

Jiyu Bianhuanyu De Wenli Fangwei Biaoqian Zidong Shibie Jishu

基于变换域的 纹理防伪标签自动识别技术

李京兵 韩宝如 著

3



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位



iyu Bianhuanyu De Wenli Fangwei Biaoqian Zidong Shibie Jishu

基于变换域的 纹理防伪标签自动识别技术

李京兵 韩宝如 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

基于变换域的纹理防伪标签自动识别技术/李京兵, 韩宝如著. —北京: 知识产权出版社, 2016. 6

ISBN 978 - 7 - 5130 - 4225 - 3

I. ①基… II. ①李…②韩… III. ①防伪印刷—标签—自动识别 IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 127324 号

内容提要

本书作为国内第一部基于变换域的纹理防伪标签自动识别技术的专著, 提出了基于变换域提取纹理防伪图像特征向量的方法, 并以此实现对纹理防伪标签的自动识别。这些算法将数字图像处理基础理论、均值感知哈希及基本频域变换有机地结合在一起, 保证了识别算法有较好的鲁棒性。

本书深入浅出、算法新颖、图文并茂, 可作为通信与信息类、计算机类、电子工程类及相关专业的本科生、研究生教材或教学参考书, 也适合于从事防伪及知识产权保护工作的学者、技术人员的阅读。同时, 本书还可作为安全系统、文本检索、多媒体通信、图像处理 and 模式识别等领域科技人员的参考资料。

责任编辑: 石陇辉

责任校对: 谷 洋

封面设计: 刘 伟

责任出版: 刘译文

基于变换域的纹理防伪标签自动识别技术

李京兵 韩宝如 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

网 址: <http://www.ipph.cn>

社 址: 北京市海淀区西外太平庄 55 号

邮 编: 100081

责任编辑: 010 - 82000860 转 8175

责编邮箱: shilonghui@cnipr.com

发行电话: 010 - 82000860 转 8101/8102

发行传真: 010 - 82000893/82005070/82000270

印 刷: 三河市国英印务有限公司

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 8.25

版 次: 2016 年 6 月第 1 版

印 次: 2016 年 6 月第 1 次印刷

字 数: 170 千字

定 价: 29.00 元

ISBN 978 - 7 - 5130 - 4225 - 3

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

近 20 年来,我国经济飞速发展,假冒伪劣产品同时也借机进入市场,损害消费者和商家的权益。如今防伪技术已经成为市场经济的一个新的技术领域,它要求在一定范围之内能够准确地鉴别真伪,并不易被仿造。目前防伪技术种类很多,主要有激光防伪、数码防伪、纹理防伪、安全线防伪纸等。由于传统的防伪技术出现时间早、已经被造假者掌握,新兴的防伪技术造价高昂、不便于消费者使用等,现有的防伪技术都没有达到预期的防伪效果。因此市场上需要一种适合批量生产、方便消费者使用的防伪技术。那么本书所研究的与互联网结合的纹理防伪技术就应运而生了。

随着网络技术的发展,自动识别在防伪技术中的地位显得愈发重要。以纹理防伪的自动识别技术为例,现有的将二维码技术、条形码技术与纹理防伪标签相结合的自动识别技术,可以自动下载获取原始纹理防伪标签图像,简化鉴别步骤。但通过二维码、条形码扫描获取纹理图像时,纹理图像下载速度慢、耗时较长,并且由于二维码和条形码的平面印刷,导致其不能很好地保护防伪信息,易于被复制仿造。而基于 RFID 的自动识别技术,其效果虽然很好,但当纹理防伪标签较多时,投入成本较大。因此,纹理防伪标签的自动识别仍是一个难题,目前几乎没有有效的算法公布。本书针对这些问题,对纹理防伪标签自动识别速度、提高可靠性和适合批量生产的需求提出了自己的算法,并已就此申请了 7 件国家发明专利。读者可在此基础上举一反三。

