

# 基于 MATLAB 的热成像系统仿真 和性能度量方法研究

刘金龙, 刘启忠

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

**摘要:**根据热成像原理,分析了仿真系统中的线性滤波过程,重点研究了热成像系统中如欠采样、扭曲、系统噪声等非线性物理效应的模拟。通过仿真平台测试了在不同应用背景下的系统性能 TOD 曲线,表明热成像系统在不同的环境温度中有不同的识别性能,对系统设计有参考意义。

**关键词:**热成像仿真;退化模型;非线性效应;TOD方法

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2012)01-0106-04

任何系统的仿真都是建立在系统模型构建的基础之上的,热成像系统也不例外。在图像处理与分析中,人们希望通过图像的恢复和重建改进输入图像的视觉效果,因此首先须要将图像的退化过程模型化,并据此采取相反的过程或措施来得到原始的图像。理论上,一个作用在输入图像 $f(x,y)$ 上的系统 $H$ 与一个加性噪声 $n(x,y)$ 的联合作用可产生退化的图像 $g(x,y)$ ,如将其应用于仿真平台,只要已知系统调制作用 $h$ 和系统噪声水平 $n_p$ 就可模拟系统对输入图像的作用效应。在图像分析和处理中利用该退化模型可恢复图像、提高成像品质。但应用于系统仿真平台还存在问题:

(1) 成像系统被假设为线性和空间不变系统,尽管大多数的成像系统可以满足这样的假设,但它仅仅是一种近似。

(2) 退化模型中仅考虑了系统线性滤波效应,实际上现实的热成像系统各种图像退化效应是很复杂的,特别是现在的焦平面成像系统中包含的欠采样和非线性响应效应、畸变效应、显示插值和高级数字电路等非线性的作用效应没有给予考虑。

本文将着重论述成像过程中的非线性物理效应和 TOD 度量方法在仿真平台中的应用问题。

## 1 热成像仿真平台

### 1.1 线性滤波模型

热成像系统中典型的物理效应有光学像差模糊、焦平面的采样降质和非线性响应、电子处理线路的传递效应、显示插值影响以及各个环节中产生的复杂噪声模糊效应等。在线性滤波理论中应用调制传递函数描述系统对输入图像的降质过程。根据线性系统和系统空间不变性系统总的调制传递函数为

$$MTF_{sys} = MTF_{OPT} \cdot MTF_d \cdot MTF_e \cdot MTF_M \quad (1)$$

式中: $MTF_{OPT}$ 为光学系统调制传递函数; $MTF_d$ 为探测器传递函数; $MTF_e$ 和 $MTF_M$ 分别为电子处理线路和系统显示的调制传递

函数。由于系统各部分的调制传递特性在很多相关书籍和文献<sup>[1-2]</sup>中都有介绍,这里不再赘述,图1为各模块的MTF曲线。

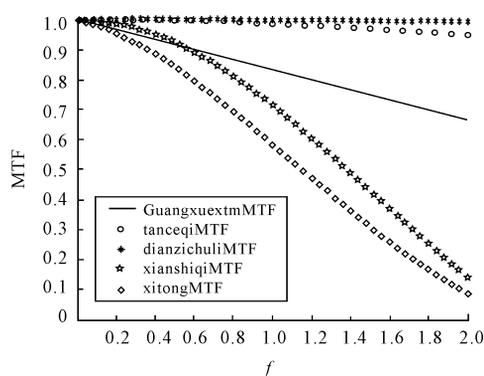


图1 各模块 MTF 曲线

### 1.2 非线性物理效应

基于线性滤波理论的调制传递函数,反映了通过红外凝视成像系统的物像关系,因而可以通过调制传递函数(MTF)理论模型仿真成像系统的成像过程、信号响应特性。同时,凝视成像系统还包括光学系统成像扭曲、焦平面欠采样、系统各个组件随机噪声和插值显示等非线性物理效应,它们也是造成图像降质、退化的重要原因,下面针对以上四项非线性物理效应以空域方法利用像素进行仿真。

