

中图法分类号: TN911.73 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)01-0062-06
论文引用格式: 王伟,方勇.单通道散焦模糊置换图像的盲分离[J].中国图象图形学报,2012,17(1):62-67

单通道散焦模糊置换图像的盲分离

王伟¹,方勇^{1,2}

1. 上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室,上海 200072;
2. 新型显示技术与应用集成教育部重点实验室,上海 200072

摘要: 针对一类散焦模糊置换图像,提出一种基于参数估计的单通道盲分离新方法。该方法基于散焦模糊置换图像的频域特性估计出散焦模糊半径,采用 Lucy-Richardson(L-R)算法对置换图像进行盲复原,并通过定义像素梯度绝对值和来对复原产生的振铃效应进行评价,根据评价结果进行分类估计出置换混合矩阵,从而完成置换源图像子块的分离。实验结果表明,针对经历不同置换操作的散焦模糊置换图像,该方法均能获得较好的分离效果,同时对高斯噪声和有损 JPEG 压缩都具有较好的鲁棒性。

关键词: 置换图像;盲源分离;散焦模糊;参数估计;单通道

Blind separation of single-channel permuted defocus blurred image

Wang Wei¹, Fang Yong^{1,2}

1. School of Communication and Information Engineering, Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Key Laboratory of Advanced Display and System Applications, Ministry of Education, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract: A novel single-channel blind separation algorithm for permuted defocus blurred image is proposed based on parameter estimation in this paper. The defocus blur radius is estimated by the characteristics of permuted image in the frequency domain, and then the permuted image is restored by performing the Lucy-Richardson(L-R) blind restoration method. The ringing effect of restored image is measured by defining the sum of absolute pixel gradient, and the permutation mixing matrixes can be accurately estimated by classifying the ringing effect of each sub-block, thereby separating the source images. Simulation results show that the proposed algorithm is able to achieve better separation efficiency for the permuted defocus blurred image with various permutation operations and a better performance on the robustness against Gaussian noise and lossy JPEG compression.

Key words: permuted image; blind source separation; defocus blur; parameter-estimation; single-channel

0 引言

盲信号分离是只根据观测到的信号分离或恢复出未知源信号的过程,是近年来信号处理领域和神

经网络领域研究的热点之一,在图像处理、语音识别等方面有着许多潜在的应用。单通道盲分离作为盲信号分离中一种比较极端的情况,讨论在只有一个接收信号的情况下实现对多个源信号的分离,由于其是一个极端病态问题,解决起来十分困难。但由于单通道盲分离具有诱人的应用前景,目前正受到

收稿日期:2010-09-28;修回日期:2011-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(60872114);上海市重点学科基金项目(S30108);上海市科委重点实验室基金项目(08DZ2231100);上海大学研究生创新基金项目(SHUCX101086)

第一作者简介:王伟(1983—),男,现为上海大学通信与信息系统专业博士研究生,主要研究方向为图像处理和盲信号分离。E-mail:wwang_shu@163.com

越来越多的关注^[1-8]。目前研究者研究的单通道盲分离问题大都假设多个源信号之间是以叠加的方式进行混叠的, 如果一类混合信号不是以叠加方式, 而是以置换的方式与另外的信号发生混叠, 由于这两种混合方式完全不同, 现有的盲分离方法就不能用来解决这种单通道置换混叠信号的分离问题, 而这类问题在信号的原始性认证等方面有重要应用。

文献[9]首次提出单通道置换混叠信号的盲分离问题, 并给出正弦置换混叠信号和图像置换混叠信号两个盲分离实例。然而由于源信号被置换的部分信息的丢失, 源信号置换的区域未知, 并且置换后信号具有语义的完整性, 导致这类单通道置换混叠信号的盲分离问题更为复杂。文献[9]只是对其进行了初步研究, 提出的算法也不具有通用性。本文针对一类经历置换操作的散焦模糊图像进行研究, 探讨其盲分离方法。这类散焦模糊置换图像在图像认证中经常碰到, 在刑侦与物证鉴定的实际工作中往往面对的是由于成像设备对焦不准而导致的散焦模糊图像, 如何辨识其原始性, 对于提高刑侦和物证鉴定的准确性和有效性具有重要的现实意义。