本书作为国内第一部基于变换域的纹理防伪标签自动识别技术的专著,提出了基于变换域提取纹理防伪图像特征向量的方法,并以此实现对纹理防伪标签的自动识别。这些算法将数字图像处理基础理论、均值感知哈希及基本频域变换有机地结合在一起,有效地解决了纹理防伪标签自动识别发展所遇到的一些难题。

本书共分 4 章。第 1 章介绍了防伪技术发展历史及现状,以及防伪技术的相关基本知识,第 2 章介绍了纹理防伪标签自动识别算法所需要的基础理论,



第3章内容为基于变换域的纹理防伪标签自动识别算法，第4章内容为基于压缩域的纹理防伪标签自动识别算法。

本书可以作为专业课程的指导书，也可作为课程设计和毕业设计指导书，同时还可以作为纹理防伪自动识别研发人员的入门参考书。

本书在编写过程中参考了国内外大量文献以及网站资料，这些资料在本书中已尽量列出，若有遗漏深表歉意。在此也对本书所引用文献的作者深表感谢。

海南大学李京兵教授撰写了本书第1章和第4章，并对全书进行统稿；海南软件职业技术学院韩宝如副教授撰写了第2章、第3章和参考文献等内容。此外，海南大学的张月、刘畅、王双双、李雨佳等研究生参加了本书编写和整理工作，特此感谢。

本书的出版得到了海南大学211办公室高水平专著出版专项资金、国家自然科学基金（61263033）、海南省高等学校科学研究专项项目（Hnkyzx2014-2）、海南省国际科技合作重点项目（KJHZ2015-04）、海南省高等学校优秀中青年骨干教师基金（2014-129）、海南省高等学校科学研究项目（Hnky2015-80）的支持。由于作者水平有限，书中难免出现各种疏漏和不当之处，欢迎大家批评指正。作者联系方式：Jingbingli2008@hotmail.com。

目 录

1 防伪技术概述	1
1.1 背景	1
1.2 防伪技术的分类	1
1.2.1 激光防伪	1
1.2.2 数码防伪	2
1.2.3 纹理防伪	3
1.2.4 安全线防伪纸	3
1.2.5 与互联网结合的纹理防伪	4
1.3 防伪技术的要求	4
1.4 防伪标签的自动识别技术	5
1.5 特征提取在图像识别中的发展	6
1.6 本书的主要研究工作	7
2 纹理防伪标签自动识别算法的基础理论	8
2.1 离散余弦变换 (DCT)	8
2.2 离散傅里叶变换 (DFT)	9
2.3 离散小波变换 (DWT)	11
2.4 均值感知哈希算法	13
2.5 数字图像处理的重要参数	16
2.6 小结	16
3 基于变换域的纹理防伪标签自动识别算法	17
3.1 引言	17
3.2 基于 DCT 的纹理防伪标签自动识别算法	18
3.2.1 防伪标签特征向量库的建立与标签的自动识别	18



3.2.2	实验结果	22
3.3	基于 DFT 的纹理防伪标签自动识别算法	32
3.3.1	防伪标签特征向量库的建立与标签的自动识别	32
3.3.2	实验结果	37
3.4	基于 DWT - DCT 的纹理防伪标签自动识别算法	46
3.4.1	防伪标签特征向量库的建立与标签的自动识别	46
3.4.2	实验结果	52
3.5	基于 DWT - DFT 的纹理防伪标签自动识别算法	61
3.5.1	防伪标签特征向量库的建立与标签的自动识别	61
3.5.2	实验结果	65
4	基于压缩域的纹理防伪标签自动识别算法	75
4.1	引言	75
4.2	基于 DCT 压缩域的纹理防伪标签自动识别算法	75
4.2.1	防伪标签特征向量库的建立与标签的自动识别	75
4.2.2	实验结果	81
4.3	基于 DFT 压缩域的纹理防伪标签自动识别算法	90
4.3.1	防伪标签特征向量库的建立与标签的自动识别	90
4.3.2	实验结果	94
4.4	基于感知哈希的纹理标签自动识别算法	103
4.4.1	防伪标签特征向量库的建立与标签的自动识别	103
4.4.2	实验结果	107
结 语		118
参考文献		120

