



国防科学技术大学

全国优秀博士学位论文丛书 [第二辑]

# 离散与小波变换新型算法 及其在图像处理中应用的研究

成礼智 著

国防科技大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

离散与小波变换新型算法及其在图像处理中应用的研究/成礼智著.—长沙:国防科技大学出版社,2007.7

(国防科学技术大学全国优秀博士学位论文丛书.第2辑/曾淳主编)

ISBN 978 - 7 - 81099 - 416 - 3

I . 离… II . 成… III . ① 离散模型—应用—图像处理 ② 小波分析—应用—图像处理 IV . TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 072315 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:耿 筠 责任校对:肖 滨

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

\*

开本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:278千

2007年7月第1版第1次印刷

ISBN 978 - 7 - 81099 - 416 - 3

全套定价:150.00元

# 序 言

积淀孕育创新，智慧创造价值。

寒窗苦读，拼搏奋斗的积淀凝聚成一本本厚积薄发的论文。博士学位论文是博士生学术水平、科研能力、创造性成果的集中体现，也是学校研究生教育水平、学术水平和创新能力的重要标志。全国博士学位论文水平反映了我国高层次创新型人才培养的质量。作为国家 21 世纪教育振兴行动计划的重要内容，教育部每年评选 100 篇左右的全国优秀博士学位论文。该举措已成为提高研究生培养质量，鼓励创新，促进高层次创造性人才脱颖而出的重要措施。

自 1999 年教育部开展全国优秀博士学位论文评选以来，我校积极参加评选工作，同时参加湖南省和军队优秀博士、硕士学位论文的评选，并以此为契机，在我校研究生中大力倡导科学严谨的学风和勇攀高峰的精神，营造鼓励人才积极创新、支持人才实现创新的浓厚氛围，为学生的禀赋和潜能的充分开发创造一种宽松的环境；采取切实可行的措施，加强学科建设；通过深化研究生学位论文评阅制度改革，完善学位论文抽检制度，实施研究生创新工程，加强研究生导师队伍建设，建立激励机制，鼓励优秀人才脱颖而出等措施不断完善质量保证体系和监督机制，全面提高研究生培养质量。迄今为止，我校已有 7 篇学位论文获全国优秀博士学位论文，另有 7 篇博士学位论文被评为全国优秀博士学位论文提名论文。

睿智颖悟，优秀博士学位论文展现给我们的不仅仅是丰硕的科研成果，更是巨大的精神财富。全国优秀博士学位论文是我国优秀博士学位论文中的杰出代表，全国优秀博士学位论文作者是具有创造能力和竞争能力的高层次创造性人才，是支撑国家掘起的骨干创新力量。认真总结全国优秀博士学位论文的成功经验，对于进一步提高博士生教育的整体水平，培养数量更多、水平更高的高层次创造性人才，具有十分重要的启示作用。在2005年3月汇集出版的我校2004年及之前获得的全国优秀博士学位论文和全国优秀博士学位论文提名的10篇论文基础上，现将我校2005—2006年获得的4篇全国优秀博士学位论文和全国优秀博士学位论文提名论文汇集出版。旨在为广大在学博士生及其导师树立高水平博士学位论文的范本和学习榜样，也期望进一步推动我校研究生教育改革的深入发展，以培养高层次创新性人才为目标，认真总结创新性人才的培养经验和方法，深入探讨博士生教育改革的思路 and 措施。

当今世界，科学技术日新月异，科技创新已经成为社会生产力解放和发展的重要标志。科学技术的迅猛发展，正在引发一场广泛而深刻的军事变革，信息化战争时代已经来临。在新的历史条件下，面对世界新军事变革的严峻挑战，面对推进中国特色军事变革和军事斗争准备的紧迫需求，军队研究生教育的地位和作用比以往任何时候都更加突出。

国防科技大学承担着为国家和军队信息化建设、研究开发国防高科技和先进武器装备、培养军队高级工程技术和指挥人才的历史使命，是我军实现新军事变革和军队信息化建设的高层次人才培养和科学研究重要基地。提高人才培养的质量已成为我们现阶段亟需关注的问题之一。我们要在培养大批各类专业和指挥人才的同时，努力为优秀创新人才的脱颖而

