

文章编号:1001-9014(2005)05-0335-06

红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法中 目标退化与伪像的消除方法

张天序^{1,2}, 石岩¹

(1. 华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:深入分析了红外焦平面阵列(IRFPA)非均匀性的神经网络校正法出现目标退化和伪像的成因,指出没有考虑目标边缘而盲目更新系数是产生问题的根源.在此基础上提出了防止目标退化和伪像的边缘指导的神经网络自适应校正方法(ED-NN-NUC).仿真实验以及针对实际红外图像的实验结果表明,所指出的问题根源是正确的,提出的方法是合理有效的.

关键词:红外焦平面阵列;非均匀性校正;神经网络校正法;目标退化;伪像

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

ELIMINATING THE "GHOSTING" ARTIFACT AND TARGET FADE-OUT IN ADAPTIVE NONUNIFORMITY CORRECTION FOR IRFPA

ZHANG Tian-Xu^{1,2}, SHI Yan²

(1. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, HUST, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract:The cause of the target fade-out and the ghosting artifact in NN nonuniformity correction scheme for infrared focal plane array (IRFPA) was studied. It was found that ignoring target edge and updating correction coefficients blindly in the NN-NUC scheme were the cause of the problems. Based on this consideration, an edge-directed NN-NUC scheme (ED-NN-NUC) was proposed to eliminate the ghosting artifact and the target fade-out. The comparison experiment with simulated data and real IRFPA infrared data shows that our viewpoint is correct, and the proposed scheme is effective.

Key words:IRFPA; nonuniformity correction; neural networks correction algorithm; target fade-out; ghosting artifact

引言

凝视型红外焦平面成像系统是目前红外成像系统的发展方向.在实际应用中,系统成像质量受器件响应的不均匀性影响严重,必须进行非均匀性校正^[1].目前国内外的IRFPA非均匀性校正方法主要分为基于标定的方法^[2,3]和基于场景方法(也称为自适应校正方法).其中自适应方法由于不要求(或只需要简单)预先标定,根据场景信息自适应地更新校正系数,成为当前该领域研究和应用的热点.而在自适应方法中,神经网络法^[4](NN-NUC)、时域高通滤波法^[4](THPF-NUC)以及常数统计法^[5,6](CS-

NUC)由于计算量较少、内存需求量少、实时性较好,得到了广泛的研究和应用.但是,这3种方法都要求目标处于不断的运动状态.一旦目标趋于静止,则会出现目标退化(fade-out);而当目标运动离开后,又会在原位置留下一个呈反像的“伪像”(ghosting artifact).这种现象不但直接影响视觉效果;并且在成像跟踪系统中可能引起目标丢失和干扰.针对这个问题,Harris和Chiang研究了在CS-NUC方法中消除伪像的策略^[6],该策略同样适用于THPF-NUC方法.然而在NN-NUC方法如何解决这些问题,国内外文献中一直未见有相关的报道.

本文深入分析了NN-NUC方法中出现目标退

收稿日期:2004-10-20,修回日期:2005-06-10

Received date: 2004-10-20, revised date: 2005-06-10

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60135020);国家重点预研项目(413010701-3)

作者简介:张天序(1947-),男,重庆人,华中科技大学教授,博士,主要研究方向为图像分析与智能系统、医学图像处理、机器视觉等.

化及伪像的根本原因,提出了新的去伪像防退化方法.

1 NN-NUC 算法中出现目标退化与伪像现象的原因和消除方法

在人眼的视网膜中,视细胞的响应存在 $\pm 10\%$ 的差异^[7],但这种差异并没有最终导致非均匀性噪声,因此人眼视网膜必然通过了某种复杂有效的方式实现了校正. 尽管目前人眼视网膜的视觉处理过程只是部分为人所知,但生理学和解剖学研究结果表明视网膜中各个视细胞之间是存在着横向联系和反馈回路. Scribner 所提出的 NN-NUC 方法正是模拟了视网膜中这种低层处理的机制,实际上是一个空间平均、时间迭代的过程,其主要步骤如下.

