

现代空间光电子信息技术丛书

宋丰华 编著



现代

空间光电子信息
处理技术及应用

国防工业出版社

National Defence Industry Press <http://www.ndip.cn>

现代空间光电子技术丛书

现代空间光电信息 处理技术及应用

宋丰华 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

现代空间光电信息处理技术及应用/宋丰华编著. 北京:国防工业出版社,2004.2

(现代空间光电子信息技术丛书)

ISBN 7-118-03322-7

I. 现... II. 宋... III. 光电技术—应用—信息处理 IV. ①0438②TP391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 000846 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25½ 584 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月北京第 1 次印刷

印数:1—3500 册 定价:34.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

丛书序言

21 世纪被称为“光电子信息时代”。光电信息技术的飞跃发展及其在各行各业的广泛应用,不仅改变了人们的工作、学习和生活方式,而且推动了新产业革命、新军事革命。由新材料、新工艺、新技术支撑的,能产生高效益的光电子信息产业在世界范围内迅速扩大,一个世界性“光谷”正在流行。

光电信息革命集中地体现在信息光子学(info photonics)的飞速发展,而信息光子学是信息科学和光电子学发展形成的一门新兴的交叉学科。它是以光子作为信息载体的信息源,信息获取、信息传递、信息处理、信息融合、信息存储和信息显示等为研究对象的高新技术学科,已成为高技术发展的先导和核心。

代表着具有时代特征的高技术发展的光电子信息技术,在现代的光计算机、空间光通信、航天(如空间交通管理、高稳定空间科学研究、空间定向能武器和空间武器平台)和太空探索等重要领域中都扮演了不可替代的角色。如世纪之交的几场局部战争,无论是战争的“旧容”,还是“新貌”,都可堪称为信息战胜钢铁的战争。而光电信息装备(如激光武器、侦察、预警、制导类光电装备)已形成信息战中获取战场信息的主要手段,堪称无可替代的“耳目”(即把战场变成了没有“黑夜”的战场)、“喉舌”(即实现了对战情了如指掌)和“利器”(即胜敌方一筹的精确打击能力),把光电信息技术在现代高技术局部战争中的作用发挥得淋漓尽致。这预示着未来的军事斗争已转向空间,光电武器装备是获取空间信息的主要手段,军事武器装备必须转型。一场光电子信息革命已经到来,光电信息技术已成为现代人类文明的重要支柱之一。

为了适应新形势下光电技术和光电武器装备的发展和高校改革力度不断加大的要求,以及人才培养协调发展的需要,本着创新、实用、前瞻、高质量等原则和专业重组方式,根据近年来“非光电技术”专业本科、研究生的考生猛增的态势,以及教学大纲要求和新时期军队武器装备转型要求,在作者长期从事光电子技术工作和教学讲稿的基础之上,经多方审定,考虑了上述诸多因素,编著了《现代空间光电子信息技术丛书》。因为任何先进的光电武器装备都是由优质的光电系统组成的,而优质的光电系统又是由先进的光电信息器件和先进的光电信息处理技术来支撑的,所以,该丛书首批奉献的是《现代光电器件技术及应用》、《现代空间光电系统及应用》和《现代空间光电信息处理技术及应用》等几本。

本丛书侧重从原理结构、系统构成、参数测试、典型应用、处理方法和发展方向等方面进行阐述,力求内容新颖、通俗易懂、深入浅出。丛书中的每一部又自成体系,可作为相关专业的教材及教学参考书。

本丛书的各分册将陆续出版,若能对读者有所裨益,将不胜荣幸。由于作者水平有限,不妥或谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

