

一种消除 LCD 运动图像去模糊模型极点的方法

朱雄泳¹ 周杰² 谭洪舟¹

摘要 sinc^{-1} 模型作为逆系统能较好地改善 LCD 运动图像模糊现象, 但其在极点处无法正确还原运动模糊的图像, 且难以硬件实现. 因此, 本文从系统辨识的角度出发, 提出了一种采用基于变步长最小均方误差 (Least mean square, LMS) 的低阶 Volterra 非线性系统拟合 sinc^{-1} 模型的 LCD 运动图像去模糊的方法. 仿真结果表明, 该方法能消除 sinc^{-1} 模型的极点问题, 较好地改善了 LCD 运动图像模糊现象, 简单且易于硬件实现.

关键词 LCD 运动模糊, sinc 模型, sinc^{-1} 模型, 极点消除, Volterra 系统

引用格式 朱雄泳, 周杰, 谭洪舟. 一种消除 LCD 运动图像去模糊模型极点的方法. 自动化学报, 2012, 38(5): 759–768

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00759

Method for Eliminating LCD Motion De-blurring Model's Pole

ZHU Xiong-Yong¹ ZHOU Jie² TAN Hong-Zhou¹

Abstract The sinc^{-1} model can reduce the LCD motion blur effectively, however, it can not restore the correct frequency components on the pole and is hard to implement on hardware. This paper presents a novel method which is trying to improve the LCD motion blur phenomenon from the view of system identification. The method uses the Volterra nonlinear system that is based on the VSSLMS (variable step size least mean square) algorithm to fit the sinc^{-1} model, which is a non-perfect inverse system to the LCD motion blur system for the pole problem. Simulation results demonstrate that the performance of the proposed simple method can avoid the pole problem of sinc^{-1} model and can be implemented on hardware easily.

Key words LCD motion blurring, sinc model, sinc^{-1} model, pole eliminating, Volterra system

Citation Zhu Xiong-Yong, Zhou Jie, Tan Hong-Zhou. Method for eliminating LCD motion de-blurring model's pole. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(5): 759–768

目前, 液晶电视 (LCD TV) 的出货量已成为全球 TFT-LCD 产业第三次发展高潮的主要驱动力^[1]. 然而, LCD 的运动模糊拖尾的问题^[2–6], 至今仍未获得有效的解决. 国内外的学者们从引起该问题的 LCD 保持型显示特性及人眼视觉系统的运动跟踪特性出发, 提出了一系列硬件或软件的办法来解决该问题.

在硬件方面, 利用响应时间补偿技术^[7] 与过压驱动技术^[8] 已可令 LCD 面板的响应时间达到了 1ms, 在一定程度上提高了运动图像的显示质量. 但简单地提高 LCD 面板的响应速度, 其实对减少运动模糊现象并没有多大的作用, 举例来说, 对响应时间为 16 ms 的 LCD 面板而言, 实际上只有 30% 的模糊是由慢响应特性引起的^[3]. 采用倍频技术^[9]

将帧频提升到 240 Hz 后, 也可以在很大程度上消除 LCD 运动模糊的现象, 但其带来的功耗、带宽、干扰等问题不容忽视. 模拟 CRT 脉冲驱动的方案对运动模糊也有一定的改善效果, 但其中的背光闪烁技术^[5] 容易导致亮度下降的问题; 背光源扫描技术^[10] 则存在 LED 背光成本较高, 亮度不均匀等问题; 黑帧插入技术^[11] 容易产生漏光现象, 增加对数据速率和带宽的要求, 从而增加技术的难度和成本. 可见, 单纯采用物理方案虽然能取得一定的运动去模糊的效果, 但代价过高, 难以彻底解决该问题.

而在采取上述物理方案的基础上, 利用图像处理技术可以更进一步改善 LCD 运动模糊现象. Klompenhouwer 等^[12] 提出一种基于频域的运动向量预补偿逆滤波 (Motion compensated inverse filtering, MCIF) 的方法, 对显示特性与人眼的低通滤波特性进行预补偿, 能在很大程度上恢复 LCD 运动图像的锐利度. Har-Noy 等^[13] 提出一种改善 LCD 运动模糊的方法, 就是在输入信号到 LCD 之前, 将信号分解成双通道, 分别采用高效的非迭代滤波器库进行 FIR (Finite impulse response) 滤波, 然后再合成送入 LCD 显示器输出, 达到 IIR (Infinite impulse response) 滤波器的效果. 但从下文的分析可知, LCD 的运动模糊现象只发生在运动方向上,

收稿日期 2011-07-11 录用日期 2011-10-17
Manuscript received July 11, 2011; accepted October 17, 2011
国家自然科学基金 (60874060) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60874060)

本文责任编辑 刘一军

Recommended by Associate Editor LIU Yi-Jun

1. 中山大学信息科学与技术学院 广州 510275 2. 广东省广播电视大学 广州 510275

1. School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275 2. Guangdong Radio and Television University, Guangzhou 510275

其他方向不会发生模糊现象,上述方案对所有方向都进行补偿,这实际上是一种过补偿. Har-Noy 等还提出另一种方法^[14],即将 LCD 运动模糊现象看作是一种图像的退化问题,采用非参数迭代算法 Richardson-Lucy (RL) 反卷积算法,找出点扩散函数 (Point spread function, PSF),再通过一定的迭代令输出图像收敛到同真实图像相近的最大似然图像,从而达到降低图像模糊的目的. Xia 等^[15]在 Har-Noy 等的基础上,提出一种运动自适应去模糊滤波器以还原图像的方法. 但点扩散函数难以找到,如果精度不足反而容易引起图像无法恢复的现象,而且也可能出现图像边缘失真问题^[16]. 上述方案都是在对运动图像显示前进行预补偿,这是一条比较可行的思路,并也取得了一定的改善效果. 但由于 LCD 运动去模糊最终要在硬件上实现,故上述方法并不适用.

其实,可将 LCD 运动图像去模糊看作一个系统辨识的问题,即令 LCD 运动模糊模型为原系统,将其逆系统与之级联组合,则输出信号 $\mathbf{Y}(n)$ 将与输入信号 $\mathbf{X}(n)$ 相同^[17],从而达到 LCD 运动去模糊之目的,如图 1 所示. 由于 sinc 模型是 LCD 运动模糊的频域数学模型,故将其逆 (sinc⁻¹ 模型) 作为图 1 中的 LCD 运动模糊逆系统,与原系统级联组合,即可实现 LCD 运动去模糊的效果. 但 sinc⁻¹ 模型存在极点问题,无法恢复极点处的频率,所以其应用受到极大的限制. 于是,钟翊炜等^[18]提出一种通过建立二维全极点滤波器的极点聚焦技术,根据速率采用不同的系数插值计算而得到一个取代 sinc⁻¹ 模型极点的新位置,从而恢复该点的频率以作为极点的频率. 该方法在高频处能得到有效的改善,但难以硬件实现.