1 防伪技术概述

1.1 背景

近 20 年来,我国经济飞速发展,假冒伪劣产品同时也借机进入市场,损害消费者和商家的权益^[1],破坏整个社会经济运行的规则。这是个严肃的社会和政治问题^[2]。利用防伪技术解决假冒伪劣的问题势在必行。如今防伪技术已经成为市场经济的一个新的技术领域,它要求在一定范围之内能够准确地鉴别真伪,并不易被仿造。防伪技术涉及的学科领域很多,如化学、物理学(光学、电磁学)、计算机技术、光谱技术、印刷技术、数字技术等,属于一门交叉边缘学科^[3]。目前防伪技术种类很多,主要是激光防伪、数码防伪、RFID(Radio Frequency Identification, 射频识别)防伪、电码电话防伪等,但由于防伪容易被复制和消费者识别比较困难等原因而没有达到预期防伪的效果,因此,提高防伪技术的性能是目前防伪研究的一大难点。

1.2 防伪技术的分类

目前,防伪技术可以分为以下几类:激光防伪、数码防伪、纹理防伪、安全线防伪纸,以及与互联网结合的纹理防伪标签。

1.2.1 激光防伪

激光防伪是第一代防伪技术的代表。激光防伪又称激光全息防伪,顾名思义,其主要是利用激光全息技术来进行防伪的。

全息图像是由美国科学家伯格(M. J. Buerger)在利用 X 射线拍摄晶体的原子结构照片时发现的,并与伽柏(D. Gaber)一起建立了全息图像理论:利用双光束干涉原理,令物光和另一个与物光相干的光束(参考光束)产生干



涉图样,即可把位相“合并”上去,从而用感光底片能同时记录下位相和振幅,就可以获得全息图像^[4]。但由于普通光源单色性不好、相干性差,因而全息技术发展缓慢,很难拍出令人满意的全息图。直到 20 世纪 60 年代初激光出现,其高亮度、高单色性和高相干度的特性,迅速推动了全息技术的发展。这时全息技术还停留在实验室的阶段,直到 1980 年,美国科学家利用压印全息技术,将全息表面结构转移到聚酯薄膜上,从而成功地印制出世界上第一张模压全息图像。这种模压全息图像可以大批量复制生产,成本较低,且可以与各类印刷品结合使用。至此,全息摄影向社会应用迈出了决定性的一步^[5]。

但此时将其用于防伪还是不够的,随后人们对它进行了改进,由此衍生出了透明激光全息图像防伪技术和反射激光全息图像防伪技术^[6]。这两种技术也是在防伪中应用最广泛的,但由于其出现的时间较早,仿造者已经掌握其技术手段来制假售假。随着对激光防伪的深入研究,加密全息图像防伪技术和激光光刻防伪技术^[7]也相继出现。这两种激光防伪技术具有较好的防伪效果。但是加密全息图像需要特定的识别环境,因此很难被普通消费者识别使用;而激光光刻防伪技术造价高昂,一般中小企业都难以负担。

1.2.2 数码防伪

数码防伪是为每一件入网的产品设置一个唯一的编码,并把这一编码储存在中心数据库中,同时在全国建立起短信、电话、网络查询等鉴别网络^[8]。消费者购买到贴有数码防伪标识物的商品,只需拨打查询电话或登录查询网址,输入产品上的编码,即可知道产品的真伪。消费者在购买已加入数码防伪系统的企业所生产的产品时,在产品的包装上均可看到数码防伪标签,只要揭开标识的表层或刮开标识的涂层,就可以看到一组由多位数字组成的编码(16 位及以上),此编码是唯一的,只能使用一次^[9]。当消费者查询了一次后,第二次查询时系统就会提示该防伪编码已被使用,那消费者就不会购买了。