前言

现代社会中与信息科学技术发展相伴生的光电信息产业正迅速发展和壮大。在技术发达国家,光电子信息相关产值已占国民经济总产值的一半以上。光电信息获取与光电信息处理技术是获得目标或物体信息的主要手段,它在信息技术中属于“上游”技术或“源头”技术,抓住了“源头”就等于抓住了关键,突破了“难点”就会产生“飞跃”。如对于任何一台信息装备,只要源头信息处理得当,就能使得系统有高质量的信息输出,进而能大大地提高信息装备的性能指标。重视光电信息处理就等于重视整个信息处理的关键,而重视空间光电信息处理技术就可不失跟踪本领域的前沿。同理,重视了光电信息处理技术人才的培养就等于重视本领域关键人才的培养。因此,随着以光计算机和光通信为主流技术的迅猛发展,光电信息处理技术必将对当代的知识经济转化起着关键作用,对科学的可视化(scientific visualization)和明日现实化(tomorrow's reality)起着深远的影响。

目前光电信息处理方面的教材多数仍侧重于单一学科,如“光学信息处理”、“工程光学”、“信息光学”、“数字光学信号处理”等,而把光电信息处理技术与光电信息装备紧密结合在一起的教材较少,在校学生要学完多门课程才能完成本课程的学习,这与当前“厚基础、宽专业、重应用”的复合型人才需求和高校专业课授课学时大量压缩不相适应。为解决这一矛盾,本教材在吸取了国内外优秀教材精髓内容和资料的基础上,着重于基本概念、物理模型和典型应用,尽量避免复杂的数学推导,有利于扩大学生的知识面,有利于学科的交叉,有利于毕业后学生在光电武器装备转型后能快速入门。同时,结合典型应用反映光电子技术或装备技术的最新发展,以达到不失跟踪学科前沿的目的。

本书是《现代空间光电子信息技术丛书》之一,全书共分为13章,既突出了光电信息处理技术基础,又结合了工程实践,同时考虑了光电子信息技术的前沿。本书内容包括模拟空间光学信息处理、空间光的数字处理、空间光电混合处理及其应用中的空间动态光电信息处理、光电混合预处理、啁啾变换和小波变换等精选内容。全书力求内容循序渐进、新颖,技术先进,方法适用,教学主题突出,且各章后附有部分思考题和习题,参考学时50学时。

由于空间光电信息处理技术的迅速发展,新的光电信息处理技术层出不穷,所以,本教材所涉及内容有限,且受编者水平的局限性及时间限制,书中定有不符读者心意之处。作者只是站在从事本专业的实践需求、教学急需的角度上,以义不容辞的责任奉献本教材的。所以,书中问题和缺点在所难免,恳请读者谅解,并诚恳希望广大读者提出宝贵的批评和改进意见。

作者 于北京

目 录

第 1 章 光电信息处理的数学基础	1
1.1 基本的一维函数	1
1.2 二维线性系统的数学表述	7
1.3 连续随机场的数学表述	9
1.4 二维函数的矩阵与向量表述	11
1.4.1 二维函数的矩阵表示	11
1.4.2 二维信息的向量表示	11
1.4.3 图像矩阵的奇异值分解	12
1.4.4 向量空间中的相关矩阵	13
1.5 函数的傅里叶变换	14
1.5.1 一维连续函数的傅里叶变换	14
1.5.2 二维连续函数的傅里叶变换	15
1.5.3 离散的傅里叶变换	16
1.6 函数的傅里叶变换的性质	17
1.7 其它形式的变换	22
1.7.1 Parseval 定理	22
1.7.2 特殊函数及其傅里叶变换	22
1.7.3 分数阶傅里叶变换	23
1.8 卷积与相关	24
1.8.1 卷积(convolution)和卷积定理	24
1.8.2 相关(correlation)和相关定理	27
1.9 FFT	28
1.9.1 FFT 算法	28
1.9.2 运算次数分析	29
1.9.3 反变换	30
1.9.4 FFT 算法流程	30
思考题与习题	32
第 2 章 光电信息处理概述	33
2.1 信息的源头与处理的综合	33
2.1.1 信息的来源和获取	33