本文在文献[9]工作的基础上, 提出一种基于参数估计的单通道盲分离新方法。该方法首先基于散焦模糊置换图像的频域特性估计出散焦模糊半径, 并根据估计半径构造出点扩展函数(point spread function); 其次, 采用 L-R 算法对置换图像进行盲复原, 并通过定义像素梯度绝对值和来对复原产生的振铃效应进行评价; 最后, 根据评价结果进行分类估计出置换混合矩阵, 从而完成置换源图像子块的分离。实验仿真表明了本文方法的有效性和鲁棒性。

1 问题描述

散焦模糊置换图像是指散焦模糊图像的一部分被其他图像置换, 其数学模型可描述如下

$$y(i, j) = A_1 \odot s_1(i, j) + A_2 \odot s_2(i, j) = A \cdot s(i, j) \quad (1)$$

式中, $y(i, j)$ 为置换图像, \odot 表示 Hadamard 积, $s_1(i, j)$ 为散焦模糊图像, $s_2(i, j)$ 为其他图像(为了不引起视觉上的畸变, 一般也为模糊图像), 源图像 $s(i, j) = [s_1(i, j) \ s_2(i, j)]^T$, 置换混合矩阵 $A = [A_1 \ A_2]$ 。这里

$$A_1 = \begin{cases} 1 & (i, j) \in U_1 \\ 0 & (i, j) \in U_2 \end{cases}$$

$$A_2 = \begin{cases} 0 & (i, j) \in U_1 \\ 1 & (i, j) \in U_2 \end{cases}$$

式中, U_1, U_2 为激活区间, $U_1 \cup U_2 = U$, $U_1 \cap U_2 = \emptyset$ 。本文的目的就是仅根据得到的置换图像 $y(i, j)$ 来分离出源图像 $s(i, j)$ 的子块, 由于置换混合矩阵 A_n 是特殊的二值矩阵(0-1 矩阵), 通过估计出 A 可实现源图像子块的分离。

由于式(1)中的源图像 $s(i, j)$ 都为模糊图像, 式(1)可以等效的写成

$$y(i, j) = A_1 \odot (f_1(i, j) \otimes h_1(i, j)) + A_2 \odot (f_2(i, j) \otimes h_2(i, j)) \quad (2)$$

式中, \otimes 表示卷积算子, $f_n(i, j)$ 为原始清晰图像, $h_n(i, j)$ 为点扩展函数(PSF), $n = 1, 2$ 。其中散焦模糊图像 PSF $h_1(i, j)$ 是一个对称的圆形区域^[10], 如下式

$$h_1(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R^2} & \sqrt{i^2 + j^2} \leq R \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, R 为散焦模糊半径。由于置换混合矩阵 A_n 与激活区间 U_n 存在一一对应关系, 可通过对参数 R 的估计来实现激活区间 U_1 的检测, 从而最终估计出混合矩阵 A 。对散焦模糊半径 R 的估计可由散焦模糊图像的频域特性得到, 如式(4)(5)所示。

$$H_1(\omega_1, \omega_2) = 2\pi R \frac{J_1(R \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2})}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}} \quad (4)$$

式中, $H_1(\omega_1, \omega_2)$ 表示 $h_1(i, j)$ 的傅里叶变换, $J_1(\cdot)$ 表示一阶 Bessel 函数。其中 $H_1(\omega_1, \omega_2)$ 是圆对称的, 它的第一过零点的轨迹形成一个圆, 设圆的半径为 d_r , 则有

$$R = \frac{3.83N}{2\pi d_r} \quad (5)$$

这里, 假定计算离散傅里叶变换的尺寸是 $N \times N$ 。

2 散焦模糊置换图像的盲分离

2.1 散焦模糊半径估计

为了能够准确地检测激活区间, 首先要对散焦模糊半径 R 进行估计, 而这可通过散焦模糊图像的频域特性得到, 如图 1 所示。其中, 图 1(a) 是 $R = 5$ 的散焦模糊图像, 图 1(c) 是经历过高斯模糊置换的置换图像。

