

红外图像序列中不均匀背景消除新方法

刘火平^{1,2,3}, 孟维平^{2,4}, 宋立维⁵, 刘 扬^{1,3}, 吴钦章^{1*}

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209, E-mail: ccliuhuoping@163.com;

2. 新疆 63610 部队; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;

4. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710126;

5. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 从红外相机自身特性和使用角度两方面对靶场红外图像序列中不均匀(花纹)背景产生的原因进行了剖析, 分析了传统红外图像非均匀校正算法在处理靶场序列红外图像上的优缺点, 提出在目标跟踪过程中随着场景变化, 基于实时线性标定的非线性红外图像的校正的新方法, 克服了传统方法的弊端, 实时确定了校正增益系数和校正因子, 消除了序列红外图像中不均匀背景。通过对含有弱小目标的靶场实际序列红外图像进行仿真验证表明, 新方法去除了图像固定图案噪声, 消除了探测器坏元的影响, 输出了理想的序列红外图像。

关 键 词: 红外图像; 线性标定; 非均匀性校正法; 校正增益

中图分类号: TP391.4; TN919.8; O235

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122704.0539

New Method for Eliminating Non-Uniformity Background of IR Images

LIU Huo-ping^{1,2,3}, MENG Wei-ping^{2,4}, SONG Li-wei⁵, LIU Yang^{1,3}, WU Qin-zhang^{1*}

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences,

Chengdu 610209, China, E-mail: ccliuhuopin@163.com;

2. Army of Xinjiang 63610, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Xidian University, Xi'an 710126, China;

5. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physic, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: This article takes apart the reason which a serial of the IR images comes into being non-uniformity(speckle) background in the light of the characteristic and using of IR camera. It analyses the merit and defect on traditional non-linear correction methods dealing with a serial of the IR images on the shooting range. It puts forward the new method of non-linear correction of IR images based on the linear calibration in real time serving background changing in course of tracing targets. The new method overcomes traditional abuse and obtains real-time coefficient of gain correction and correction factor. It eliminates non-uniformity background of a serial of the IR images. The experimental results using puny targets of a serial of the IR images on the shooting range shows that the new method not only wipes off the noise of the fixed-pattern and eliminates bad-cell of sensor, but also outputs a serial of the perfect IR images.

Key words: IR images; linear calibration; non-linear correction; gain correction

收稿日期: 2012-02-20; 修订日期: 2012-04-04

基金项目: 国家 863 计划项目(No. 2006AA703104)

作者简介: 刘火平(1968-)男, 湖南隆回人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事目标光学跟踪测量及信号处理等方面研究。

* 通讯联系人, E-mail: wuqzh@163.com

1 引 言

近年来红外图像监视与跟踪系统在靶场得到了广泛的应用,并且在多次使用中取得了很好的使用效果。尽管如此,这些红外系统所获取的红外图像序列却饱受诟议,因为获取的几乎所有红外图像均存在“西瓜皮”似的花纹背景(见图 1(a)、(b)、(c)),使得图像的清晰度、对比度、观赏性大打折扣,目标也几乎被淹没在图像的背景中而不可见。这是由于红外成像系统所采用的红外焦平面阵列技术的非均匀性问题导致的。多年来,非均匀性问题在红外焦平面阵列成像的研究中非常突出,极大地限制了红外成像系统性能,为解决此类问题,众多文献提出了许多非均匀性校正算法^[1-4],但在处理靶场目标跟踪的红外图像序列时始终效果不明显。本文将对此进行分析,并在此基础上提出解决方法,再进行仿真计算。

2 花纹背景产生的原因

根据红外数字图像的一般算术描述和非均匀性一般校正算法可知,红外成像背景不均匀、产生类似“西瓜皮”花纹的因素有多种:器件自身的非均匀性,器件使用过程中的工作状态变化引入的非均匀性与外界输入相关的非均匀性等。