2.1.2	光电信息的形态和处理	35
2.1.3	光电信息处理类特征和领域	38
2.1.4	光电信息处理方法和目标	39
2.2	光波的理论基础	40
2.2.1	光波线性叠加规律及相干性	40
2.2.2	光的相干性	41
2.2.3	空间光的相干条件	44
2.3	空间光的衍射与光学图像处理	45
2.3.1	始于惠更斯—菲涅耳衍射	45
2.3.2	衍射和衍射区的界定	46
2.3.3	典型的几种夫琅和费衍射计算	47
2.3.4	夫琅和费衍射图形的特点	54
2.3.5	夫琅和费衍射与傅里叶变换	56
2.3.6	傅里叶变换中的基函数及其意义	56
	思考题与习题	57
第3章	信息处理中常用的光学元件	59
3.1	透镜	59
3.1.1	透镜的变换作用及结构	59
3.1.2	傅里叶变换透镜系统成像性质	62
3.1.3	透镜的傅里叶变换性质	63
3.1.4	透镜的空间滤波特性	65
3.2	信息处理中的衍射光栅	68
3.2.1	光栅的分光性能	69
3.2.2	正弦(振幅)光栅	71
3.2.3	闪耀光栅	73
3.2.4	正弦相位光栅	74
3.3	微(二元)光学处理器件	76
3.3.1	微(二元)光学处理器件	76
3.3.2	微(二元)光学器件结构和分类	77
3.3.3	光学器件的二元化原理	78
3.3.4	二元化器件衍射效率	79
3.3.5	微透镜的制作及结构	80
3.4	信息处理中的空间光调制器	82
	思考题与习题	83
第4章	光学系统的线性分析	85
4.1	二维线性成像系统的一般分析	85
4.1.1	任意线性系统的数学描述	85

4.1.2	线性成像系统的分析模型	87
4.1.3	扩展物体的成像分析	88
4.1.4	成像系统的线性和空间不变性	90
4.1.5	光学系统的线性平移空间不变性数学分析	90
4.2	系统的传递函数、本征函数和点扩散函数	92
4.2.1	线性平移不变系统的传递函数	92
4.2.2	线性平移不变系统的本征函数	93
4.2.3	衍射受限系统点扩散函数	94
4.3	相干系统点扩散函数与传递函数	95
4.3.1	相干光学系统的点扩散函数	95
4.3.2	衍射受限系统的相干传递函数(CTF)	95
4.3.3	相干系统的线扩散函数	96
4.4	非相干系统的传递函数	99
4.4.1	非相干成像系统的光学传递函数(OTF)	99
4.4.2	非相干线扩散函数与边缘扩散函数	101
4.5	平面波的空间频率与频谱	102
4.5.1	平面波的空间频率	102
4.5.2	平面波的空间频谱	104
4.6	线性系统的空间带宽积与分辨率	105
4.6.1	线性系统的空间带宽积	105
4.6.2	线性光学系统的分辨率	105
	思考题与习题	106
第5章	空间相干处理技术及其应用	107
5.1	相干光学处理系统	107
5.1.1	单透镜构成的傅里叶变换系统	107
5.1.2	双透镜构成的傅里叶变换系统	108
5.2	空间相干光学滤波系统及其类型	109
5.2.1	相干光学滤波系统	109
5.2.2	图解滤波分析	111
5.2.3	几类典型的空间滤波系统	119
5.2.4	空间光学滤波器的类型	120
5.2.5	策尼克相衬相位滤波器	122
5.2.6	光学系统补偿滤波器	123
5.3	傅里叶变换全息技术	124
5.3.1	干涉记录	124
5.3.2	傅里叶变换再现	125
5.4	全息滤波器的制作	126
5.5	几种相干处理技术	128