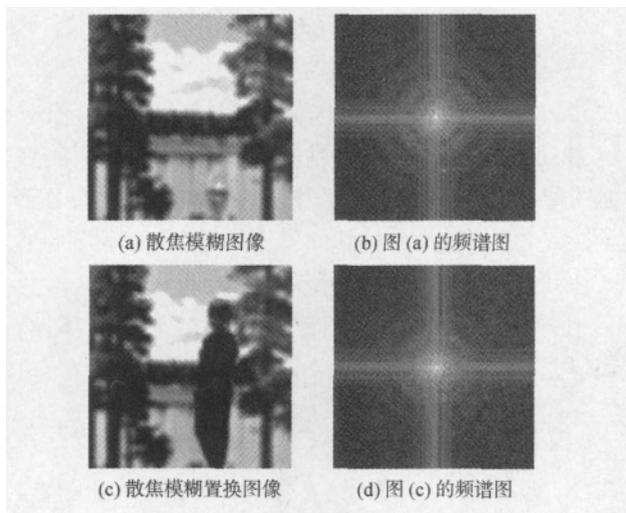


图 1 模糊图像及其频谱

Fig. 1 Blurred images and their DFT s

从图 1(b) 可以看出, 散焦模糊图像具有显著的频域特征, 其幅度谱是一系列周期性的圆环, 第一个中心圆环的半径 d_r 决定了散焦模糊的程度, 即散焦模糊半径 R 。虽然经过置换后的散焦模糊图像的幅度谱有些被削弱, 但具有同心圆的频域特征还是比较明显, 如图 1(d) 所示。本文提出用对角线分析方法来估计散焦模糊半径 R , 同时, 为了消除孤立点的影响, 可采用高斯模糊进行预处理。该方法首先提取图像幅度谱的对角线; 其次, 沿对角线方向检测离中心点最大的尖峰到中心的距离, 即为第一圆环的半径 d_r , 如图 2 所示。

由图 2(a)(b) 分别得到 $d_r = 31$ 和 $d_r = 30$, 最后, 代入式(5) 求得散焦模糊半径 $R = 5.04$ 和 $R = 5.20$, 虽然有些误差, 但基本估计出原模糊参数。

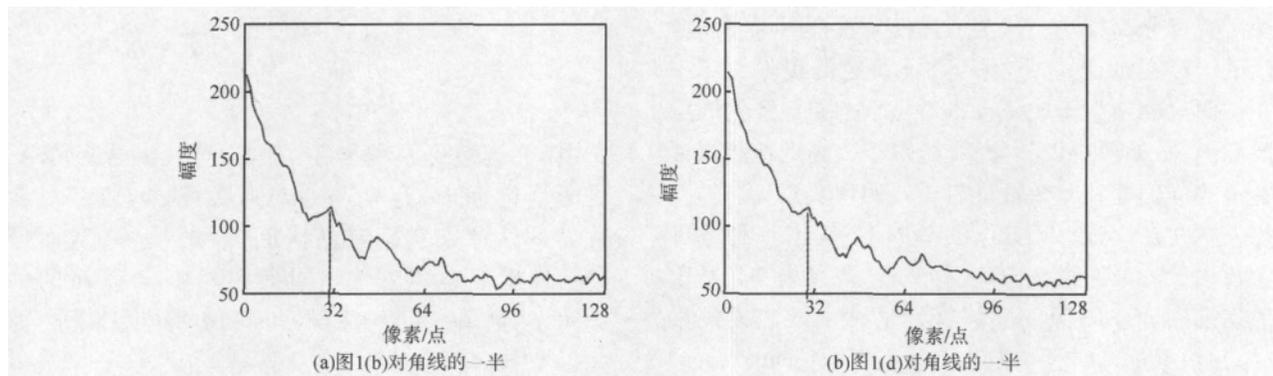


图 2 中心圆环半径的估计

Fig. 2 Estimated the radiuses of the center circles

2.2 置换混合矩阵估计

根据 2.1 节估计出的散焦模糊半径 R 代入式(3) 构造出 PSF, 然后根据构造出的散焦模糊 PSF 对置换图像进行盲复原, 并对复原产生的振铃效应进行评价, 根据评价结果估计出置换混合矩阵。