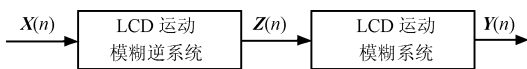


图 1 LCD 运动去模糊系统原理图

Fig. 1 The diagram of LCD motion de-blurring system

实际上, LCD 运动模糊问题可看作是一个单输入单输出非线性的动态时不变系统,而目前利用 Volterra 级数理论来研究非线性系统越来越受到人们的重视,已在非线性频域分析、非线性辨识、信号处理及故障诊断等方面都取得了重要的进展,且容易在硬件上实现^[19],它能以任意精度逼近紧集上的连续函数,建立起非线性、时不变、动态系统的数学模型^[20],故从非线性系统辨识的角度出发,选用非线性系统的 Volterra 模型来拟合 sinc⁻¹ 系统,从而构建一个相对理想的 LCD 运动模糊系统的非线性可逆系统,将是一条可行的思路.

本文其余部分的结构安排是:第 1 节分析 LCD 运动图像模糊的数学模型;第 2 节分析 sinc⁻¹ 模型

的特性;第 3 节针对 sinc⁻¹ 模型的不足从非线性系统辨识的角度出发,提出采用基于变步长 LMS 的 Volterra 模型拟合 sinc⁻¹ 模型的方法,从而构建一个无极点的 LCD 运动图像模糊系统的非线性逆系统;第 4 节是相关的仿真分析;第 5 节是结论.

1 LCD 运动图像模糊的数学模型

LCD 运动模糊现象是由 LCD 的显示特性和人眼视觉系统 (Human visual system, HVS) 的特性共同作用而引起的^[3],如图 2 所示,即图 1 中的 LCD 运动模糊系统. 其中, $f_{\text{org}}(x, y, t)$ 表示输入到 LCD 显示设备的原视频图像信号, t 是图像序列的时间坐标, (x, y) 是图像的空间位置坐标, $f_{\text{out}}(x, y, t)$ 为人眼所感受到的模糊视频图像信号.

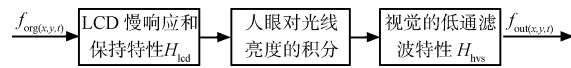


图 2 LCD 运动图像模糊的系统框图

Fig. 2 The diagram of LCD motion blur system

由于随着 LCD 面板技术的不断改进,目前 1 ms 响应速度的 LCD 面板也已推向了市场, LCD 的慢响应特性对 LCD 运动模糊的影响已变得越来越小,故本文不再考虑 LCD 的慢响应特性,即设其响应时间为 0,运动模糊全部都来自 LCD 的采样保持特性与人眼视觉特性,于是有:

$$f_{\text{out}}(x, y, n) = \frac{1}{T_h} \int_0^{T_h} f((x, y, n) + vt, n) dt \quad (1)$$

其中, $f(x, y, n)$ 是原始图像, n 是图像的帧序号, $f_{\text{out}}(x, y, n)$ 是 LCD 输出图像, T_h 为显示器的扫描周期, $v = [v_x, v_y]$ 是视频中图像的运动速度矢量. 将式 (1) 变形:

$$f_{\text{out}}(x, y, n) = \int_0^1 f((x, y) + \alpha v T_h, n) d\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} f((x, y) + \alpha v T_h, n) h(\alpha) d\alpha \quad (2)$$

其中, $h(\alpha) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \alpha < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, 对式 (2) 两边求二

维傅里叶变换,得:

$$F_{\text{out}}(u, v, n) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{out}}(x, y, n) e^{-j2\pi[u, v][x, y]^T} dx dy = F(u, v, n) H(u, v) \quad (3)$$

式中, $F(x, y, n)$ 是时刻 n 的原始图像的二维空间傅里叶变换, $[u, v]$ 是空间频率. 因此,人眼所观察到的 LCD 运动图像实际上可看作是原图像经过一个

sinc 空间滤波器而最终得到的图像^[6, 12]. 于是, 理想液晶显示器显示运动图像的频域模型如下:

$$H(u, v) = \text{sinc}(\pi T_h [v_x, v_y] \times [u, v]^T) \quad (4)$$

通过空间采样后, 其离散时域的表达式为

$$H(m, n) = \begin{cases} \sum_{m, n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc} \left[\pi T_h \left(v_x \left(\frac{m}{M} f_{MS} - m f_{MS} \right) + v_y \left(\frac{n}{N} f_{NS} - n f_{NS} \right) \right) \right], \\ m \in \{0, 1, 2, \dots, M-1\}, \\ n \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\} \\ 0, \quad \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, f_{MS} 、 f_{NS} 是显示器的空间采样频率, M 、 N 是图像的宽度和高度.

为了使模糊现象更明显, 本文采用大小为 60 像素 \times 40 像素的对比度较大的二值图像, 屏幕刷新率为 $T_h = 1/15$, 令图 3(a) 图像以 85 像素/秒的速度分别作水平向右和垂直向下的运动, LCD 的运动模糊现象分别如图 3(b) 和图 3(c) 所示.

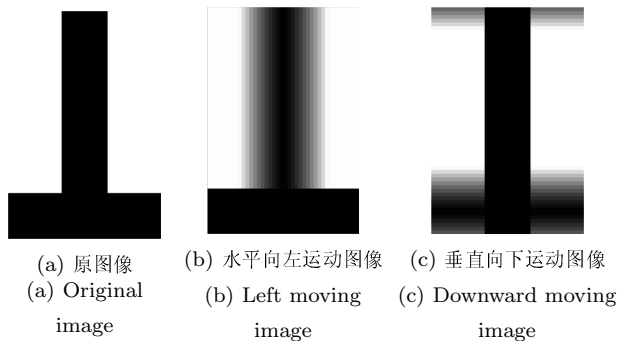


图 3 LCD 运动模糊现象
Fig. 3 LCD motion blurring

由图 3 可知, 由于图像的运动, 原图像在边缘的灰度跳变处产生与运动方向相关的模糊现象, 而其他方向不会发生模糊现象. 因此, 为方便起见, 下文只分析水平方向运动的模糊情况.

可以将 sinc 模型看作原系统, 将其逆系统与之级联组合, 如图 1 所示, 输出信号就会与输入信号相同^[17]. 理论上, sinc^{-1} 模型将是一个比较适合作为逆系统的模型.

2 sinc 逆模型的特性分析

由于 LCD 运动模糊的频域是 sinc 模型, 因此, 将 sinc^{-1} 模型作为它的逆系统, 与之级联组合后, 人眼所看到的 LCD 输出运动图像信号就会与实际输入的图像信号相同, 从而达到改善 LCD 运动模糊的目的, 其原理如图 4 所示.

