文章编号:1001-5078(2012)09-0989-05 ·红外技术及应用·

基于扫描型红外热像仪非均匀性场景校正算法的实现

于繁迪,孙志亮,夏寅辉,邵 涛
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘 要:通过对某扫描型手持红外热像仪非均匀性的分析,建立了相应的非均匀性数学模型,提出了场景校正算法并在DSP中编程实现。算法采用运动估计与递归最小二乘法相结合的方式,实现了对空间非均匀性的实时校正;采用神经网络与最小均方算法结合的方式实现了对两点校正后残留非线性非均匀性的实时补偿。应用效果表明该算法具有很高的工程价值。

关键词:非均匀性校正;场景校正;非均匀性补偿
中图分类号:TN219 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2012.09.006

Implementation of scene-based non-uniformity correction algorithm in scanning infrared camera

YU Fan-di,SUN Zhi-liang,XIA Yin-hui,SHAO Tao
(North China Research Institute of Electro-optics,Beijing 100015,China)

Abstract:The article analyzes the non-uniformity of scanning infrared camera,constructs corresponding non-uniformity mathematical model,offers a scene-based non-uniformity correction method and implement it by programming on DSP. The method combines movement estimation with recursion least two multiplication to implement real-time space non-uniformity correction. It also combines neural network with least-mean-square to implement real-time compensation of non-linear non-uniformity after two-point correction. The practical results show that the algorithm is valuable in engineering application.

Key words:non-uniformity correction;scene-based correction;non-uniformity compensation

1 引 言

目前,针对如何提高红外图像均匀性的研究很多[1],特别是针对如何解决红外图像非均匀性(NU)漂移的问题尤为集中,但是大多有各自的局限性。特别是对于资源有限的嵌入式运行平台(DSP等),可行的算法很少。

通过对某扫描型手持红外热像仪红外探测器非均匀性的分析,建立了相应的非均匀性数学模型,提出了场景校正算法并在DSP中编程实现。算法分三步进行:第一步、运用两点校正加一点校正的方式,对红外图像进行基本校正,剩余残留的非均匀性;第二步、引入递归最小二乘法[2](RLS)对基于运动场景估计的非均性校正算法[3-4]进行大数据量输入统计的改进,降低了运算的复杂度,更新了相应的校正参数,实现对空间非均匀性的实时校正;第三步、在神经网络校正算法[5-6]的基础上引入最小均方法[2](LMS)从输出图像数据获取补偿参数,既降低了算法实现的难度,提高了算法实现的可行性,又在对非线性非均匀性进行实时补偿的同时,进一步补偿了空间非均匀性。

2 非均匀性分析

扫描型红外热像仪表现出来的非均匀性呈条纹状,且随着探测器探测元数的增多,非均匀性表现得越明显;而且随着系统的老化,图像具有非均匀性大、非均匀性漂移快的特点。

作者简介:于繁迪(1982-),男,工程师,工学硕士,研究方向为红外成像技术。E-mail:hnderby@sina.com
收稿日期:2011-12-01;**修订日期**:2011-12-26

从非均匀性产生原因可以把非均匀性分为固有非均匀性 $P(\varphi)$ 和加性非均匀性 $Q(\varphi)$，$P(\varphi)$ 表示的是由探测元固有特性、光学系统固有特性等产生的非均匀性，$Q(\varphi)$ 表示的是由探测元敏感度变化、光学系统老化、电路特性变化等产生的非均匀性。从非均匀性校正(NUC)的角度，对 $P(\varphi)$ 和 $Q(\varphi)$ 进一步归类，建立如下的数学模型：