2.1 相机自身非均匀性原因

相机红外器件自身的非均匀性是红外图像非均匀性的主要组成部分。

目前靶场使用的红外相机均为 $N \times M$ 单元红外焦平面阵列(IRFPA),探测器单元数目在万元以上,且自带信号读出电路(ROIC)。红外探测器的实测输出则是光学系统、红外敏感元件、读出机构、半导体特性以及放大电路等各种因素综合的结果,而且红外焦平面阵列成像技术由于放弃了放大器与探测器单元逐一对应的工作模式,对于输出的非均匀性实际上无法找出是由于阵列单元的哪一部分响应非一致性影响而造成的。而且由于许多无法控制的因素和工艺水平的限制,如硅材料本身的质量造成的非均匀性是无法改变的;同时生产工艺中造成的探测单元沟道掺杂浓度不均匀、表面态密度分布不均匀以及栅氧化物厚度不同造成的开启电压不同和光敏元有效面积不同,使得每个光敏元的响应率不可能完全一致;并且每个光敏元的直流偏置也不同。这种响应和

偏置的非均匀性,表现为暗电流及光电响应的非均匀性,使成像系统即使在均匀背景照射下输出的图像亮度也不一致,出现许多亮斑或条纹,即红外焦平面探测器中各探测单元辐射响应随空间位置发生变化,这就导致了红外焦平面阵列的非均匀性(NU),也称为空间噪声、固定图案噪声。这种非均匀性使得系统的温度分辨率下降,使目标图像的质量受到严重影响^[5-6]。

2.2 相机使用过程中的原因

在红外相机成像和红外辐射特性测量过程中,为克服不同红外探测器单元响应差异而引入红外图像产生空间不均匀现象,一般都要进行非均匀性校正。下面将先对非均匀性校正算法在靶场的适应性进行分析,而后对靶场实际工作状态变化及外界输入等原因导致的不均匀现象进行分析。

2.2.1 非均匀性校正的一般算法

解决红外图像的非均匀性问题的主要技术途径是利用现代信号处理技术对红外焦平面器件的非均匀性进行实时校正。因此对高像质的红外成像系统来说,非均匀性校正技术是关键图像处理技术之一,同时也是和红外成像仪本身的结构特征结合最紧密的图像处理技术。为处理红外图像的非均匀性问题,输出高像质的红外图像,许多文献提出了多种图像处理和校正方法^[7-14]。这些方法基本可以分为两类:基于参照源的线性校正技术(例如一点校正、二点校正和多点校正算法等)和基于场景的非线性校正技术(例如场景统计法、神经网络法和滤波法等)。

2.2.1.1 线性校正方法

基于参考源的线性校正技术是目前已经实用化的技术,但它要求在特定温度的黑体均匀辐射下,对红外焦平面阵列定标,通常使用两点定标技术或多点定标技术,即两点温度定标法、多点温度定标法。技术上来说线性校正相对非线性校正更加成熟,而且线性校正可以解算未知辐射源的温度,得到较为准确的量化结果,因此,目前在商业上有推广价值的和在军事上能够实用的还是两点线性校正法和多点线性校正法。目前靶场对红外探测器非均匀性校准的主要方法正是两点温度线性定标法,而且利用该方法可以测量目标的红外辐射特性。

线性校正技术的前提条件是在一定的工作范

围内,传感器的每个像素的响应工作于线性区。在理想条件下传感器固定位置像素的增益和偏移量是一致的,应用两点线性校正方法可以校正像素的非均匀性,该线性校正算法是基于增益和偏移参数实现的。校正方程为:

$$y_{ij} = G_{ij}x_{ij}(\phi) + Q_{ij} \quad (1)$$

式中 G_{ij} 和 Q_{ij} 分别为增益校正因子和偏移量校正因子, $x_{ij}(\phi)$ 为校正前的输出。

然而由于传感器的成像特性(像素间光电响应的非均匀性决定了传感器中存在如散粒噪声、热噪声、电荷转移噪声、读出噪声等各种噪声,暗电流、量子效应、材质结构等局部差异性,以及定标与校正使用的时间差异等),使得各像素对于相同的辐照度产生的灰度值并不相同,甚至有较大的差异。所以在传感器的线性工作范围外,各像素的响应不再是线性的,利用线性校正非均匀性得到的结果不再准确,这就需要对系统进行周期性的重复定标以消除参数漂移的影响,这就相应地增加了系统的复杂性,降低了系统的可靠性和响应速度。

