连接,摄像部分与“匹配仿真与性能评估子系统”相连,组成闭合回路,实现多源图像匹配仿真实验。

(2) 基准图制备与场景生成子系统 该子系统简称 RPS (Reference image Produce Sub-system),主要完成从大幅卫星影像到小幅基准图像或飞行场景的数据制备及仿真生成。主要包括:(a)利用多种准则完成景像匹配区的分析,基于分析结果,自动完成景像匹配区基准图的有效选定,进而生成特征明显、可匹配性高的制导基准图;(b)通过选取多源图像对,进行单幅、多幅匹配仿真实验,相关匹配曲面的各

种相关峰特征分析,计算图像的自匹配性能参数等方法,实现基准图的适配度性能评估;(c)在分析实际应用中制导图特性的基础上,模拟产生存在各种畸变的基准图、实时图,以及利用序列图像模拟飞行场景,从而为制导图的预处理及匹配仿真提供较为真实、可靠的数据资源。

(3) 图像预处理与特征提取子系统 该子系统简称 PFS (Processing and Feature extraction Sub-system),实现匹配中的各种图像分析、预处理及特征提取功能。可以对卫片、航片等用于景像匹配制导的多源图像资源的灰度特征分析,为制导基准图的可匹配性检验提供参数依据。系统地实现景像匹配制导中可能用到的图像预处理算法及图像特征提取算法。可以完成对存在畸变的制导图的预处理,减小其失真度,提高其可匹配性。比如:(a)基于对比度增强、直方图均衡法、直方图规格化、灰度最小化、灰度标准化等方法图像灰度校正;(b)基于仿射变换、透视变换、CP 选取、飞行姿态角的几何校正;(c)基于中值滤波、四点邻域滤波、阈值平滑滤波、加权平均滤波、加窗中值滤波等算法的噪声消除;(d)基于邻域平均、中值滤波、降分辨率、小波变换、特征提取等方法的数据压缩;(e)图像特征如边缘、角点、不变矩、物理特征、NMI 的提取。

(4) 匹配仿真与性能评估子系统 该子系统简称 PES (Performance Evaluation Sub-system),可完成多源图像匹配仿真、序列图像匹配仿真等内容,为算法的性能评估、基准图的适配性估计提供重要、有效的技术途径。软件运动界面如图 2 所示:

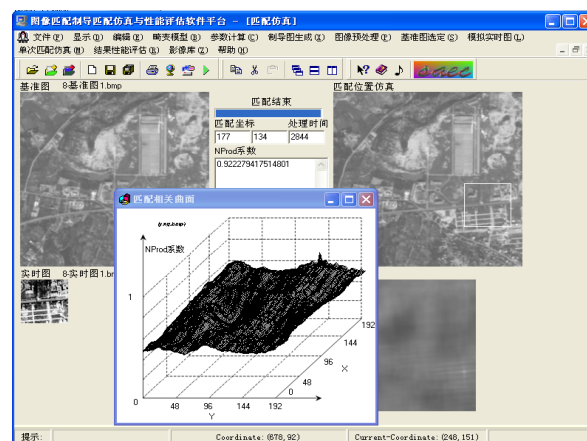


图 2 匹配仿真与性能评估子系统运行界面

该子系统主要包括:(a)以工程应用为背景,建立典型、实用的图像匹配算法库,如 AD、MAD、Nprod、Proj、SSDA、等特征、相似性度量及控制策略组合的几十种实用匹配算法^[5];(b)通过 CCD 相机从投影屏幕实时获取图像,作为匹配仿真的实时图;(c)通过单次匹配仿真、算法性能参数计算、图对匹配仿真等模块实现算法性能评估;(d)通过多图选定与分析、匹配曲面分析、匹配性能参数分析等模块实现基准图的适配性估计;(e)通过序列图像匹配、序列图像匹配概率估

计、曲线示意图等模块完成序列图像的匹配仿真，对序列匹配方法的性能进行分析^[1]。

(5) 影像库子系统 简称 IDS(Image Database Subsystem)，采用 Client/Server (C/S) 结构，客户端应用程序是其它子系统，如 RPS、PES。服务器应用程序协调和处理来自多个客户端的请求，与服务器数据库直接通信，完成系统维护、原始数据录入、报表生成等操作。系统影像库子系统具有海量数据管理能力和快速检索性能，实现了对典型目标区影像的管理，并为系统其它功能部分提供数据支持。

