

降质图象运动长度参数的估计

朱灿焰

冯纪先

屠忠逐

(电气工程系)

(武汉大学)

摘 要

本文提出了一种新的运动长度参数 L 的估计方法,其特点是对初始值的依赖性极小,理论上完全消除了原始图象的随机性影响,且结果简洁、准确。该方法对白噪声干扰也能起一定的抑制作用。模拟实验证实了该方法的有效性和实用价值。

一、问题的提出

运动模糊降质图象的恢复是图象复原中较有实际意义的课题之一。该课题的研究主要涉及到三个方面的工作,即运动长度参数的估计、复原算法的研究和初始值问题,其中,长度参数的估计值是否准确,决定了复原后图象的质量。因而,寻找有效、实用的参数估计方法则是图象复原的首要问题。

常见的运动降质情形是匀速直线运动所引起的图象模糊。若运动方向沿水平轴正向,运动距离为 L 点,则降质图象 $g(n,m)$ 可表为⁽²⁾

$$g(n,m) = h \sum_{l=0}^L x(n,m-l) + w(n,m) \quad (1)$$

式中, $x(n,m)$ 为原始图象; $w(n,m)$ 为降质过程中噪声的积累; L 即为待求的长度参数; $h = 1/(L+1)$ 的矩阵; $n, m \in [0, N-1]$ 。根据矩阵分解理论⁽⁶⁾, 上式可写成如下形式

$$G(n) = H^c X(n) + W(n) + [B(n) + H^1 X(n)] \quad (2)$$

式中, $G(n) = [g(n,0), g(n,1), \dots, g(n,N-1)]^T$

$$X(n) = [x(n,0), x(n,1), \dots, x(n,N-1)]^T \quad (3)$$

$$W(n) = [w(n,0), w(n,1), \dots, w(n,N-1)]^T$$

$B(n)$ 为初始条件矢量; H^1 为汉克尔矩阵; H^c 为循环矩阵, 其特征矢量为付里叶变换正交基⁽¹⁾, 特征值为

本文于1988年1月22日收到

$$\lambda(m) = h \cdot \frac{\sin \frac{L+1}{N} m \pi}{\sin \frac{m}{L} \pi} \exp \left[-j \frac{L}{N} m \pi \right],$$

$$m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

对式(2)求付里叶变换, 则有

$$\widetilde{G}(n) = \Lambda_H \widetilde{X}(n) + \widetilde{W}_b(n) \quad (5)$$

其中, Λ_H 为 H^c 的特征值对角矩阵; $\widetilde{W}_b(n)$ 是 $W(n) + [B(n) + H^H X(n)]$ 的付里叶变换。根据式(4)可知, 在 m 为 $N/(L+1)$ 的整数倍处, 式(5)中的第一项将出现零点, 故可由 $\widetilde{G}(n)$ 的谷点位置来估计出 L 值。然而, 由于项 $\widetilde{X}(n)$ 和 $\widetilde{W}_b(n)$ 的存在, 使得现有的一些方法, 如幅度法⁽¹⁾、相位统计法⁽²⁾、积分平均法⁽³⁾和倒谱法⁽⁴⁾等, 均不可避免地受到了原始图象的随机性和噪声的影响。

本文在原始图象的准因果模型的基础上, 得到了循环矩阵特征值的估计, 然后, 根据特征值与参数 L 间的关系, 将检测结果以冲激函数的形式表现出来, 故具有准确、简洁的特点。在理论上, 该方法完全消除了原始图象的随机性影响, 且能有效地抑制白噪声干扰。最后, 我们给出了计算机模拟实验结果。

二、长度参数估计的一种新方法

我们知道, 一维信号的一个重要性质是其具有因果性。然而, 对于二维图象数据来说, 其因果性并不是很重要的。因为, 尽管整顿图象的运动是因果的, 但实物的图象数据间并不具有因果性关系, 故此, 我们可用准因果模型⁽⁵⁾来描述二维原始图象。