#### 1.2.1 畸变

光学系统产生畸变的原因主要在于主光线的球差随视角的改变而不同,因而在一对共轭的物像平面上,放大率随着视场而变化不再是常数。畸变在数值上通常以理想像高 $y'$ 和主光线与理想像面相交的实际像高 $Y_2'$ 只差 $\delta Y_2'$ 表示:

$$\delta Y_2' = Y_2' - y' \quad (2)$$

在热成像系统中,实际上要仿真的是系统已经校正过的残余畸变。因为光学系统一般都存在像差和畸变,但是,同时也考

虑了系统的补偿作为校正,只是由于畸变的复杂性,实际校正的只是初级畸变,而残余畸变就是高阶畸变。由于畸变是几何变形,可利用数字图像处理工具处理,本文利用一个跟特定热成像系统相关的经验函数<sup>[3]</sup>来表征系统的残余畸变量。由畸变的定义可知,一幅图像的畸变值是视场的函数,即离光学中心越远畸变值越大,在数字图像中可以以像素的离图像中心的距离来表示,然后进行灰度插值得到畸变的效果图,如图2所示。

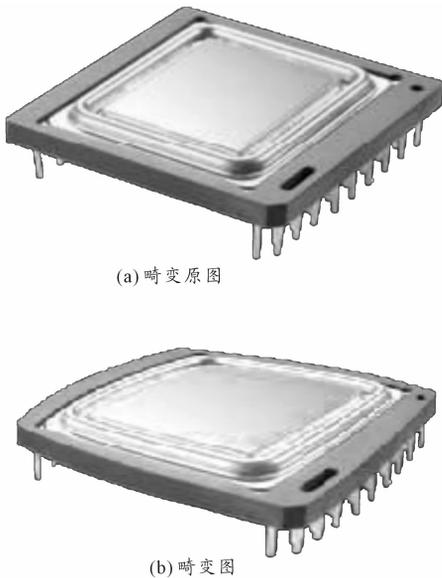


图2 畸变效果图

图2所示为形变量是92时的畸变效果图(该图加大了形变量以使视觉效果更明显,在仿真成像系统的残余畸变是形变量为85左右),通过调节形变量的大小可以控制畸变量的大小。此时因为畸变率为负,产生桶形畸变。

### 1.2.2 空间欠采样

要较完善的建立仿真平台,应建立在对欠采样特性的充分的了解上,然后尽量的减小欠采样的影响,在已有装备的基础上提高成像系统的探测性能,无疑是有巨大的现实意义的。

(1) Vollmerhausen 提出了一个有关 MTF 的压缩 MTF 理论模型<sup>[4]</sup>,该模型认为:欠采样造成的识别性能降低实际上增加了空域中系统的模糊效果,等效在频率域中就反映在 MTF 的压缩或挤压,如图3所示,于是可以通过给 MTF 加上一个压缩因子来反映采样的影响,该因子的大小取决于虚假信号、失真和混叠的程度。

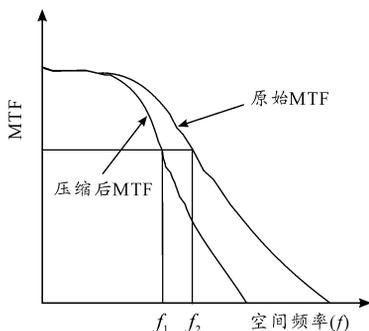


图3 调制传递函数的压缩

(2) 图像捕捉系统通常包含光学成像系统和探测器阵列,采样过程可以是线性的,但它不是移不变的,因而产生欠采样噪声。无法用系统 MTF 描述的成像效应,一些研究者用固定图形噪声来描述采样造成的图像品质下降<sup>[5]</sup>,就是将欠采样引起的图像退化现象作为图像噪声来处理。

(3) 上述两种描述欠采样成像的方法在一定范围内解决了目标识别性能的问题,只是从一个侧面反应了成像系统的图像退化效应,但不能很好的描述欠采样过程,其次是 MTF 压缩理论在仿真建模中不容易实现。

本文从成像系统采样原理着手,直接模拟采样过程,将模拟连续的输入场景经过焦平面的采样过程直接将场景离散化为每一个像素点,这正是采样原理的直接过程。分析成像系统的焦平面采样过程可知,光学系统将场景成像于焦平面处,焦平面上的成像器件正是由一组阵列象元组成,于是连续的物平面场景就离散为焦平面的像。因而,我们同样可以近似模拟这一过程,利用靶标生成器产生模拟连续的输入场景,然后经过所谓的采样过程,把输入场景离散为以像素为单元的像平面。