假设 x 是存在非均匀性噪声的图像,经过 NUC 校正单元处理后输出为 y ,对于像元 (i,j) 两者关系为:

$$y_{ij}^n = a_{ij}^n \cdot x_{ij}^n + b_{ij}^n, \quad (1)$$

其中 n 表示第 n 帧图像, a_{ij}^n 和 b_{ij}^n 分别为像元 (i,j) 的增益和偏移校正系数. 像元 (i,j) 期望的校正输出 f_{ij}^n 采用像元 (i,j) 其 4 邻域 y^n 的空间均值,由神经网络中的隐含层计算得到.

$$f_{ij}^n = (y_{i-1,j}^n + y_{i+1,j}^n + y_{i,j-1}^n + y_{i,j+1}^n) / 4, \quad (2)$$

定义误差函数为:

$$e_{ij}^n = [y_{ij}^n - f_{ij}^n]^2 = [a_{ij}^n \cdot x_{ij}^n + b_{ij}^n - f_{ij}^n]^2, \quad (3)$$

则利用最陡下降法对 a_{ij}^n 和 b_{ij}^n 进行更新,得到 a_{ij}^{n+1} 和 b_{ij}^{n+1} ,其中迭代步长为 μ .

$$\begin{cases} a_{ij}^{n+1} = a_{ij}^n - \mu \cdot e_a = a_{ij}^n - 2\mu \cdot x \cdot (y - f) \\ b_{ij}^{n+1} = b_{ij}^n - \mu \cdot e_b = b_{ij}^n - 2\mu \cdot (y - f) \end{cases}, \quad (4)$$

上述 NN-NUC 算法中在得到像元 (i,j) 期望校正输出 f_{ij}^n 时,直接采用其 4 邻域 y^n 空间均值. 对于场景中同一区域内部由于信号在空间上是缓变的,这样得到期望输出是合理的. 但在区域的边缘处,由于信号在空间上剧烈变化,对于紧靠边缘的 (i,j) ,根据式(2)得到的期望输出 f_{ij}^n 则将受到边缘信号的干扰,这种干扰通过公式(4)进一步影响到 (i,j) 的校正系数;在下一帧影响到像元 (i,j) 的校正输出 y_{ij}^n ,通过隐含层的横向联系,这种干扰又传播到 (i,j) 的邻域,进而逐渐扩散开来. 干扰传播的速度(即在每帧中影响的范围)与计算期望输出时所选择邻域的大小成正比,强度与迭代步长 μ 的大小成正比. 同样对边缘上的像元 (i,j) ,通过式(2)计算期望响应来更新校正系数也是不合理的. 这样会使得区域

两边的信号,通过 NN-NUC 过程而互相影响. 即不同区域的信号能量在上述空间平均/时间迭代过程中,通过区域边缘发生了扩散. 当目标相对成像面静止较长时间后,目标将会由于能量的扩散而最终“溶于”背景,即发生目标退化. 考虑一维情况下运动目标的简化模型. 不失一般性假设目标灰度比背景亮,背景灰度为 50,目标大小为 1×7 ,灰度为 $[65, 80, 80, 80, 80, 80, 65]$,红外探测器为 1×128 的线列. 由于实际 IRFPA 的非均匀性噪声空间频率的高、低频成分都有,并且通常是低频占优的. 为模拟这种非均匀性,仿真的 128 个探测元的增益 g 服从 $N(1, 0.06^2)$ 的正态分布,直流分量 o 为:

$$o_i = 10 \times \sin(i \times 2\pi / 127 - 0.5\pi), i = 1, 2, \dots, 128, \quad (5)$$