假设原始图象满足各向同性和稳态的特性, 则根据 Woods 的结论⁽⁸⁾, $x(n, m)$ 为一可分离的 Markov 稳态过程随机场, 且可用下式描述:

$$x(n, m) = \alpha x(n, m-1) + \alpha x(n, m+1) + \rho_v x(n-1, m) - \alpha \rho_v x(n-1, m-1) \\ - \alpha \rho_v x(n-1, m+1) + u(n, m) \quad (6)$$

此式即为准因果图象模型, 其中, $\alpha = \rho_h / (1 + \rho_h^2)$; ρ_v, ρ_h 即为 $x(n, m)$ 的自相关系数; $u(n, m)$ 是一各向同性的非白噪声激励源。将上式写成矩阵形式, 则有

$$Q^c X(n) = \rho_v Q^c X(n-1) + U(n) + A(n) \quad (7)$$

Q^c 为循环矩阵, 其特征值 $\lambda_Q(m) = 1 - 2\alpha \cos(-\frac{2\pi}{N}m)$; $A(n)$ 被称为边界条件矢量。由于 $N \gg 1$, 故 $A(n)$ 可忽略掉。此时, 式(7)简化为

$$Q^c X(n) = \rho_v Q^c X(n) + U(n) \quad (8)$$

式中, $X(n)$ 和 $U(n)$ 是行矢量, 其形式和式(3)相同。对上式两边求付里叶变换, 得

$$\Lambda_Q \widetilde{X}(n) = \rho_v \Lambda_Q \widetilde{X}(n-1) + \widetilde{U}(n) \quad (9)$$

代入式(5), 得

$$\widetilde{G}(n) - \rho_v \widetilde{G}(n-1) = \Lambda_H \Lambda_Q^{-1} \widetilde{U}(n) + \widetilde{W}_b(n) - \rho_v \widetilde{W}_b(n-1) \quad (10)$$

$$\text{令} \begin{cases} \widetilde{G}_o(n) = \widetilde{G}(n) - \rho_v \widetilde{G}(n-1) \\ \widetilde{W}_{ob}(n) = \widetilde{W}_b(n) - \rho_v \widetilde{W}_b(n-1) \end{cases} \quad (11)$$

则式(10)可简化为

$$\widetilde{G}_o(n) = \Lambda_H \Lambda_Q^{-1} \widetilde{U}(n) + \widetilde{W}_{ob}(n) \quad (12)$$

分解上式, 有

$$\widetilde{g}_o(n, m) = \frac{\lambda_H(m)}{\lambda_Q(m)} \widetilde{u}(n, m) + \widetilde{w}_{ob}(n, m) \quad (13)$$

上式两边同乘以其共轭值, 并对 n 求和, 则有

$$\sum_n \left| \widetilde{g}_o(n, m) \right|^2 = \sum_n \left| \frac{\lambda_H(m)}{\lambda_Q(m)} \widetilde{u}(n, m) + \widetilde{w}_{ob}(n, m) \right|^2$$

因为 $u(n, m)$ 与 $W_{ob}(n, m)$ 互不相关, 故

$$\sum_n \left| \widetilde{g}_o(n, m) \right|^2 = \left| \frac{\lambda_H(m)}{\lambda_Q(m)} \right|^2 \sum_k \left| \widetilde{u}(n, m) \right|^2 + \sum_n \left| \widetilde{w}_{ob}(n, m) \right|^2$$

整理得

$$\left| \lambda_H(m) \right|^2 = f(m) \left[\sum_n \left| \widetilde{g}_o(n, m) \right|^2 - \sum_n \left| \widetilde{w}_{ob}(n, m) \right|^2 \right] \quad (14)$$