5.5.1	图像相减处理技术	128
5.5.2	正弦光栅滤波器相减方法	130
5.5.3	作图像非线性处理	132
5.5.4	几种非线性图像处理的实例	134
	思考题与习题	138
第 6 章	空间滤波器与相关识别技术	139
6.1	卷积与相关处理涵义	139
6.1.1	卷积与相关算法	139
6.1.2	输入差异(特征)识别	141
6.1.3	输入位移差别识别	142
6.2	相关识别技术的应用	143
6.2.1	相关识别技术在防伪系统中的应用	143
6.2.2	相关图像识别技术在防伪中的应用	150
6.2.3	相关识别在强激光信号波前自动检测中的应用	151
6.3	实际应用中的像面全息图技术	155
6.3.1	像面全息图的特点	155
6.3.2	像面全息用于全息存储	156
6.3.3	相关识别在全息存储中的应用	156
	思考题与习题	158
第 7 章	非相干光学处理及其应用	159
7.1	相干与非相干光学处理主要差异	159
7.1.1	相干光学处理系统的特点	159
7.1.2	非相干光学处理系统的特点	161
7.1.3	用散焦系统得到脉冲响应的综合	162
7.2	基于衍射的非相干光学处理	163
7.2.1	非相干频域综合处理	163
7.2.2	对非相干光强度处理的讨论	164
7.2.3	切趾术与点扩散函数的关系	166
7.2.4	衍射最小强度检出滤波器	167
7.3	非相干光学相关处理方法	168
7.3.1	非相干光学相关处理原理	168
7.3.2	对非相干光学相关处理的讨论	169
7.3.3	无运动元件的卷积和相关运算	170
7.3.4	用散焦系统得到脉冲响应的综合	171
7.4	白光光学信息处理技术	172
7.4.1	白光光学处理的基本原理	172
7.4.2	实时假彩色编码	174

7.4.3 等密度假彩色编码	176
7.4.4 相位调制假彩色编码	177
7.4.5 光栅取样	177
7.4.6 漂白处理	178
7.4.7 白光信息处理系统中的滤波解调	179
7.5 非相干光学处理系统的典型应用	180
7.5.1 利用光学滤波器消除像素	181
7.5.2 用非相干相关处理技术实现多通道并行处理	182
7.5.3 在计算层析技术中的应用	183
7.5.4 在人脸检索识别系统中的应用	185
思考题与习题	189
第8章 计算全息与数字处理技术	190
8.1 概述	190
8.1.1 计算全息的分类	190
8.1.2 计算全息的主要应用范围	191
8.1.3 计算全息图的制作和再现过程	191
8.2 函数抽样与函数复原	192
8.2.1 函数的抽样	192
8.2.2 函数的复原	195
8.2.3 计算全息中的信息容量	196
8.2.4 时域信号和空域信号的调制与解调	197
8.3 计算全息的编码方法	198
8.3.1 计算全息的编码	198
8.3.2 迂回相位编码方法	199
8.3.3 修正离散参考光的编码方法	201
8.3.4 二元脉冲密度编码	203
8.4 计算傅里叶变换全息	204
8.4.1 全息图抽样	204
8.4.2 计算离散傅里叶变换	205
8.4.3 全息图编码	206
8.4.4 绘制全息图	206
8.4.5 计算傅里叶变换全息图的再现	206
8.4.6 对计算傅里叶变换全息图的讨论	207
8.5 计算像面全息	208
8.5.1 物波函数的抽样	208
8.5.2 物波函数的编码	209
8.5.3 全息图的绘制和再现	210
8.6 计算全息干涉图	210

8.6.1	二元全息函数	210
8.6.2	二元全息干涉图的制作	212
8.6.3	载波频率的选择	212
8.6.4	计算举例	213
8.7	相息图	213
8.8	计算全息的应用	214
8.8.1	用于制作空间滤波器	215
8.8.2	利用计算全息实现数字图像的全息变换	216
	思考题与习题	218
第9章	空间光互连与神经网络处理	219
9.1	概述	219
9.1.1	神经网络与计算机	219
9.1.2	神经网络与信息处理	220
9.1.3	神经网络与空间光互连	221
9.2	自由空间光互连技术	221
9.2.1	空间动态光互连的特点	222
9.2.2	空间动态光互连的类型	222
9.3	神经网络构成的基本原理	227
9.3.1	人工神经元	227
9.3.2	人工神经网络的描述	229
9.3.3	人工神经网络类型	231
9.3.4	前馈型网络	232
9.3.5	反馈型网络	235
9.3.6	Hopfield 网络	237
9.3.7	光纤网络	238
9.4	网络处理原理和规则	239
9.4.1	神经网络的学习	239
9.4.2	感知(perception)	239
9.4.3	反向传播	241
9.4.4	自组织学习、竞争规则	242
9.4.5	竞争原理	243
9.4.6	网络学习规则	244
9.4.7	矩阵一向量乘法原理	245
9.4.8	用透镜列阵实现光互连	246
9.5	霍普菲尔德(Hopfield)网络处理原理和规则	247
9.5.1	Hopfield 学习模型	247
9.5.2	用 Hopfield 型神经网络实现图像复原	248
9.5.3	光学关联记忆与无监视的神经网络处理	250