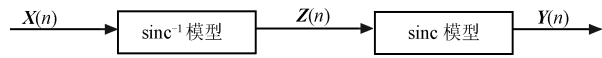


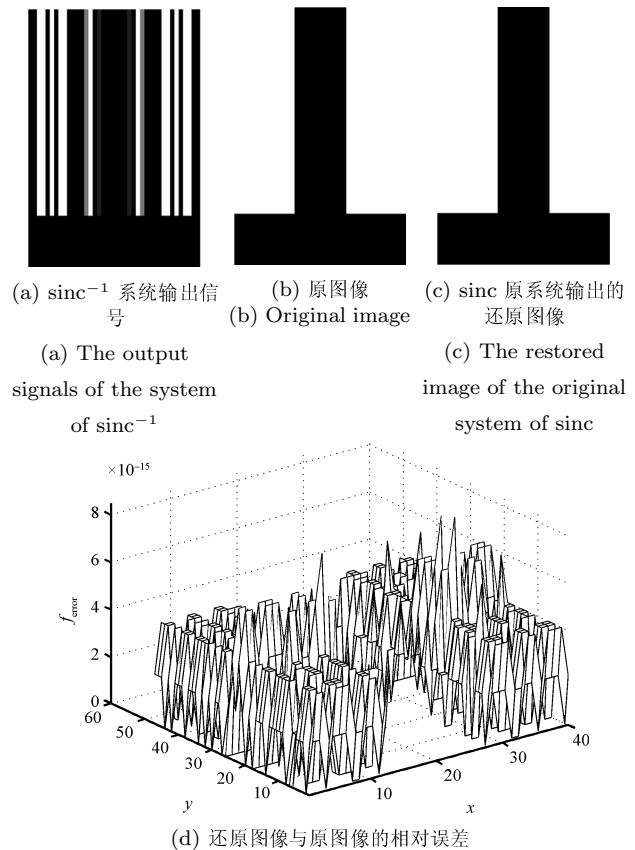
图 4 sinc^{-1} 模型改善 LCD 运动模糊原理图
Fig. 4 The diagram of LCD motion de-blurring by sinc^{-1} model

sinc^{-1} 系统的频域数学模型如下所示:

$$\text{sinc}^{-1}(u, v) = \frac{1}{\text{sinc} \left(K [v_y, v_x] \left[\frac{1}{M} u, \frac{1}{N} v \right]^T \right)} \quad (6)$$

其中, $K = \pi T_h$, $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$, $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

此时同样以 85 像素/秒的速度令图 3(a) 的图像往水平方向运动, 运动模糊的图像如图 3(b) 所示. 采用 sinc^{-1} 模型作为逆系统对其先进行预处理, 然后再与作为原系统的 sinc 模型级联, 仿真结果如图 5 所示. 从图 5 中可知, 采用 sinc^{-1} 模型作为逆系统, 还原后的图像与原图像之间的相对误差精度非常小, 图像质量非常好, 较好地消除了 LCD 运动模糊现象.

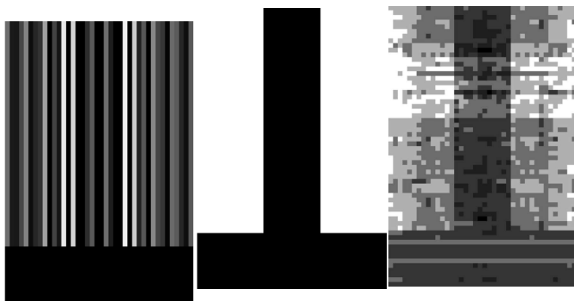


(d) 还原图像与原图像的相对误差
(d) The relative error between the restored image and the original image

图 5 sinc^{-1} 系统的 LCD 运动图像去模糊
Fig. 5 LCD motion de-blurring by the system of sinc^{-1}

但由式 (5) 可知, 只要当 sinc 系统在运动速度为 T_h (刷新率) 的整数倍时, 系统将可能会出现 $\text{sinc}(k\pi) = 0$ 的情况, 这将导致其逆系统 sinc^{-1} 模型出现某些坐标的值极大, 超出 LCD 表达范围的灰度值现象, 即便对其进行归一化处理, 该问题仍然存在, 我们称之为“极点”问题. 在极点处的频率无法恢复, 从而对整幅图像造成严重的失真.

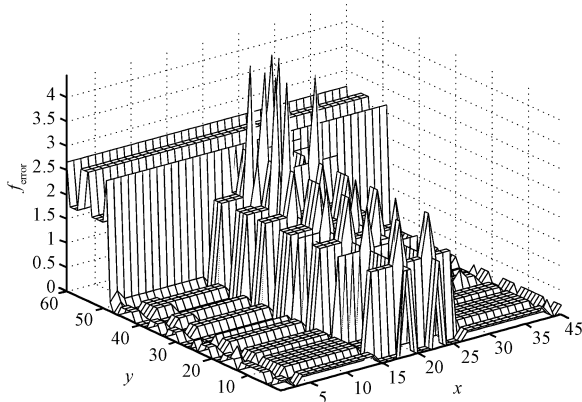
令图 3(a) 的图像以 60 像素/秒 (T_h 的 4 倍) 的速度往水平方向运动, 此时 sinc 模型某些地方可能会出现 $\text{sinc}(4\pi) = 0$ 的情况, 亦即 sinc^{-1} 模型在某些坐标会输出极大值. 由仿真结果可知, 此时系统出现了极点现象, 人眼最终感知的图像如图 6(c) 所示. 归一化后的还原图像质量极差, 与原图像的相对误差非常大, 如图 6(d) 所示. 正由于极点的存在, 导致这些点的频率无法正确还原, 造成人眼感知的图像质量极差, 为人眼所难以接受.



(a) sinc^{-1} 系统输出信号
(a) The output signals of the system of sinc^{-1}

(b) 原图像
(b) Original image

(c) sinc 原系统输出的还原图像
(c) The restored image of the original system of sinc



(d) 还原图像与原图像的相对误差
(d) The relative error between the restored image and the original image

图 6 sinc^{-1} 模型的极点问题

Fig. 6 The pole problem of sinc^{-1} model

LCD 运动图像模糊系统实际上是一个非线性系统, 而 sinc^{-1} 模型却是线性连续的系统, 难以硬

件实现, 且存在极点问题, 因此, sinc^{-1} 模型并不适合作为理想的 LCD 运动模糊系统的逆系统, 必须要找到一个具有 sinc^{-1} 模型特性, 而又不存在极点问题的非线性系统作逆系统. 由于 Volterra 模型能以任意精度逼近紧集上的连续函数, 建立非线性、时不变、动态系统的数学模型^[20], 且容易在硬件上实现, 故在 LCD 运动图像去模糊中, 采用 Volterra 模型作为非线性逆系统以拟合 sinc^{-1} 模型从而避免其极点问题是一条可行的思路.

