

CCD 扫描噪声建模及自适应滤波算法

王娜^{1,2}, 曾平¹, 孔月萍^{1,2}

(1. 西安电子科技大学计算机学院, 西安 710071; 2. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 西安 710055)

摘要: 为去除图像因扫描引入的电荷耦合器件(CCD)噪声, 提出一种基于变窗口的自适应滤波算法。分析 CCD 主要噪声: 散粒, 固有和输出噪声的噪声特性, 建立 CCD 扫描噪声模型, 根据噪声和边缘处理方式的不同设计了局部和全局自适应滤波器。实验结果表明, 该算法具有较好的信噪分离能力, 在充分抑制噪声的同时, 很好地保持了边缘, 提高对比度, 视觉效果良好。

关键词: CCD 扫描噪声; 噪声模型; 噪声和边缘; 自适应滤波

Modeling for CCD Scan Noise and Adaptive Filtering Algorithm

WANG Na¹, ZENG Ping¹, KONG Yue-ping^{1,2}

(1. School of Computer Science, Xidian University, Xi'an 710071;

2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture, Xi'an 710055)

【Abstract】In order to remove CCD noise for scanner in the image, an adaptive filtering algorithm based on window-altered is proposed. This paper analyzes CCD noisy characteristic, which mainly includes: photon noise, fixed-pattern noise and amplifier noise. A model for CCD scanning noise is developed. According to different processing methods for noise and edge, local and overall adaptive filters are designed. Experimental results show that the proposed algorithm can separate the CCD noise and signal better than the traditional algorithm. The algorithm has the efficient edge preserving ability and high contrast gradient and excellent visual effect, while CCD noise is suppressed fully.

【Key words】 CCD scan noise; noise model; noise and edge; adaptive filtering

1 概述

电荷耦合器件(CCD)扫描仪在计算机视觉系统中应用越来越广泛。目前, CCD器件以其自扫描、高分辨率、输出噪声低、动态范围大、电荷转移效率高、光谱响应范围宽、几何稳定性好等突出优点, 被认为是可见光成像领域最有前途的探测器件。CCD 图像传感器的输出信号是空间采样的离散模拟信号, 其中夹杂着各种噪声和干扰, 由 CCD 扫描仪得到的图像一般会出现^[1]几何失真和畸变、图像模糊、对比度低、规则网纹和低频颗粒等。扫描图像去噪一直是大家研究的重点和热点, 但这方面成熟有效的算法很少, 现有的均是假设图像被扫描噪声污染而去噪, 没有立足于实验, 也没有分析 CCD 噪声特性, 更没有对 CCD 噪声建模, 去噪效果都不是很理想, 如双正交小波^[2]、维纳^[2]、形态金字塔^[3]滤波等。

自适应滤波器是近几年发展起来的关于信号处理方法的滤波器, 其设计方法对滤波器的性能影响很大。现有的大部分滤波器设计方法都是建立在信号特征先验知识基础上的, 然而在实际应用中常常无法得到这些信息, 在这种情况下, 自适应滤波器具有较好的滤波性能。

本文分析 CCD 扫描噪声特性, 建立了 CCD 扫描噪声模型, 并依据噪声类型及边缘和非边缘像素处理方式的不同设计了局部自适应滤波器, 根据图像的噪声-边缘测度, 设计了全局自适应滤波器, 仿真结果好。

2 CCD 噪声分析及其模型的建立

污染数字图像的噪声主要有^[4]: 电子噪声, 主要是由摄像机和图像采集电路中的电子随机热运动引起的; 光电噪声, 包括散粒噪声和量化噪声, 主要是由入射光光子的统计特性和光电转换及量化过程引起的; 元器件材料本身引起的噪声,

主要由光学元件内部含有不透明微颗粒、CCD 图像传感阵列表面缺陷等因素引起。实践证明在一般光电成像系统中的噪声既有依赖于信号的乘性噪声也有独立于信号的加性噪声, 均属于高斯白噪声。

CCD 扫描仪主要由 3 部分组成: 光学成像部分(CCD), 机械传动部分和转换电路部分(A/D)。CCD 将模拟光信号转变为模拟电信号, 模拟电信号又被 A/D 转换器转换为数字信号。CCD 传感器输出的图像信号包括多种噪声, 主要有散粒噪声、固有噪声(FPN)和输出噪声, 另外还有暗电流噪声、热噪声等。图 1 为光子转换曲线(PTC), PTC 以对数为尺度表明了 CCD 噪声标准偏差随光强度的变化。

