



电子信息前沿技术丛书



Quantum Image Processing

量子图像处理

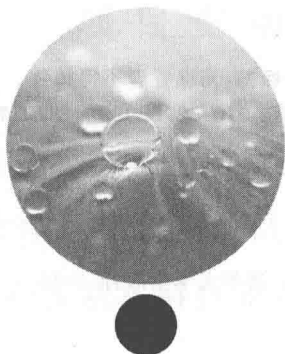
姜楠 著

Jiang Nan

清华大学出版社



电子信息前沿技术丛书



Quantum Image Processing

量子图像处理

姜楠 著

Jiang Nan

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

量子图像处理是近几年刚刚兴起的研究方向,是融合量子信息、量子计算、图像处理、数学等形成的新兴交叉学科。本书在简要介绍量子计算知识的基础上,总结了量子图像处理方面的研究现状,并着重介绍本书作者在量子图像处理方面的研究成果,包括量子图像表示、量子图像置乱、量子图像几何操作、量子伪彩色处理、量子信息隐藏等方面。

对量子图像处理感兴趣的科研人员可以选用本书作为入门读物或者参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

量子图像处理/姜楠著.--北京:清华大学出版社,2016

电子信息前沿技术丛书

ISBN 978-7-302-42267-9

I. ①量… II. ①姜… III. ①图像处理 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 283681 号

责任编辑:文 怡

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:9.5

字 数:232 千字

版 次:2016 年 4 月第 1 版

印 次:2016 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

产品编号:062688-01

FOREWORD

1982年,诺贝尔物理学奖得主理查德·费曼提出,量子计算机的计算速度远远超过经典计算机。20世纪90年代,Shor提出的量子素数因子分解算法以及Grover提出的量子搜索算法,证明了量子计算机的计算能力。越来越多的研究人员开始探索量子计算机上的各种应用,量子图像处理便是其中之一。

之所以要研究量子图像处理,笔者认为有两个主要原因:一是量子所具有的叠加、纠缠等特性可以大大提高复杂图像处理算法的效率;二是缺少图形图像的计算机已经无法想象,作为新型计算工具的量子计算机必须迎合用户的这一需求,具有图像处理功能。

量子图像处理是近几年刚刚兴起的研究方向,是融合量子信息、量子计算、图像处理、数学等形成的新兴交叉学科。虽然该方面的研究还很不成熟,在物理实现上还存在许多困难,但是它的理论优势很可能对未来计算工具的发展产生深远影响。

本书在简要介绍量子计算知识的基础上,总结了量子图像处理方面的研究现状,并着重介绍笔者在量子图像处理方面的研究成果,具体内容如下:

第1章绪论部分,主要介绍量子图像处理的研究意义,以及国内外目前关于量子图像处理方面的研究现状,列举了当前量子图像表示和量子图像处理算法方面的一些研究成果。

第2章主要介绍量子计算基础知识,包括量子态的表示、态叠加原理、量子系统的演化、量子态纠缠、不可克隆定理等,分析了量子计算机相比于经典计算机在时间和空间上的优势,并简要介绍量子计算中的基本量子逻辑门和量子比特的概念。

第3章介绍量子图像处理的相关工作,分别对量子图像表示和处理算法两方

面的工作进行总结、分析和展望。量子图像表示方面,按时间顺序介绍了 Qubit Lattice、Real Ket、Entangled Image、FRQI、NEQR、NAQSS 等表示方法。处理算法方面,按类别介绍几何变换、色彩处理、特征提取、图像分割、图像置乱、图像加密、信息隐藏和数字水印等方面的研究现状。

从第 4 章开始,介绍笔者在量子图像处理方面的研究成果。第 4 章给出一个新的量子图像表示方法 GQIR。GQIR 是对 NEQR 量子图像表示方法的改进,它可以表示任意 $H \times W$ 尺寸的量子图像,其中 H 和 W 是任意的正整数。GQIR 表示方法不仅可以表示灰度图像,还可以表示彩色图像,因为 GQIR 用 q 个量子比特表示颜色信息,这里的 q 是图像色深,通常当 $q=2$ 时,表示二进制图像;当 $q=8$ 时,表示灰度值图像;当 $q=24$ 时,表示彩色图像。后续章节的图像处理算法都是基于 GQIR 表示方法展开的。