3 Volterra 模型去模糊的特性分析

通过估计 Volterra 模型相应的参数, 令其与 sinc^{-1} 模型有相同的外部特征, 即可拟合 sinc^{-1} 模型, 从而克服 sinc^{-1} 模型的缺点, 构建起一个 LCD 运动模糊系统的非线性逆系统. 令符合一定条件的 sinc^{-1} 模型的输出作为拟合系统的输出 $\mathbf{Y}(n)$, 系统的输入 $\mathbf{X}(n)$ 已知, 此时, 只需训练好 Volterra 模型的核函数即可拟合这个 sinc^{-1} 模型系统. 显然, 这是一个典型的非线性系统辨识问题, 如图 7 所示.

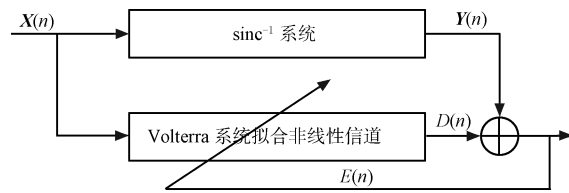


图 7 Volterra 系统辨识原理图

Fig. 7 The diagram of the Volterra system identification

一个离散因果非线性 Volterra 系统的输入 $\mathbf{X}(n)$ 及其输出 $\mathbf{Y}(n)$ 之间的关系可用 Volterra 级数表示为^[21]

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(n) = & h_0 + \sum_{m_1=0}^{\infty} h_1(m_1)\mathbf{X}(n - m_1) + \\ & \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} h_2(m_1, m_2) \times \\ & \mathbf{X}(n - m_1)\mathbf{X}(n - m_2) + \cdots + \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \cdots \\ & \sum_{m_p=0}^{\infty} h_p(m_1, m_2, \cdots, m_p)\mathbf{X}(n - m_1) \times \\ & \mathbf{X}(n - m_2) \cdots \mathbf{X}(n - m_p) + \cdots \end{aligned} \quad (7)$$

其中, m 是记忆长度; h_p 称为 p 阶 Volterra 核, 也称 p 阶非线性冲激响应, 只与系统本身有关而与信号的变化无关.

但若要全部辨识 Volterra 的核, 则很容易导致所谓的“维数灾难”的问题, 计算量非常庞大. 因此, 可以利用核函数的对称性, 不考虑直流分量的影响,

减少核的数量, 从而减小计算量. 此时核函数矩阵为一个三角矩阵, 其项数为

$$m + \sum_{i=2}^p C_{m+i-1}^i \quad (8)$$

其中, p 为阶数, m 为记忆长度. 于是, 式 (7) 可以写成:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(n) = & \sum_{m_1=0}^{N-1} h_1(m_1) \mathbf{X}(n-m_1) + \\ & \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=m_1}^{N-1} h_2(m_1, m_2) \mathbf{X}(n-m_1) \mathbf{X}(n-m_2) + \\ & \cdots + \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=m_1}^{N-1} \cdots \sum_{m_p=m_{p-1}}^{N-1} h_p(m_1, m_2, \cdots, m_p) \times \\ & \mathbf{X}(n-m_1) \mathbf{X}(n-m_2) \cdots \mathbf{X}(n-m_p) + \cdots \quad (9) \end{aligned}$$

对于两路独立的信号矢量 $\mathbf{X}(n)$ 和 $\mathbf{Y}(n)$, 选取核函数参数矢量 $\mathbf{W}(E) = [h_0, h_1, h_2, \cdots, h_p]$, 输入信号矢量 $\mathbf{X}(n) = [x(n), x(n-1), \cdots, x(n-N+1), x(n)x(n), x(n)x(n-1), \cdots, x(n)x(n-N+1), x(n-1)x(n-1), \cdots, x(n-1)x(n-N+1), \cdots, x(n-N+1)x(n-N+1)]^T$, 则式 (9) 的输出信号矢量为

$$\mathbf{Y}(n) = \mathbf{W}(E)^T \times \mathbf{X}(n) \quad (10)$$

于是, sinc^{-1} 模型可用 Volterra 模型描述如下:

$$\text{sinc}^{-1} \approx \mathbf{Y}(n) = \mathbf{W}(E)^T \times \mathbf{X}(n) \quad (11)$$

由上式可知, 将某一速度下的 sinc^{-1} 系统输出 $\mathbf{Y}(n)$, 输入 $\mathbf{X}(n)$ 为已知, 此时只需根据输入输出数据训练好 Volterra 的核函数参数矢量 $\mathbf{W}(E)$, 即可获得图 7 中拟合 sinc^{-1} 模型的非线性 Volterra 模型.

对于 Volterra 核函数的获取, 专家学者们提出了许多方法. 其中, 最小均方误差 (Least mean squares, LMS) 算法是最常见的自适应滤波方法, 该算法原理简单, 便于实时实现, 缺点是收敛速度慢, 动态跟踪性能差; 递推最小二乘 (Recursive least squares, RLS) 算法对估计误差采用指数加权, 收敛速度和跟踪性能大大优于 LMS 算法, 所付出的代价是要采用矩阵求逆递推, 计算量太大^[22]. 近年来, 众多的学者对 LMS 算法的性能分析和算法改进方面进行了大量的研究工作, 提出了许多 LMS 算法的改进算法, 令其收敛速度大大加快. 本文采用了变步长的 LMS 算法训练 Volterra 的核函数 $\mathbf{W}(E)$, 令其均方误差 (Mean square error, MSE) 收敛速度更

快, 算法如下^[23]:

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - \mathbf{X}^T(n) \mathbf{W}(E) \\ \mu(n) &= \beta(1 - \exp(-\alpha |e(n)|^2)) \\ \mathbf{W}(n+1) &= \mathbf{W}(n) + 2\mu(n)e(n)\mathbf{X}(n) \quad (12) \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{W}(n)$ 为时刻 n 的权矢量, $\mathbf{X}(n)$ 为时刻 n 的输入信号矢量, $d(n)$ 为期望输出值, $e(n)$ 是误差信号, $\mu(n)$ 是步长因子. LMS 算法收敛的条件为 $0 < \mu(n) < 1/\lambda_{\max}$, λ_{\max} 是输入信号自相关矩阵的最大特征值. 在满足算法收敛的情况下, α, β 应根据初始误差 $|e(n)|$ 值的大小来选择, 使得初始误差 $|e(n)|$ 对应的 $\mu(n)$ 值尽可能大些. 该算法在初始收敛阶段的 $|e(n)|$ 较大, 对应的 $\mu(n)$ 也较大, 收敛速度就较快. 当算法进入稳态时, $|e(n)|$ 达到最小, 此时 $\mu(n)$ 也达到最小, 由此得到最佳 Wiener 解.