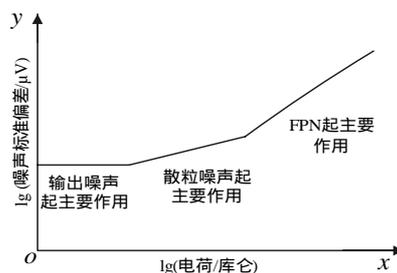


图 1 光子转换曲线(PTC)

下面分析 3 种主要噪声的标准偏差与光强度的关系: 单位时间光产生的电荷数目在平均值上作微小波动, 形成散粒

基金项目: 国家部委预研基金资助项目

作者简介: 王娜(1982-), 女, 硕士研究生, 主研方向: 图形图像处理, 图像的打印和扫描; 曾平, 教授、博士生导师; 孔月萍, 副教授

收稿日期: 2007-11-20 **E-mail:** wnwangna@tom.com

噪声，它与频率无关，在所有频率范围内有均匀的功率分布（白噪声特性），服从柏松分布，是加性高斯白噪声^[5]，在信号强度为中等时，它起主要作用；固有噪声FPN对每一个像素的响应不同，与图像的亮度相关，依赖于信号，相当于乘性噪声，在信号最强时它起主要作用；放大噪声是在信号输出时产生的，独立于信号，为加性高斯白噪声^[5]，信号最弱时起主要作用。经上述分析，CCD扫描噪声可分为依赖于信号的乘性噪声和独立于信号的加性噪声，均为相互独立的高斯白噪声^[6]。

本文建立的 CCD 扫描噪声模型如图 2 所示。经过棱镜和滤色镜得到的模拟光信号作为 CCD 的输入信号。由于噪声的存在，相同强度的入射光也可导致不同的 CCD 输出，这一现象将会引入固有噪声。与此同时，由半导体内电子运动产生的热能引入了暗电流噪声，该噪声对输出仅产生常量偏移，符合高斯模型。设 CCD 的输出经 FPN 和暗电流后的值为 E ，曝光时间为 t ，散粒噪声和热噪声分别为 N_s 和 N_{cl} ，则 E 被 N_s 和 N_{cl} 污染后有

$$E_i = tE + N_s + N_{cl} \quad (1)$$

另外，由于存在色调变化和色彩偏移，扫描得到的图像应进行 Gamma 校正，将该过程引入的噪声设为 b ，同时扫描过程会引入其他附加常量噪声，如量化误差、放大噪声、A/D 转换噪声等，设上述噪声为 N_{c2} ，则有

$$z = f(E_i + b) + N_{c2} = f(tE + N_s + N_{cl} + b) + N_{c2} \quad (2)$$

根据上述分析，式(2)可分为 2 部分：一部分为与信号相关的乘性噪声，另一部分为与信号无关的加性噪声，两部分均符合高斯白噪声模型。

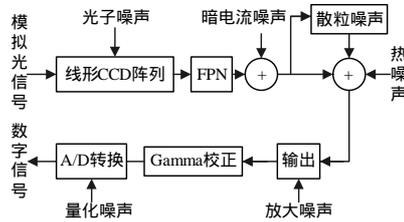


图 2 CCD 扫描噪声模型

3 自适应滤波算法

3.1 图像噪声和边缘分析

设 $\{G_{i,j}; 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$ 为图像； M, N 表示图像大小； $\{\Delta G_{x,y}\}$ 表示像素 (x, y) 在其八邻域上的距离； $d_{i,j}$ 是 $\{\Delta G_{x,y}\}$ 的平均值，为了判断 $G_{i,j}$ 是否可能被噪声污染，定义二值图像为

$$N_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } |d_{i,j}| > d_m + d_s \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

其中， $d_m = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N d_{i,j}$ ； $d_s = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (d_{i,j} - d_m)$ ， $N_{i,j}$ 为 1 时表示该像素被噪声污染，则集合 $\{N_{i,j}\}$ 构成了对应于原图像的二值噪声检测图。该噪声监测器对边缘敏感，会检测出部分边缘。为检测真正的噪声，必须估计图像边缘，采用 4 个不同方向的 Prewitt 窗以进行边缘检测，4 个方向的距离函数分别为

$$f_1(i, j) = \min\{|g_{i-1,j-1} - g_{i-1,j+1}|, |g_{i,j-1} - g_{i,j+1}|, |g_{i+1,j-1} - g_{i+1,j+1}|\};$$

$$f_2(i, j) = \min\{|g_{i,j-1} - g_{i,j+1}|, |g_{i+1,j-1} - g_{i+1,j+1}|, |g_{i+1,j} - g_{i,j+1}|\};$$

$$f_3(i, j) = \min\{|g_{i+1,j-1} - g_{i-1,j-1}|, |g_{i+1,j} - g_{i-1,j}|, |g_{i+1,j+1} - g_{i-1,j+1}|\};$$

$$f_4(i, j) = \min\{|g_{i,j+1} - g_{i,j-1}|, |g_{i+1,j+1} - g_{i-1,j-1}|, |g_{i+1,j} - g_{i,j-1}|\}。$$