出创造条件。尤其要下功夫造就一批真正能站在世界科学技术前沿的学术带头人和尖子人才，以应对世界新军事变革的严峻挑战，为推进中国特色军事变革做出新的更大贡献。

国防科学技术大学研究生院

曾源

2007年4月于长沙

# 2005—2006 年国防科技大学 全国优秀博士学位论文及 全国优秀博士学位论文提名论文

2005 年二篇全国优秀博士学位论文：

信息与通信工程学科,成礼智博士的论文《离散与小波变换新型算法及其在图像处理中应用的研究》,导师梁甸农教授;

原子与分子物理学科,陈平彤博士的论文《纠缠的提取和正交量子态的局域区分》,导师李承祖教授。

2005 年一篇全国优秀博士学位论文提名论文：

光学工程学科,侯静博士的论文《共光路/工模块自适应光学与位相畸变光束频过程研究》,导师姜文汉研究员。

2006 年一篇全国优秀博士学位论文提名论文：

信息与通信工程学科,黄知涛博士的论文《循环平稳信号处理及其应用研究》,导师周一宇教授。

分类号 TN91  
UDC \_\_\_\_\_

学号 XB02041001  
密级 \_\_\_\_\_

工学博士学位论文

**离散与小波变换新型算法  
及其在图像处理中应用的研究**

博士生姓名：成礼智  
学科专业：信息与通信工程  
研究方向：电子信息获取与实时处理  
指导教师：梁旬农教授

国防科学技术大学研究生院  
二〇〇二年十月

**The Research of New Types of Algorithms for  
Discrete and Wavelet Transforms with Applications  
in Image Processing**

**Candidate: Cheng Lizhi**

**Supervisor: Prof. Liang Diannong**

A Dissertation

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Doctor of Engineering

in Information and Communication Engineering

Graduate School of National University of Defense Technology

Changsha, Hunan, P. R. China

October, 2002



# 摘 要

作为特殊的多带完全重构滤波器,包括  $M$  带小波、各种离散正交变换在内的变换方法在信息处理,尤其是在图像处理中具有非常重要的地位和作用。论文以  $M$  带含参数线性相位小波变换以及小波与离散变换整数实现及其应用为研究对象,以低复杂度算法为核心,建立了多种多带小波的构造理论与方法,得到了包括小波变换、各种离散正交变换在内的整数变换算法体系;利用该理论体系,深入研究了包括图像压缩、数字水印、三维地形表示以及图像超分辨等诸多图像处理应用问题。

本文的研究工作由新型算法的理论研究和图像处理应用研究两个方面组成。第一部分理论研究的主要成果有:

## 1. 建立了五种多带小波的构造方法。

(1)通过研究多带完全重构滤波器长度、消失矩以及滤波器系数之间的关系,提出了多带小波构造的线性方程组解法,该方法对于滤波器带数较小时非常简单高效。

(2)通过研究完全重构滤波器多相矩阵提升分解的一般形式,利用小波消失矩与 Euclidean 算法,建立了由基于提升分解的完全重构滤波器构造方法。

(3)通过揭示离散变换本质上为具有至少一阶消失矩的完全重构滤波器特性,提出了基于离散变换方法的多带完全重构滤波器构造方法。

(4)通过建立完全重构滤波器分解与重构端多相矩阵关系式,利用矩阵函数平移方法,从一个滤波器出发求出了所有其他分解与重构滤波器长度之和与之相等的滤波器。

(5)另外,为了解决由于带数增加而导致现有构造方法运算量急剧增加的问题,利用计算机代数学中的 Groebner 基和合冲模算法理论,并通过建立矩阵多项式的正交分解方法,建立了多带小波的高效、高精度方法。

本文找到的双正交小波其变换系数大部分是带参数的,搜索发现,当该参数属于某个区间时,找到的滤波器系数为双正交小波滤波器系数,因而很容易地找到具有良好计算性质的二进制系数小波。同时利用五种方法得到的小波各具特色。

