

变形曲线曲面 主动轮廓模型方法

BIANXING QUXIAN QUMIAN
ZHUDONG LUNKUO MOXING FANGFA

张荣国 刘 焜 蔡江辉 刘小君 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

变形曲线曲面主动轮廓 模型方法

张荣国 刘 焜 蔡江辉 刘小君 著

国防工业出版社

· 北京 ·

T0237

2-11

内 容 简 介

本书对可变形曲线曲面主动轮廓模型的建模理论和方法进行了介绍,着重对参数主动轮廓模型中的外力场构造、内部能量和外部能量函数的选择、微分方程的数字离散化方法、演化曲线曲面的优化等内容进行了阐述,对几何主动轮廓模型中的多目标轮廓曲线曲面提取、拓扑结构的自适应变化、符号距离函数的重新初始化、基于概率统计的水平集模型和全局主动轮廓模型等内容进行了详细的讨论,为自由曲线曲面的变形和图像信息的图形化建模提供了理论依据。给出了常用模型算法的 Matlab 源程序代码,为进一步的研究提供了实验基础。

本书可作为计算机应用专业和电子信息专业研究生的授课教材使用,也可以作为计算机图形学和图形图像处理爱好者的专业参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

变形曲线曲面主动轮廓模型方法/张荣国等著. —北京:国防工业出版社,2012.9

ISBN 978-7-118-08403-0

I. ①变... II. ①张... III. ①工程制图—计算机制图—轮廓跟踪—模型法 IV. ①TB237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 223637 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 100048)

北京市海淀区四季青印刷厂

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 12 1/2 字数 358 千字

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

总 序

2012年,太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际,我校的专家学者推出了这套学术丛书,以此献礼,共襄盛举。

60年前,伴随着新中国的成立,伟业初创,百废待兴,以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起,太原科技大学应运而生。60年来,几代科大人始终心系民族振兴大业,胸怀制造强国梦想,潜心教书育人,勇担科技难题,积极服务社会,为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场,涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一,今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主,“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明,多学科协调发展的教学研究型大学,成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围,众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘,硕果累累。这套丛书的编撰出版,定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012年6月

前 言

变形曲线曲面在计算机领域有着广泛的应用,通过变形曲线曲面描述复杂形状的三维物体,进而产生分析和演示表面所需的计算机动画;通过变形表面轮廓抽取,提取变形表面的几何形状特征,建立变形表面的几何模型;通过对变形曲线轮廓边缘的提取,获得动态目标的跟踪信息,在此基础上进行特征提取和模式识别;还可以利用变形曲面在影像上所表现出来的特性,对图像内容进行分割等,近年来,人们对此展开了大量的研究。

主动轮廓模型由 Kass 等人在 20 世纪 80 年代后期提出的,是进行图形表面轮廓抽取和图像分割的一种十分有效的工具,适用于图形建模和提取任意形状的变形轮廓。水平集方法是由 Osher 和 Sethian 在 20 世纪 80 年代提出的,最初目的是为了按照热力学方程描述和分析燃烧火焰外形的变化过程,因为火焰在燃烧过程中不仅外形随时变化,其拓扑结构也在发生变化,而水平集方法可以有效地解决这一曲线曲面演化问题。对主动轮廓的研究目前主要从两个方面进行:参数主动轮廓模型和几何主动轮廓模型。

参数主动轮廓模型的基本思想很简单,它用构成一定形状的控制点为轮廓线的模板,以参数的形式连续地对曲线加以描述,通过模板自身的弹性形变,使得主动轮廓与图形图像局部特征相匹配以达到调和,通过对描述主动轮廓模型的能量函数极小化,完成对图形对象的提取、图像目标的分割,再通过对模板的进一步分析,实现图形的表面重构、图像的理解和识别等。

几何主动轮廓模型,是通过一个适当的三维表面的曲面水平集函数来表示其二维平面曲线,将运动界面的平面闭合曲线作为零水平集

隐含地表达为高一维曲面函数的水平集中,这样通过水平集函数曲面的进化方程来隐含地求解曲线的进化方程,它将低维平面上的曲线演化问题通过一个隐含表达式转化为高维空间的曲面演化问题,由对参数方程的直接求解转化为水平集函数的一个零水平集隐含方式求解,通过控制曲面演化的偏微分方程进行数值计算,最终得到所希望轮廓。