本文采用经典的 L-R 算法^[11] (取迭代次数为 20) 对散焦模糊图像和置换图像进行盲复原, 复原结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 由于在 2.1 节较好地估计出了散焦模糊半径 R , 因此散焦模糊部分取得了令人满意的复原效果, 但置换部分由于模糊模型的不一致性导致严重的振铃效应。由于振铃效应其典型表现是在图像灰度剧烈变化的临域出现类吉布斯(Gibbs)分布的振荡, 本文提出通过定义像素梯度绝对值和来对振铃效应进行评价, 根据评价结果进行分类检测出置换激活区间, 从

而估计出置换混合矩阵。

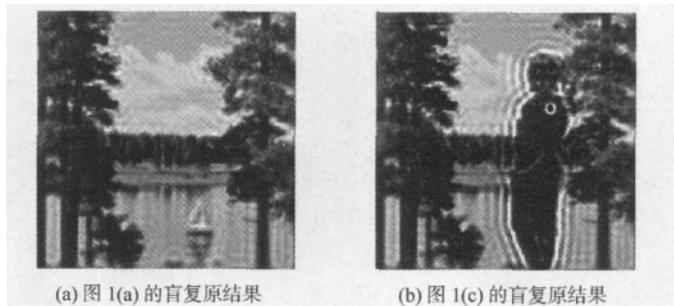


图 3 复原图像

Fig. 3 Restored images

首先对一幅大小为 $N \times N$ 的盲复原图像(如图 3(b) 所示) 进行子块的划分, 得到 $k \times k$ 大小的子块

$$y_{mn}(i, j) = y_r(i, j) (1 + k(m-1) : km, 1 + k(n-1) : kn) \quad (6)$$

式中, $m = n = 1, 2, \dots, \lfloor \frac{N}{k} \rfloor$ 。其次, 取子块 $y_{mn}(i, j)$ 的中间行 $y_{row}[u]$ 或中间列 $y_{col}[v]$ 分别做差分运算求得像素梯度, 并以较大的梯度绝对值和来表征子块的振铃效应。对像素梯度绝对值和的定义如式(7)所示

$$\begin{aligned} T_{row} &= \text{sum}(\text{abs}(\text{diff}(y_{row}[u]))) \\ T_{col} &= \text{sum}(\text{abs}(\text{diff}(y_{col}[v]))) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\text{diff}(\cdot)$ 表示差分, $u = v = 0, 1, 2, \dots, k - 1$ 。最后, 对所有子块的较大梯度和进行分类, 完成了激活区间的检测(对应二值矩阵的 1), 实现了置换混合矩阵 A 的估计。

2.3 置换源图像的分离

根据估计得到的置换混合矩阵与激活区间的对应关系, 对式(1)两边同时左乘 A^T (相当于分离矩阵) 可得

$$\begin{aligned} A^T \cdot y(i, j) &= A^T \cdot A \cdot s(i, j) \quad (8) \\ \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \cdot y(i, j) &= \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \cdot [A_1 \ A_2] \cdot \begin{bmatrix} s_1(i, j) \\ s_2(i, j) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} A_1 \odot A_1 & A_1 \odot A_2 \\ A_2 \odot A_1 & A_2 \odot A_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1(i, j) \\ s_2(i, j) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1(i, j) \\ s_2(i, j) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} A_1 \odot s_1(i, j) \\ A_2 \odot s_2(i, j) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 置换源图像的子块被成功地分离出来。

2.4 算法流程

针对一类散焦模糊置换图像, 本文在根据其频域特性估计出散焦模糊半径的基础上, 提出一种基于盲复原的单通道盲分离方法, 具体的流程总结如下:

- 1) 对一幅大小为 $N \times N$ 的散焦模糊置换图像 $y(i, j)$ 进行频域变换, 得到具有同心圆的频谱特征;
- 2) 利用高斯模糊对幅度谱进行预处理以消除孤立点的影响, 并采用对角线分析方法来估计第一中心圆环的半径 d_r , 代入式(5)求得散焦模糊半径 R ;
- 3) 根据估计出的散焦模糊半径 R 代入式(3)构造出 PSF, 采用 L-R 算法对 $y(i, j)$ 进行盲复原得到复原图像 $y_r(i, j)$;
- 4) 对 $y_r(i, j)$ 进行大小为 $k \times k$ 子块的划分, 并