第一类是空间的非均匀性 R_{ij}，表现为在同一辐射照度条件下，同一时刻图像的不同像素点所对应灰度值大小不等；

第二类是时间的非均匀性 R_t，表现为在同一辐射照度条件下，在不同时刻图像的同一像素点所对应灰度值大小不等；

第三类是非线性的非均匀性 R_k，表现为对同一辐射照度增量，图像同一像素点所对应的灰度增量值不等。

三类非均匀性可以分别用数学表达式(1)～式(3)表示出来：

$$R_{ij}=P_{ij}(\varphi,i,j)+Q_{ij}(\varphi,i,j) \tag{1}$$

$$R_t=Q_t(\varphi,t,i) \tag{2}$$

$$R_k=P_k(k\varphi,i)+Q_k(k\varphi,i) \tag{3}$$

式中，φ 为辐射照度；i 和 j 为像素位置；t 为时间；k 为比例系数。以上这几种非均匀性相互作用，使得非均匀性校正变得非常复杂。一般认为红外成像系统的非均匀性数学模型是一组由辐射照度、像素位置、时间等组成的复杂的函数[7]，简化后的函数表达式(4)：

$$R=f(\varphi,i,j,t) \tag{4}$$

式(1)～式(4)是简化通用的数学表达式，其具体的数学模型非常复杂，实际应用中难以通过计算和分析得到。但是对非均匀性进行分类，找出复杂数学模型的影响因子，对于非均匀性校正具有很大的作用。

3 非均匀性校正模型的建立

通过对非均匀性数学模型的分析，建立了图 1 所示的基于场景的非均匀性校正模型。

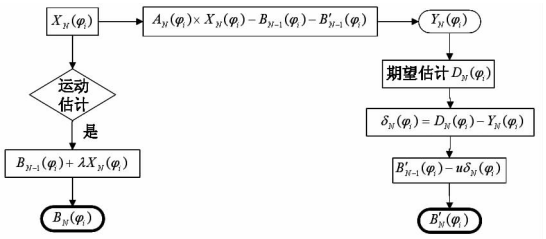

图 1 基于场景的非均匀性校正模型

图 1 中，N 表示第 N 帧图像，$X_N(\varphi_i)$ 表示原始图像数据输入，φ_i 表示第 i 个像素的辐射照度，$A_N(\varphi_i)$ 表示增益校正参数，$B_N(\varphi_i)$ 表示偏置校正参数，$B'_N(\varphi_i)$ 表示偏置补偿校正参数，$Y_N(\varphi_i)$ 表示输出的图像数据，$D_N(\varphi_i)$ 表示期望输出的图像数据，$\delta_N(\varphi_i)$ 表示估计残差，λ 为 RLS 遗忘因子，λ 为 LMS 步长参数。

4 非均匀性校正算法的实现

4.1 非均匀性校正的实现平台

实现非均匀性校正的平台为某型扫描型手持红外热像仪，其采用 288×4 线列型红外探测器，帧频为 25 Hz，分辨率为 768×576，非均匀性校正处理平台为 AD 公司的处理器 ADSP－BF561。基于这样一种帧频和分辨率的应用平台，为了实现实时校正处理，对非均匀性校正各个步骤进行了分解，其具体实现过程如图 2 所示。

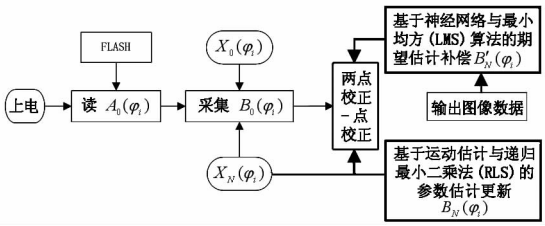

图 2 基于场景的非均匀性校正实现过程

4.2 两点校正与一点校正

两点校正法计算简单，易于实现，不影响系统的实时性，在一定程度上能有效地逼近红外成像系统的非线性的响应曲线，两点定标完成后红外图像残留的非均匀性 R 用数学表达式(5)表示：

$$R=P_k(k\varphi,i)+Q_k(k\varphi,i)+Q_t(\varphi,t,i)+P_{ij}(\varphi,i,j)+Q_{ij}(\varphi,i,j) \tag{5}$$

从非均匀性的表现形式，对式(4)、式(5)进行合并，得到残留的非均匀性 R 用数学表达式(6)表示：

$$R=P_k(k\varphi,i)+Q_k(k\varphi,i,t)+P_{ij}(\varphi,i,j)+Q_{ij}(\varphi,i,j,t) \tag{6}$$