在系统的仿真设计中,要根据焦平面组件的物理参数,即象元的尺寸和象元间的间距来确定采样的过程,具体的办法可以控制采样间隔来描述成像器件的分辨率,图4~7给出了以像素为单位的采样间隔模拟采样过程的效果图。

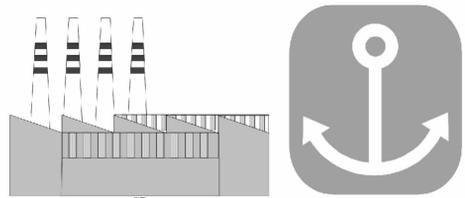


图4 采样前原图

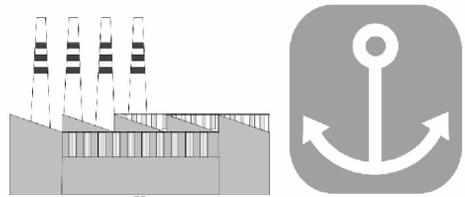


图5 采样步距2

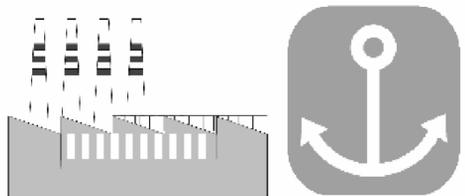


图6 采样步距4



图7 采样步距8

从效果可以看出在采样之前的原图中代表高频部分的纹理脉络部分很清晰,在采样步距为两个像素时纹理基本上看不到了,只是变成了小的竖条纹;再随着采样步距的增大,如图6和图7物体边缘部分开始模糊,并出现类似马赛克现象的模糊不清。因而用这种直接模拟焦平面采样的方法不仅在理论和逻辑上很合理的,同时,在实际仿真效果上也是令人满意的。

### 1.2.3 噪声模糊

各个组件引入的噪声是一个不可避免的问题,它是系统图像退化的主要原因之一,影响系统的外场性能预测。采用不同成像技术的红外成像系统其噪声来源又不尽相同。

从性质上讲,系统的噪声通常可分为两类:加性噪声和乘性噪声,要准确模拟系统噪声对图像质量的影响,应分别对加性噪声和乘性噪声进行建模分析。本文采用了三维噪声模型<sup>[6]</sup>和线性函数相结合的方法对系统的加性噪声和乘性噪声进行了建模仿真。

对于焦平面成像系统而言,三维噪声模型(在很多文献中已有介绍,本文不再重复)中 $\sigma_{th}$ 和 $\sigma_{ih}$ 是主要的噪声形式,实际上传统的NETD值就是 $\sigma_{th}$ ,根据FLIR92默认值 $\sigma_{ih} = 0.4\sigma_{th}$ 。因而在实际仿真计算模型中,基于测量噪声分量NETD或 $\sigma_{th}$ 的噪声模拟可由

$$N = \frac{255}{\Delta V_{\max} - \Delta V_{\min}} NETD \cdot SiTF \quad (3)$$

表示。其中 $N$ 为模拟的像素灰度值随机数范围,NETD为理论计算或实验室测量噪声等效温差, $SiTF$ 为热成像系统的信号传递函数。

噪声图像模拟步骤:

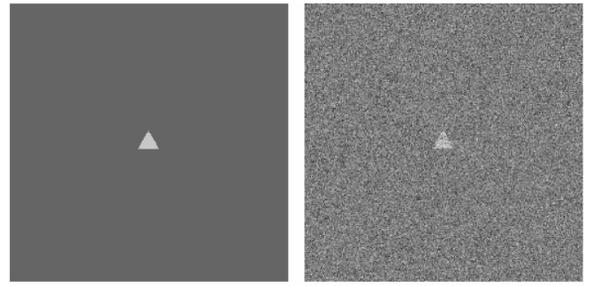
(a) 首先根据红外成像系统的参数,计算噪声等效温差NETD,或利用已知的系统NETD值;