本书就是围绕这两个方面的研究内容进行了介绍,重点是作者所在课题组做的一些工作和国内外学者在该领域的一些最新研究成果。全书由张荣国、刘焜、蔡江辉和刘小君编著,第1章对主动轮廓模型的一般方法进行了概述;第2章到第7章重点对参数主动轮廓模型的多种方法进行了阐述;第8章到第11章着重对几何主动轮廓模型曲线曲面的演化进行了说明;第12章对主动轮廓模型的应用作了简单介绍;书末还附了常用主动轮廓模型的 Matlab 源程序代码,以供感兴趣读者作进一步研究之用。

课题在研究过程中,得到了国家“863”高技术研究发展计划基金项目(2007AA04Z119)、国家自然科学基金项目(50775060、51075113)和校博士基金项目(20122025)资助,研究所的李晓明、胡静、党伟超、李富萍、武妍、刘春霞和白尚旺等人参与了部分内容的研究工作,作者所带研究生王蓉、邢益良、冯军华、张建国和杨莉等人对主动轮廓模型的相关课题做了相应研究,在此表示衷心的感谢。

主动轮廓模型在计算机图形学、计算机视觉、图形图像处理和模式识别等领域仍是研究的热点,出版本书的目的,就是希望把在该领域的研究经验、研究成果、最新研究动态与对其感兴趣的读者进行交流共享,并作进一步研究探讨。由于作者学术水平有限,书中不足在所难免,真诚希望热心读者能对本书的不妥之处给予批评指正。

作者

2012年6月

目 录

第 1 章	概述	1
1.1	引言	1
1.2	变形曲线曲面模型	2
1.2.1	变形曲线曲面几何模型	3
1.2.2	变形曲线曲面物理模型	5
1.3	主动轮廓模型	7
1.3.1	参数主动轮廓模型	9
1.3.2	几何主动轮廓模型	12
1.4	国内外研究现状评述	15
第 2 章	自适应梯度矢量流模型	18
2.1	引言	18
2.2	主动轮廓模型的数学表示	20
2.3	主动轮廓能量最小化条件	22
2.4	自适应梯度矢量流模型	27
2.4.1	梯度矢量流特性分析	27
2.4.2	自适应梯度矢量场	30
2.4.3	自适应外部力	31
2.5	模型的离散化及数字化求解	32
2.5.1	模型的离散化	32
2.5.2	算法实现步骤	38
2.6	实验结果与分析	39
2.7	本章小结	43