以均值为 0, 方差为 1, 图像大小为 100 像素 \times 10 像素, 服从高斯正态分布的白噪声信号作为输入信号 $X(n)$. 令图像以水平方向 30 像素/秒的速度运动, 标准 LMS 算法的步长 $\mu = 0.0005$ (本仿真最佳值), VSSLMS (Variable step size LMS) 算法的 $\alpha = 200, \beta = 0.0022$ (本仿真最佳值), Volterra 的阶数为 2, 记忆长度也为 2. 采样点数为 50, 分别做 100 次独立仿真后的统计平均结果如图 8 所示. 其中, 横轴坐标为迭代次数, 单位为图像总数之和 10^3 ; 纵轴为误差, 单位为分贝.

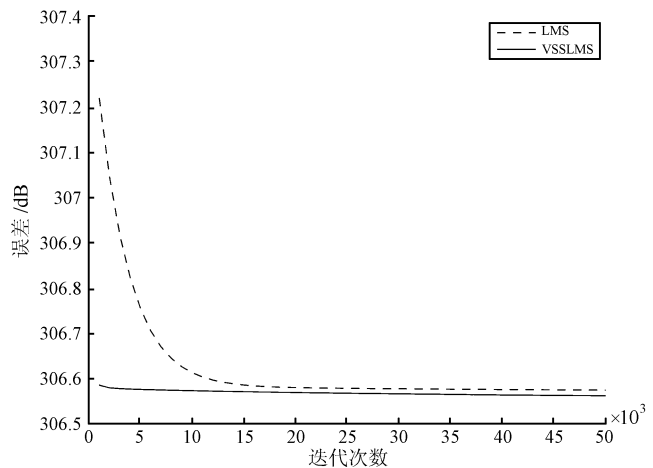


图 8 两种 LMS 算法的收敛曲线

Fig. 8 The convergence curves of LMS algorithms

从图 8 可知, 采用变步长的 VSSLMS 算法, 经过 3×10^3 次迭代后即收敛且稳定下来, 而标准固定步长的 LMS 算法则需要经过近 20×10^3 次迭代才能达到收敛状态. 固定步长 LMS 算法每更新一次核函数, 只需要 $2n+1$ 次乘法和 $2n$ 次加法, 其中, n 为核函数的个数. 也就是说, 固定步长 LMS 算法的每次更新核函数的计算复杂度为 $O(n)$, 总的计算复杂度为 $O(mn)$, 其中, m 为迭代次数. 相比

之下, 变步长 LMS 算法需要计算步长, 故每次更新核函数的计算量比传统 LMS 算法略高, 包括两次指数运算、两次乘法运算和一次加法运算, 但其计算复杂度仍为 $O(n)$. 由于变步长 LMS 算法很快即可收敛, 故它的总的算法计算复杂度为 $O(kn)$, 其中, k 为迭代次数, $k \ll m$. 因此, 采用变步长 LMS 算法训练 Volterra 的方法可节省 $O((m-k)n)$ 的计算量. 因此 VSSLMS 算法的性能明显优于标准固定步长的 LMS 算法, 较好地解决了收敛速度和稳态误差的矛盾.

同时, 由于 Volterra 级数是由无穷多项和无穷多个参数来逼近非线性系统的, 而现实中不可能做到. 事实上, 由于实际处理的运动图像的运动矢量都在一个合理的范围内, 只需选择一个合适的阶数就可以达到改善运动模糊的目的, 故可对其进行截断处理以进一步减少计算量. 这涉及对阶数 p 和记忆长度 m 的选择问题, 它们的取值应该满足下式:

$$\left| \text{sinc}^{-1} \left(K[v_y, v_x] \times \left[\frac{1}{M}u, \frac{1}{N}v \right]^T \right) - W_E \times X_n^T \right| \leq k \quad (13)$$

式中, k 是精度常数, 确定了 Volterra 系统拟合阶数 p (确定精度) 和记忆长度 m 的选择条件. 在现实中, 2 阶或 3 阶 Volterra 系统已经能拟合绝大多数非线性系统了, 采用更高阶的 Volterra 系统会令计算量激增, 且不会带来更好的去模糊效果. 因此, 本文采用 2 阶 Volterra 系统. 另外, 大量的仿真结果表明, 记忆长度与输入图像宽度相同即可获得较好的去模糊效果.

4 仿真分析

本文的仿真系统框架如图 9 所示. 由于随着速度的增加, sinc^{-1} 的输出会越来越大, 特别是出现极点的时候, 从而导致 MSE 曲线越来越难收敛, 而采

用归一化处理, 可将所需要处理的数据限定在一定的范围内, 从而令程序运行时能加快收敛的速度.

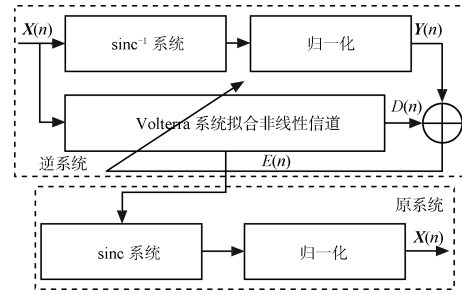
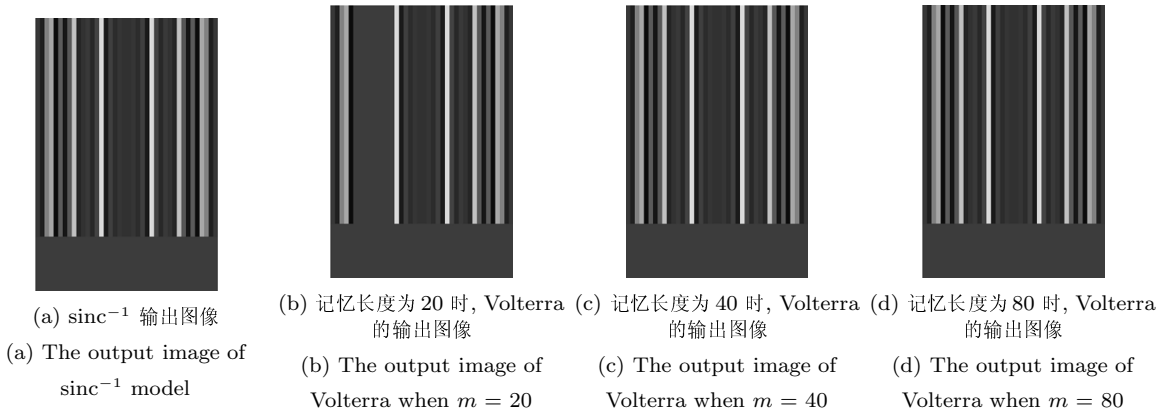
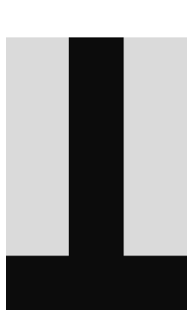