此式即为所求的估计 H^c 特征值的公式。其中, $m=0, 1, 2, \dots, N-1$; $f(m)$ 为一加权因子, 其具体形式为(详见附录A)

$$f(m) = 1 / (1 - \rho_v^2) \sigma_x^2 |F\{\rho_h^{-1}\}|^2 \quad (15)$$

若噪声为零, 并忽略掉边界条件的影响, 则式(14)可简化为

$$\left| \lambda_H(m) \right|^2 = f(m) \sum_n \left| \widetilde{g}_o(n, m) \right|^2 \quad (16)$$

在忽略掉边界条件的情况下, 对加性白噪声, 式(14)可近似为

$$\left| \lambda_H(m) \right|^2 = f(m) \left[\sum_n \left| \widetilde{g}_o(n, m) \right|^2 - \sigma_w^2 \right] \quad (17)$$

σ_x^2 和 σ_w^2 分别为原图象和噪声的方差值。

显然, 根据式(14)所得到的 L 参数估计值, 已完全消除了原始图象的影响, 在已知噪声分布特性时, 也能起到一定的抑制作用。然而, 直接从退化图象数据中所得到的 $|\lambda_H(m)|^2$ 估计值, 并不一定是理想值, 因而, 根据其谷点位置来估计参数值不一定精确、可靠, 所以, 应进一步寻求更有效的函数形式。

由式(4)知, $|\lambda_H(m)|^2$ 是一抽样函数, 见图1(a)所示。我们知道, 抽样函数的付里

叶变换是一三角形函数。令

$$fh(v) = F\{|\lambda(m)|^2\} \quad (18)$$

$fh(v)$ 的波形见图 1 (b), 其截止点在 $L+1$ 处。对 $fh(v)$ 求导, 令

$$\begin{cases} df(v) = fh(v) - fh(v+1) \end{cases} \quad (19. a)$$

$$\begin{cases} dd(v) = df(v) - df(v+1) \end{cases} \quad (19. b)$$

$df(v)$ 和 $dd(v)$ 随 v 变化的曲线分别见图 1 (c)和(d), $dd(v)$ 恰好在 $v=L$ 处出现一个正冲激。将图 (a) (b) (d) 作比较可发现, 从图 (d) 中估计 L 参数的值, 显然更准确、可靠。因各