(b) 依据成像系统的帧频和视场的象素数目,生成一组与 $\sigma_{th}$ 有关的随机数,模拟生成噪声图像序列;

(c) 利用象素处理的方法,将得到的系统总噪声图像与空间调制输出的红外图像序列进行象素相加,得到初始的图像数据;

(d) 依据红外成像系统的灰度范围拉伸量化(c)中的数据,得到最后的仿真图像。

图8(a)为理想的原图,对于凝视型红外成像系统,各个探测器元响应都是不一致的,表现为随机和固定图案噪声,如图8(b)所示。



(a)原图

(b)系统噪声引起的降质图 $\sigma_{inh}=1$ 

图8 噪声图像仿真效果

### 1.2.4 仿真平台的合理性验证

为了验证该凝视红外成像系统仿真的合理性,设计并仿真了标准四杆靶图案。并按照经典测试理论产生了MRTD曲线,如图9所示;同时,根据实验室现有条件,利用武汉凯尔文的红外成像系统性能参数测试系统测量了待测热像仪的相关性能参数,并拟合了MRTD曲线。

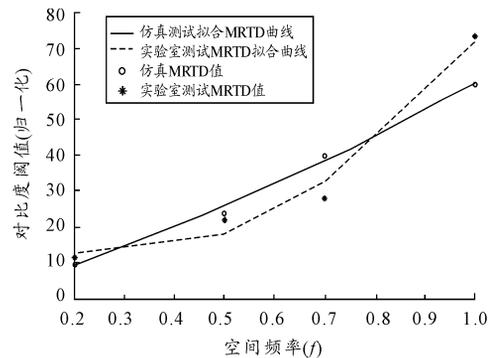


图9 实验室和仿真平台 MRTD 曲线

可以看到根据本仿真系统测量的MRTD曲线跟实验室条件的测量结果有较好的一致性,满足了设计要求。

## 2 不同背景温度下的分辨性能分析

我国地缘广阔、南北跨度大以及四季温差变化大等诸多因素造成了热成像系统的应用环境复杂多变,因而有必要分析研究热成像系统在不同环境下的使用性能,本文主要考虑背景温度对热成像系统的分辨力性能的影响。依据仿真平台测试了热成像系统在不同的环境背景下的可探测识别性能,仿真结果见图10。

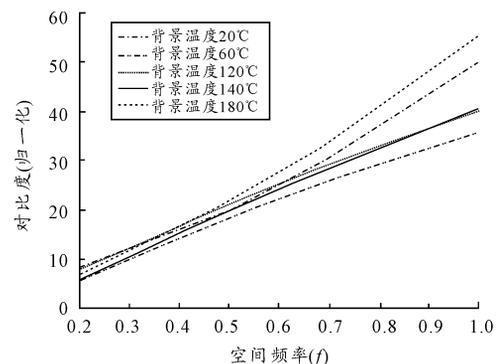


图10 不同环境应用对 MRTD 值的影响

图中绿实线是背景灰度(由背景温度归一化到图像灰度)为 20 时的 MRTD 曲线,短划线、点划线、红实线和虚线分别是背景灰度为 180、120、140 和 60 时的 MRTD 曲线。从图中可以看出在探测、识别大目标,即小空间频率物体时,在各背景温度下的 MRTD 值大小基本相同,但随着空间频率的增大 MRTD 曲线变化趋势虽然相同但变化速率却有明显的差异。仔细分析之后发现,在背景温差在 20 和 180 时随着空间频率的增加 MRTD 值变化更快,且有较大的 MRTD 值,在背景温度为 120 和 140 时次之,在背景温度为 60 时 MRTD 曲线变化最缓慢,且有最小的 MRTD 值。

在大多数的非制冷热像仪中其性能指标都是在 300 K 时的指标,即在环境温度 25 摄氏度左右是最佳的工作温度。而 300 K 的背景温度即对于仿真平台中背景灰度值 100,可以发现 MRTD 值是以背景灰度 100 为中心,不论是背景灰度的增大或是减小,待测试成像系统的 MRTD 值都比较大,因而可以推断热成像系统都有一个最佳的工作温度,随着使用环境的改变都会影响其识别性能。产生这种现象的原因可能是跟人的视觉敏感性有关。