目标所成的像从 IRFPA 线列的最左边开始,以 1 像元/帧的速度向右运动,持续 60 帧;从 61 帧到 260 帧,目标静止;从 261 帧到 460 帧,目标消失. 图 1 为第 60 帧目标开始静止时未校正的原始信号,图 2 为第 60、160、260 这 3 帧经过 NN-NUC 校正后的信号(步长 μ 为 $1e-5$). 图 3 为第 60、110、160、210、260 这 5 帧的增益校正系数 a (偏移校正系数 b 形状与 a 类似,只给出了像元 50 到 80 部分). 图 4 为第 261 帧目标开始消失时未校正的原始信号,图 5 为第 261、360、460 这 3 帧经过 NN-NUC 校正后的信号. 从图 3 可以明显看出,在目标静止位置相应的 IRFPA 增益校正系数值,随着目标静止时间的增加而不断降低,而目标两侧的校正系数值出现增加,最终在 60 ~ 70 坐标范围内形成了明显的凹陷. 这个凹陷对应的就是静止目标所在的位置,校正系数的这种变化不但严重削弱了目标信号,而且还增强了目标相邻背景信号,使得目标逐渐“溶于”背景. 从图 2 中可以清楚地看到目标退化的过程.

上述校正系数的异常变化所导致的另一个问题

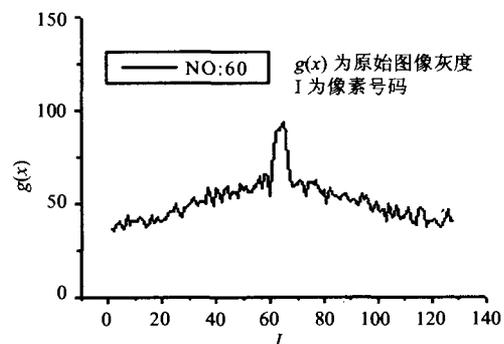


图 1 第 60 帧未校正信号

Fig. 1 Uncorrected signal in the 60th frame

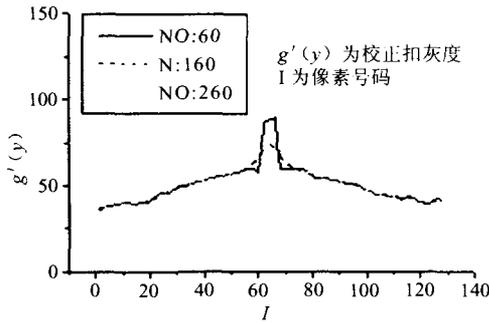


图2 第 60、160 和 260 帧 NN-NUC 校正后信号
Fig.2 Corrected signal after NN-NUC in the 60th, 160th and 260th frame

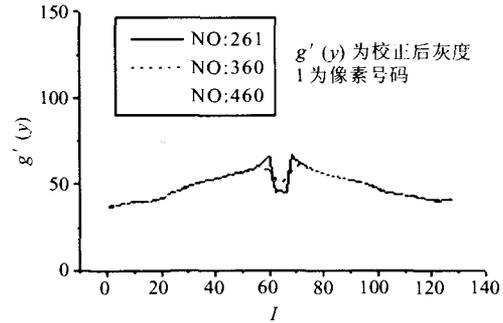


图5 第 261、360 和 460 帧 NN-NUC 校正后信号
Fig.5 Corrected signal after NN-NUC in the 261st, 360th and 460th frame

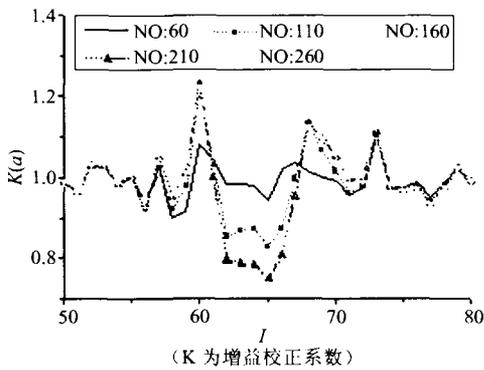


图3 NN-NUC 校正过程中第 60、110、160、210 和 260 帧的增益校正系数(K 为增益校正系数)
Fig.3 Gain correction coefficients of the NN-NUC in the 60th, 110th, 160th, 210th and 260th frame