第 5 章对量子图像置乱展开了研究,研究量子图像的 Arnold、Fibonacci、Hilbert 3 种置乱及其逆置乱方法。这 3 种置乱均是图像处理中常用的置乱方法。Arnold 置乱和 Fibonacci 置乱较为相似,都是基于加法线路实现的。Hilbert 置乱是采用逐步迭代的方法实现的。量子置乱仅需对坐标信息处理一次即可,无须一个像素一个像素地处理。

第 6 章研究了量子图像几何操作,包括图像缩放和图像平移。图像缩放方面,给出基于最近邻的图像放大和缩小算法,缩放倍数是 2^m 这种形式,这是首次提出的能够改变图像尺寸的量子图像处理算法。图像平移方面,研究了图像整体平移和循环平移。 X 轴方向的平移和 Y 轴方向的平移,这两个部分的原理相同,且执行过程没有先后之分。

第 7 章主要研究量子图像处理中伪彩色处理算法,研究基于密度分层方法的伪彩色处理的量子实现。以 GQIR 量子图像表示方法为基础,通过分析经典量子伪彩色编码方案,结合量子信息理论知识,给出了量子算法,量子算法中定义了量子色图 QCR。以 GQIR 和 QCR 为基础完成量子伪彩色编码的研究工作。

第 8 章给出两个量子图像信息隐藏算法,一个是量子 LSB 信息隐藏;另一个是基于莫尔条纹的信息隐藏。LSB 在经典图像信息隐藏中是一个重要的算法,笔者将其移植到量子计算机中,给出两个 LSB 量子算法,包括一般算法和分块算法,无论哪种算法都是盲提取的。莫尔效应指的是具有周期结构的点纹或线纹重叠时能产生异于原点纹和线纹的波纹图样的现象,基于莫尔条纹的量子信息隐藏将载体图像和消息图像重叠在一起,完成信息的嵌入。提取时需要原始载体的参与,属于非盲信息隐藏。

参考文献列出了书中引用的全部文献,在此向所有文献的作者表示感谢,同时也向由于疏忽而未被列出的作者表示歉意。

国家自然科学基金项目(61502016)、北京工业大学京华人才项目(2014-JH-L06)和北京交通大学中央高校基本科研业务费项目(2015JBM027)为本书的出版提供了资金支持。

感谢北京工业大学段立娟教授对本书的出版给予的支持和帮助。还感谢王健博士等本领域学者以及研究生吴文亚、王璐、赵娜、慕悦等为本书提供相关素材。

量子图像处理的研究刚刚起步,是一个发展迅速的领域,要对其进行系统的总结和评述,对于笔者来说是十分困难的任务,本书只能看作是笔者在这一方向上的一种努力和尝试,不妥之处在所难免,诚恳地欢迎读者批评指正。

姜楠

2015年12月

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 量子图像处理的产生与发展	3
1.3 本书组织结构	4
第 2 章 量子计算基础知识	7
2.1 量子计算和量子计算机	7
2.1.1 量子态及其叠加	8
2.1.2 量子态的时间演化及其么正性	10
2.1.3 纠缠	10
2.1.4 量子不可克隆定理	11
2.2 研究量子计算机的原因	12
2.3 量子逻辑门	14
2.3.1 一位门	15
2.3.2 二位门	16
2.3.3 多位门	20
2.3.4 量子计算复杂性	21
2.4 本章小结	22
第 3 章 量子图像处理研究进展	23
3.1 概述	23

3.2 量子图像表示	24
3.2.1 Qubit Lattice	24
3.2.2 Real Ket	25
3.2.3 Entangled Image	26
3.2.4 FRQI	26
3.2.5 NEQR	27
3.2.6 NAQSS	29
3.2.7 QSMC&QSNL	30
3.2.8 QUALPI	30
3.3 量子图像处理算法	31
3.3.1 几何变换	31
3.3.2 色彩处理	33
3.3.3 图像分割	34
3.3.4 特征提取	35
3.3.5 图像置乱	35
3.3.6 图像加密	36
3.3.7 信息隐藏和数字水印	37
3.4 本章小结	38
第4章 量子图像表示	39
4.1 INEQR	39
4.2 GQIR	40
4.2.1 GQIR 表示	40
4.2.2 图像制备	41
4.3 本章小结	45
第5章 量子图像置乱	46
5.1 量子 Arnold/Fibonacci 置乱	46
5.1.1 经典 Arnold/Fibonacci 置乱原理	46
5.1.2 量子加法器	49
5.1.3 量子模 N 加法器	51
5.1.4 量子 Arnold/Fibonacci 置乱的 GQIR 表示	51