总之,本文建立的系列小波构造方法克服了经典的 Daubechies 方法需要多项式开

方的困难,以及得到的小波滤波器系数为无理数的缺陷,同时,也避免了 Sweldens 提升分解方法不能揭示小波的重要性质——消失矩的问题,极大地丰富了已有小波变换系数的内容。人们可以根据需要,采用不同的方法,非常方便地构造和选用合适的小波变换。

## 2. 建立了各种离散三角变换整数实现的系统理论与算法。

利用作者建立的系列离散变换浮点快速算法,并研究离散正交变换矩阵的稀疏提升分解性质:

(1)提出了一般长度情形下具有提升结构的整数 DCT 算法以及带尺度整数 DCT 算法。

(2)建立了各种离散变换矩阵的具有提升结构的新型稀疏分解,从而建立了整数 DCT、整数 DFT、整数 DHT 以及整数 DWT 的统一快速算法,上述算法的算术运算量在浮点运算次数总数意义下是最优的,而整数 DFT 则避免了复数运算。

(3)设计了利用第二类整数 DCT 计算所有整数离散变换的统一快速算法。所有整数变换只需移位与加法,从而可以避免浮点运算。

(4)为了克服(块)离散变换实施在图像上时产生边缘效应的问题,根据输出变换系数的加权,论文提出了一种加权整数重叠式变换(IntWLPT)理论与算法。

第二部分内容研究整数小波与离散变换在图像压缩、数字水印、三维地形的带参数小波表示、Toeplitz 系统求解及其在图像超分辨中的应用等问题。主要包括:

(1)从建立低复杂度、低存储、适合硬件实现、高保真图像压缩方法的角度出发,基于“带”的(局部)小波变换,提出了一种带量化的集合分裂编码方法,建立了一种提高变换效率的带尺度小波提升分解,从而得到一种低存储、低复杂度的图像压缩方法。利用该方法与 IntWLPT 实施图像压缩时,在图像质量与 JPEG 2000 方法相近的前提下,存储开销减少 75%,运算量减少 54%。进行 FPGA 硬件仿真表明,利用本文得到的小波变换,只需保留其系数的二进制小数 4 位(即小数值不小于  $\frac{1}{16}$ ),则按照软件压缩所得到的图像客观质量 PSNR 值与相应硬件仿真得到的 PSNR 相近,但易于硬件实现。

(2)利用整数小波可以实现图像无损表示的特性,讨论了在数字高程模型(Digital Terrain Model,DTM)环境下的低计算复杂度数字水印新技术,该水印方法抗攻击和干扰的能力强,具有高度安全性。

(3)应用带参数的小波变换,提出了一种利用含参数小波实现三维地形表示的高精

度、低复杂度方法,在保证高精度的前提下,需要的三角形个数比国际通用方法减少16%左右。

(4)在多重网格理论的框架下,通过小波变换矩阵构造出有效的限制与延拓算子,建立了一种高效、高精度的 Toeplitz 系统求解方法,基于此提出了图像超分辨的新型算法,图像恢复质量比经典的整体迭代法提高近 7dB,获得了良好的图像超分辨效果。

**关键词:**离散正交变换;  $M$  带线性相位双正交小波;提升格式;消失矩;完全重构滤波器;整数离散变换;整数带权叠式变换;图像压缩;低存储;低计算复杂性;数字水印;三维地形表示;图像超分辨;Toeplitz 系统;多重网格方法;预条件共轭梯度法;快速算法

# ABSTRACT

As special types of multi-band perfectly reconstruction (PR) filters, transforms including wavelets, discrete orthogonal transforms is very important used in information processing fields, especially in image processing.

In this thesis, we focus on the construction of M band wavelets with parameters with linear phase, integer implementation of wavelet and various types of discrete orthogonal transforms and their application. With the low complexity algorithms being the nucleus, the construction theory and methods is developed for M wavelets, a algorithm system of integer transforms involving wavelets and discrete transforms is proposed. Based on this theory, some application subjects, such as image compression, watermarking, three-dimensional surface approximations, and image superresolution, are investigated deepgoingly.

The work of this thesis are composed of two parts that in cludes new types of algorithm theory and its application in image processing.

The first content are mainly concerned with the following theoretic hands:

1. Five types of wavelet construction methods is achieved:

(1) By investigating relations among the length, vanishing moment and the coefficients of perfect reconstruction (PR) filters, a linear equations is solved for constructing M band wavelets, it is very easy and highly efficient when the number of band of PR filters is small.