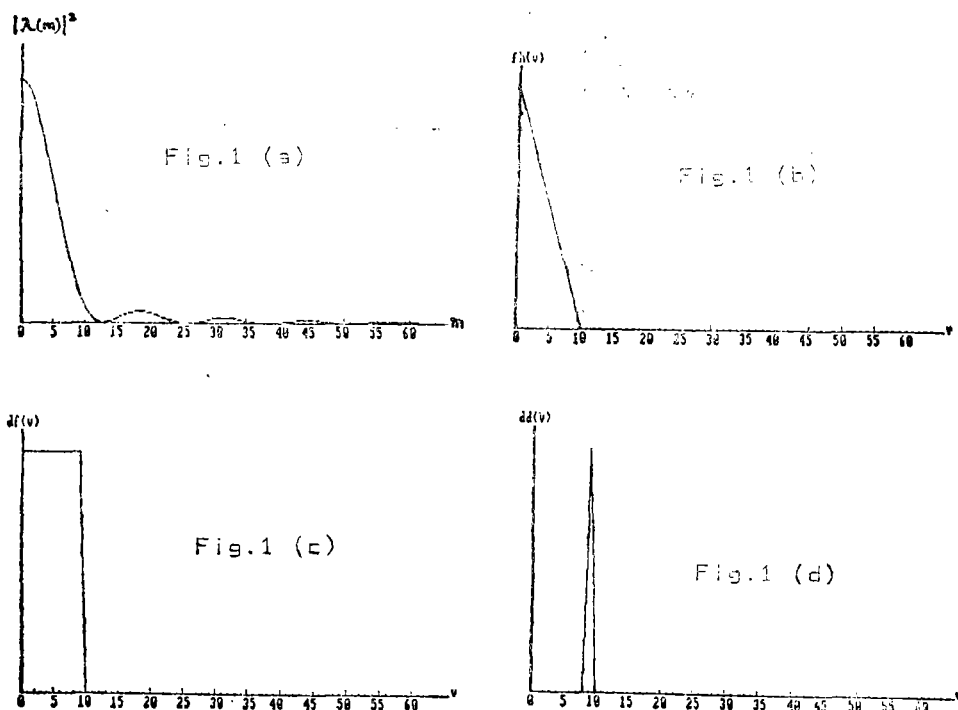


图 1 循环矩阵 H^c 特征值的特性曲线。图中取 $N=128$ 点, $L=9$ 点

曲线均具有对称性, 故图 1 中仅画出了 0 至 $N/2$ 间各点的变化情况。

三、实验结果与分析

为了验证上节所述方法原理的正确性, 我们根据式 (1) 产生了四幅 256×256 的模糊图象, 并假设 $w(n, m) = 0$, 运动长度参数 L 分别为 19 点、32 点、7 点和 75 点, 分别见图 2 (b)、(c) 及图 4 (b)、(c)。图 2 (a) 是一幅妇女头像的原始图象; 图 4 (a) 是一幅风景照片, 它是对应于图 4 (b)、(c) 的原始图象。实验结果分别见图 3 和图 5。为了突出峰值, 我们对各曲线进行了零值下限幅处理。

图3中各曲线分别对应于图2(a)、(b)和(c)，它们进行估计的子行长度均为128点；图5中各曲线则分别对应于图4(a)、(b)和(c)，其中，(a)和(b)的子行长度为128点；(c)的子行长度为256点。从实验结果可看出， $N_e \leq N$ (N_e 为参与估计的子行长度)，均给出了准确的估计结果。实际上，根据上节的理论原理可知，由于付里叶变换的对称性，当 N_e 满足关系