5.1.5	量子 Arnold/Fibonacci 置乱的线路构建	52
5.1.6	量子 Arnold/Fibonacci 逆置乱	52
5.1.7	量子 Arnold/Fibonacci 置乱的例子	54
5.1.8	置乱线路复杂度分析	54
5.2	量子 Arnold 置乱的改进	55
5.2.1	对已有方案的分析	55
5.2.2	二进制运算的特殊性	56
5.2.3	量子 Arnold 置乱的改进	57
5.2.4	改进后算法的网络复杂度	59
5.3	量子 Hilbert 置乱	59
5.3.1	经典 Hilbert 置乱原理	59
5.3.2	Hilbert 矩阵迭代公式的变形	61
5.3.3	量子 Hilbert 置乱	66
5.3.4	量子 Hilbert 逆置乱	72
5.3.5	量子 Hilbert 置乱的例子	72
5.3.6	网络复杂度	74
5.4	本章小结	74
第 6 章	量子图像几何操作	75
6.1	量子图像缩放	75
6.1.1	图像缩放概述	75
6.1.2	基于最近邻的图像缩放原理	76
6.1.3	量子图像放大	78
6.1.4	量子图像缩小	80
6.1.5	量子图像缩放的例子	81
6.1.6	网络复杂度	83
6.2	量子图像平移	83
6.2.1	图像平移概述	83
6.2.2	量子比较器	85
6.2.3	量子图像平移	86
6.2.4	复杂性分析	90
6.2.5	实验分析	91

6.3 本章小结	93
第7章 量子伪彩色处理	95
7.1 经典伪彩色编码原理	95
7.2 量子色图	99
7.2.1 量子色图表示	99
7.2.2 QCR 的制备	99
7.3 量子伪彩色处理编码方案	102
7.3.1 量子算法	102
7.3.2 量子伪彩色编码的实现	104
7.3.3 复杂度分析	105
7.3.4 量子伪彩色处理的例子	108
7.4 本章小结	110
第8章 量子信息隐藏	111
8.1 量子 LSB 信息隐藏	111
8.1.1 经典 LSB 信息隐藏	111
8.1.2 量子 LSB 信息隐藏	112
8.1.3 量子 LSB 分块信息隐藏	114
8.1.4 实验模拟与分析	120
8.2 基于 Moiré 条纹的量子信息隐藏	125
8.2.1 莫尔效应	125
8.2.2 基于莫尔条纹的量子信息隐藏	125
8.2.3 提取操作	128
8.2.4 实验模拟与分析	129
8.3 本章小结	132
参考文献	133

绪 论

1.1 研究意义

1982年,诺贝尔物理学奖得主理查德·费曼提出,量子计算机的计算速度远远超过经典计算机^[1]。20世纪90年代,Shor提出的量子素数因子分解算法^[2]以及Grover提出的量子搜索算法^[3],证明了量子计算机的计算能力。因此越来越多的研究人员开始探索量子计算机上的各种应用,相关的交叉学科也不断产生,例如量子人工智能^[4]、量子机器学习^[5]、计算几何^[6]等,量子图像处理是处于起步阶段的一个交叉领域。

目前,量子图像处理主要涉及两个范畴:第一个是借鉴量子力学中的某些概念和方法解决经典计算机中数字图像处理的问题;第二个是用量子计算机处理量子图像。本书涉及第二个范畴。我们认为这两种情况最本质的差别在于图像的存储形式,如果图像以经典的数组(矩阵)方式存储,则属于经典图像处理;如果图像存储在量子中,则属于量子图像处理。

之所以要研究量子图像处理,笔者认为有两个主要原因:

(1) 量子所具有的叠加、纠缠等特性可以大大提高图像处理算法的效率。

随着计算机技术的发展,图像处理算法也越来越复杂,早就已经超越了缩放、裁剪、去噪等简单操作,发展到图像理解等复杂功能。在这些复杂功能面前,现有

的计算技术显得效率低下。

下面以图像理解为例,对该问题进行说明。图像理解是数字图像处理的研究内容之一,也是计算机视觉和人工智能的交叉学科,它的研究目标是用计算机系统解释图像,实现类似人类视觉系统理解外部世界的效果^[7]。图像理解在机器人、图像检索识别分类、工业控制、突发事件应对等方面有着广泛的应用,例如利用摄像机检测食品质量,从监控视频中自动识别出车祸、爆炸等突发事件,帮助用户更准确地找到想要的图片等。它还可以帮助我们超越人类自身的生理限制,辅助人类探索和认识自然,例如通过对外太空中的图像数据进行分析帮助人们发现外星生命或者宇宙的其他活动,潜入深不可测的海沟分析海底地貌和生物等。凡是需要用人的眼睛观察并通过人的智力活动进行理解的场景,理论上都可以用图像理解技术实现。

然而图像理解需要经过图像特征提取、知识的认知和学习、根据图像特征和已有知识进行推理和理解等步骤,其时间和空间复杂度都相当高。2006年,加拿大多伦多大学教授、机器学习领域的泰斗 Hinton 和他的学生在《科学》杂志上发表了一篇文章^[8],指出含有很多隐层的人工神经网络(称为深度神经网络)具有优异的特征学习能力,能够获得更高的准确率。事实证明了这一点,谷歌利用深度神经网络将语音识别错误率降低了 20%~30%,将 ImageNet 上图像识别的错误率从 26%降低到 15%^[9]。然而随深度增加而来的是算法时间和空间复杂度的急剧增长,再加上产业界海量数据的爆炸式增长,算法将更加耗费资源,包括时间和空间资源。例如,当训练数据超过 10 000 时,支持向量机算法代码(libsvm)因为内存不够而无法在一台普通的台式机上运行,即使扩大内存后,也需要几个小时才能完成训练^[10]。再例如,谷歌为了训练深度神经网络,动用了 16 000 个 CPU 核的并行计算平台,即便如此,训练几千小时的声学模型还是需要几个月的时间^[9]。

用量子计算机解决这类复杂图像处理算法中极大的时间和空间消耗是一种可能的方法,原因是量子所具有的叠加、纠缠等特性可以大大提高图像处理算法的效率(叠加、纠缠等概念,以及量子计算机可以提高算法效率的原因详见本书第 2 章)。

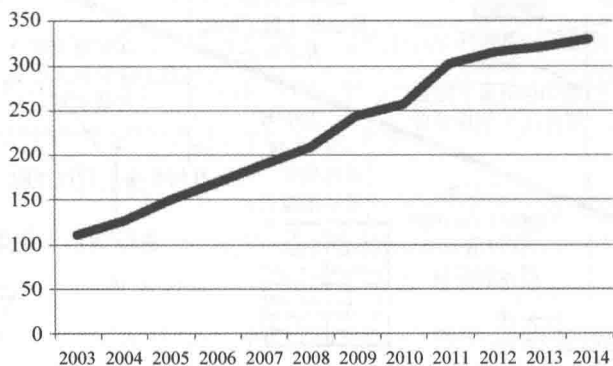
(2) 缺少图形图像的计算机已经无法想象。

计算工具发展到今天,已经离不开图像处理功能。无论是台式机、笔记本、平板电脑,还是手机,其便捷操作的背后都与图像处理紧密相关。作为新型计算工具的量子计算机也必须迎合用户的这一需求,具有图像处理功能。

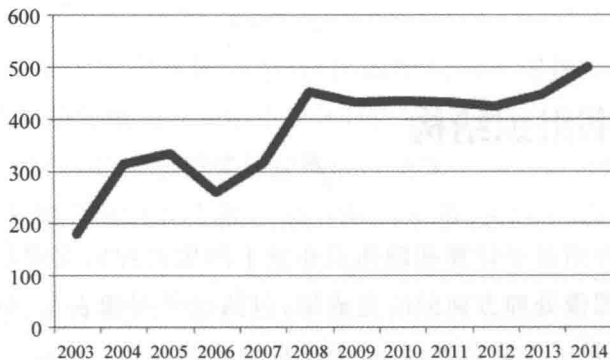
以上两点原因,正是开展量子图像处理研究的意义:一方面可以为解决现有问题提供一条新的途径;另一方面可以促进量子计算机本身的发展。