(2) By describing the general characters of lifting factorization for polyphase matrix of PR filters, and using vanishing moment of wavelet and Euclidean algorithm, the construction method via lifting scheme for PR filters is obtained.

(3) By revealing the property that the discrete transforms is a PR filters in essential contain at least one order vanishing moment, a construction method based on discrete transform is also proposed.

(4) By developing the polyphase matrix relations between analysis and synthesis parts of PR filter, using exchange of the matrix function, we can achieve all PR filters that the sum of filter length of analysis and synthesis parts is unchanged.

(5) Furthermore, in order to overcome the that computational complexity increase sharply

with the number of band  $M$  larger, using Groebner base and syzygy module of computer algebra, and orthogonal factorization for matrix polynomial, a low complexity and high precision construction for  $M$  band wavelet is obtained.

The coefficients of almost wavelets developed in this paper contain some free parameters, and the intervals that these parameters belong to is achieved by employing the sufficient conditions. Moreover, these five types of construction have various features. In conclusion, the construction methods developed in this thesis can overcome the difficulty that Daubechies' s method need the square-root finding the polynomial and the coefficient with irrational numbers, and on the other hand, the defect that vanishing moment of wavelet can not reveale lifting scheme methods developed by Sweldens can completely avoided. Users can easy select various types wavelets for their purpose.

2. Systematic theory and integer implemental algorithms for vasioous types of discrete sinusoidal transforms is presented.

Using known fast floating algorithms developed by authors, and by studying sparse matrix decomposition via lifting steps, we get:

- (1) The integer DCT and the scaled integer DCT algorithms with general length is achieved.
- (2) The integer DCT, integer DFT, integer DHT and integer DWT and fast algorithms for them have been achieved, the number of operations is optimal under the sense of floating-point corresponding discrete transforms. The complex operations for integer DFT is also completely eliminated.
- (3) In order to speed up the efficiency of software, the unified approach that use integer DCT-II to compute all other integer discrete transforms have also been proposed. All integer transforms need only shifting and additions, so the floating-point operations are completely avoided.

The second part in this thesis discusses the applications of the developed methods in image compression, watermarking, three-dimensional surface meshing, and image superresolution. The mainly contents includes:

- (1) In order to achieve image compression methods that is low complexity, low memory, hardware friendly, and high fidelity, the combination of stripe-based (local) wavelet and set splitting is used, and scaled wavelet lifting scheme is also proposed, and finally a low memory and low complexity image coding is developed. When the combination of the IntWLPT and this new coding method is used, memory and complexity are reduced by 75% and 54% respectively compared with that of JPEG 2000.

(2) Using the feature that the wavelet can express information lossless, a low computational complexity watermarking under the Digital Terrain Model—DTM is proposed, experimental results shows the robustness of the algorithm to noise and data smooth, and furthermore, this method is also high security.

(3) A type of low complexity and high precision three-dimensional surface meshing is obtained by use of wavelet with parameters, the number that triangles needed is reduced 16% compared with that of the commonly used methods.

(4) Under the frame of multigrid theory, using wavelet transforms construct interpolation and polyphase matrices, a high precision and low complexity method for solving ill-conditioned Toeplitz systems is proposed. And finally, image superresolution techniques via wavelet and multigrid is developed, the simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed methods.

**Key word:** Discrete orthogonal transform, M-band biorthogonal wavelet with linear phase, Lifting scheme, Regular order, Perfectly reconstruction filter, Integer discrete transform, Integer weighted lapped transform, Image compression, Low complexity; Low memory, Digital watermarking, Three-dimensional surface meshing, Image superresolution, Toeplitz systems, Multigrid method, Preconditioned conjugate gradient method, Fast algorithm

# 目 录

摘 要	( i )
-----	-------

## 第一章 绪 论

1.1 引言	( 1 )
1.2 离散与小波变换理论及其应用发展概况	( 2 )
1.2.1 离散变换及其快速算法的简要历史回顾	( 2 )
1.2.2 小波变换理论发展的历史回顾	( 3 )
1.2.3 图像压缩、数字水印以及图像超分辨简介	( 5 )
1.2.4 离散与小波变换整数实现算法研究现状	( 10 )
1.2.5 离散与小波变换理论与应用面临的新课题	( 11 )
1.3 论文主要工作简介	( 12 )