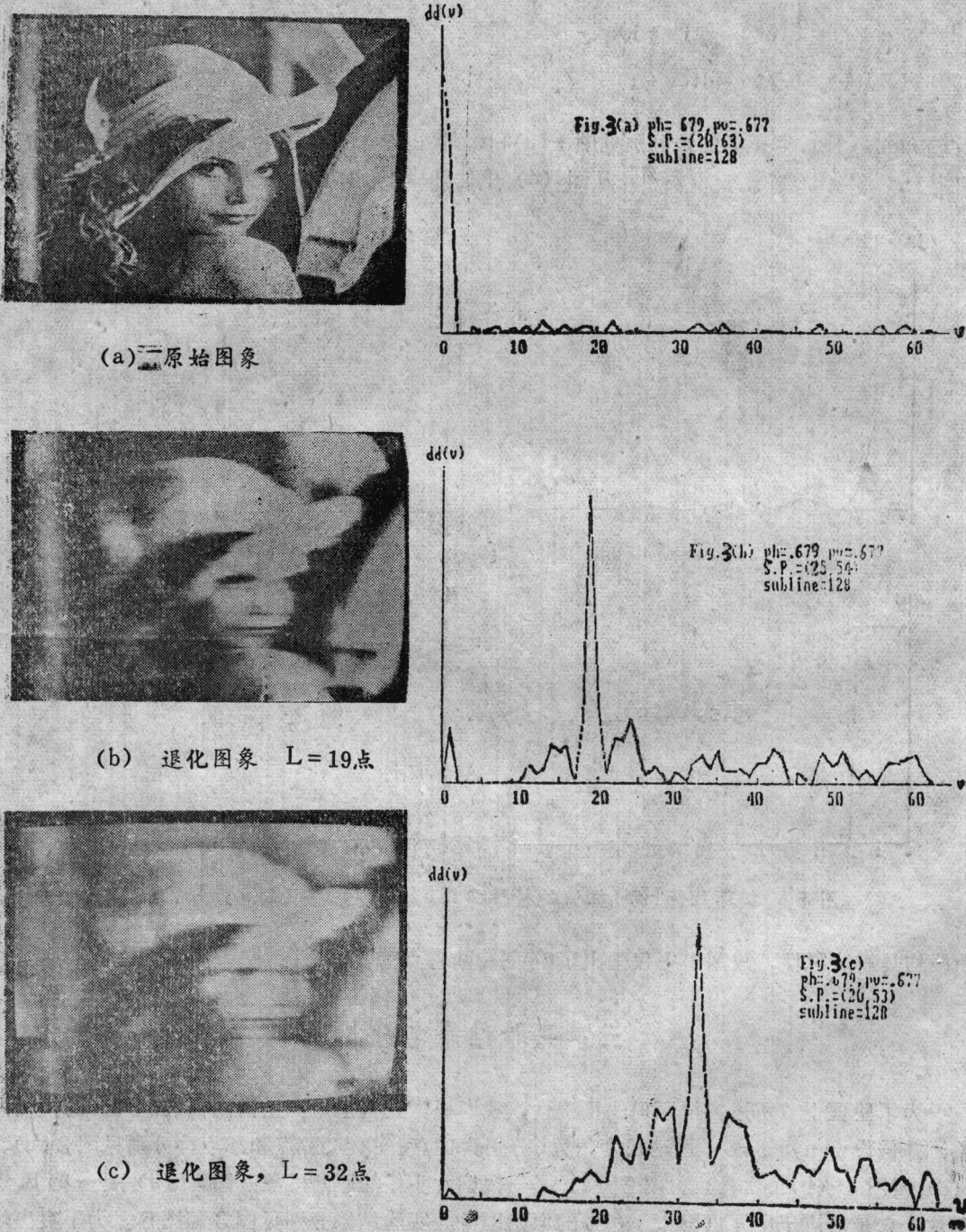


图2 妇女头像

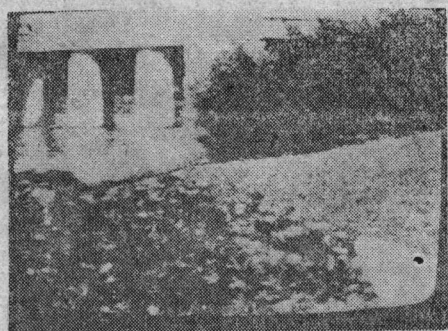
图3 对应于图2的检测曲线

式

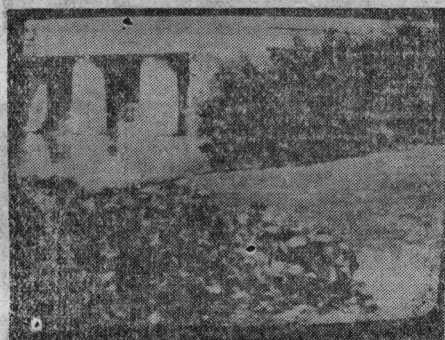
$$2(L+1) < N \leq N$$

(20)

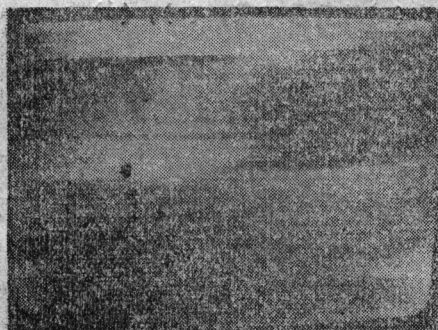
时, 则可得到准确的 L 参数估计值。另外, 参与估计的行数越多, 则显然有估计值越准确。本文中的各实验曲线均是在子行数为200时获得的。