2 主要技术方案

仿真系统的构建过程中，匹配仿真策略的设计、基准图制备以及实时图的生成是需要考虑的关键技术内容^[4]。

2.1 匹配仿真策略设计

设计采用了一种实用的多源图像匹配仿真方法。采用该方法进行匹配算法的性能评估，可促进算法性能的优化及研究的深入；采用该方法进行基准图的适配性估计，可为巡航导弹景象匹配区的选定提供新的思路；采用该方法可开展针对弹上实时图的可匹配性检验研究，为实时图的预处理提供新的技术方法。图 3 给出了该方法在不同条件下的两种仿真模式流程图。

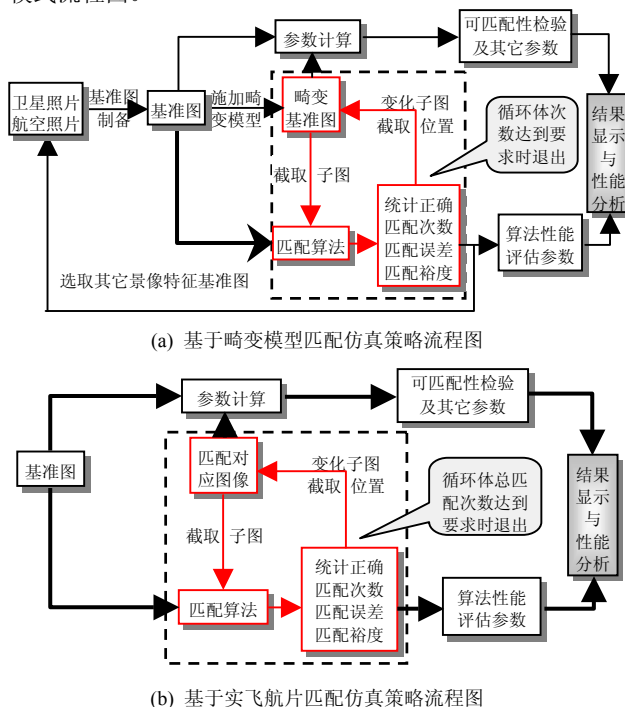


图 3 匹配仿真策略流程图

图 3(a)是基于畸变模型的仿真策略，当没有实测图像时，通过对基准图施加畸变模型来模拟产生实时图像。畸变模型是依据实际匹配中基准图与实时图的差异而确定的，这与所使用图像的特性有一定关系。比如，目前用于巡航导弹景象匹配系统的主要是光学景象匹配，畸变模型一般包括由

于云层遮挡或传感器镜头畸变引起的噪声干扰，由于图像传感器姿态的变化、地球曲率、地形起伏、弹载相机焦距变动引起的几何失真，以及由于成像时图像曝光不足或过度而引起的灰度畸变等。步长是通过基准图与实时图的大小及总的匹配次数而确定的，考虑到图像内部像素之间的相关性，步长取 10~15 个像素较为合适。仿真实验时，也可先截取子图，再施加畸变模型来实现实时图的模拟，其思路及流程与图 3(a)类似。

图 3(b)是基于实飞航片的仿真策略，这种策略通过实飞试验直接摄取的方式获取实时图，与基准图组成真实的基准图—实时图对。依据这些图对，完成一种离线的半实物匹配仿真。这种策略的最大优点是真实性好、可信度更高，而且可以完成多传感器图像匹配仿真实验。因为在实际的景象匹配制导中，实时图是由飞行器的机载传感器实时获取的，采用实飞图像对更能反映飞行器实际的工作环境。

图中采用的性能评价参数主要有以下几种^[4,5]：(1)算法性能评估指标参数：匹配概率 P_c 、匹配精度 σ 、匹配时间 T_M 、匹配裕度 R_{MM} 、匹配适应度 R_{MA} ；(2)图像可匹配性检验参数：图像方差 Var 、独立像元数 IPN ；(3)其它分析参数：均方误差 MSE 、峰值信噪比 $PSNR$ 、相似信噪比 $SSNR$ 。