取子块 $y_{mn}(i, j)$ 的中间行 $y_{row}[u]$ 或中间列 $y_{col}[v]$ 作差分运算求得像素梯度, 其中, $m = n = 1, 2, \dots, \lfloor \frac{N}{k} \rfloor, u = v = 0, 1, 2, \dots, k - 1$;

- 5) 把得到的像素梯度代入式(7)求得梯度绝对值和, 并比较 T_{row} 和 T_{col} 大小, 以较大的梯度和来表征子块的振铃效应;
- 6) 重复步骤 4) — 5), 完成所有对应子块振铃效应的评价, 并进行分类;
- 7) 根据不同分类完成了置换激活区间的检测(对应二值矩阵的 1), 实现了置换混合矩阵 A 的估计;
- 8) 根据估计出的置换混合矩阵 A , 代入式(9), 实现了置换源图像子块的分离。

3 实验仿真与性能分析

为了验证本文基于参数估计的单通道盲分离方法的有效性, 仿真实验采用 4 组大小为 256×256 , 且经过 Photoshop 处理的散焦模糊置换图像, 从上到下散焦模糊半径 R 依次为 3、3.8、4.3 和 5, 置换区域则依次经历径向模糊、方框模糊、运动模糊和高斯模糊。实验按照 2.4 节的算法流程进行, 考虑到梯度计算的准确性及算法的复杂度等因素, 通过大量实验得到: 子块大小为 $k = 16$, 并每次移动 8 个像素点较为合适, 分离结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 实验仿真结果虽然有些误检块, 但置换源图像子块基本被完整地分离出来。

为了测试本文算法的鲁棒性, 我们还分别对实验样本进行了不同信噪比下和不同压缩因子下的测试。实验样本为从图像库中随机选取不同分辨率、不同场景的 200 幅自然图像, 对每幅图像进行 $R = 5$ 的散焦模糊, 然后依次与经历运动模糊、径向模糊、方框模糊和高斯模糊的标准 TANK 图像进行置换操作, 共得到 800 幅置换图像。分别在添加不同的噪声和以不同压缩因子的 JPEG 压缩情况下, 利用本文提出的算法对这类散焦模糊置换图像进行盲分离, 分离正确率与信噪比、JPEG 压缩因子的对应关系如图 5、图 6 所示。从图 5 可以看出, 对于存在加性高斯白噪声的情况, 本文算法对置换区域经历运动模糊的分离性能最好, 而对置换区域经历高斯模糊的分离性能略差, 但总体具有较好的噪声鲁棒性。在低信噪比为 20 dB 的情况下, 本文算法还能