图 9 Volterra 系统消除 LCD 运动图像去模糊极点原理图
Fig. 9 The diagram of eliminating the pole of LCD motion de-blurring by the Volterra system

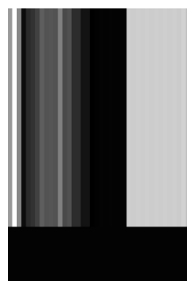
采用 2 阶 Volterra 作为逆系统, 记忆长度分别为 20、40、80, 即分别为图像宽度的 1/2、1 倍和 2 倍, 此时核函数的项数分别为 230、860、3 300 个. 以图 3(a) 为原图像, 令图像以 85 像素/秒的速度水平向右运动, VSSLMS 算法的 $\alpha = 8000$, $\beta = 0.0025$, 仿真结果如图 10 所示. 其中, 横轴坐标为迭代次数, 单位为图像总数之和为 2.4×10^3 ; 纵轴为误差, 单位为分贝.

从仿真结果可知, MSE 曲线的收敛速度非常快, 变步长 LMS 算法的重要性得到体现, 记忆长度对收敛速度的影响不大. 记忆长度为 20 时, Volterra 输出图像与 sinc^{-1} 输出图像之间的误差, 及经过 sinc 原系统的还原后, 人眼感知的图像与原图像的误差都非常大, 其还原图像效果很差, 说明该记忆长度还不足以表征 sinc^{-1} 模型. 当记忆长度为 40 与 80 时, 两种误差都非常小, 但相差也不大. 从还原图像的质量看, 记忆长度为 40 时的还原图像已经比较好, 容易为人眼所接受, 我们认为此时 Volterra 系统已足以表征 sinc^{-1} 模型. 由式 (8) 可知, 记忆长度越长, 则核函数个数越多, 导致计算量剧增. 因此, 本文仿真取记忆长度为 40.





(e) 原图像
(e) Original image



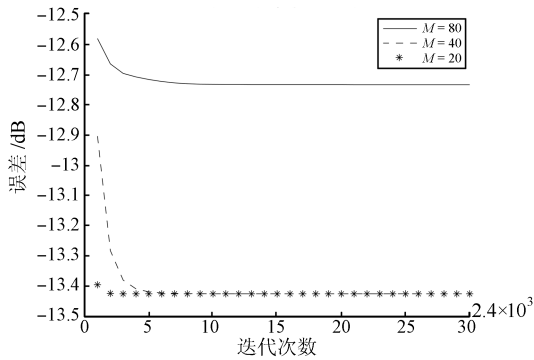
(f) 记忆长度为 20 时, Volterra 还原图像
(f) Restored image by Volterra when $m = 20$



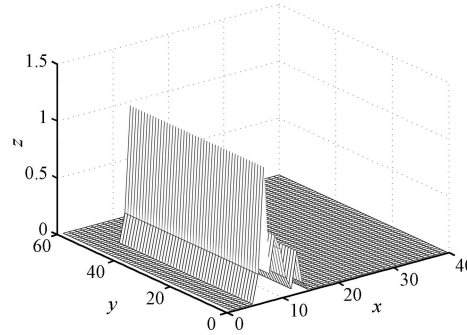
(g) 记忆长度为 40 时, Volterra 还原图像
(g) Restored image by Volterra when $m = 40$



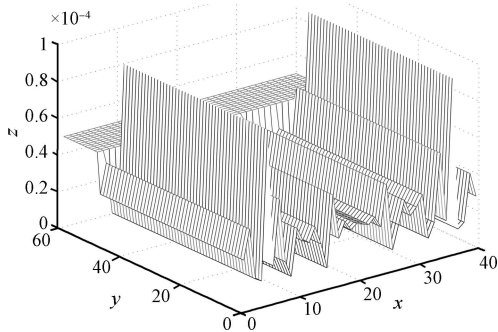
(h) 记忆长度为 80 时, Volterra 还原图像
(h) Restored image by Volterra when $m = 80$



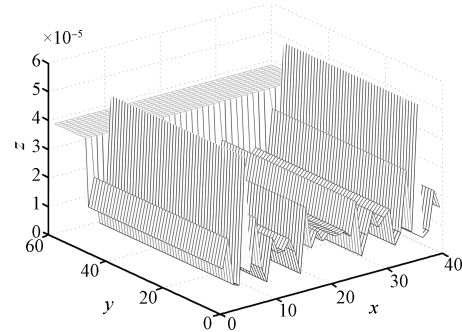
(i) MSE 收敛曲线
(i) The convergence curves of MSE



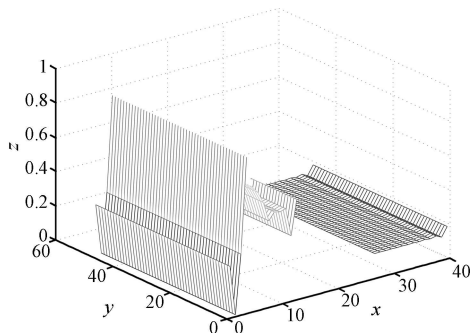
(j) 记忆长度为 20 时, Volterra 输出图像与观察图像的相对误差
(j) The relative error between the output image of Volterra and the observed image when $m = 20$



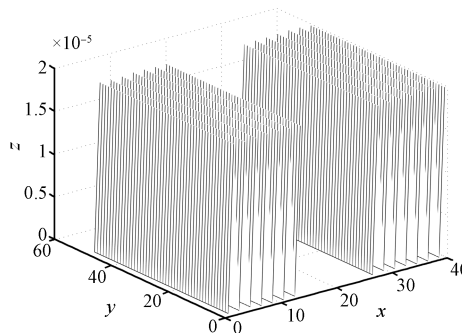
(k) 记忆长度为 40 时, Volterra 输出图像与观察图像的相对误差
(k) The relative error between the output image of Volterra and the observed image when $m = 40$



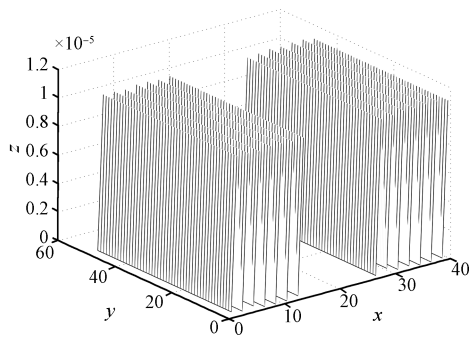
(l) 记忆长度为 80 时, Volterra 输出图像与观察图像的相对误差
(l) The relative error between the output image of Volterra and the observed image when $m = 80$



(m) 记忆长度为 20 时, Volterra 还原图像与原图像的相对误差
(m) The relative error between the restored image of Volterra and the original image when $m = 20$