得像素 $G_{i,j}$ 的边缘强度函数 $F_{i,j} = \max\{f_m(i, j); m=1,2,3,4\}$ ，定义集合 $\{E_{i,j}\}$ 为对应于原图像的二值边缘检测图， $E_{i,j}$ 为 1 时表示该像素为边缘像素，否则为非边缘像素，其计算方法类似上述噪声监测器。

定义 $D_{e-n} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N E_{i,j} / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N N_{i,j}$ 为图像的噪声-边缘测度。

3.2 改进的加权滤波器

改进的加权滤波器(IF)描述为

(1) 计算窗口的均值 $g_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i$ ，令 g_a 和 g_b 为滑动窗口中距离 g_m 最远的 2 个值， $a, b \in I$ 。

(2) g_{out} 作为滤波器 IF 输出： $g_{out} = \sum_{i \in I} w_i g_i / \sum_{i \in I} w_i$ ，式中 w_i 为加权系数； I' 为 I 中去除 a 和 b 后的集合， $I' = \{1, 2, \dots, n\}$ 。其中，滤波器 IF 所采用的加权窗如表 1 所示， $C3$ 、 $S3$ 和 $S5$ 分别表示 3×3 十字形模板集合， 3×3 方形模板集合， 5×5 方形模板集合。

表 1 IF 滤波器模板

M1	M2	M3	M4	M5
1	1 2 1	1 4 1	1 2 3 2 1	1 3 5 3 1
1 4 1	2 4 2	4 12 4	2 7 11 7 2	3 9 13 9 3
1	1 2 1	1 4 1	3 11 17 11 3	5 13 19 13 5
			2 7 11 7 2	3 9 13 9 3
			1 2 3 2 1	1 3 5 3 1

3.3 局部自适应滤波器

经第 2 部分分析得知扫描过程中引入乘性和加性的高斯白噪声，不可避免地会引入少量脉冲噪声。经脉冲干扰的像素比较好的处理方法是仅对受干扰像素滤波，对于高斯白噪声而言，如果是边缘像素，滤波窗口越小越好，如果是非边缘像素，滤波窗口越大越好^[7]。基于实验，本文按照噪声种类及边缘和非边缘像素处理方式的不同设计了局部自适应滤波器如表 2 所示。该算法在最大化去噪的同时较好地保持了图像的细节，视觉效果良好。

表 2 MF1 和 MF2 滤波器

条件	MF1 输出	MF2 输出
若 $\sum_{(i,j) \in C3} E_{i,j} \neq 0$	IF(M1)	IF(M2)
否则若 $\sum_{(i,j) \in S3} E_{i,j} \neq 0$	IF(M2)	IF(M3)
否则若 $\sum_{(i,j) \in S5} E_{i,j} \neq 0$	IF(M3)	IF(M4)
否则	IF(M4)	IF(M5)

3.4 自适应滤波器

由于扫描图像的对比度下降，本文首先加强图像的对比度。加强对比度不会改变图像的频谱特征，因此不影响以后的去噪。然后通过对数转换将乘性噪声转换为加性噪声，使图像只含有加性噪声。扫描图像处理流程设计如图 3 所示。

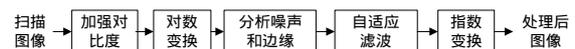


图 3 扫描图像处理流程

选用 100 幅扫描图像(打印和扫描分辨率均为 300 dpi)作为实验测试图像集，在实验基础上统计得 D_{e-n} 范围：0.745 ~ 1.256。 D_{e-n} 的大小反映了图像子窗口内噪声像素和边缘素的比例，若 $D_{e-n} > 1$ 表示边缘多于噪声，反之噪声多于边缘。根据 D_{e-n} 的值选择不同的滤波器，当噪声多于边缘选择较大的

子窗口滤波,反之选择较小的子窗口。设计扫描图像的全局自适应滤波器如下:(1)若 $D_{e-n} > 1$,先进行MF1滤波,再IF(M1)进行第2次滤波。(2)否则若 $D_{e-n} < 1$,先进行MF2滤波,再IF(M5)进行第2次滤波。