1.2 量子图像处理的产生与发展

量子图像处理的概念最早由俄罗斯学者 Vlasov 在 1997 年提出^[11],当时并没有引起太多注意。直到 2003 年,Beach^[12]和 Venegas-Andraca^[13~14]分别给出各自的量子图像处理算法,并尝试将已有的量子算法(如 Grover 量子搜索算法)应用于图像,量子图像处理才开始得到研究人员关注。2005 年,Latorre 提出一种新的量子图像表示方法^[15]。从 2010 年开始,对量子图像处理的研究逐渐繁荣起来,成果一年比一年多。从图 1-1 能够看出,当我们用“quantum image processing”作为关键词分别查找 SCI 和 EI 数据库时,查找到的论文数量呈逐年上升趋势。



(a) SCI



(b) EI

图 1-1 2003—2014 年论文数量

目前,量子图像处理方面的研究主要包括两个研究分支:量子图像表示和量子图像处理算法。

量子图像表示方面,不仅要给出图像的表示方法,还要给出如何将图像数据存储在量子计算机上。存储图像的过程称为量子图像制备,本质是一个量子算法。不同的表示方法对应不同的制备过程。现在,已经有多个图像表示方法被提出,如 Qubit Lattice^[14]、Real Ket^[15]、Entangled Image^[16]、FRQI^[17]、NEQR^[18]等。

量子图像处理算法方面,目前涉及的研究内容包括几何变换、色彩处理、特征提取、图像分割、图像置乱、图像加密、信息隐藏和数字水印等。

量子图像处理的产生与发展如图 1-2 所示,我们将在第 3 章对两方面的工作进行总结、分析和展望。

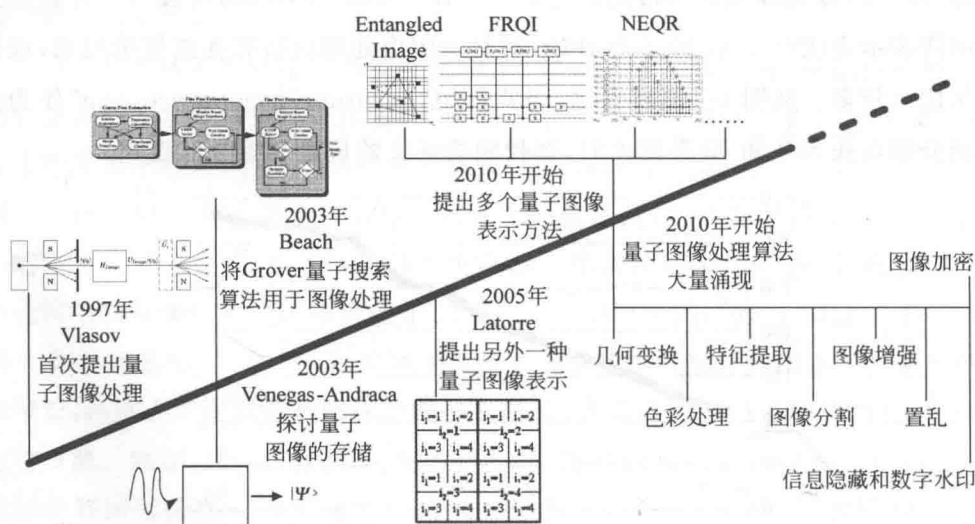


图 1-2 量子图像处理的产生与发展

1.3 本书组织结构

本书在简要介绍量子计算基础知识和量子图像处理研究现状的基础上,着重介绍笔者在量子图像处理方面的研究成果,包括量子图像表示、量子图像置乱、量子图像几何操作、量子伪彩色处理、量子信息隐藏等方面。

具体的组织安排如下:

第 1 章绪论部分,主要介绍量子图像处理的研究意义,以及国内外目前关于

量子图像处理方面的研究现状,列举了当前量子图像表示和量子图像处理算法方面的一些研究成果。

第2章主要介绍量子计算基础知识,包括量子态的表示、态叠加原理、量子系统的演化、量子态纠缠、不可克隆定理等,分析了量子计算机相比于经典计算机在时间和空间上的优势,并简要介绍量子计算中的基本量子逻辑门和量子比特的概念。