一点校正算法主要针对的是空间的非均匀性，其理想的校正的结果是对同一辐射照度条件下，在同一时刻图像的不同像素点所对应灰度值相等。通过实际系统的试验研究发现，把一点校正算法和两点校正算法结合起来使用，能从一定程度上更好的消除残留非均匀性，而且不影响系统的实时性。经过两点与一点校正后残留的非均匀性 R 用数学表达式(7)表示出来。

$$R = P_k(k\varphi, i) + Q_k(k\varphi, i, t) + Q_{ij}(\varphi, i, j, t) \quad (7)$$

对式(7)残留的非均匀性 R 进行分析可以得出,非线性的非均匀性 $P_k(k\varphi, i)$,$Q_k(k\varphi, i, t)$ 必须随着时间和辐射照度的变化进行非线性自适应的实时调整校正参数,而对于空间的非均匀性 $Q_{ij}(\varphi, i, j, t)$ 则需要对校正参数进行线性的实时调整。

4.3　基于运动估计与递归最小二乘法(RLS)的参数估计更新

空间的非均匀性 $Q_{ij}(\varphi, i, j, t)$ 在红外成像系统具体表现是:热像仪每次上电完成两点和一点校正并经过一段时间的工作后,同一辐射照度经过 $B_0(\varphi_i)$ 校正,不同像素点所对应的灰度值不再相等,校正残差会逐渐加重。因此,需要根据时间的推移,从背景中找出对于所有的图像像素点来说都具有相当辐射照度的情况,实时更新 $B_0(\varphi_i)$ 为 $B_N(\varphi_i)$。

基于场景运动估计的基本思想是:假设在 T 秒时间内,由于场景的移动,辐射照度 $\Phi_I(I = 0, 1, \cdots, n)$ 分别通过探测元 $\Omega_J(J = 0, 1, \cdots, 288)$ 的次数为 K_I,则在时间 T 内经过每个探测元的辐射照度的均值 Γ_J 为式(8)所示:

$$\Gamma_J = (\sum_{I=0}^{n} \Phi_I \times K_I) / (\sum_{I=0}^{n} K_I) \quad (8)$$

式中,如果在统计的时间内,假设每个 Φ_I 都经过 Ω_J 基本相同的次数,且样本 n 足够大,则对于每个 Ω_J 来说 Γ_J 基本相等,即在 T 时间内每个 Ω_J 的辐射照度基本相当,这样便可以实现对 $B_N(\varphi_i)$ 的更新。

这种实现方法是基于两个前提:场景存在变化和每个探测元采样数据(样本数)足够多。由于工程应用中场景变化的条件大部分情况是可以满足的,比如手持热像仪、机载热像仪等使用过程中场景的移动是频繁发生的。但是也会有场景静止的时候,所以需要对场景是否运动进行估计,以减少静止场景在 $B_N(\varphi_i)$ 所占的比重来减少残留的非均匀性。扫描型红外成像系统中一个最大的特点是单个探测元输出的图像信号在每帧图像上会有多次的反应,且每次反应的辐射照度均有差异,这个特点对于针对单个探测元进行大样本的统计具有很大的优势。但是获得足够大的样本需要的时间太长,而且样本数太大会增加计算的复杂度。特别是对于资源相对有限的嵌入式系统编程几乎无法实现,因此需要引入线性自适应算法对此进行优化和改进。采用 RLS 的理由是:RLS 是一种解决线性估计问题的收敛速度快且便于实现自适应算法,其最优估计准则——估计曲线与被估计曲线之差的平方和最小与红外图像均匀性评价准则相似。基本思想是:对于最新到达的样本 $X_N(\varphi_i)$,对过去的 $(N-1)$ 次样本进行加权迭代更新,以获得最新的估计参数 $B_N(\varphi_i)$,如式(9)所示:

$$B_N(\varphi_i) = (1-\lambda)^N \times X_{N-L}(\varphi_i) + \lambda \sum_{K=N-L+1}^{N} [(1-\lambda)^{N-K} \times X_K(\varphi_i)] \quad (9)$$