4 仿真结果

传统的评价图像质量的方法都基于原图像,如:PSNR,SDM,ANM等。经打印扫描后图像大小已改变,不再和原图像像素具有一一对应关系,则上述评价方法不适合扫描图像,本文采用视觉评价方法。为了更好地观察滤波后细节特征保留情况,用Sobel边缘检测算子检测滤波后图像的边缘。图4为各种方法的边缘检测,从图4可以看出,该方法在去除大量噪声的同时较好地保持并加强了边缘。此外也对仿真结果做了分析,图5(a)中含有大量的低频高密度颗粒噪声,边缘较模糊,对比度很低。图5(b)中颗粒噪声基本消失,但细节损失严重,Lena的头部分最为明显。图5(c)表明本算法滤波后较好地保持了边缘,对比度也明显提高。

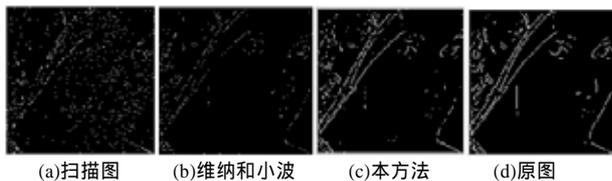


图4 边缘保持能力的比较



图5 仿真结果

(上接第240页)

参考文献

- [1] 何曙光,田捷,张晓鹏,等. 网格化简综述[J]. 软件学报, 2002, 13(12): 2215-2224.
- [2] 朱经纬,王乘,蒙培生. 基于控制点误差控制的网格简化算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(5): 1150-1152.

(上接第243页)

参考文献

- [1] 陈利平,李思昆. 虚拟坦克装甲车运动仿真中的碰撞检测算法研究[J]. 计算机工程, 2002, 28(1): 122-124.
- [2] Gottschalk S, Manocha D. OBBTree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection[C]//Proceedings of SIGGRAPH'96. New Orleans, USA: ACM Press, 1996-08: 171-80.
- [3] 宋宇,孙茂相,吴镇炜,等. 装配机器人系统快速碰撞检测算法[J]. 控制与决策, 2001, 16(2): 215-218.
- [4] 任世军,洪炳熔,孟庆鑫. 判断两个凸多面体是否相交的一个快

5 结束语

传统的方法只是对模拟的扫描图像去噪,没有分析CCD扫描噪声特性,也没有建立起噪声模型,所提算法没有针对性,因此,去噪效果不是很理想。本文分析CCD扫描噪声特性,建立噪声模型,并在实验的基础上根据图像噪声-边缘测度设计了自适应滤波器。对CCD噪声建模时,没有考虑打印半调噪声和扫描逆半调噪声,这将作为以后进一步研究的内容。

参考文献

- [1] Martin G, Pattichis M S. The Characterization of Scanning Noise and Quantization on Texture Feature Analysis[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2004, 44(8): 152-156.
- [2] 刘国瑞,曾平. 扫描输入彩色地图的去噪与自动分割[J]. 计算机应用研究, 2004, 11(10): 114-116.
- [3] 任获荣,张平,王家礼. 一种形态金字塔扫描图像去噪方法[J]. 红外技术, 2004, 26(2): 40-43.
- [4] Faraji H, James W, Lean M. CCD Noise Removal in Digital Images[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2006, 15(9): 2676-1685.
- [5] Tsin Y, Ramesh V, Kanade T. Statistical Calibration of CCD Imaging Process[C]//Proc. of IEEE Int'l Conf. on Computer Vision. [S. l.]: IEEE Press, 2001: 480-487.
- [6] Janesick J R. Scientific Charge-coupled Devices[M]. Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 2001.
- [7] 蒋刚毅,郁梅,郁伯康. 自适应彩色图像滤波新方法[J]. 科学通报, 1999, 44(18): 1937-1942.

- [3] 顾耀林,赵争鸣,魏江涛. 距离加权的二次误差测度多分辨率网格简化[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(8): 1965-1968.
- [4] 曹勇,田捷,张晓鹏,等. 递归网格算法在虚拟内窥镜中的应用[J]. 软件学报, 2002, 13(4): 677-685.
- [5] 夏仁波,刘伟军,王越超. 保持拓扑和尖角特征的网格简化算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(19): 14-16.

速算法[J]. 软件学报, 2000, 11(4): 564-568.

- [5] 李学庆,孟祥旭,汪嘉业,等. 基于启发式分离向量的凸多面体碰撞检测[J]. 计算机学报, 2003, 26(7): 837-847.
- [6] Ennell J A, Dowland W B. The Irregular Cutting-stock Problem: A New Procedure for Deriving the No Fit Polygon[J]. Computers and Operations Research, 2001, 28(2): 271-287.
- [7] 黎自强,滕弘飞. 一种多臂机器人关节间碰撞检测快速算法[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(4): 527-532.
- [8] 陆润民,李学志. 计算机绘图[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 221-223.