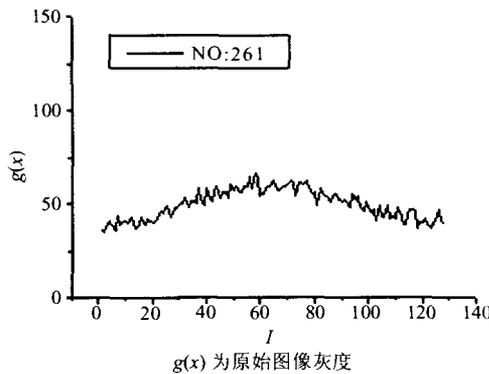


图4 第 261 帧未校正信号(g(x)为原始图系灰度)
Fig.4 Uncorrected signal in the 261st frame

就是伪像.如图 4 所示第 261 帧信号,此时已没有目标,但由于在原静止目标位置的校正系数的异常,使得校正后的信号在此位置出现比背景暗的伪像.随着凹陷区域校正系数的不断更新而趋于正常,伪像也逐渐减弱.从图 5 不难看出,即使经过了 200 帧更新(第 460 帧)信号中仍然存在伪像.

通过上述分析,NN-NUC 方法中出现目标退化

和伪像的根源已找到:即 NN-NUC 方法中没有考虑景象实际边缘,使得目标区域以及其相邻背景区域的校正系数发生了异常更新.这种现象在目标长时间静止以及随后的迅速移开时,表现非常明显.而当目标在像面上不断运动时,由于系数的更新需要时间(更新速度正比与步长 μ),使得上述问题不明显.步长 μ 越大,NN-NUC 越容易出现目标退化和伪像.一个可行的解决方法如图 6 所示.第 n 帧校正后的图像 y^n 经过边缘提取单元,得到第 n 帧二值边缘图像,再利用边缘信息控制期望输出 f 的计算以及校正系数的更新.现考虑第 n 帧的处理过程,为书写方便略去上标 n .令二值边缘图像中的边缘点所构成的集合为 Θ ,像元 (i, j) 的 4 邻域为 Ω_{ij} ,则期望校正输出 f_{ij} 为:

$$f_{ij} = \langle y \rangle, (y \in \Omega_{ij} \text{ and } y \notin \Theta) \quad (6)$$

其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示空间平均.而校正系数 a_{ij} 和 b_{ij} 则按以下原则更新:如果像元 $(i, j) \in \Theta$,则根据公式(4)更新系数;否则,不进行更新.实际上在景象的边缘设置了一个“隔离带”,阻断了一个区域内的信号对其相邻区域校正系数的影响.不同区域的校正系数只根据其区域内的信号进行更新,避免了异常更新,从根本上杜绝了目标退化和伪像的产生.

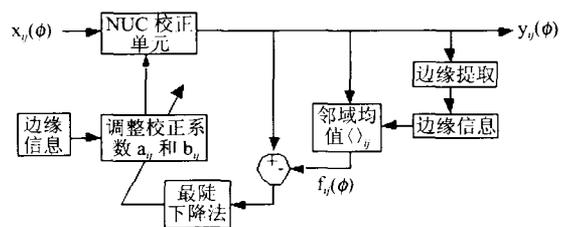


图6 去伪像的 NN-NUC 方法框图
Fig.6 Graphic description of the combined NN-NUC and de-ghosting algorithm

2 实验结果与讨论

2.1 评价指标

客观地评价校正算法的性能,合理的评价指标是值得探讨的问题.待校正图像如果是定标图像数据,则可采用标准差 σ 来衡量校正前后的非均匀性.如果已知真实的、不存在非均匀性噪声的图像数据,可采用均方根误差 RMSE^[8] 来衡量:

$$RMSE = \frac{1}{pm} \sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m (\hat{T}_{ij} - T_{ij})^2}, \quad (7)$$

其中 T_{ij} 和 \hat{T}_{ij} 分别为真实红外信号以及它的估计.由于需要知道真实信号,本文中 RMSE 用来评价仿真实验中方法的性能.