(n) 记忆长度为 40 时, Volterra 还原图像与原图像的相对误差
(n) The relative error between the restored image of Volterra and the original image when $m = 40$



(o) 记忆长度为 80 时, Volterra 还原图像与原图像的相对误差

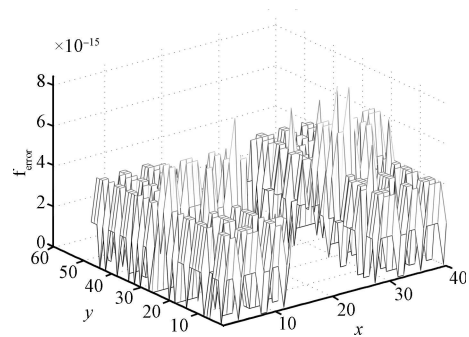
(o) The relative error between the restored image of Volterra and the original image when $m = 80$ (p) sinc^{-1} 还原图像与原图像的相对误差(p) The relative error between the restored image of sinc^{-1} and the original image

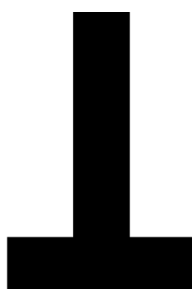
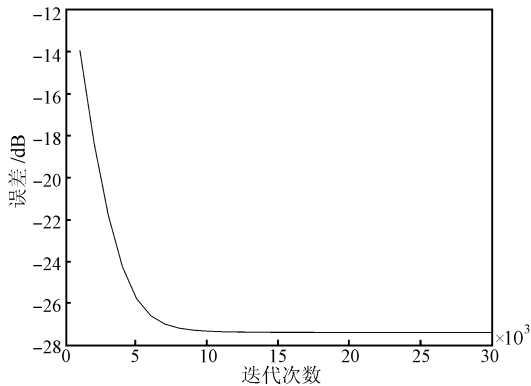
图 10 Volterra 系统辨识 LCD 运动图像去模糊

Fig. 10 The Volterra system identification for LCD motion de-blurring

当图像以 60 像素/秒 ($4T_h$) 的速度水平向右运动时, sinc^{-1} 模型因存在极点 (图 11(g)), 人眼感知到的图像质量较差, 如图 11(d) 所示. 此时用 Volterra 系统进行辨识还原, 仿真结果如图 11 所示.

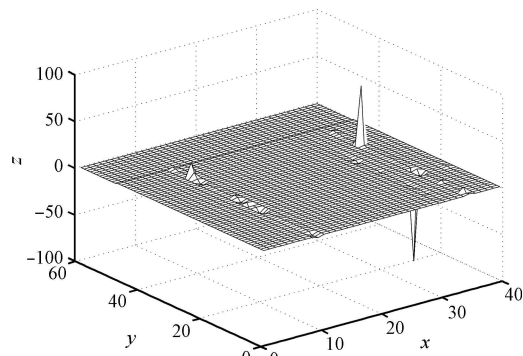
从图 11 可以看出, 出现极点时, MSE 曲线的收敛速度要慢一些, Volterra 输出图像与 sinc^{-1} 输出图像之间的相对误差 (除极点外) 几乎都可以忽略不计. 此时人眼感知的还原图像与原图像的误差如

图 11(h), 相对于图 11(i) (sinc^{-1} 模型还原图像的误差) 来说, 误差小了 3 个数量级, 但不如无极点的运动图像的还原效果 (下降了 2 个数量级). 由仿真结果可知, Volterra 非线性系统拟合 sinc^{-1} 模型后, 拥有了它的特性, 却避免了它的极点问题, 同时也没有出现基于 RL 的盲去卷积方法的图像边缘失真问题^[16]. 可见, 采用 Volterra 非线性系统作为 LCD 运动去模糊系统的逆系统的思路是可行的.

(a) sinc^{-1} 输出图像
(a) The output image of sinc^{-1} model(b) Volterra 输出图像
(b) The output image of Volterra(c) 原图像
(c) Original image(d) sinc^{-1} 还原图像
(d) Restored image by sinc^{-1} (e) Volterra 还原图像
(e) Restored image by Volterra

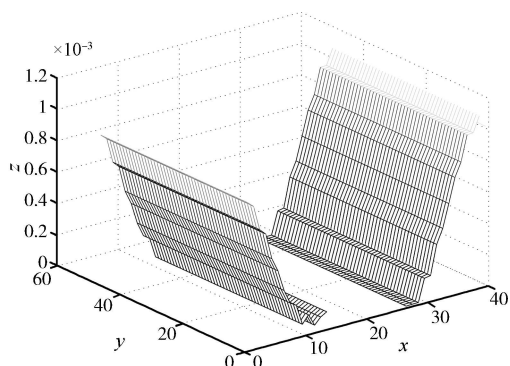
(f) MSE 收敛曲线

(f) The convergence curve of MSE



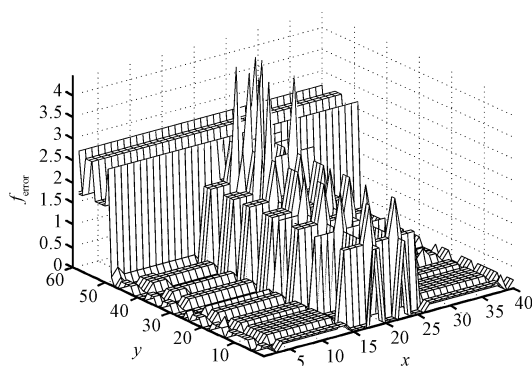
(g) Volterra 输出图像与观察图像的相对误差

(g) The relative error between the output image of Volterra and the observed image



(h) Volterra 还原图像与原图像的相对误差

(h) The relative error between the restored image of Volterra and the original image

(i) sinc^{-1} 还原图像与原图像的相对误差

(i) The relative error between the restored image of sinc^{-1} and the original image

图 11 极点的 Volterra 系统辨识 LCD 图像去模糊

Fig. 11 The Volterra system identification for LCD motion de-blurring on the pole

5 结论

本文从系统辨识的角度出发, 提出了一种采用基于变步长 LMS 的低阶 Volterra 非线性系统拟合 sinc^{-1} 模型以作为逆系统的方法, 从而避免 LCD 运动图像去模糊模型中出现的极点问题. 仿真结果表明, 该方法能用较低阶的 Volterra 系统逼近 sinc^{-1} 模型, 消除 sinc^{-1} 模型中的极点问题, 从而取代 sinc^{-1} 模型作为一个非线性可逆系统, 方法简单、运算速度快. sinc^{-1} 模型为线性连续的模型, 硬件难以精确描述, 通常采用查表方式来快速实现其计算处理过程, 硬件代价较大. 而采用 Volterra 非线性模型拟合 sinc^{-1} 模型, 可用较低阶的多项式来描述, 不需要查表, 故可用较少的硬件资源实现 LCD 运动图像的去模糊处理.