在以上的讨论中,是假定现有的热成像系统没有应用复杂的数字图像处理,但是随着硬件电路的增强使得在实时性成像系统中应用数字图像处理不再没有可能,数字图像处理的应用不仅解决图像畸变、非线性响应和噪声消除等,而且可以图像增强与拉伸,根据人们需要进行感兴趣部分特征提取等。通过外加温度稳定装置和数字图像处理充分满足人的视觉需要,就可以不考虑使用环境的变化。

### 3 结论

根据线性滤波理论和作用系统非线性响应物理过程模拟建

(上接第 103 页)

### 3 其他配套功能

整套数控系统只需要一组 24VDC、5A 型西门子公司的直流开关电源,采用隔离变压器为该开关电源滤波供电 AC 220V 确保数控系统电源的质量。

有 PC 计算机 Windows XP 等平台支持,安装 801 型数控系统提供的 Winpcin 通讯文件,通过通讯电缆与系统接口可实现系统与 PC 机之间程序和系统内容的双向传输,为用户在线加工提供回路,为系统批量调试和系统维护提供保证<sup>[1,2]</sup>。

801 型数控系统使用简体中文操作菜单,全数字控制键盘,系统内存 128KB 的零件程序存储区,编程标准 DIN66025,系统配置有常用的加工沉孔、螺纹等标准循环程序;系统软件具有直线插补、圆弧插补、螺纹加工、刀尖半径补偿、反向间隙补偿、零点偏置等功能;手动、自动、MDA 等 6 种基本工作方式的功能方便用户对系统的有效操作和管理<sup>[1-2]</sup>。

DORNA 系列驱动器参数通过 5 个 LED 数码管和 4 个按键“MOD”(模式选择/取消)、“←”(字符移位)、“↑”(0-9 循环增加)、“SET”(确认)组合完成驱动器参数设置、运行状态及报警等显示<sup>[3]</sup>。

立了热成像仿真系统,并通过仿真实验发现成像系统在不同的应用温度背景下有不同的分辨率性能,虽然还有待进一步实地验证,但对以后的实验和研究是有帮助和有益的。

### 参考文献:

- [1] 王晓蕊. 红外焦平面阵列成像系统建模及 TOD 表征方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2005.
- [2] 刘启忠. 红外热成像与微光技术(第一版)[M]. 武汉:海军工程大学,2007.
- [3] 崔洪州,孔渊,周起勃. 基于畸变率的图像几何校正[J]. 应用光学,2006,27(3):183-185.
- [4] Richard Vollmerhausen. Influence of sampling on target recognition and identification [J]. Opt. Eng., 1999, 38(5): 763-772.
- [5] 迟学芬,于银辉,易志栋,等. 互信息量用于采样成像系统的评价[J]. 长春邮电学院学报,2001,19(4):24-28.
- [6] Schloss Kressbach. Minimum temperature difference perceive a new approach to assess undersampled thermal imagers [J]. Opt. Eng., 1999, 38(5): 773-781.
- [7] 陈国凯,李劲松,卢经纬. 成像系统焦深延拓的方法研究进展[J]. 激光杂志,2011(4):48-49.
- [8] 王真胜,马飒飒,宋伟. 红外热像仪外场性能测试系统[J]. 兵工自动化,2011(11):63-67.

(责任编辑 周江川)

### 4 结束语

我们集成西门子 801 型系统配套国产 DORNA 驱动器和国产伺服电机构成数控系统只是众多驱动器产品接口 801 型系统的一种品牌产品。该品牌产品能满足车床用户对系统功能、驱动需求等的通用要求,已成功应用到数十个机床用户,为简易车床装配提供了国内最经济实用的优选品牌数控系统。

### 参考文献:

- [1] SINUMERIK 801 安装调试. 北京:西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团运动控制部, 2005.
- [2] SINUMERIK 801 操作与编程. 北京:西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团运动控制部, 11/2005.
- [3] DORNA 交流全数字伺服驱动器 EPS 系列基础技术手册. 杭州:浙江东能电子科技有限公司.
- [4] 景富军. 基于西门子 802C baseline 数控系统的集成[J]. 兵工自动化, 2009, 28(2): 76-77.

(责任编辑 周江川)