式中,遗忘因子 $0 < \lambda < 1$,L 为记忆长度即处理的样本数。其具体表现就是,根据指数衰退的原则对所有输入的数据作加权处理,越旧的数据权重越小,越新的数据权重越大,但是过去的数据并没有被完全遗忘掉,仍然对当前的参数估计施加影响。

这种基于运动运动估计以及 RLS 的非均匀性校正成立的前提是场景的理想运动状态,而且为了实现应用的可操作性引入 RLS 来避免由于样本过大、资源有限的限制,这些因素的存在使得该方法虽然在很大程度上能对空间的 NU($Q_{ij}(\varphi, i, j, t)$)进行校正,但是仍然会残留小部分的 $Q_{ij}(\varphi, i, j, t)$,需要做进一步的补偿校正处理。残留 NU(R)的数学表达式由式(7)变为式(10):

$$R = P_k(k\varphi, i) + Q_k(k\varphi, i, t) + \xi Q_{ij}(\varphi, i, j, t) \quad (10)$$

式中,$0 < \xi < 1$。

从图 4 和图 3 的校正效果可以看出,两点加一点校正后的图像,经过 1 h 的工作后,残留非均匀性会明显增大。而从图 5 与图 3 和图 4 的校正比较效果可以看出,经过基于运动估计与递归最小二乘法(RLS)的参数估计更新后,图像非均匀性得到了实时的校正,与两点加一点校正刚完成的时候校正效果相当,但仍有部分残留的非均匀性,需要进一步的处理。

图 3　两点加一点校正后经过的效果

图 4 两点加一点校正经过 1 h 工作后的效果

图 5 采用基于运动估计与递归最小二乘法(RLS)算法校正工作 1 h 的效果

4.4 基于神经网络与最小均方(LMS)算法的期望估计补偿

非线性的 NU(R_k)在红外成像系统中的具体表现是:红外原始图像数据经过 $A_N(\varphi_i)$ 校正后,不同像素点针对同一辐射增量 $X_N(k\varphi_i)$ 所获得的原始图像数据输入不等于 $kX_N(\varphi_i)$,即 $X_N(k\varphi_i) \neq kX_N(\varphi_i)$。在定标完成时刻所表现出来的残留的非线性非均匀性为 $P_k(k\varphi,i)$,定标完成后的时间里所表现出来的残留的非线性 NU 为 $Q_k(k\varphi,i,t)$,因此需要实时更新 $B'_N(\varphi_i)$ 来补偿非线性的非均匀性。

为了对非线性的残留非均匀性进行实时补偿,采用最典型非线性自适应滤波算法——神经网络算法对响应曲线进行逼近,因为神经网络算法理论上能够逼近任意复杂的非线性系统,红外图像相邻的像素点之间具有很强的相关性与神经网络相邻神经元之间的强相关性具有很强的相似性。实现参数补偿的基本思想是:从图像的输出端对残留的非均匀性进行补偿,使得图像的每个像素点与相邻像素点相近。获得补偿参数 $B'_N(\varphi_i)$ 具体实现过程如图 6 所示:由原始输入 $X_N(\varphi_i)$ 设计一个输入层,由