第3章介绍量子图像处理的相关工作,分别对量子图像表示和处理算法两方面的工作进行总结、分析和展望。量子图像表示方面,按时间顺序介绍了 Qubit Lattice、Real Ket、Entangled Image、FRQI、NEQR、NAQSS 等表示方法。处理算法方面,按类别介绍几何变换、色彩处理、特征提取、图像分割、图像置乱、图像加密、信息隐藏和数字水印等方面的研究现状。

从第4章开始,介绍笔者在量子图像处理方面的研究成果。第4章给出一个新的量子图像表示方法 GQIR。GQIR 是对 NEQR 量子图像表示方法的改进,它可以表示任意 $H \times W$ 尺寸的量子图像,其中 H 和 W 是任意的正整数。GQIR 表示方法不仅可以表示灰度图像还可以表示彩色图像,因为 GQIR 用 q 个量子比特表示颜色信息,这里的 q 是图像色深,通常当 $q=2$ 时,表示二进制图像;当 $q=8$ 时,表示灰度值图像;当 $q=24$ 时,表示彩色图像。后续章节的图像处理算法都是基于 GQIR 表示方法展开的。

第5章对量子图像置乱展开研究,研究了量子图像的 Arnold、Fibonacci、Hilbert 3 种置乱及其逆置乱方法。这 3 种置乱均是图像处理中常用的置乱方法。Arnold 置乱和 Fibonacci 置乱较为相似,都是基于加法线路实现。Hilbert 置乱是采用逐步迭代的方法实现的。量子置乱仅需对坐标信息处理一次即可,无须一个像素一个像素地处理。

第6章研究了量子图像几何操作,包括图像缩放和图像平移。图像缩放方面,给出基于最近邻的图像放大和缩小算法,缩放倍数是 2^m 这种形式,这是首次提出的能够改变图像尺寸的量子图像处理算法。图像平移方面,研究了图像整体平移和循环平移。X 轴方向的平移和 Y 轴方向的平移,这两个部分的原理相同,且执行过程没有先后之分。

第7章主要研究量子图像处理中伪彩色处理算法,研究基于密度分层方法的伪彩色处理的量子实现。以 GQIR 量子图像表示方法为基础。通过分析经典量子伪彩色编码方案,结合量子信息理论知识,给出了量子算法,量子算法中定义了量子色图 QCR。以 GQIR 和 QCR 为基础完成量子伪彩色编码的研究工作。

第8章给出两个量子图像信息隐藏算法,一个是量子LSB信息隐藏;另一个是基于莫尔条纹的信息隐藏。LSB在经典图像信息隐藏中是一个重要的算法,笔者将其移植到量子计算机中,给出两个LSB量子算法,包括一般算法和分块算法,无论哪种算法都是盲提取。莫尔效应指的是具有周期结构的点纹或线纹重叠时能产生异于原点纹和线纹的波纹图样的现象,基于莫尔条纹的量子信息隐藏将载体图像和消息图像重叠在一起,完成信息的嵌入。提取时需要原始载体的参与,属于非盲信息隐藏。

量子计算基础知识

量子图像处理以量子计算为基础,研究量子计算机上的图像处理问题。它利用量子力学的基本性质(如叠加、纠缠、相干效应等),能以比经典计算机更为有效的方式来解决图像处理问题。为了便于读者理解后续的量子图像处理算法,本章简要介绍量子计算的相关知识。

2.1 量子计算和量子计算机

现代物理将微观世界中所有的微观粒子(如光子、电子、原子等)统称为量子。量子具有宏观世界无法解释的微观客体的许多特性,如叠加、纠缠、波粒二相、波包塌缩等性质。这些奇异现象来自于微观世界中微观客体间存在的相互干涉,即所谓的量子相干特性。

量子计算是一种依照各种量子相干特性进行计算的新型计算模型。量子计算机是实现该模型的计算设备。目前,量子计算机已经从实验室逐步走向商用。2007年,加拿大计算机公司 D-Wave 展示了全球首台量子计算机原型机 Orion(猎户座),它利用量子退火效应来实现量子计算。该公司此后在 2011 年推出具有 128 个量子位的 D-Wave One 型量子计算机,由全球最大的军火商洛克希德·马

注:本书矢量、矩阵等不用黑斜体标明。