(a) 原始图象



(b) 退化图象 $L=7$ 点



(c) 退化图象, $L=75$ 点

图4 风景照片

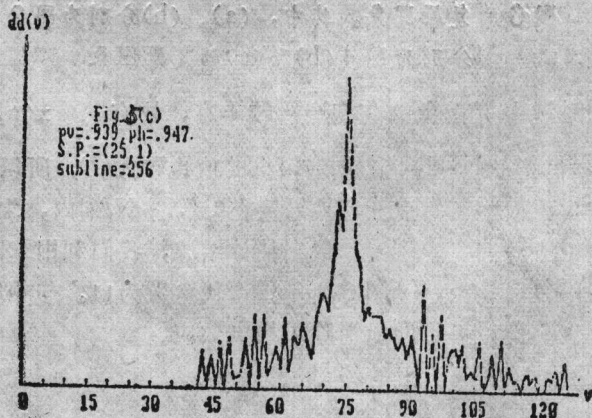
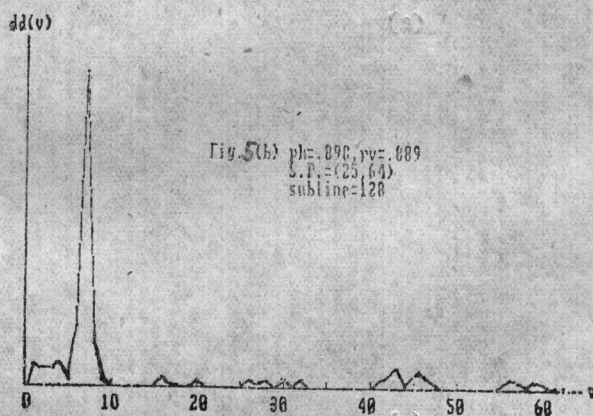
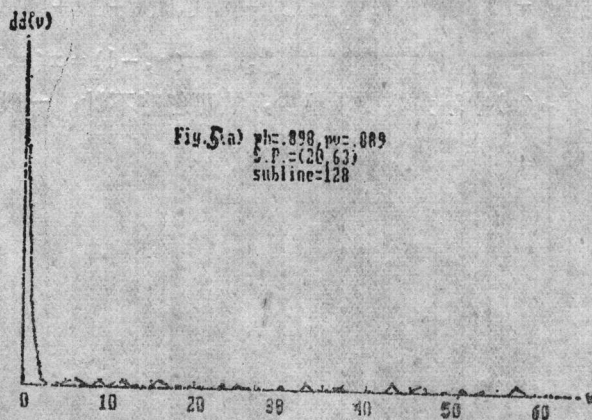


图5 对应于图4的检测曲线

从实验结果还可看出,各结果曲线的初始点均不相同,这说明该方法对初始条件的依赖性极弱。实际上,当 $w(n,m)=0$ 时,

$$\begin{aligned}\widetilde{W}_{pb}(n) &= \widetilde{B}(n) - \rho_v \widetilde{B}(n-1) + H^1 [\widetilde{X}(n) - \rho_v \widetilde{X}(n-1)] \\ &= [\widetilde{B}(n) + H^1 \widetilde{X}(n)] - \rho_v [\widetilde{B}(n-1) + H^1 \widetilde{X}(n-1)]\end{aligned}\quad (21)$$

若边界条件满足循环移位特性,即 $x(n,-1)=x(n,N-1)$,则有 $\widetilde{W}_{pb}(n)=0$;若 $L \ll N$,则 $\widetilde{W}_{pb}(n)$ 中不为零的项很少,故可忽略不计;一般情况下,因图象的低频分量较大,反映