2.2.1.2 非线性校正方法

基于场景的非线性校正方法可以省略参考辐射源,不需黑体标定,而是根据场景的运动,在每个像素上产生场景温度的变化,这些温度变化依次提供统计参考点,依照这些参考点,探测器的非均匀性响应就可以被校正。这可使系统得到简化,提高系统的稳定性,而且可以有效地消除参数特性漂移的影响,实现高精度、大动态范围的自适应非均匀校正。基于场景的算法基本上有如下特点:(1)不需要预先对各探测元进行参数标定,并且能对外部环境的改变根据输入非均匀图像的特性进行自适应校正,实现系统简洁;(2)处理对象往往是时域上连续的图像序列,因此算法执行要考虑硬件设备存储容量和处理速度。基于场景的非线性校正算法主要有基于全局的非均匀性校正算法、时域高通滤波算法和神经网络算法等。

采用高通滤波器的方法可以实现非均匀性校正,还能够达到突出目标的目的,不过该算法依赖于目标的运动,它只保留在图像上不断移动的物体,包括抖动的斑点目标,以及时域高频噪声,而当目标在连续多帧移动很小的情况下,如果选择了较小的时间常数,即较少的累加帧数,可能会滤去静止背景甚至目标,所以对于有闪烁的坏点和

跟踪稳定(目标在视场中移动很小)目标时,高通滤波法对于靶场目标跟踪情况不适用。

神经网络算法是稳定和收敛的,但其缺点也比较突出:(1)计算量大,实时实现有困难;(2)结构复杂,硬件实现有困难;(3)因采用迭代运算,其收敛性需要小心保证;(4)与时域高通滤波算法相类似,这种方法同样要求视场内的景物作随机运动,否则会引起图像退化;(5)对于空间频率低的非均匀性效果不明显。而且当前尚未设计和制造出处理元件数和红外焦平面阵列的光敏元数相等的神经网络芯片。

全局非均匀性校正算法近几年来在靶场也得到了应用,不过仅限于只须得到目标图像的应用中。下面介绍基于全局的非均匀性校正算法。

设图像大小为 $m \times n$, 图像像素记为 $X(i, j)$, 灰度级变化范围为 $0 \sim L$ 。计算图像每一行的平均灰度值 $\bar{R}(j)$, 图像的平均灰度为 \bar{X} , 变换后的灰度值 $Y(i, j)$ 。公式如下:

$$\bar{R}(j) = \frac{\sum_{i=0}^m X(i, j)}{m} \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^m X(i, j)}{m \cdot n} = \frac{\sum_{j=0}^n \bar{R}(j)}{n} \quad (3)$$

$$Y(i, j) = X(i, j) \cdot \frac{\bar{X}}{\bar{R}(j)} \quad (4)$$

通过这种方法,将各行的平均灰度有效地归一化到了全局平均灰度值 \bar{X} 上,由于舍入误差,最多偏移不会超过 $1/256$ 级灰度级。

基于全局考虑的非均匀校正算法可直接对原始图像进行全局非均匀校正,不必使用均匀温度场的标定参数,校正效果良好,而且简单易行,几乎无硬件软件的限制,对某些场景可与传统的两点法相媲美。但是,该方法也存在着较大的局限性,使用前提是图像上下部分没有非常明显的大块亮暗变化区域,或者图像本身的背景就较为干净,否则会造成亮度信号失真;同时该算法会削弱信号强度,它无差别地将非均匀性、噪声和信号一同平均了,使用不当会增加人为的图像噪声。