数码防伪除了最基本的防伪查询功能,还有找出售假区域和制假者的功能。根据查询记录中的主叫电话号码是不是正码所规定的查询号码 800、400,输入的防伪编码是不是 16 位数,假冒编码被查询的次数、时间、电话等信息,可以清楚判断假货出现的地区及时间。而通过对异常查询记录数据的科学分析,可以初步判断出可疑制假者的电话号码;同时可以通过记录的查询电话号码,直接对发现假货的消费者进行回访,可以较清楚地了解市场上假货的销售

情况,从而顺藤摸瓜,找出制假窝点和销售假货的地点,为企业打假指明方向和找准目标,降低打假费用、提高打假效率^[10,11]。

然而数码防伪只有购买后才可以查询,并且商场等地并不会提供查询的工具,所花费的资费要由消费者自己承担。并且,这种查询方式只能满足消费者自己查询,不能进行机器识别,阻碍了数码防伪的发展。

1.2.3 纹理防伪

纹理防伪具有极难仿造、先查后买、永久有效、查询结论准确可靠等优点^[12,13]。纹理是指物体表面清晰可见的天然特征,自然界中所有物体的纹理都是千变万化、各不相同的,如人的指纹、树叶脉络、斑马纹及瓷器上的裂纹等。纹理防伪技术利用这一原理,以材料本身固有的纹理特征作为防伪识别标记^[14]。

纹理防伪技术中的纹理目前有两种实现方式。一种是在包装原材料制备过程中,把形成纹理的材料加入原料中,形成具有纹理特征的包装材料。例如,造纸时在白色纸浆中掺入类似于发丝的短细黑色、彩色和有色荧光纤维等,造出的纸内部具有清晰、随机分布的纤维。另一种是在包装材料形成后或在生产防伪产品的工序中,加入复合纹理材料,最终形成防伪产品的纹理分布特征。例如,一些企业在生产防伪标签或防伪包装等产品时,会在最后覆膜时在覆膜胶水中加入纤维,利用透明膜的复合,把纤维纹理复合到防伪产品中,这种纹理具有明显的凹凸感,边缘具有一定的空隙,并非印刷导致的效果,较易识别且真实可信^[15]。

但现有的纹理防伪技术方面的研究主要针对如何高效生产纹理防伪标签和自动识别技术。陈明发提出了烫印技术^[16]、撒纤印刷技术^[17]、数字化防伪纸^[18],利用这些技术可快速高效地生产纹理防伪标签、缩短生产时间,并增强其美观性,便于鉴别。但是这些标签鉴别方法存在以下不足:纹理条纹比较细小,且鉴别时需要打电话或发短信咨询防伪公司,使得鉴别比较困难复杂;当生成纹理防伪标签较多时,原始纹理照片需占据大量的数据库存储空间。

1.2.4 安全线防伪纸

安全线防伪纸又称为具有防假线的防伪纸。它是在抄纸阶段,利用特殊装置或特殊工艺和手段,将安全线(一条由金属、塑料或其他特殊物质制成的



线)嵌入纸页中特定位置的一种防伪纸^[19]。由于安全线和纸页的颜色不一致以及安全线的特殊性,从而达到防伪效果。目前有两种安全线的制作方式:一种是将安全线完全埋入纸张中;另一种是安全线间隔埋入纸张中和间隔露出纸张表面,称为开窗安全线^[20]。安全线防伪纸的种类很多,有荧光、磁性、全息、镂空、缩微文字等,材料有聚酯、金属等^[21]。安全线防伪纸是各国钞票防伪研究和应用的重点,如英国采用的开窗式透射安全线、沉浮式安全线,法国研制的部分镀铝工艺的安全线,芬兰则采用荧光安全线等^[22]。

安全线的防伪指数较高,一般造假者不容易模仿制造安全线防伪纸,因为生产该纸种的设备投资较大,且生产工艺比较复杂,其安全线本身的制造过程也具有较高的技术含量,有的安全线并不是单纯的一种技术所能完成,有的安全线所记录的信息具有很高的专业特性,因此它是一种较为可靠安全的防伪技术^[23]。由于其辨别简单、可靠安全,因此,在纸币的制造过程中,世界各国几乎都采用了安全线防伪纸技术。目前安全线的发展方向是新材料的开发,以及与其他高新技术的结合^[24]。