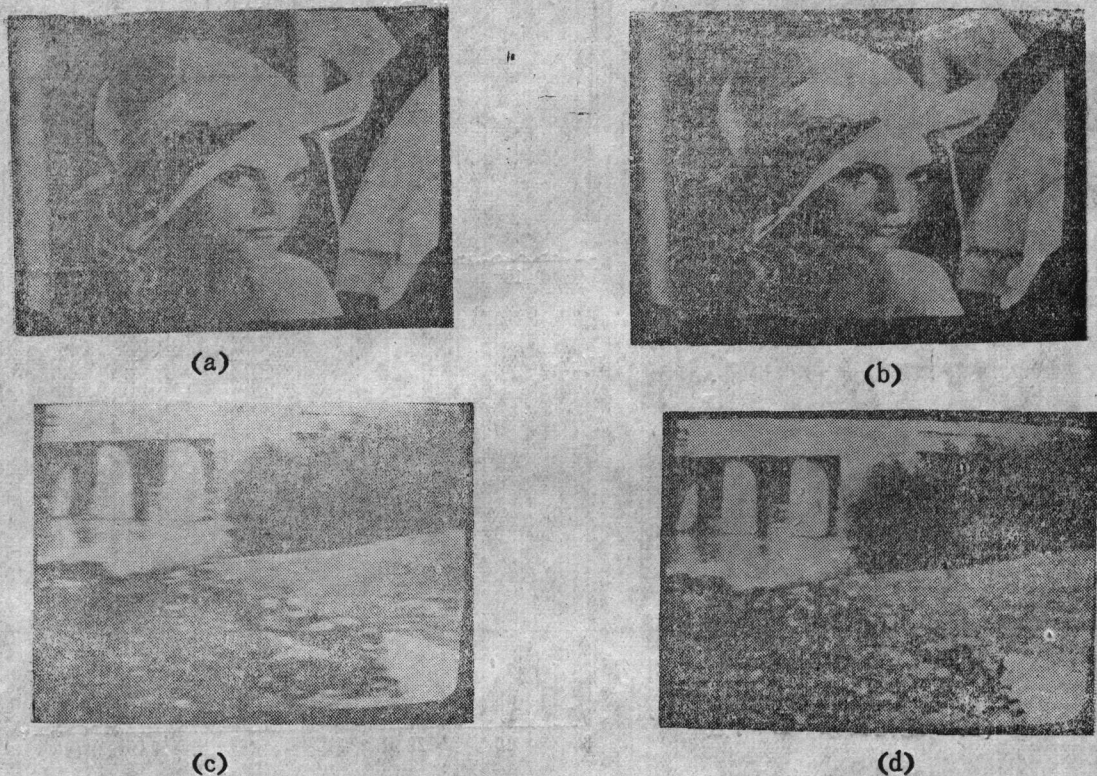


图6 复原图象。其中,(a)、(b)分别为图2(b)和(c)的复原结果;(c)、(d)分别为图4(b)和(c)的复原图象

到时域中是图象的灰度层次较丰富,故有 $x(n,-1) \approx x(n-1,-1)$; $x(n,N-1) \approx x(n-1,N-1)$ 。同时, ρ_v 的值也较大⁽⁷⁾,所以, $\widetilde{W}_{pb}(n)$ 的影响可忽略不计。实验过程中,我们将初始点任意地设置在0至 $N-N$ 列内,均得到了较准确的估计结果。由于篇幅所限,实验曲线未列出。根据估计结果,我们利用二阶收敛约束递推复原方法得到了各退化图象的复原结果,见图6所示。迭代次数为11。与相应的原始图象相比较,尽管复原图象的对比度下降,但已明显消除了模糊效应。

四、结 论

实验结果表明：在无噪声情形，本文所提出的方法能准确地估计出降质图象的运动长度参数 L 。该方法对初始点的依赖性极小，在满足条件 $2(L+1) < N_s \ll N$ 时，可尽量使 $N_s < N$ ，从而可减少计算量和存储空间。理论推导的结果还适用于有噪情形。