对 IRFPA 获取的含有非均匀性噪声的红外图像序列,目前普遍采用的是校正后图像的粗糙度^[8] (roughness) 或是 3×3 邻域内标准差的空间平均值,来衡量校正前后的非均匀性.这些指标存在两个问题:一是对图像灰度值进行线性变换时,尽管图像信息没有改变,这些指标都会变化.二是将景象边缘部分的有用高频信息也算成了非均匀性噪声.考虑实际应用需要,本文提出采用对比度指标 C 来衡量算法的校正性能.对比度定义为:

$$C = \frac{ads(\langle g \rangle_1 - \langle g \rangle_2)}{(\text{size1} \cdot \text{std}(g)_1 + \text{size2} \cdot \text{std}(g)_2) / (\text{size1} + \text{size2})}, \quad (8)$$

其中 $\langle g \rangle_1$ 和 $\langle g \rangle_2$ 分别为区域 1 和 2 的灰度均值, size1 和 size2 分别为区域 1 和 2 的面积, $\text{std}(g)_1$ 和 $\text{std}(g)_2$ 分别为区域 1 和 2 的灰度标准差.区域之间的对比度 C 越高,越有利于后续的处理,因此也认为校正效果越好.对于小目标情况,选择目标的邻域背景来计算 C 值.由于计算 C 不需要已知真实信号,在本文中用于评价针对仿真数据和真实数据时算法的校正性能.以下实验中,称本文方法为“边缘指导的 NN-NUC 算法”(简称 ED-NN-NUC),传统方法为 NN-NUC 算法.

2.2 仿真实验

仿真实验采用第二章的 1×128 线列探测器仿真数据,迭代步长 μ 仍为 $1e-5$.经过 ED-NN-NUC 校正后的第 60、160、260 帧信号如图 7 所示,校正后第 261、360、460 帧信号如图 8 所示.对比图 7 和图 2、图 8 和图 5 可以看出,NN-NUC 新方法已没有目标退化和伪像的问题.整个 460 帧的未校正信号 (uncorrected)、ED-NN-NUC 算法校正后信号 (with de-ghosting) 以及 NN-NUC 校正后信号 (w/o de-ghosting)

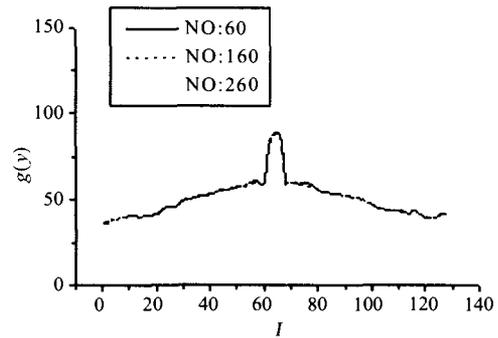


图 7 第 60, 160 和 260 帧 ED-NN-NUC 校正后信号
Fig.7 Corrected signal after ED-NN-NUC in the 60th, 160th and 260th frame

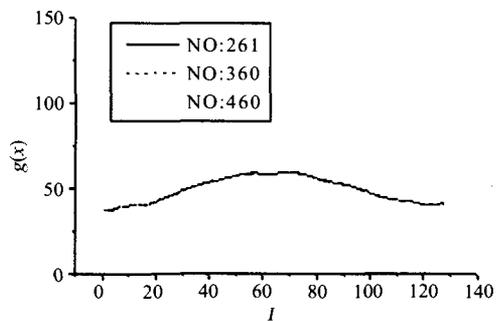


图 8 第 261, 360 和 460 帧 ED-NN-NUC 校正后信号
Fig.8 Corrected signal after ED-NN-NUC in the 261th, 360th and 460th frame