2.2.2 工作状态变化及与输入相关形成的非均匀性

目前靶场在对目标进行红外辐射特性测量时,校正时一般用线性方法;当只需要得到目标图像时,也常用线性法,但近年来非线性校正算法也

得到了较为广泛的应用。

靶场所用的线性非均匀性校正方法都是两点温度线性定标法,使用的参照源是实验室用的均匀黑体,定标方法是实验室评估采用的 MRTD (最小可分辨温差)方法:即在校正之前定标,获取非均匀性校正的数据(校正因子或校正后的视频信号),再在校正实现过程中读取这些数据或作相应的运算,就完成了对非均匀性的校正,这也是定标非均匀性校正的两个基本步骤。红外图像经过校正处理后,其质量一般会得到提高,图像的视觉效果也可能被改善。

MRTD 的优点是一种面向应用的评价方法,使用两点温度线性定标法在实验室对红外相机的评价也比较理想,但 MRTD 同时也是一种主观的方法,受环境因素和评价者的主观因素影响。且实际上靶场环境是不可能与实验室一致的,野外条件下温度变化速度、湿度及其变化、风力、空气洁净度等都与实验室差异甚大,各方面的影响都无法估计,使得红外相机在靶场应用时的工作状态与非均匀校正时的状态发生较大改变,同时目标与背景信号的输入也在发生较大的变化,诸多因素造成了成像质量的下降,使得校正后红外图像仍然会存在一些视觉缺陷,如图像的对比度不高,视觉效果模糊;同时无效像元引起的图像斑点,用校正的方法是无法消除的。因此,在实时校正算法研究的基础上,对图像需要进行再处理,以得到较高品质的图像。由此可见定标法校正运算速度快,但长时间工作需要重新定标。当工作状态与定标时相比较,发生了较大的改变,则必定引入红外图像的非均匀性问题。

靶场使用基于全局考虑的非均匀校正算法时,选择标定的时间一般都在目标跟踪前 1 h 左右进行,方法是对仰角较高的天空拍摄数帧图像,再根据在任务中场景的运动在每个像素上产生的温度变化,由此提供统计参考点,对探测器的非均匀性响应进行校正。但由于靶场目标飞行时间较长,且目标在飞行过程中背景不断在变化,而且随着目标物理特性(如燃烧、距离太阳的远近等)的变化,背景温度变化进一步加剧,导致定标温度与使用时环境温度相差过大,使用过程中又不可能再次进行定标,结果同样难以达到非均匀性校正的目的。

3 背景消除新算法及仿真计算

3.1 背景消除新算法

由于目前处理的主要是图像,不涉及辐射特性测量,采用基于参照源的两点定标法过程长、操作复杂;而基于全局的非均匀校正算法对图像本身的要求又太严格。为此,本文在参考基于全局的非均匀性非线性校正法基础上,考虑结合线性定标法的校正算法,对图像序列进行非均匀校正,形成一种新改进的基于全局的非均匀性校正算法。

为了克服飞行过程中经历的背景变化造成的非均匀性影响,改进算法中用于校正的场景将随着目标跟踪的运动过程实时确定:即跟踪开始前数分钟对高仰角洁净天空采集 1 帧或数帧作为标定初始值,但在设备跟踪目标过程中,该标定值将随着跟踪的进行和背景的更新而更新,即标定值采用前一帧(或数帧)的原始图像灰度值(平均灰度值);同时,不再针对全局平均灰度值来校正,而是针对全图像中的各点分别进行相应校正。这样,随着背景温度变化,图像中各点的场景标定值同时更新,相当于随着目标跟踪的进行在不断进行标定,这样即时标定即时进行非均匀性校正,克服了传统线性校正方法中因温度变化引入的工作状态改变带来的非线性误差,也克服了传统非线性校正方法中对原始图像本身不能剧烈变化的要求。

算法所述如下:

假设探测器的响应输出为 $x(k)$,增益补偿后变为 $x'(k) = G_x(k)$,考虑非均匀性校正后输出偏移量为 $f(k)$,则校正后的输出 $y(k)$:

$$y(k) = Gx(k) - f(k) \quad (5)$$

在这里, G 为增益补偿系数,为前后两帧全局平均灰度值的比值(或本帧与前一帧直至前 $p+1$ 帧全局灰度值的总平均值之比),算法如下:

$$G = \frac{\bar{X}(k)}{\bar{X}(k-1)} \text{ 或 } G = \frac{\bar{X}(k)}{R(p)} \quad (6)$$

其中,

$$(q = k - p - 1, k - p, k - p + 1, \dots, k - 1)$$

式(5)中 $f(k)$ 的确定方法如下:

开始跟踪前,连续采集 p 帧图像,取 p 帧图像中每一像素点上灰度值的平均值作为各像素点 $f(k)_{(i,j)}$;

跟踪开始后,根据相机输出原始图像每个像素上的灰度值与前一帧原始图像的背景部分相应像素上灰度值作差(或前 p 帧原始图像背景部分各像素点上的平均灰度值),当差值在某一门限值内时,即认为该部分仍为背景,当超出门限值时,即认为是目标,保留目标,即目标区各像素点上 $f(k)_{(i,j)} = 0$, 而背景区各像素点上 $f(k)_{i,j} = x(k-1)_{i,j}$ 。

之所以采集连续 p 帧图像,通过时间域平均,是因为噪声是时间域无关的前提,以尽量抑制校正定时噪声的影响,取得较好的校正效果,这在理论上可以提高信噪比 \sqrt{p} 倍。

3.2 试验结果

由于改进后的基于全局考虑的非均匀校正算法需要对每一像素点进行灰度值计算,计算量明显加大,为保证计算顺利进行,实验采用 DM6446

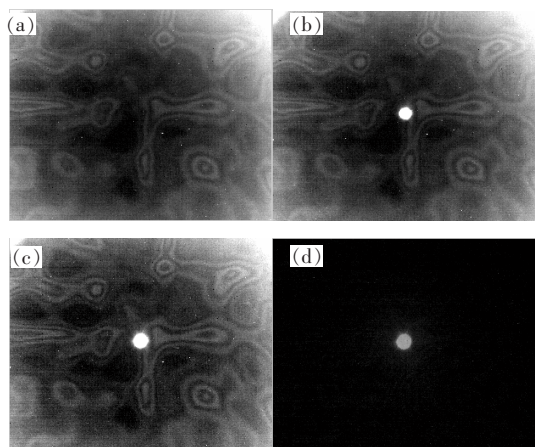


图1 (a)背景图,(b)原始第 $(k-1)$ 帧图像,(c)原始第 (k) 帧图像,(d)校正后第 (k) 帧图像。

Fig. 1 (a) Background image, (b) Original image of the $(k-1)$ frame, (c) Original image of the (k) frame, (d) Corrected image of the (k) frame.

开发板进行仿真。试验用图像源为靶场目前正在用的某红外设备某次跟踪目标的图像序列。试验计算结果如图1所示。

在图1中,(a)为跟踪开始前背景图,(b)为设备原输出第 $(k-1)$ 帧图像,(c)为设备原输出第 (k) 帧图像,(d)为经过校正后的第 (k) 帧图像。由(d)图可以看出,“花纹”背景(包括图像中的坏点)已经消除,而目标亮度虽有减弱,但其形状(甚至包括亮目标产生的光芒)输出没有任何改变,而且与周边的背景的对比更加明显。

4 结 论

红外探测器是红外成像系统的关键部件,也是靶场目前执行任务的重要设备,但红外图像的非均匀性直接影响系统的成像质量,导致其适用性屡受质疑。因此解决非均匀性校正成了非常迫切的问题。尽管现在有多种技术手段来解决红外图像的非均匀性问题,但用这些方法来处理靶场目标跟踪的红外图像序列时效果始终不理想,虽历经多次试验,“西瓜皮”样式花纹的背景依旧。本文通过对比红外图像非均匀性校正算法中传统的线性校正和非线性校正方法的优缺点,提出在目标跟踪过程中随着场景的变化实时确定增益系数和校正因子,用基于全局非均匀性校正方法结合线性校正方程,形成了新的基于全局的非线性校正算法,克服了传统线性校正方法中因温度变化引入的工作状态改变带来的非线性误差,也克服了传统非线性校正方法中对原始图像本身不能剧烈变化及上下部分不能有大的差异的要求。通过对实际目标跟踪红外图像序列仿真验算,验证显示新校正方法彻底消除了红外图像序列中的花纹背景,且基本消除了探测器本身坏点的影响,输出了比较理想的目标红外图像。

