

上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 19



独立分量分析方法及在 图像处理中的应用研究

- 作者：王明祥
- 专业：通信与信息系统
- 导师：方 勇 莫 玉 龙



2005 年上海大学博士学位论文 19

独立分量分析方法及在 图像处理中的应用研究

作 者: 王明祥
专 业: 通信与信息系统
导 师: 方 勇 莫玉龙

上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral
Dissertation (2005)

Study on Independent Component Analysis Method and Its Applications to Image Processing

Candidate: Wang Mingxiang

Major: Communication and Information System

Supervisor: Prof. Fang Yong and Mo Yulong

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求.

答辩委员会名单:

主任:	王国中	教授, 上广电中央研究院	200032
委员:	张兆扬	教授, 上海大学通信学院	200072
	王汝笠	研究员, 中科院上海技物所	200083
	王朔中	教授, 上海大学通信学院	200072
	胡波	教授, 复旦大学电子工程系	200433
导师:	方勇	教授, 上海大学通信学院	200072

评阅人名单:

王国中	教授, 上广电中央研究院	200032
施鹏飞	教授, 上海交通大学图像所	200030
王成道	教授, 华东师范大学信息学院	200062

评议人名单:

胡 波	教授, 复旦大学电子工程系	200433
钱松荣	教授, 复旦大学通信科学与工程系	200433
王浩钢	研究员, 上海航天局 809 研究所	200031
张 浩	教授, 上海电力学院	200080
张兆扬	教授, 上海大学通信学院	200072
王朔中	教授, 上海大学通信学院	200072

答辩委员会对论文的评语

该博士学位论文作者深入研究了独立分量分析(ICA)方法及其在图像处理中的应用,论文选题有一定的创新性,并取得了多项研究成果.论文作者取得的主要成果可归纳如下:

(1) 分别将 ICA 和小波变换、自组织映射、BP 神经网络结合起来,提出了三种改进的算法: 1) 基于小波变换的 ICA 方法,分析了图像在小波域的统计特征,并由此导出小波域自然梯度算法可以获得更高的分离精度和更快的收敛速度. 2) 基于 SOM 的后非线性 ICA 的初始化方法,通过推导和实验证明了该方法易于全局收敛,并提高收敛速度. 3) 将 ICA 结合人工神经网络技术应用于人脸识别,通过实验验证该方法具有较高的识别率.

(2) 在多个具体的图像处理的应用中使用了 ICA 方法,包括运动目标检测、数字图像水印技术和自适应图像降噪等,实验和分析均证实了该方法具有一定的优越性.

论文理论正确,条理清晰,结构合理,文笔流畅,实验数据详实,结果可靠,反映出作者具有扎实的理论基础和系统的专业知识,具有较强的数学分析能力和独立科研能力.在答辩中表达清楚,回答问题正确.

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过王明祥同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席: **王国中**

2005年3月3日

摘 要

独立分量分析(ICA)是近期发展起来的一种非常有效的盲信号处理技术,在许多应用领域正发挥着越来越重要的作用. ICA具有重要的理论和应用价值,在无线通信、声纳、语音处理、图像处理和生物医学等领域具有广泛而诱人的应用前景,在过去的十几年时间里,有关的理论和算法研究都得到了较快的发展,并涌现出了许多有效的算法.目前,ICA已经成为国际上信号处理和人工神经网络等学科领域的一个研究热点.

本论文对 ICA 算法的理论进行了详细的分析,将 ICA 和小波变换、自组织映射(SOM)、BP 神经网络等方法结合起来,提出了三种改进的 ICA 算法:基于小波变换的 ICA 方法、基于 SOM 的后非线性 ICA 的初始化方法,以及基于 ICA 和改进 BP 网络的人脸识别方法.并研究了 ICA 方法在图像处理中的应用,包括混合图像的盲分离、图像特征提取与识别、运动目标检测、数字图像水印的嵌入与提取,以及自适应图像降噪等,并提出了一些改进的方法.

论文的主要贡献及创新点包括以下几个方面:

(1) 提出了一种基于二维小波变换的 ICA 方法,并用于图像的盲分离.首先采用误差扰动法对自然梯度算法(NGA)的精确度进行了详细的研究,从理论上证明:当源信号的概率密度相同且非线性函数为双曲正切函数时,NGA 的稳态误差与源信号峭度的平方成反比.由于小波域高频子图像的分布近似为

拉普拉斯分布,其峭度远大于原图的峭度,因此对小波域高频子图像进行 ICA 分解可以获得更高的分离精度.此外,高频子图像的大小为原图的四分之一,因此计算量大大减少,算法的收敛速度更快.其次,对小波域快速独立分量分析(FastICA)算法的收敛特性也进行了研究,得出该算法的收敛速度与源信号的峭度无关这一结论.同样,由于高频子图像的大小为原图的四分之一,因此算法的收敛速度也会明显提高.