今后，我们的工作进一步完善该方法，并证实其在有噪情形时的有效性和实用性。

附录A 式(15)的证明

证：根据式(9)，经分解得

$$\begin{aligned}\tilde{u}(n, m) &= \lambda_Q(m) [\tilde{x}(n, m) - \rho_v \tilde{x}(n-1, m)] \\ &= \lambda_Q(m) \tilde{x}_p(n, m)\end{aligned}\quad (P \cdot 1)$$

$$\begin{aligned}\therefore \sum_n |\tilde{u}(n, m)|^2 &= \lambda_Q^2(m) \sum_n |\tilde{x}_p(n, m)|^2 \\ f(m) &= \frac{\lambda_Q^2(m)}{\sum_n |\tilde{u}(n, m)|^2} = \frac{1}{\sum_n |\tilde{x}_p(n, m)|^2}\end{aligned}\quad (P \cdot 2)$$

我们已假设 $x(n, m)$ 为各向同性的，且为一可分的Markov稳态过程随机场，故有

$$\begin{aligned}\text{Cov}\{x(n, m)\} &= \sum_n \sum_m x(n, m) x(n+k, m+1) \\ &= [\sum_n x_1(n) x_1(n+k)] [\sum_m x_2(m) x_2(m+1)] \\ &= \sigma_x^2 \rho_v^{|k|} \rho_b^{|l|}\end{aligned}\quad (P \cdot 3)$$

$$\text{即} \begin{cases} \sum_n x_1(n) x_1(n+k) = \sigma_x^2 \rho_v^{|k|} \\ \sum_m x_2(m) x_2(m+1) = \sigma_x^2 \rho_b^{|l|} \end{cases}\quad (P \cdot 4)$$

$$\text{由于付里叶变换是沿水平方向进行的，所以，} \sum_n |\tilde{x}_p(n, m)|^2 = \sigma_x^2 (1 - \rho_v^2) |\tilde{x}_2(m)|^2\quad (P \cdot 5)$$

根据Parseval定理⁽⁶⁾，知 $|\tilde{x}_2(m)|^2 = F\{\sigma_x^2 \rho_b^{|l|}\}$ ，所以， $f(m) = 1/\sigma_x^2 (1 - \rho_v^2) F\{\rho_b^{|l|}\}$

参 考 文 献

- [1] R. C. Gonzalez, and P. Wintz, 《数字图象处理》, 李叔梁等译, 科学出版社, 1983年。
- [2] Li Han, Wang Yenping, "A new model of motion blurred images and estimating of its parameter," ICASSP—86, pp. 2447~2450, Tokyo, 1986.
- [3] H. C. Andrews, and B. R. Hunt, Digital Image Restoration, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1977.
- [4] T. M. Cannon, "Blind deconvolution of spatially invariant image blurred with phase," IEEE Trans. Vol. ASSP-24, pp. 58~63, Feb. 1976.
- [5] A. K. Jain, "A semicausal model for recursive filtering of 2-D images," IEEE Trans. C-26, pp. 343-350, April 1977.
- [6] ———, "A operator factorization method for restoration of blurred images," IEEE Trans. C-26, pp. 1061~1071, Nov. 1977.
- [7] 姚庆栋等著, 《图象编码基础》, 人民邮电出版社版, 1983年。
- [8] J. W. Woods, "Two-dimensional discrete Markovian fields," IEEE Trans. IT-18, pp. 232~240, 1972.
- [9] A. V. Oppenheim, and R. W. Schaffer, 《数字信号处理》, 董士嘉、杨耀增译, 科学出版社, 1980年。

Motion Length Parameter Estimating of Degraded Images

Zhu Canyan
(East China Jiaotong Uni.)

Feng Jixian Tu Zhongsui
(Wuhan University)

Abstract

In this paper, a new method for estimating the motion length parameter L of degraded images is proposed. It is of these advantages that being nearly not dependent upon the choice of starting points, can completely eliminating the stochastic effectiveness of the original image in theory, and having exact correct, simple and clear results. This method is also suitable for the noisy blurred images. Simulation experiments show this method is practical and valuable.