1.2.5 与互联网结合的纹理防伪

与互联网结合的纹理防伪属于较先进的第五代防伪技术,它集数据库存储、数码印刷、信息查询等多种技术于一体^[25],利用现代印刷技术把具有清晰随机纹理的材料制成一枚枚适合在单件商品外包装上粘贴的防伪标签,最后再通过通信、互联网等技术进行查询。相较于传统的防伪理论,纹理防伪标签让造假者无法仿制,且具有唯一性,同时它针对智能手机等现代新型技术,在纹理防伪的基础上与网络、通信结合,便于消费者查询辨别。这使得纹理防伪成为近年来产生和发展的新型防伪技术^[26]。

1.3 防伪技术的要求

(1) 身份唯一性:防伪技术产品防伪识别特征的唯一性和不可转移性。例如,数码防伪技术要做到一件商品的防伪标识包含一个身份码,每一个防伪标识只能一次性使用,不能转移使用。

(2) 稳定期:在正常使用条件下,防伪技术产品的防伪识别特征可持续保持的最短时间。例如,荧光油墨和温变油墨都有衰减期。

(3) 安全期：在正常使用条件下，防伪技术产品防伪识别特征被成功仿制的最短时间。这是客户最关心的，应由厂家提出承诺期。

(4) 防伪力度：识别真伪、防止假冒伪造功能的持久性与可靠程度。防伪力度由防伪识别特征的数量、防伪技术独占性的数量、仿制难度和仿制成本大小四要素构成。

(5) 使用适应性：防伪技术产品的防伪识别特征能与标的物或服务对象使用要求相适应的能力。

(6) 识别性能：防伪技术产品的防伪识别特征能通过感官或机器（仪器）在要求的识别时间内正确识别。一线识别强调防伪识别特征的大众共知性，通过感官即能识别；二线识别强调通过简单仪器（如放大镜、激光笔、紫外荧光鉴别器等）即能识别；三线识别强调通过专用仪器（如 DNA 鉴定）由专家识别，可作为司法判定的依据。二线识别与三线识别强调防伪识别特征的隐含性。

(7) 使用环境要求：防伪技术产品的防伪性能应能满足标的物的正常使用环境要求。

(8) 技术安全保密性：设计、制作防伪技术产品的技术应具有安全保密性。除此之外还应考虑经济成本适应性，即在满足防伪技术要求时应尽可能降低使用成本。

1.4 防伪标签的自动识别技术

随着网络技术的发展，自动识别在防伪技术中的地位显得愈发重要。其实是给每一件产品分配一个内含防伪码的防伪标识，随着产品一起流动，同时该防伪码在防伪数据中心留有存档，消费者可以通过防伪查询网络系统的各种多媒体终端进行实时查询，以判定产品的真伪。消费者购得商品后可以用各种终端（智能手机、计算机等）将防伪标识信息传至验证终端进行验证，验证终端一方面将验证结果反馈给消费者，另一方面也将验证结果传至网络管理中心，该管理中心再向本中心的所有其他终端以及网络控制中心传输。若所验证商品为真品，再反馈给消费者后，该商品数据即从数据库中消除。自动识别技术融合传统的密码验证原理，以一种新的视角对待防伪领域所面临的困难，为生产企业和广大消费者提供跟踪服务，能防止大批量假冒产品的出现，创造一



个全民打假的局面。

此处以纹理防伪的自动识别为例,浅析现有的自动识别方法。文献[27, 28]中分别使用二维码技术、条形码技术与纹理防伪标签相结合,可以自动下载获取原始纹理防伪标签图像,简化鉴别步骤。但是通过二维码、条形码扫描获取纹理图像时,纹理图像下载速度慢,耗时较长,并且由于二维码和条形码的平面印刷,导致其不能很好地保护防伪信息,易于被复制仿造。Tuyls 提出了一种基于 RFID 标签的自动鉴别技术^[29],其效果虽然很好,但当纹理防伪标签较多时,投入成本较大。因此,纹理防伪标签的自动识别仍是一个难题,目前几乎没有有效的算法公布。