系统中还采用 CCD 摄像头、投影屏幕及相应的软硬件环境构成回路，设计实现了模拟飞行过程的动态匹配策略，这里不再详述。

2.2 基准图制备

景象匹配制导定位中，基准图的来源一般是卫星照片或用高空侦察机拍摄的航片。进行景象匹配仿真时，基准图的制备应能充分反映图像匹配算法可能遇到的各类场景类型图像信息。选择具有代表性的各种地形地貌的图像，如农田、丘陵、山地、河流、机场、港口、居民区等主，而且每种地形应当具有不同的复杂程度。结合实验室的一般研究条件以及实际应用需求，图 4 给出了匹配仿真中基准图制备方法的实现流程。

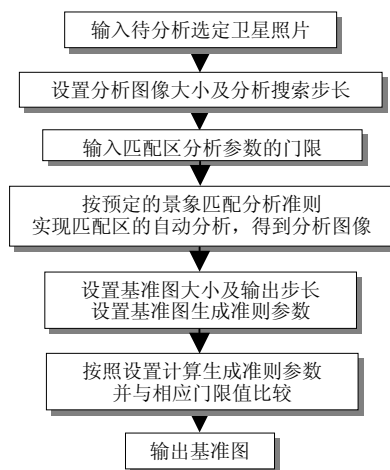


图 4 基准图制备流程图

图中给出的四个模块分别对应了实现流程图中各项功能的软件模块,集成在“基准图制备与场景生成子系统”中。依据上述基准图制备方案,可在已知的弹道影像图或目标区卫星影像图中选取生成特征明显、可匹配性高的基准图数据信息,这符合实际影像匹配制导系统的工作要求,对于提高仿真的可靠性具有重要意义。有关这一技术方案的原理及实现已有文章专题论述。

2.3 实时图的仿真生成

实时图是当飞行器飞经目标区上空时,由弹(机)载传感器实时获取的地面景象特征。由于摄取时间、环境等条件的不同,基准图与实时图在灰度内容特征上有很大差异,形成这种差异的因素有摄像时的光照强度、气象状况以及传感器姿态等。匹配仿真必须考虑实时图与基准图的差异性,建立有效的畸变模型,使仿真生成的实时图数据更切近于实际应用。

从图 3 给出的仿真模式可以看出,实时图的生成有两种方法:一是从基准图中截取图像区域,施加各类畸变构成实时图,与基准图组成仿真的基准图—实时图对,其优点是方便灵活。二是采用直接摄取的方式获取实时图,与基准图组成真实的基准图—实时图对,其优点是真实性好、可信度高,因为在实际的影像匹配制导中,实时图是由飞行器的机载传感器实时获取的。在图像匹配仿真中,必须有大量能够覆盖各种图像场景种类、畸变种类与强度的实时图,但通过直接摄取的方法代价昂贵,并不现实。因此,在现有的图像数据的基础上模拟各种畸变特性,以生成满足要求的实时图,是实验室条件下行之有效的仿真方法。依据实时图与基准图之间存在的各种差异性,系统中采用的畸变模型主要有噪声干扰模型、几何畸变模型、灰度畸变模型以及天候模型四大类。

(1) 噪声干扰模型 实时图在拍摄时距离地面景物较近(比如巡航导弹在贴地飞行时一般距地面 50m~100m),获取的图像比较清晰,其主要噪声源是传感器噪声和信道误差等。系统中采用的噪声模型主要有三种:高斯噪声、椒盐噪声、斑点噪声。

(2) 几何畸变模型 引起实时图几何畸变的主要因素是图像传感器姿态的变化、飞行高度、地球曲率、地形起伏、地球旋转以及摄像机焦距变动、像点偏移、镜头畸变等。这些因素将导致拍摄的实时图产生仿射、透视、偏扭、弯曲等,或者多种形式组合的更为复杂的几何畸变。系统中采用的几何畸变模型主要有:仿射畸变、透视畸变、偏扭畸变、弯曲畸变、基于飞行姿态的几何畸变。