9.6 光联想记忆处理应用系统	252
9.6.1 纯相位滤波的非相干光相关器强度的互连	252
9.6.2 可编程的光联想记忆系统	253
9.6.3 综合性多层混合神经网络光联想记忆处理系统	254
9.7 基于全息技术的光互连处理技术及应用	254
9.7.1 基于全息技术的空间光互连	254
9.7.2 基于全息神经网络实现旋转不变的图像识别	256
思考题与习题	257
第 10 章 光电图像预处理技术	259
10.1 数字图像处理的基本方法	259
10.1.1 图像的模/数转换过程	259
10.1.2 数字图像的矩阵表示	259
10.1.3 图像的直方图表示	260
10.2 像素处理	260
10.2.1 图像的点处理	260
10.2.2 图像的区处理	262
10.3 图像增强	265
10.3.1 直方图均衡化增强	265
10.3.2 用灰度变换增强对比度	267
10.3.3 空间滤波法增强	268
10.3.4 同态图像增强	273
10.3.5 钝掩膜法	274
10.3.6 伪彩色增强和假彩色增强	274
10.4 图像复原	275
10.4.1 图像退化模型	277
10.4.2 图像恢复中的病态性质和空间滤波	277
10.4.3 逆滤波恢复	278
10.4.4 Wiener 滤波恢复	278
10.4.5 点扩展函数的确定	279
10.5 图像区域分割	279
10.5.1 区域分割的集合定义	280
10.5.2 基于像素的分割	281
10.5.3 阈值化分割	281
10.5.4 特征提取和描述	282
10.6 图像压缩编码	282
10.6.1 图像的数据压缩概念	282
10.6.2 图像的数据压缩编码算法类型	283
10.6.3 图像的数据压缩方法选择	284

10.6.4	图像压缩原理	285
10.6.5	压缩图像编码标准	289
10.6.6	图像压缩编码算法举例	292
10.7	图像处理技术在视频判读系统中的应用	297
10.7.1	判读硬件系统的构成	297
10.7.2	判读软件方法和策略	298
10.7.3	点阵图像处理	298
10.7.4	图像平滑	298
10.7.5	自动浮动阈值的选取	299
10.7.6	点阵信息的识别和译码	299
	思考题与习题	300
第 11 章	动态光电图像处理系统	301
11.1	综合性动态光电信息处理系统	301
11.1.1	NASA 的 CCD 信息处理系统	301
11.1.2	SAR 实时信息处理系统	302
11.1.3	我国的高速光电信息综合处理系统	304
11.2	SAR 成像信息的处理	305
11.2.1	SAR 回波信号的特点	305
11.2.2	SAR 成像信息处理域	307
11.2.3	多视角处理	308
11.2.4	距离游动校正	309
11.2.5	星载合成孔径雷达的运动补偿	310
11.2.6	SAR 图像信息的识别法	311
11.3	CCD 动态光信息接收和自处理能力	321
11.3.1	CCD 电荷信号的存储能力	321
11.3.2	CCD 内电荷信号的转移能力	323
11.4	动态视频图像的获取	325
11.4.1	数码相机的工作原理	325
11.4.2	视频信息处理的特点和内容	326
11.5	信息的高速数字化处理	327
11.5.1	实现信号处理的超高速计算	327
11.5.2	用信息处理器实现高速数字信号处理	329
11.5.3	动态目标图像的预处理	331
11.5.4	动态目标图像的分割	331
11.5.5	动态图像的特征提取与动态目标的识别	332
11.5.6	动态目标预测	332
11.5.7	动态目标的跟踪	333
11.5.8	动态目标仿真	334