获得最低 72.00% ,平均 86.00% 的较好的分离正确率;对于存在有损 JPEG 压缩的情况,图 6 表明了本文算法对几种常见的模糊置换操作都具有很好的

抗 JPEG 压缩性能,即使在压缩因子低至 30 的情况下,本文算法依然能获得最低 89.00%、平均 94.75% 的分离正确率。

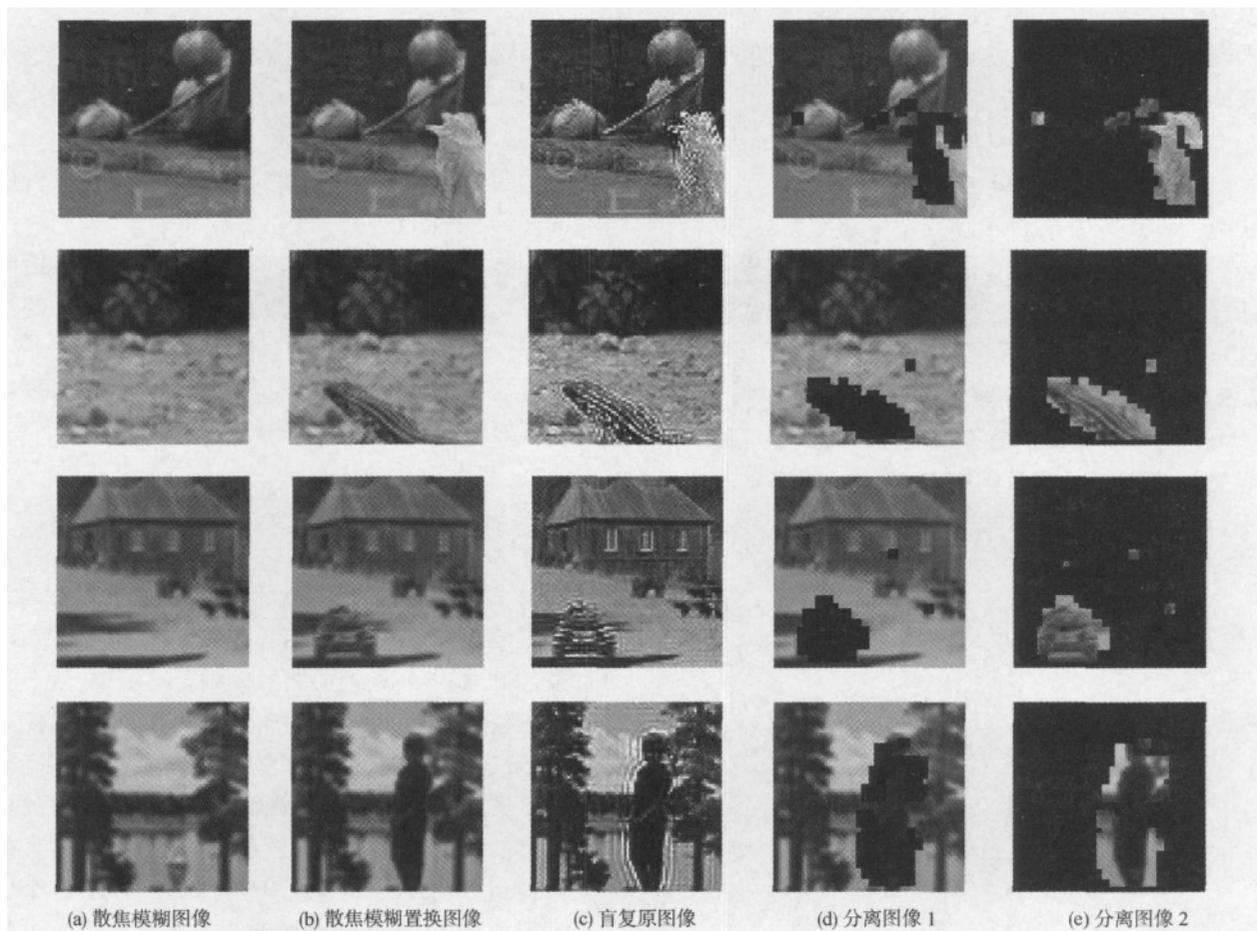


图 4 散焦模糊置换图像分离结果

Fig. 4 Defocus blur permuted images and their separation results

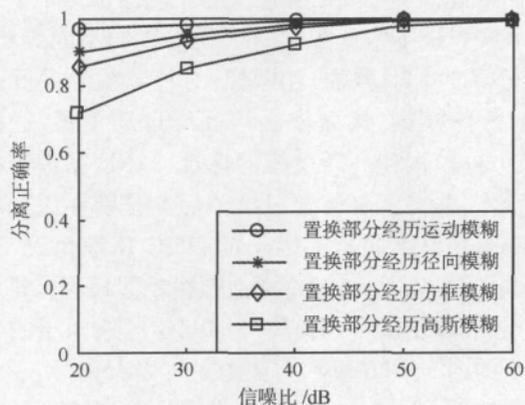


图 5 本文算法对加性高斯白噪声的鲁棒性

Fig. 5 Separation accuracy as a function of signal-to-noise ratio

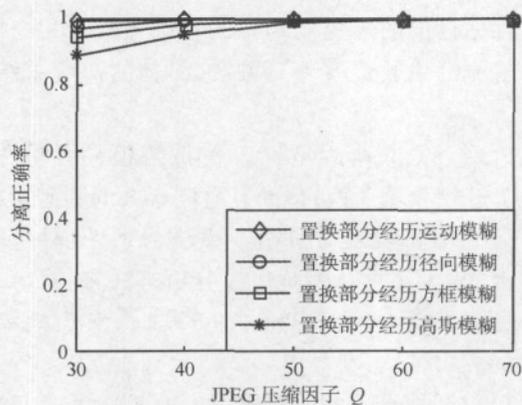


图 6 本文算法对 JPEG 压缩的鲁棒性

Fig. 6 Separation accuracy as a function of JPEG compression

4 结 论

针对一类散焦模糊置换图像, 在根据其频域特性估计出散焦模糊半径的基础上, 提出一种基于盲复原的单通道盲分离方法。由于置换源图像之间具有不同的模糊模型或模糊半径, 通过定义像素梯度绝对值和来对复原产生的振铃效应进行评价可以获得较好的分离性能。仿真结果表明, 该方法对经历不同置换操作的散焦模糊置换图像均能取得较好的分离效果, 同时, 算法在低信噪比、低压缩因子压缩情况下依然具有较好的鲁棒性。另外, 本文研究的散焦模糊置换图像盲分离问题还丰富了盲源分离理论, 并能是目前广泛研究的图像篡改认证提供新的解决方案。

参考文献(References)

- [1] Fevotte C ,Godsill S J. A Bayesian approach for blind separations of sparse sources [J]. IEEE Transactions on Audio ,Speech ,and Language Processing 2006 ,14(6) : 2174-2188.
- [2] Radfar M H ,Danserean R M. Single-channel speech separation using soft mask filtering[J]. IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing 2007 ,15(8) : 2299-2310.
- [3] Duan Z Y ,Zhang Y G ,Zhang C S ,et al. Unsupervised single channel music source separation by average harmonic structure modeling[J]. IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing 2008 ,16(4) : 766-778.
- [4] Cui R T ,Li H ,Wan J ,et al. An over-sampling based blind separation algorithm of single channel MPSK signals [J]. Journal of Electronics & Information Technology 2009 ,31(3) : 566-569. [崔荣涛 李辉 万坚 等. 一种基于过采样的单通道 MPSK 信号盲分离算法[J]. 电子与信息学报 2009 ,31(3) : 566-569.]