(2) 针对基于自组织映射(SOM)的后非线性 ICA 方法的缺点,提出了一种新的具有全局拓扑保持特性的 SOM 网络权值初始化方法.该方法充分利用了混合信号的概率密度分布这一先验知识,构造出一种与该分布基本吻合的网格作为 SOM 网络的初始权值.该初始化方法不仅提高了 SOM 网络的收敛速度,而且可以有效地避免由于初值随机选取而导致算法陷入局部极小的情况.同时,在混合方式基本相同的情况下,可使输出信号的次序和符号保持不变,减小了 ICA 问题中不确定性的影响.此外,为了衡量该初始化方法的拓扑保持特性,本文还提出了一个简单的拓扑度量函数.最后,通过一维人工信号和二维自然图像的后非线性混合和盲分离实验,证实该初始化方法是有效的.

(3) 提出了一种基于 ICA 和改进 BP 神经网络的人脸识别方法,与传统的基于主分量分析(PCA)的特征脸方法相比,该方法的识别性能更好.PCA 只考虑了信号的二阶统计特性,分离出的各分量是互不相关的,而 ICA 考虑了信号的高阶统计特性,分离出的各分量是相互统计独立的.该方法将 ICA 的局部特征提取能力和 BP 神经网络的自适应能力有效地结合起来,

从而大大提高了人脸的识别率.实验表明,该方法对于人脸表情丰富和干扰严重的情况具有良好的适应性,算法的鲁棒性很强.

(4) 将 ICA 用于图像处理中的多个方面,包括运动目标检测、数字图像水印的嵌入与检测以及自适应图像降噪等.首先,提出了一种新的基于小波域 FastICA 算法的运动目标检测方法,该方法的优点是可以检测出运动目标的运动轨迹,并且具有较强的抗背景光照变化的能力.其次,提出了一种基于 ICA 的图像小波域水印嵌入与检测方法,该方法的优点是无需知道原水印图像及其混入原始图像的强度,就可以有效地检测出嵌入的水印图像.该方法对尺寸缩放、图像滤波、JPEG 和 JPEG2000 有损压缩等攻击方式具有较强的免疫力.实验表明,该方法的水印检测性能优于传统的空域 ICA 图像水印嵌入方法.最后,提出了一种基于 ICA 的自适应图像降噪方法,该方法可以获得很高的峰值信噪比,适合处理图像受到同一噪声严重污染的情况.本文通过一系列实验证实了上述三种方法的有效性.

本论文对 ICA 方法的理论和应用进行了深入的研究,所提出的算法及其在图像处理中的应用研究具有一定的创新性,特别是对于 ICA 在图像处理中的应用研究,具有一定的参考价值和实际意义.

关键词: 独立分量分析,盲信号处理,图像处理,小波变换,自组织映射,BP 神经网络,非线性独立分量分析

Abstract

Independent Component Analysis (ICA) is a kind of powerful method for Blind Signal Processing (BSP). It becomes more and more important while using in widely fields, such as telecommunications, audio signal separation, biomedical signal processing, and image processing. Many literatures on ICA were published and lots of algorithms were proposed during the past ten years in a large number of journals and conference proceedings. ICA becomes one of the most exciting new topics both in the fields of signal processing and artificial neural networks.

In this thesis, the principle and algorithms of ICA are researched in detail. Some modified ICA algorithms by combining ICA with wavelet transform, Self-Organizing Maps (SOM) and BP neural network are proposed, such as ICA method based on wavelet transform, initialization method for post-nonlinear ICA based on SOM, and face recognition method based on ICA and modified BP neural network. Furthermore, the applications of ICA to image processing are discussed, including blind separation of images, feature extraction and pattern recognition, moving objects detection, digital image watermarking and adaptive noise cancelling of images.

The main achievements of this dissertation are put forward:

(i) A kind of new ICA method based on 2-dimensional wavelet transform is proposed. And this method is used to separate the mixed images. The precision of the Nature Gradient Algorithm (NGA) is discussed by using the error perturbation method. It can be proved that the steady-state error of NGA is inverse proportional to the quadratic of the kurtosis of the sources when the probability distribution function of each source is the same and the nonlinear function is a tanh function. Because the kurtosis of the detail subimages in wavelet domain is always bigger, the separation precision of the proposed method is higher. Furthermore, the size of the sub-image in wavelet domain is a quarter of the source image, so the convergence speed of our method is faster. In addition, the convergence of the FastICA method is analyzed. The conclusion is that the source signals' kurtosis has no effect on the convergence. Because the size of the sub-image in wavelet domain is a quarter of the source image, its convergence speed is faster too.

(ii) According to the drawbacks of the post-nonlinear ICA method based on SOM, an initialization method with global topology preservation property for SOM network is proposed. The initial weights nearly match with the joint probability distribution of the mixture signals. By using this method, the convergence speed of the SOM network is faster and the algorithm can escape from falling into the local

minima more efficiently. Furthermore, when the mixed manner is nearly fixed, the order and the sign of the estimated sources are invariant. Thus the effect of indeterminacies in ICA problem is reduced. In order to verify the topology preservation property of our initialization method, a simple topographic function is proposed. The results of two kinds of simulation experiments show that the proposed method is effective.