思考题与习题	335
第 12 章 空间光电相关处理技术	336
12.1 典型的空间光电联合变换相关处理器	336
12.1.1 光电联合相关器类型及其特点	336
12.1.2 空间光电相关处理器的基本结构原理	337
12.1.3 典型的空间光电相关处理器的构成方案	338
12.1.4 空间相关处理器的参数分析	339
12.1.5 空间光实时相关处理器的应用	340
12.2 典型的 Vander Lugt 相关处理器	341
12.2.1 匹配型 Vander Lugt 相关处理器	341
12.2.2 扫描型 Vander Lugt 相关处理器	342
12.3 光电联合变换相关处理器	343
12.3.1 联合傅里叶变换相关处理器分析	343
12.3.2 联合相关处理器用于图像识别处理	344
12.3.3 LCLV 实时联合变换相关处理器光路	345
12.3.4 改进型光电联合变换相关处理器	346
12.3.5 用混合变换型相关处理器实现灰度图像变换	350
12.3.6 用相关非线性反馈系统获得自联想记忆图像	351
12.3.7 用非线性反馈相关器实现角度编码全息存储	351
12.3.8 数据融合畸变不变性联合变换相关器	352
12.4 高性能空间相关跟踪处理器设计	354
12.4.1 设计思想和性能要求	354
12.4.2 相关跟踪算法	355
12.4.3 相关跟踪处理器的运行原理	355
12.4.4 相关处理器跟踪(处理)精度测试	356
12.5 典型的相关存储(处理)器	357
12.5.1 双光子三维相关存储器	357
12.5.2 新颖而紧凑的全息相关存储(处理)器	358
思考题与习题	360
第 13 章 两个重要变换技术及其应用	361
13.1 分数傅里叶变换技术及其应用	361
13.1.1 分数傅里叶变换的含义	361
13.1.2 分数阶傅里叶变换作用	362
13.1.3 分数傅里叶变换的定义	363
13.1.4 对分数傅里叶变换阶的讨论	364
13.1.5 利用分数傅里叶变换实现自再现	366
13.1.6 分数域啁啾滤波及其在数字图像处理中的应用	366

13.2 光学小波处理技术及其应用	371
13.2.1 光学小波的基本概念	371
13.2.2 短时傅里叶变换与光学小波变换	373
13.2.3 小波变换类型	377
13.2.4 小波变换的几个基本性质	378
13.2.5 光学小波变换的特性	379
13.2.6 常用的几种小波函数	380
13.2.7 小波变换在信号处理中的应用	382
13.2.8 光学小波变换及其应用系统	386
13.2.9 光学小波变换的应用展望	391
思考题与习题	392

第 1 章 光电信息处理的数学基础

光电信息处理是基于对函数的数学描述与建模，运用光学元器件完成光学信息的模拟分析和处理或在计算机中完成对信息的各种数字处理和分析。综合运用光学信息的模拟分析和处理是现代光电信息处理的显著特点，如借助于光学元器件作并行处理和必要的数学运算是十分方便的。而由于光电信息数字图像信息是确定的，所以用数字处理和分析方法研究光电信息的性质也是很方便的。用统计性的表示法则是用统计的平均参数说明图像信息的特征。本章介绍了光电信息处理中的常用函数，讨论了二维连续、离散函数和它们的变换。

光信

1.1 基本的一维函数

光电信号种类很多，有规则信号和不规则信号、连续信号和离散信号、周期信号和非周期信号等。例如：常遇到的典型连续信号、正弦信号、指数衰减信号、复指数信号、高斯信号；还有一些奇特信号，如斜变信号、三角信号等。本节描述这些特殊的信号函数，它们在信号处理中会被经常用到。