参 考 文 献:

- [1] 胡贵红,陈浅,沈晓燕. 红外焦平面探测器响应非线性的测定 [J]. 光电子 激光, 2003, 5(14): 489-492.
- [2] 刘妍妍,李国宁,张瑜,等. 可见光面阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(5): 759-763.
- [3] 马云,胡军. CCD 成像单元仿真系统的实时显示方法研究 [J]. 液晶与显示, 2009, 24(6): 922-928.
- [4] 桑红石,袁雅婧,张天序. 基于运动指导的红外焦平面非均匀性校正方法 [J]. 中国图像图形学报, 2011, 16(9): 1577-1582.
- [5] 吴军辉. 红外成像系统图像空间噪声分析与估计 [J]. 红外技术, 2001, 23(5): 19-22.
- [6] 周建勋. 红外图像非均匀性产生原因分析 [J]. 红外与激光工程, 1997, 26(3): 11-13.

- [7] 刘志才, 李志广. 红外热像仪图像处理技术综述 [J]. 红外技术, 2000, 22 (6): 27-32.
- [8] 简耀波. 红外图像处理中的关键算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2009.
- [9] 刘会通. 红外焦平面阵列剩余非均匀性的测试和检验 [J]. 激光与红外, 1998, 28 (5): 305-307.
- [10] Qu Hui-ming, Chen Qian, Gu Guo-hua, *et al.* A general Image and evaluation system for infrared imaging [J]. *Processing Algorithm Demo Proceedings of SPIE*, 2007, 6279: 627936(1-7).
- [11] Sui Jing, Jin Wei-qi, Dong Li-quan, *et al.* A new nonuniformity correction algorithm for infrared line scanners [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6207: 62070Y(1-8).
- [12] Tomes S N, Vera E M, Reeves R A, *et al.* Adaptive scene-based non-uniformity correction method for infrared-focal plane arrays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5076: 130-139.
- [13] Duykers G L. Test result of a “factory” calibration technique for non-uniformity correction of an Insb infrared system [J]. *SPIE*, 1997, 3036: 208-213.

包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	名称	符号	SI 导出单位
			用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	1 rad = 1 m/m = 1
立体角	球面度	sr	1 sr = 1 m ² /m ² = 1
频率	赫[兹]	Hz	1 Hz = 1 S ⁻¹
力	牛[顿]	N	1 N = 1 kg · m/S ²
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pa	1 Pa = 1 N/m ²
能[量], 功, 热量	焦[耳]	J	1 J = 1 N · m
功率, 幅[射能]通量	瓦[特]	W	1 W = 1 J/S
电荷[量]	库[仑]	C	1 C = 1 A · S
电压, 电动势, 电位	伏[特]	V	1 V = 1 W/A
电容	法[拉]	F	1 F = 1 C/V
电阻	欧[姆]	Ω	1 Ω = 1 V/A
电导	西[门子]	S	1 S = 1 Ω ⁻¹
磁通[量]	韦[伯]	Wb	1 Wb = 1 V · S
磁通[量]密度, 磁感应强度	特[斯拉]	T	1 T = 1 Wb/m ²
电感	亨[利]	H	1 H = 1 Wb/A
摄氏温度	摄氏度	°C	1 °C = 1 K
[光]通量	流[明]	lm	1 lm = 1 cd · Sr
光照度	勒[克斯]	lx	1 lx = 1 lm/m ²
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	1 Bq = 1 S ⁻¹
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	1 Gy = 1 J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	1 Sv = 1 J/kg