(3) 灰度畸变模型 实时图灰度相对于基准图灰度的变化,归纳起来主要由以下因素所致:由传感器引入的整个信号电平变化;景物反射率或辐射率的变化;由于云层或太阳入射角度的变化所引起的亮度变化,阴影和景物遮蔽所引起的模糊;匹配区域内实际景物的变化;基准图本身与实时图之间的灰度差异,即基准图的制备误差。系统采用灰度线

性变换法实现对对比度及亮度的调整。

(4) 天候模型 其目的在于:在计算机虚拟环境下,通过对遥感成像过程进行科学可视化仿真再现,直观地分析和评测那些制约遥感成像质量的内外界因素的作用机制。LOWTRAN7 是目前采用最多的天候模型专用仿真软件之一。利用其中的可控参数,如太阳方位、表面漫反射系数、大气模糊度、观察者的高度和天顶角、波长范围和增量等等,可模拟典型气象条件下(阴、晴、雨、雾、气溶胶和不通日光条件)的成像模式。

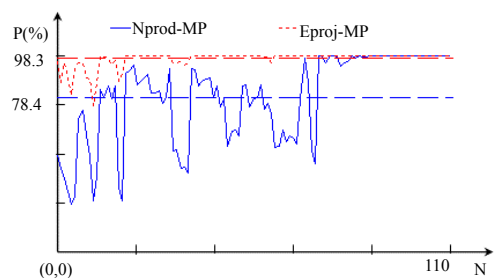
仿真实验中,以上畸变模型可以单独施加,也可以依据情况混合施加。有关这一技术方案的原理及实现也有文章专题论述。

3 应用实验举例

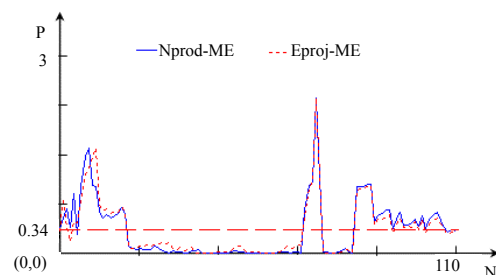
该系统融合了影像匹配制导的主要研究内容及关键技术方法,提供了多种实验与分析手段,为多源图像匹配技术研究及图像匹配相关理论在导弹武器系统中的实用化与工程化,提供有效的技术支持与服务平台。这里举例说明系统的两个典型的应用。

3.1 匹配仿真性能评估

以经典的 NProd 算法以及基于边缘强度的投影度量匹配算法(EProj)为例^[10],选取多组反映不同地区、不同地貌特征的卫片/航片图像匹配对,进行算法的性能评估实验。图 5 给出了两种算法的匹配概率、匹配精度的比较曲线。实验中的基准图大小为 256×256,实时图大小取 64×64,曲线图的横坐标均为图像匹配对数目,纵坐标为各种评价参数值,匹配精度的单位为像素(Pixel,统计平均结果)。



(a) 匹配概率曲线



(b) 匹配精度曲线

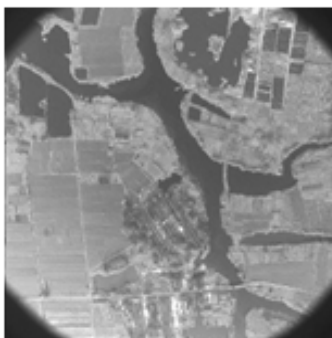
图 5 不同匹配算法性能比较曲线

综合而言,基于上述实验可开展以下研究工作:(a)不同匹配算法的性能比较分析;(b)匹配算法对各种畸变的鲁棒性分析;(c)匹配算法对各种景物类型的适应性分析;(d)匹配算法中实时图大小的优化确定问题研究;(e)不同图源基准图适配性比较分析;(f)不同地区基准图适配性比较分析。