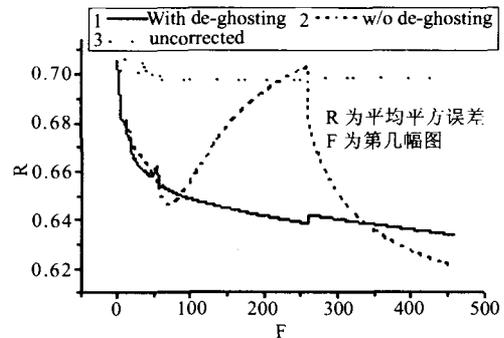


图 9 未校正信号, 经过 NN-NUC 校正, 经过 ED-NN-NUC 校正 3 种信号的 RMSE 指标比较

Fig.9 Comparison between the RMSE before and after two NUC schemes (1: after ED-NN-NUC calibration; 2: after NN-NUC calibration; 3: before correction)

ting) 的 RMSE 指标和对比度 C 指标分别如图 9 和 10 所示(由于第 261 帧以后没有目标,对比度 C 指标曲线为前 260 帧).其中计算 C 时选择目标左右两边各 5 个像素区域作为背景区域.从图 9 中可以明显看出,由于出现了目标退化和伪像的问题,w/o de-ghosting 曲线从第 60 多帧开始上冲,到第 260 多

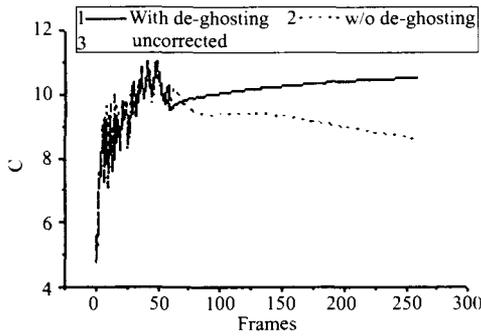


图 10 未校正信号, 经过 NN-NUC 校正, 经过 ED-NN-NUC 校正 3 种信号的 C 指标比较
 Fig. 10 Comparison between the C before and after two NUC schemes (1: after ED-NN-NUC calibration; 2: after NN-NUC calibration; 3: before correction)

帧回落, 形成一个“鲨鱼鳍”状的尖峰; 而 with de-ghosting 曲线则随着帧数增加而不断降低. 从图 10 中也可看出, 由于目标退化的原因, NN-NUC 校正后的信号的 C 值从第 60 多帧开始不断下降. 相反, ED-NN-NUC 算法由于不存在目标退化, 校正后信号的 C 值不断上升. 以上两个指标都说明本文所提出的方法在解决目标退化和伪像这两个问题时是有效的.

2.3 真实 IRPFA 图像数据的实验

本节采用从实际 128 × 128 LW MCT IRFPA 所采集到的 850 帧序列图像, 将本文提出的 ED-NN-NUC 算法与传统的 NN-NUC 算法进行对比. 参数取值为: 迭代步长 $\mu = 2e-5$, 增益校正系数初值 $a_y^0 = 1$, 偏移校正系数初值 $b_y^0 = 0$. 图像景象内容为室内均匀背景下的拿着手机的人手. 序列中从第 590 多帧到 630 多帧, 手趋于静止; 从第 640 多帧到 660 多帧, 手又有一个大的翻转动作. 图 11 ~ 12 分别显示了第 630 帧和第 650 帧的原始图像、采用本文提出的 ED-NN-NUC 和传统的 NN-NUC 校正后的结果图像. 其中 a 为原始图像, b 为 NN-NUC 校正结果, c 为 ED-NN-NUC 校正结果. 此外还给出了时域高通滤波器 (THPF-NUC) 校正结果 (如图 d 所示), 其中设置的时间常数 M 值为 20.