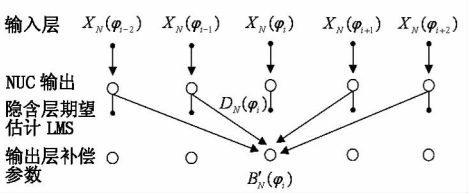

图 6 获得参数补偿的原理框图

$B'_{N-1}(\varphi_i)$ 以及 *LMS* 算法对输出进行期望估计构成隐含层,得到下一帧的补偿参数 $B'_N(\varphi_i)$。

引入 LMS 的原因是:神经网络校正算法需要估计函数对估计残差 $\delta_N(\varphi_i)$ 进行隐层设计来得到输出层的补偿参数;LMS 是通过比较输出结果与期望响应产生的估计误差来自动调整输出参数的最简单的算法,是其他自适应滤波算法的标准;LMS 是线性自适应滤波算法,在一定程度上能进一步对残留的空间非均匀性 $\xi Q_{ij}(\varphi,i,j,t)$ 进行补偿。其实现过程是:计算系统的输出对输入信号的响应,通过比较输出 $Y_N(\varphi_i)$ 与期望响应 $D_N(\varphi_i)$ 产生估计误差 $\delta_N(\varphi_i)$,根据估计误差结合步长参数 μ 自动调整输出参数 $B'_N(\varphi_i)$。

经过补偿校正后,校正曲线进一步逼近实际的响应曲线,残留的 NUC 进一步减少,其数学表达式由式(10)变为式(11):

$$R = \beta P_k(k\varphi,i) + \beta Q_k(k\varphi,i,t) + \alpha Q_{ij}(\varphi,i,j,t) \tag{11}$$

式中,$0<\alpha<\xi<1$,$0<\beta<1$。

图 7 与图 8 分别是采用三步校正初始化完成时和工作 1 h 后的效果,从图像上可以看出,图像不仅残留的非均匀性小,且随着工作时间的推进,图像的非均匀性得到了实时的补偿,校正效果具有长时间的稳定性。

图 7 采用基于神经网络与最小均方(LMS)算法的期望估计补偿后的效果

图 8 采用基于神经网络与最小均方(LMS)算法的期望估计补偿且工作 1 h 后的效果

5 结 论

校正算法采用基于运动估计校正的同时引入RLS算法从原始数据中获取实时校正参数,采用神经网络算法的同时引入LMS算法从输出图像数据中获得补偿更新参数,不仅达到了预期的校正效果,而且降低了算法难度,使基于扫描型红外热像仪非均匀性场景校正算法在DSP中得以实现。解决了两点加一点校正后残留的非均匀性以及随时间漂移而产生的非均匀性,具有重要的意义。该算法对于其他扫描型红外成像系统的非均匀性校正具有很强的应用参考价值。

参考文献:

[1] Zhu Hong, et al. Scene-based non-uniformity correction techniques in focal plane arrays[J]. Journal of Air Force Engneering Univcrsity: Natural Science Edition, 2006, 2(1):46 – 48. (in Chinese)
朱红,等. 基于场景的自适应红外焦平面非均匀性校正技术[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2006,2(1):46 – 48.

[2] Simon Haykin. Adaptive filter theory[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)
西蒙 赫金. 自适应滤波器原理[M]. 郑宝玉,等译. 4版. 北京:电子工业出版社,2003.

[3] Ratlif B M, Hayat M M, Hardie R C. Algebraic scene-based nonuniformity correction in focal plane arays[A]. Proc. SPIE C, 2001:114 – 124.

[4] Guo Yashuang, et al. A nonuniformity correction algorithm based on scene techniques[J]. 2006, 3:13 – 16. (in Chinese)
国亚双,等. 一种基于场景的红外非均匀性校正算法[J]. 红外,2006,3:13 – 16.

[5] Seribner D A, Sarkady K A, Kruer M, et al. Adaptive non-uniformity correction for IR focal plane arays using neural net works[C]//Proc. SPIE, 1991:100 – 109.

[6] Yang Shaolin, Yu Huimin. Scene-based non-uniformity correction algorithm in focal plane arrays[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 7(7): 1150 – 1153. (in Chinese)
杨少林,于慧敏. 基于场景的焦平面阵列非均匀性校正算法研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2006,7(7):1150 – 1153.

[7] Dong Zhengshi, Liu Xiaobo, et al. The mathematical model research for rntrared focal plane arrays nonuniformity[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(3):208 – 211. (in Chinese)
董珍时,刘小波,等. 红外焦平面探测器非均匀性的简化数学模型[J]. 激光与红外,2003,33(3):208 – 211.