## 第二章 相关的数学基础知识

2.1 提升矩阵及其相关矩阵代数	( 15 )
2.2 多分辨分析与多带完全重构滤波器的多相位分解	( 18 )
2.2.1 多分辨分析与小波变换	( 18 )
2.2.2 多带滤波器与完全重构条件	( 19 )
2.3 多重网格技术	( 21 )
2.4 Groebner 基与合冲模算法	( 24 )
2.4.1 Groebner 基的基本理论与算法	( 24 )
2.4.2 多项式的合冲模及其算法	( 25 )

2.4.3 矩阵的合冲模及其算法 ..... (26)

### 第三章 线性相位含参数 $M$ 带小波变换的构造

3.1 引言 ..... (27)

3.2  $M$  带完全重构滤波器的提升分解 ..... (30)

3.3 紧支集双正交对称小波变换的性质 ..... (35)

    3.3.1 2 带紧支集双正交对称小波的性质 ..... (35)

    3.3.2  $M$  带线性相位双正交小波的一般性质 ..... (40)

3.4  $M$  带线性相位双正交小波的构造 ..... (43)

    3.4.1 线性相位双正交小波构造的线性方程组解法 ..... (43)

    3.4.2 基于提升格式与消失矩的线性相位双正交小波构造 ..... (46)

    3.4.3 基于离散正交变换的完全重构滤波器构造 ..... (50)

    3.4.4 分解与重构滤波器函数因式互相平移构造法 ..... (55)

3.5 一般 Coifmann 类型小波的构造 ..... (68)

    3.5.1 偶数长 Coifmann 类小波构造举例 ..... (72)

    3.5.2 奇数长 Coifmann 类小波构造举例 ..... (78)

3.6 基于 Groebner 基与合冲模的  $M$  带对称正交小波设计 ..... (84)

### 第四章 基于提升格式的整数离散变换及其快速算法

4.1 引言 ..... (88)

4.2 整数 DCT - II 与整数 DCT - IV 及其快速算法 ..... (90)

4.3 带尺度整数 DCT - II 及其快速算法 ..... (101)

4.4 各类整数离散 W 变换及其快速算法 ..... (105)

4.5 各类整数离散变换的统一算法 ..... (112)

4.6 多维整数离散变换及其快速算法 ..... (118)

4.7 整数带权叠式变换(IntWLPT)算法 ..... (120)



- 4.7.1 带权叠式变换描述 ..... (120)
- 4.7.2 整数带权叠式变换及其快速算法 ..... (122)

## 第五章 整数小波与离散变换在图像处理中的应用

- 5.1 引言 ..... (127)
- 5.2 整数小波与离散变换在图像压缩中的应用 ..... (128)
- 5.2.1 基于带与含量化集合分裂算法的低内存编码 ..... (128)
- 5.2.2 双正交小波提升格式的加速 ..... (137)
- 5.2.3 不同压缩方法计算复杂性与存储量比较 ..... (140)
- 5.2.4 不同压缩方法图像恢复质量比较 ..... (142)
- 5.2.5 不同整数小波方法硬件仿真结果比较 ..... (145)
- 5.3 数字高程模型的整数小波水印算法 ..... (148)
- 5.3.1 基于经验模态分解的 DEM 数据生成 ..... (149)
- 5.3.2 DEM 数据水印算法 ..... (151)
- 5.3.3 实验结果分析与安全性讨论 ..... (152)
- 5.4 基于含参数小波与四叉树结构的三维地形表示 ..... (154)

## 第六章 基于小波与多重网格方法的 Toeplitz 系统求解及其在图像超分辨中的应用

- 6.1 引言 ..... (156)
- 6.2 基于小波变换与多重网格技术的 Toeplitz 系统求解方法 ..... (157)
- 6.3 Toeplitz 矩阵的小波变换算法 ..... (162)
- 6.4 基于小波与多重网格方法的图像超分辨算法 ..... (167)