对比图 11. b 和 c 可以看出, 由于手趋于静止, 经过 NN-NUC 校正后手的下边缘已经模糊, 即发生了目标退化现象. 由于在第 630 帧的前后十几帧手和手机只有轻微抖动, 因此经过 THPF 校正后的结果图 d 中只保留了运动目标的部分边缘, 目标退化现象明显. 相反, 在图 11. c 中背景、手和手机三者各自的边缘都是比较清晰的. 而在图 12. b 中手的区域内, 可以明显看出有一个暗的手的影子, 其位置与图

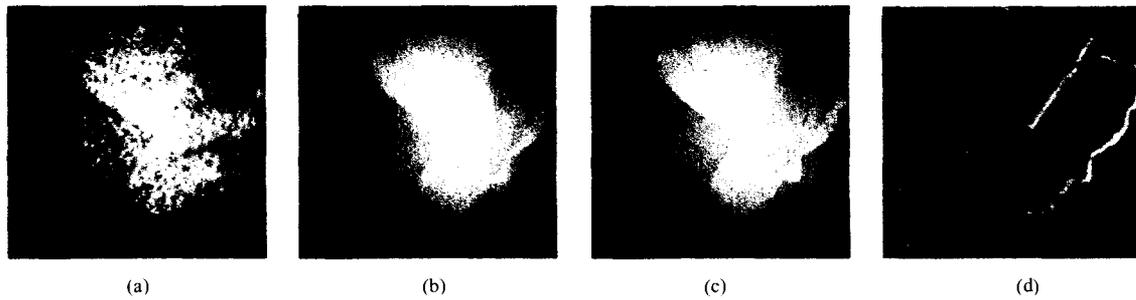


图 11 序列中的第 630 帧
 Fig. 11 The 630th frame in the serial

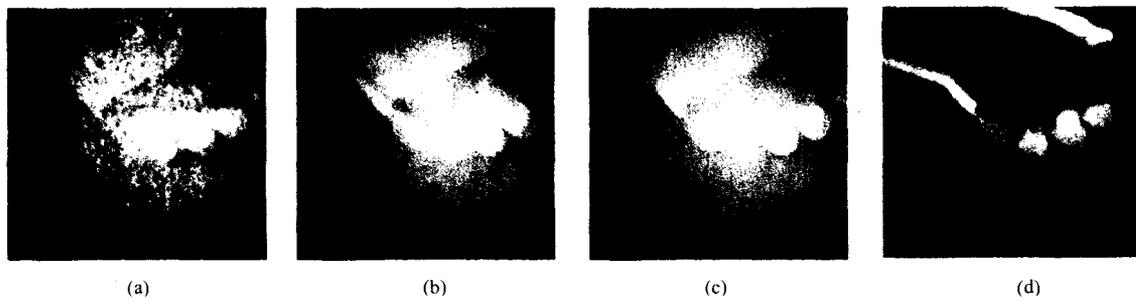


图 12 序列中的第 650 帧
 Fig. 12 The 650th frame in the serial

表 1 区域对比度 C 的比较
Table 1 Comparison between C values

帧号	原始图像	NN-NUC	ED-NN NUC	THPF-NUC
630	(1.152, 0.359, 1.652)	(1.086, 0.376, 1.649)	(1.185, 0.380, 1.775)	(0.366, 0.276, 0.004)
650	(1.008, 0.053, 0.951)	(0.942, 0.028, 0.995)	(0.969, 0.029, 1.030)	(1.242, 1.078, 0.375)
700	(1.347, 0.310, 1.891)	(1.488, 0.117, 1.817)	(1.515, 0.150, 1.932)	(1.072, 1.027, 0.212)