1.5 特征提取在图像识别中的发展

特征向量的提取在图像的识别中应用越来越广泛,越来越多的国际学者参与进来,并在人脸识别、数字水印等技术方面起着重要作用。国际学术界也越来越多地重视图像变换域特征向量提取技术的研究,在很多国际期刊及学术会议上都发表了这方面的研究进展。近年来国内外学者针对图像特征向量做了很多研究。

1962 年, Wilks 建立了经典的 Fisher 准则^[30],其算法主要基于局部考虑的特征提取,大多应用于图像的识别。刘瑞祯、谭铁牛^[31]提出了通过奇异值分解得到图像的特征向量。2002 年, Bas 通过 Harris 检测器提取图像的特征向量^[32]。2011 年, T. Celik^[33]首先利用 DWT 对图像进行多分辨率分析得到特征向量,并通过主成分分析降低特征向量的维度。Sift^[34,35]、PCA^[36,37]和 SVM^[38]等方法都被用于特征向量的提取,所提取的特征向量抗攻击能力都较好,但是提取过程耗时较长。借助 DCT 的良好特性,楼偶俊等^[39]在 DCT 域找到图像的一个具有鲁棒性的特征向量^[40],通过 DCT 变换后的低中频系数得到特征向量。刘连山^[41]通过小波变换提取出彩色图像的特征向量。Chen^[42]通过分解和改变傅里叶变换后的相位值和幅度值来得到图像特征向量。2006 年, Swaminathan 等人^[43]通过傅里叶-梅林变换得到图像的特征向量,利用 DFT 变换提取出特征向量,该特征向量对几何攻击具有较好的鲁棒性,但是算法计算过程比较复杂,效率低下。

考虑到纹理防伪标签自动识别算法所要求的实时性和鲁棒性,本书利用图

像识别中不可或缺的特征提取技术,提出了基于变换域的纹理防伪标签自动识别算法。

1.6 本书的主要研究工作

本书根据当下市场纹理防伪技术的不足,着重解决其实际查询耗时长、效率低、对网速要求高,在光线不足或视力不佳的情况下识别比较困难且不够智能化等缺点。受 Kutter 等人^[44]基于第二代水印算法的启发,利用图像变换域的特征向量来实现纹理防伪的自动鉴别技术。

(1) 提出了基于变换域的纹理防伪标签自动识别算法。通过将纹理防伪图像转换到变换域中进行特征向量的提取,可以得到一组容量仅为 32bit 的特征向量。将特征向量存储至数据库中,当消费者进行查询时,只需要用智能手机等移动终端拍摄下纹理防伪标签进行验证即可,方便快捷,有较好的鲁棒性,且缩小了占用数据库的存储空间。

(2) 提出了基于压缩域的纹理防伪标签自动识别算法。通过使用压缩域来进行纹理防伪图像的特征向量提取,特征向量有较好的稳定性,有较好的识别率。

2 纹理防伪标签自动识别算法的基础理论

2.1 离散余弦变换 (DCT)

DCT 不仅具较快的运算速度、较高的精度,且在数字信号处理器中很容易实现。它在提取特征成分及运算速度方面有着最佳的平衡,在图像处理阶段具有十分重要的地位。

1. 一维 DCT 及逆变换

$f(x)$ 的 DCT 公式为

$$F(k) = c(v) \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cos \frac{\pi(2n+1)k}{2N} \quad (2.1)$$

逆变换公式为

$$f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c(v) F(k) \cos \frac{\pi(2n+1)k}{2N} \quad (2.2)$$

其中,

$$k = 0, 1, \dots, N-1; n = 0, 1, \dots, N-1; v = 0, 1, \dots, N-1;$$

$$c(v) = \begin{cases} \sqrt{1/N} & v = 0 \\ \sqrt{2/N} & v = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases}$$