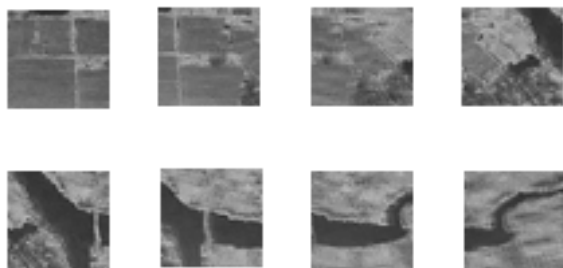
3.2 多源序列图像匹配仿真

基于实测或仿真图像,系统可完成序列图像匹配仿真^[11]。采用420帧实飞序列图像进行飞行场景生成,匹配区300-320帧之间的区域,实时图大小为64×64,图6给出了实验结果。

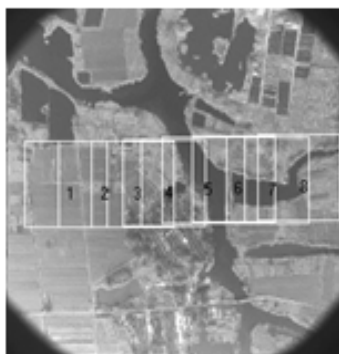
选用的匹配算法为基于边缘强度的投影度量匹配算法^[9,10]。理想情况下,序列匹配的结果是一条直线,由于各种干扰因素的影响,会出现误匹配和匹配随机误差,这一点由实验结果可明显看出。



(a) 第310帧图像



(b) 对应的实时图序列



(c) 图像匹配结果位置示意图

图6 序列图像匹配实验结果

系统还可以通过精密转台控制器实现摄像姿态的调整,通过图像采集软件的设置实现灰度的变化,从而实现各种畸变干扰条件下的序列图像匹配仿真。

4 结论

本文以飞行器景像匹配制导为背景,设计并实现了一个图像匹配综合试验与仿真系统。论述了系统的方案设计及结构原理,介绍了系统的硬件、软件组成及主要功能;通过几个典型应用举例说明了系统在图像匹配研究中的实用性。

本系统的建立以期通过仿真的方法来评价景像匹配制导系统的各项关键技术性能,将来潜在的用途是完成针对武器系统性能评估的数字仿真、半实物仿真以及参与任务规划系统中图像匹配基准图的制备与评估。同时,系统建设的部分成果可应用于巡航导弹或地地常规导弹武器匹配制导系统的模拟实验及改进研究,还可为其它图像匹配的应用领域,如无人机的导航定位、机器人的路径规划、目标的识别与跟踪等的仿真实验积累经验、提供技术支持。

参考文献:

- [1] 王东木, 何秋茹. 红外成像制导空间飞行器系统仿真技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 20(5): 53-57, 73.
- [2] 邓方林. 长缨—III 分布式并行仿真计算机系统[R]. 科技项目研究报告, 2000.
- [3] 刘扬, 赵峰伟, 金善良. 景像匹配区选择方法研究[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 168-170.
- [4] 陈朝阳, 张桂林, 郑云慧. 景像匹配算法的性能评估方法研究[J]. 红外与激光工程, 1998, 27(3): 38-41.
- [5] 杨小冈. 飞行器多源图像匹配定位与仿真技术研究[D]. 第二炮兵工程学院博士学位论文, 2006.
- [6] L Xiao, H Z Wu, *et al.* Modeling and Simulation of Digital Scene Image Synthesis Using Image Intensified CCD under Different Weathers in Scene Matching Simulation System. D.-K. Baik (Ed.): AsiaSim 2004, LNAI 3398. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2005: 607-616.
- [7] 王艳丽, 李铁军, 陈哲. 景像匹配导航系统全局仿真技术研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 108-112.
- [8] 黄重钧. 景像匹配技术中的匹配及融合算法研究[J]. 北京航空航天大学博士学位论文, 2002.
- [9] 曹菲, 杨小冈, 缪栋. 景像匹配区选定准则研究[J]. 计算机应用研究, 2005, 5(22): 137-139.
- [10] X G Yang, D Miao, F Cao. Study on the Matching Similarity Measure Method for Image Target Recognition [C]// The 2nd International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD'05). Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2005, 8: 289-292.
- [11] 杨小冈, 曹菲, 缪栋, 等. 基于 WMF 与 LSE 的序列图像匹配制导滤波融合算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(8): 1362-1365.