- [5] Tu S L ,Chen Y X ,Zheng H. Exploiting error-control codes in single-channel blind separation of co-frequency modulated signals [J]. Journal of Electronics & Information Technology ,2009 ,31(9) : 2113-2117. [涂世龙 陈越新 郑辉. 利用纠错编码的同频调制混合信号单通道盲分离[J]. 电子与信息学报 , 2009 ,31(9) : 2113-2117.]
- [6] Lee Y K ,Kwon O W. Application of shape analysis techniques for improved CASA-based speech separation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics 2009 ,55(1) : 146-149.
- [7] Cai Q W ,Wei P ,Xiao X C. Single-channel blind separation of overlapped multicomponents based on energy operator [J]. Science China-Information Sciences 2010 ,53(1) : 147-157.
- [8] Peng G ,Wang F H ,Huang Z T ,et al. Blind periodic signal separation of single channel composite signal [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences) ,2010 ,37(4) : 42-45. [彭耿 王丰华 黄知涛 等. 单通道混合信号中周期信号的盲分离[J]. 湖南大学学报: 自然科学版 2010 ,37(4) : 42-45.]
- [9] Fang Y ,Wang W ,Wang R. Blind detection and separation for permuted signals [J]. Journal of Applied Sciences 2009 ,27(5) : 491-497. [方勇 王伟 王睿. 置换混叠信号的盲检测和分离[J]. 应用科学学报 2009 ,27(5) : 491-497.]
- [10] Anarim E ,Ucar H ,Istefanopulos Y. Identification of image and blur parameters in frequency domain using the EM algorithm [J]. IEEE Transactions on Image Processing ,1996 ,5(1) : 159-164.
- [11] Gonzalez R C ,Woods R E ,Eddins S L. Digital Image Processing Using MATLAB [M]. New Jersey: Pearson Prentice Hall 2004.