11 中手的位置相同,是前面几十帧时静止的手留下来的伪像.仔细观察,还可以看出手机所留下来的伪像.同样从图 12. d 中也可以清楚地看出伪像.实际上即使到第 700 帧,NN-NUC 校正以及 THPF 校正后的图像仍然有伪像的痕迹.与此对比图 12. c 中并无伪像.用对比度 C 对图 11、12 评价的结果如表 1 所示,还列出了第 700 帧的结果.表 1 中按(手/背景、手/手机、手机/背景)格式给出了 C 值,用于计算 C 值的区域通过手工方法划分.从表 1 也可以看出,考虑了边缘信息的 ED-NN-NUC 方法其对比度 C 值均高于 NN-NUC 方法.尽管第 630、650 帧原始图像与校正后的图像相比非均匀性噪声严重,但其 C 值与校正后结果相比并不低.这主要是由于 NN-NUC 方法本身呈空间低通的频率特性,对于空间低频噪声的抑制能力有限,在图 11 和 12 中表现为校正后图像的四个角落响应偏低.低频非均匀性噪声的存在,使得校正后图像的 C 值改善有限.当然如果是小目标,由于计算 C 值时只需选择其相邻背景区域,有理由相信 C 值会有较大提高.当然引入了景象的边缘信息会导致校正处理计算量的增加.在上述对比实验中,所有算法代码用 Visual C++ 6.0 编写,并在 AMD Athlon 1G 主频的 PC 上运行.操作系统为 Windows 2000 Professional.测试得到的 NN-NUC 和 ED-NN-NUC 每帧处理时间为:NN-NUC 算法开销为 6.6ms;而 ED-NN-NUC 算法开销为 22.9ms,其中边缘提取部分的开销为 15.7ms.从时间开销来看,边缘提取部分引入的计算量还是较大的.但如果后续的跟踪、识别等处理过程也需要提取目标边缘,则从整个信息处理系统的角度来看计算量并没有增加,只是边缘提取单元所提供的信息既提供了后续处理算法,又反馈到非均匀性校正环节.此外,也可以利用 FPGA 硬件实现边缘提取算法中耗时的模板卷积过程,从而减少整个 ED-NN-NUC 算法的计算量.

3 结束语

深入分析了 NN-NUC 算法原理,指出目标退化

和伪像的根源在于其没有考虑景象的实际边缘,盲目地更新校正系数,使得边缘邻域内的校正系数出现异常.在此基础上提出应利用景象的边缘信息来指导校正系数的更新,符合人眼的视觉处理机制.在人眼这个复杂的视觉处理系统中,低层处理与高层处理之间存在着复杂的联系,高层处理的结果会指导、影响低层处理的过程.仿真以及实际图像的实验结果表明本文指出的问题根源以及解决方法是正确的.

REFERENCES

- [1] SHI Yan, ZHANG Tian-Xu, LI Hui, et al. New approach for nonuniformity correction in IRFPA with nonlinear response [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (石岩, 张天序, 李辉, 等. 一种考虑红外焦平面器件非线性响应的非均匀性校正方法. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(4): 251—256.
- [2] YIN Shi-Min, HONG Xin-Hua, Liu Shang-Qian, et al. New algorithm of adaptive nonuniformity correction for IRFPA [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (殷世民, 洪新华, 刘上乾, 等. 一种新的红外焦平面器件非均匀性自适应校正算法. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(1): 33—38.
- [3] WANG Yue-Ming, CHEN Jian-Xin, LIU Yin-Nian, et al. Study on two-point multi-section IRFPA nonuniformity correction algorithm [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(6): 415—418.
- [4] Scribner D A, Sarkady K A, Krueer M R, et al. Adaptive retina-like preprocessing for imaging detector arrays [C]. In: *IEEE International Conference on Neural Networks (Institute of Electrical and Electronic Engineers)*, 1993, 1955—1960.
- [5] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, 8(8): 1148—1151.
- [6] Harris J G, Chiang Y M. Minimizing the “ghosting” artifact in scene-based nonuniformity correction [C]. In: *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing IX, SPIE*, 1998, 3377: 106—113.
- [7] Hirsch J, Curcio C A. The spatial resolution capacity of human foveal retina [J]. *Vision Research*, 1989, 29(9): 1095—1101.
- [8] Torres S N, Pezoa J E, Hayat M M. Scene-based nonuniformity correction for focal plane arrays by the method of the inverse covariance form [J], *Applied Optics*, 2003, 42(29): 5872—5881.