但由于 Volterra 非线性系统的核函数项数会随着阶数与记忆长度的改变而呈指数的变化, 本文仿真中采用 2 阶 40 记忆长度, 尽管利用核函数的对称性减少了核的数量, 但也达到了 860 个核, 这仍需占用比较多的硬件资源. 同时, 在很多实际场景中, 发生运动的只是前景的目标物体, 背景的变化非常缓慢, 而且, 在具有众多目标物体的场景中, 各目标物体的运动方向与速度也可能不一样. 因此, 下一步拟对运动图像进行分块去模糊处理, 以进一步降低核的数量, 减少硬件资源.

References

- 1 Chang S C. The TFT-LCD industry in Taiwan: competitive advantages and future developments. *Technology in Society*, 2005, **27**(2): 199–215
- 2 Chan S H, Nguyen T Q. LCD motion blur: modeling, analysis and algorithm. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, **20**(8): 2352–2365
- 3 Pan H, Feng X F, Daly S. LCD motion blur modeling and analysis. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Genoa, Italy: IEEE, 2005. 21–24
- 4 Kurita T. Moving picture quality improvement for hold-type AM-LCDs. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2001, **32**(1): 986–989
- 5 Feng X F. CD motion-blur analysis, perception, and reduction using synchronized backlight flashing. In: Proceedings of the Human Vision and Electronic Imaging. San Jose, USA: SPIE, 2006. 213–226
- 6 Haan G, Klompenhouwer M A. An overview of flaws in emerging television displays and remedial video processing. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2001, **47**(3): 326–334
- 7 McCartney R I. A liquid crystal display response time compensation feature integrated into an LCD panel timing controller. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2003, **34**(1): 1350–1353
- 8 Kawabe K, Furuhashi T, Tanaka Y. New TFT-LCD driving method for improved moving picture quality. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2001, **32**(1): 998–1001
- 9 Sekiya K, Nakamura H. Eye-trace integration effect on the perception of moving pictures and a new possibility for reducing blur on hold-type displays. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2002, **33**(1): 930–933
- 10 Sluyterman A A S, Boonkamp E P. Architectural choices in a scanning backlight for large LCD TVs. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, **36**(1): 996–999
- 11 Hong S, Berkeley B, Kim S S. Motion image enhancement of LCDs. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Genoa, Italy: IEEE, 2005. 17–20
- 12 Klompenhouwer M A, Velthoven L J. Motion blur reduction for liquid crystal displays: motion compensated inverse filtering. In: Proceedings of the Visual Communications and Image Processing. San Jose, USA: SPIE, 2004. 690–699

- 13 Har-Noy S, Nguyen T Q. LCD motion blur reduction: a signal processing approach. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, **17**(2): 117–125
- 14 Har-Noy S, Martinez E, Nguyen T Q. Filter banks for improved LCD motion. *Image Communication*, 2010, **25**(1): 1–9
- 15 Xia J, Shi Y, Yin H C. Motion adaptive deblurring filter for LCD. *Displays*, 2009, **30**(1): 27–31
- 16 Pang Zhi-Yong, Tan Hong-Zhou, Zhu Xiong-Yong, Chen Fa-Ling. Study on LCD motion blur reduction based on blind signal processing. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010, **49**(2): 17–21
(庞志勇, 谭洪舟, 朱雄泳, 陈法灵. 基于盲信号处理方法的 LCD 运动图像去模糊研究. 中山大学学报, 2010, **49**(2): 17–21)
- 17 Zheng Jun-Li, Ying Qi-Heng, Yang Wei-Li. *Signal and System (Second Edition)*. Beijing: Higher Education Press, 2007
(郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007)
- 18 Zhong Yi-Wei, Deng Shao-Zhi, Liu Zhi-Jun, Yan Xiao-Lin. Method for LCD motion blur reduction by using all-pole filter. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, **24**(5): 729–734
(钟翊炜, 邓少芝, 刘志军, 闫晓林. 基于极点聚焦全极点滤波器减小 LCD 运动模糊的方法. 液晶与显示, 2009, **24**(5): 729–734)
- 19 Fang Yang-Wang, Jiao Li-Cheng, Han Chong-Zhao. New method of study on stability of MIMO bilinear system. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(6): 845–849
(方洋旺, 焦李成, 韩崇昭. MIMO 双线性系统稳定性研究的新方法. 自动化学报, 2001, **27**(6): 845–849)
- 20 Duan Zhe-Min, Si Wei, Wang Hai-Tao. Application of a novel algorithm based on Volterra series to control of aeroturbine speed. *Fire Control and Command Control*, 2010, **35**(3): 102–105
(段哲民, 司伟, 王海涛. Volterra 高阶核新算法在涡轮转速控制上的应用. 火力与指挥控制, 2010, **35**(3): 102–105)
- 21 Tan H Z, Huang Y H, Fu J. Blind identification of sparse Volterra systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2008, **22**(7): 625–662
- 22 Song Hui, Liu Jia. Research on adaptive speech enhancement algorithm based on differential microphone array and

its implementation with DSP. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(9): 1240–1244

(宋辉, 刘加. 基于微分麦克风阵列的自适应语音增强算法研究及 DSP 实现. 自动化学报, 2009, **35**(9): 1240–1244)

- 23 Gao Ying, Xie Sheng-Li. A variable step size LMS adaptive filtering algorithm and its analysis. *Acta Electronica Sinica*, 2001, **29**(8): 1094–1097

(高鹰, 谢胜利. 一种变步长 LMS 自适应滤波算法及分析. 电子学报, 2001, **29**(8): 1094–1097)



朱雄泳 中山大学信息科学与技术学院博士研究生. 主要研究方向为数字图像处理, 视频信号处理, 计算机视觉, 系统分析. E-mail: zhuxiongyong@163.com

(**ZHU Xiong-Yong** Ph.D. candidate at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University. His research interest covers digital image processing, video signal processing, computer vision, and systems analysis.)



周杰 广东广播电视大学计算机系助理研究员. 主要研究方向为数字图像处理和数据库系统管理.

E-mail: zj@gdrtvu.edu.cn

(**ZHOU Jie** Research assistant in the Department of Computer Science, Guangdong Radio and TV University. His research interest covers digital im-

age processing and database system management.)



谭洪舟 中山大学信息科学与技术学院教授. 主要研究方向为宽带通信, 信号处理, 复杂系统辨识及建模, 半导体集成电路设计. 本文通信作者.

E-mail: issthz@mail.sysu.edu.cn

(**TAN Hong-Zhou** Professor at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University.

His research interest covers broadband communications, signal processing, identification and modeling of complex systems, and semiconductor IC design. Corresponding author of this paper.)