2. 二维 DCT 及其逆变换

二维 DCT 公式为

$$F(u, v) = c(u)c(v) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos \frac{\pi(2x+1)u}{2M} \cos \frac{\pi(2y+1)v}{2N} \quad (2.3)$$

其中, $u = 0, 1, \dots, M-1; v = 0, 1, \dots, N-1;$

$$c(u) = \begin{cases} \sqrt{1/M} & u = 0 \\ \sqrt{2/M} & u = 1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad c(v) = \begin{cases} \sqrt{1/N} & v = 0 \\ \sqrt{2/N} & v = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases}$$

逆变换公式为

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} c(u) c(v) F(u, v) \cos \frac{\pi(2x+1)u}{2M} \cos \frac{\pi(2y+1)v}{2N} \quad (2.4)$$

其中, $x = 0, 1, \dots, M-1; y = 0, 1, \dots, N-1$

参照上述理论可知, DCT 的系数符号和分量的相位有关。

图 2.1 是 Lena 图像进行 DCT 后的结果。仔细观察图 2.1 (b) 看出, 其左上角区域较亮, 很好地说明了能量大部分存在于低频区域, 即在 DCT 后的低频部分存在图像的大部分特征。



(a) 原始图像

(b) 频域图像

图 2.1 图像 DCT 的效果

目前, DCT 用于图像编码时广泛使用 JPEG 压缩和 MPEG-1/2 标准。DCT 是在最小均方差条件小得出的仅次于 K-L 变换的次最佳正交变换, 是一种无损的首变换。它运算速度快、精度高, 以提取特征成分的能力和运算速度之间的最佳平衡而著称。

2.2 离散傅里叶变换 (DFT)

标准傅里叶变换于 1807 年被一位叫做傅里叶的法国数学家和物理学家提出, 它将信号的分析由时间域转换到了频率域。频率域反映了图像在空域灰度变化的剧烈程度, 也就是图像灰度的变化速度, 或者说就是图像的梯度大小。在频率域中, 频率越大说明原始信号变化速度越快; 频率越小说明原始信号越平缓; 当频率为 0 时, 表示直流信号, 没有变化。因此, 频率的大小反应了信号的变化快慢。高频分量解释信号的突变部分, 某些情况下指图像的边缘信息, 某些情况下又指噪声, 更多的是指两者的混合; 而低频分量决定信号的整



体形象,指图像变化平缓的部分,也就是图像轮廓信息。也就是说,傅里叶变换提供了观察图像的另外一个角度,可以将图像从灰度分布转化到频率分布上来观察图像的特征。

(1) 一维 DFT 及逆变换。

设 $f(x)$ 为 x 的函数,如果 $f(x)$ 满足狄里赫莱条件:有限个间断点、有限个极点、绝对可积,那么, $f(x)$ 的傅里叶变换公式为

$$F(u) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-j2\pi ux/N}, u = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.5)$$

逆变换公式为

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} F(u) e^{j2\pi ux/N}, x = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.6)$$

其中, x 为时域变量; u 为频域变量。

(2) 二维 DFT 及逆变换。

若 $f(x, y)$ 满足狄里赫莱条件,则二维 DFT 公式为

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j(2\pi/M)xu} e^{-j(2\pi/N)yv} \quad (2.7)$$

其中, $u = 0, 1, \dots, M-1; v = 0, 1, \dots, N-1$

逆变换公式为

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j(2\pi/M)xu} e^{j(2\pi/N)yv} \quad (2.8)$$

其中, $x = 0, 1, \dots, M-1; y = 0, 1, \dots, N-1$

$F(u, v)$ 称为 $f(x, y)$ 的二维 DFT 系数。

为了进一步理解二维离散傅里叶变换后频率域成分分布情况,以 Lena 图像为例, Matlab 仿真实验效果图如图 2.2 所示。



图 2.2 二维 DFT 的实验效果