(iii) A kind of face recognition method based on ICA and modified BP neural network is proposed. The local feature extraction property of ICA and the adaptive capability of BP networks are combined effectively. Compared with traditional Eigenfaces method by Principle Component Analysis (PCA), the recognition performance of the proposed method is improved greatly. The experiments results show that this algorithm is very robust, especially for the faces database has greater changes in pose and expression.

(iv) ICA method is used to moving objects detection, digital image watermarking, adaptive image denoising, and such problems in the field of image processing. Firstly, a kind of moving objects detection method based on wavelet domain FastICA algorithm is proposed. The track of the moving objects can be detected, and the proposed algorithm provides good resistance to the changes of the background illumination. Secondly, a new wavelet domain digital image watermarking method based on FastICA algorithm is proposed. Without requiring any information on the original

watermark and its mixed strength, the proposed scheme can extract the watermark effectively. The proposed method can provide good resistance under most simple image processing attacks, such as scaling, filtering and compressing. Finally, a kind of adaptive image noise canceling method based on ICA is proposed. Experimental results show that the proposed method has higher PSNR and it suitable to recover the original image when it is polluted by the same noise seriously. Experimental results show that these three proposed methods are effective.

Key words: Independent Component Analysis (ICA), Blind Source Separation (BSS), image processing, wavelet transform, Self-Organizing Maps (SOM), BP neural network, nonlinear ICA

目 录

第一章 绪论	1
1.1 本论文的研究意义	1
1.2 ICA 的研究动态及其在图像处理中的应用	3
1.3 本论文的主要工作和内容编排	7
第二章 ICA 的理论分析和性能比较	10
2.1 ICA 的数学模型及可解性分析	10
2.2 ICA 的一般求解过程	16
2.3 ICA 的典型算法	30
2.4 ICA 算法的性能分析	39
2.5 仿真实验	43
2.6 本章小结	47
第三章 基于小波变换的 ICA 方法	48
3.1 小波变换	48
3.2 基于小波变换的 ICA 方法	54
3.3 两种小波域学习算法的性能分析	63
3.4 比较实验和分析	72
3.5 本章小结	75
第四章 基于 SOM 的非线性 ICA 方法	77
4.1 非线性 ICA	77
4.2 基于 SOM 的 NLICA 的初始化方法	83
4.3 初始化方法的性能分析	90

4.4 比较实验和分析	94
4.5 本章小结	99
第五章 基于 ICA 和 BP 网络的人脸识别方法	100
5.1 人脸识别方法概述	100
5.2 基于 PCA 和 ICA 的人脸识别方法	102
5.3 基于 ICA 和改进 BP 网络的人脸识别方法	109
5.4 比较实验和分析	115
5.5 本章小结	118
第六章 ICA 在图像处理中的应用	119
6.1 ICA 在运动目标检测中的应用	119
6.2 ICA 在数字水印中的应用	124
6.3 ICA 在自适应图像降噪中的应用	135
6.4 本章小结	141
第七章 总结和展望	142
7.1 本论文的主要工作总结	142
7.2 进一步研究的展望	144
参考文献	146
致谢	163

第一章 绪 论

1.1 本论文的研究意义

本论文研究的独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)是盲信号处理(Blind Signal Processing, BSP)的一个重要分支. 盲信号处理是二十世纪最后十年中迅速发展起来的一个研究领域, 应用范围非常广泛, 具有非常重要的实用价值, 已经成为当今学术界的研究热点^[1-5]. 它起源于著名的“鸡尾酒会问题”(Cocktail Party Problem). 在嘈杂的鸡尾酒会上, 许多人在同时交谈, 可能还有背景音乐, 但人耳却能够准确而清晰地听到对方的话语. 这种可以从混合声音中选择自己感兴趣的声音而忽略其他声音的现象称为“鸡尾酒会效应”.

在盲信号处理中, 所谓的“盲”是指信号的信息和传输信道的信息都是未知的. 在信号处理领域, 有许多实际应用需要利用盲信号处理技术来解决问题^[6]. 例如, 在生物医学中常用脑电图(EEG)对人的大脑思维活动进行检测和分析, 脑电信号中往往含有心电、眼动伪迹和肌电等干扰信号, 如何从复杂的脑电信号中提取出有用的信息就显得非常重要, 而这些有用的信息事先是无法获得的^[7-9]. 在通信系统中, 信道畸变会导致码间干扰, 必须设计能够补偿码间干扰的均衡器, 这需要增加额外的校验信息, 严重浪费了系统的资源, 而基于盲信号处理的盲均衡技术无需校验信息, 可以直接利用接受的未知信号来实现盲均衡^[10-12]. 此外, 在阵列信号处理^[13-15]、语音信号处理^[16-19]、图像信号处理^[20-22]和水声信号处理^[23]等方面, 也都需要利用盲信号处理技术.