1. 矩形函数

矩形函数(图1.1.1)是在信号处理中最常用的函数，也是最有用的函数之一。其定义如下：

$$\text{rect}\left(\frac{x-x_0}{b}\right) = \begin{cases} 0 & |(x-x_0)/b| > 1/2 \\ 1/2 & |(x-x_0)/b| = 1/2 \\ 1 & |(x-x_0)/b| < 1/2 \end{cases} \quad (1.1.1)$$

二维矩形函数(图 1.1.2)定义为：

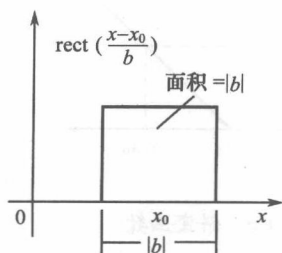


图 1.1.1 矩形函数

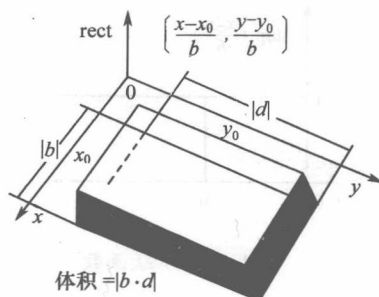


图 1.1.2 二维矩形函数

$$\text{rect}\left(\frac{x-x_0}{b}, \frac{y-y_0}{d}\right) = \text{rect}\left(\frac{x-x_0}{b}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_0}{d}\right) \quad (1.1.2)$$

2. 三角状函数

三角状函数(图 1.1.3)也是一种很重要的函数, 定义为:

$$\text{tri}\left(\frac{x-x_0}{b}\right) = \begin{cases} 0 & \left|\frac{x-x_0}{b}\right| > 1 \\ 1 - \left|\frac{x-x_0}{b}\right| & \left|\frac{x-x_0}{b}\right| < 1 \end{cases} \quad (1.1.3)$$

二维三角状函数(图 1.1.4)定义为:

$$\text{tri}\left(\frac{x-x_0}{b}, \frac{y-y_0}{d}\right) = \text{tri}\left(\frac{x-x_0}{b}\right) \text{tri}\left(\frac{y-y_0}{d}\right) \quad (1.1.4)$$

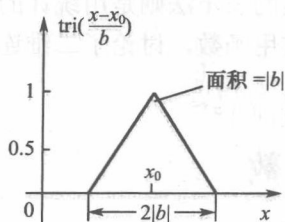


图 1.1.3 三角状函数

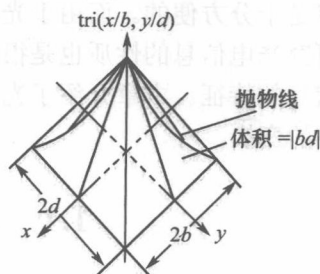


图 1.1.4 二维三角状函数

3. 阶跃函数

阶跃函数(图 1.1.5)亦称阶梯函数, 定义为:

$$\text{step}\left(\frac{x-x_0}{b}\right) = \begin{cases} 0 & \frac{x}{b} < \frac{x_0}{b} \\ \frac{1}{2} & \frac{x}{b} = \frac{x_0}{b} \\ 1 & \frac{x}{b} > \frac{x_0}{b} \end{cases} \quad (1.1.5)$$

4. 斜变函数(ramp 函数)

斜变函数(ramp)函数(图 1.1.6)定义为:

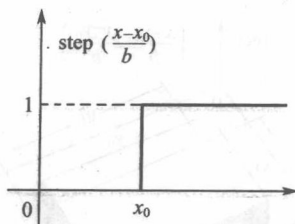


图 1.1.5 阶跃函数

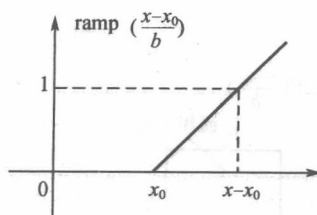


图 1.1.6 斜变函数