第 3 章 离散化能量优化模型 45

3.1 引言 45

3.2 动态规划主动轮廓模型 46

3.2.1 模型的表示 46

3.2.2 能量函数的离散化 47

3.3 动态规划主动轮廓模型算法步骤和实现 50

3.4 贪婪蛇算法主动轮廓模型 52

3.4.1 贪婪蛇模型 52

3.4.2 轮廓曲线曲率的计算 53

3.4.3 图像能的正则化 56

3.5 贪婪法主动轮廓模型算法步骤和实现 58

3.5.1 算法步骤 58

3.5.2 对比实验及分析 60

3.6 本章小结 61

第 4 章 高效能量组合模型 63

4.1 引言 63

4.2 组合模型中的图像能 64

4.2.1 基于边的图像能量计算 64

4.2.2 基于区域的图像能量计算 68

4.2.3 联合图像能量计算 69

4.3 组合模型中的内部能量 71

4.4 组合模型中的外部约束能量 75

4.5 各能量项偏导数的计算 75

4.5.1 梯度量值的图像能偏导 75

4.5.2 联合图像能的偏导 76

4.5.3 内部能的偏导 77

4.5.4 约束能的偏导 80

4.6	本章小结	80
第 5 章	共轭梯度 B - 样条模型	83
5.1	引言	83
5.2	B - 样条曲线的数学表示	84
5.3	结点控制的 B - 样条曲线	88
5.3.1	B - 样条曲线的 Z - 变换	88
5.3.2	三次 B - 样条系数的确定	92
5.4	基于共轭梯度的外力场构造	93
5.5	共轭梯度 B - 样条主动轮廓模型	96
5.5.1	模型的构建	97
5.5.2	算法实现步骤	101
5.5.3	实验结果与分析	102
5.6	主动轮廓的局部几何特性	104
5.6.1	局部几何特性分析	104
5.6.2	局部区域轮廓的形状控制	109
5.6.3	实验结果与分析	110
5.7	本章小结	112
第 6 章	拓扑结构自适应模型	114
6.1	引言	114
6.2	拓扑结构自适应模型	114
6.2.1	T - Snake 模型的演化	115
6.2.2	仿射单元分解	117
6.2.3	单形单元近似	123
6.3	拓扑结构自适应模型算法步骤和实现	127
6.3.1	算法步骤	127
6.3.2	实验结果与分析	128
6.4	双 T - Snake 模型算法步骤和实现	129

6.4.1	算法原理和步骤	129
6.4.2	实验结果与分析	132
6.5	本章小结	133
第 7 章	离散小波变形曲线曲面模型	135
7.1	引言	135
7.2	小波分析与小波变换	136
7.3	基于离散小波的曲线分解与重构	139
7.3.1	曲线分解与重构	140
7.3.2	Daubechies 小波	143
7.3.3	曲线拟合的误差控制	144
7.3.4	可控误差的曲线拟合算法	145
7.3.5	运行实例及分析	145
7.4	基于离散小波的三维表面分解与重构	147
7.4.1	三维表面的分层表示	147
7.4.2	表面仿真的误差控制	149
7.4.3	可控误差的三维表面仿真算法	150
7.4.4	仿真结果性能分析	152
7.5	离散小波主动轮廓模型	154
7.5.1	轮廓边缘的多尺度表示	154
7.5.2	基于离散小波场的轮廓演化	159
7.5.3	算法步骤与实现	161
7.5.4	实验结果与分析	162
7.6	本章小结	164
第 8 章	多目标轮廓 Mumford – Shah 水平集模型	165
8.1	引言	165
8.2	水平集方法及几何主动轮廓模型	166
8.2.1	水平集方法	166

8.2.2	测地线几何主动轮廓模型	168
8.3	Mumford – Shah 模型的多目标轮廓提取	171
8.3.1	Mumford – Shah 模型	171
8.3.2	梯度场的扩散及几何流的生成	173
8.3.3	调节项的建立	174
8.4	数值计算和实现	177
8.4.1	模型的离散化	177
8.4.2	算法实现步骤	180
8.4.3	实验结果与分析	181
8.5	分片光滑区域多目标轮廓提取	186
8.5.1	分片光滑 Mumford – Shah 模型	186
8.5.2	模型的离散化	188
8.5.3	算法实现步骤	190
8.5.4	实验结果与分析	191
8.6	本章小结	193
第 9 章	快速水平集演化模型	195
9.1	引言	195
9.2	窄带水平集模型	196
9.2.1	窄带区的构建	196
9.2.2	窄带区内符号距离函数的计算	198
9.2.3	接近度阈值的确定	199
9.2.4	数据结构及存储	200
9.2.5	特殊情况处理及扩展技术	201
9.3	窄带水平集算法步骤和实现	205
9.4	表面变形的窄带水平集方法	210
9.4.1	边界表面的构造	211
9.4.2	圆形边界表面的构造	216
9.5	最小变形表面计算的算法步骤和实现	219

9.6	快速行进法水平集模型	222
9.6.1	快速行进法模型构建	222
9.6.2	快速行进法求解	226
9.7	快速行进水平集算法步骤和实现	228
9.8	本章小结	231
第 10 章	先验形状水平集统计模型	232
10.1	引言	232
10.2	先验形状的水平集表示	234
10.2.1	形状的水平集表示	234
10.2.2	刚性物体的配准	235
10.2.3	非刚性物体的配准	237
10.3	基于统计的先验形状模型构建	240
10.3.1	形状模型的构建	240
10.3.2	模型的求解	242
10.4	先验形状水平集统计模型	243
10.4.1	简单的静态模型	244
10.4.2	考虑统计信息的模型	247
10.5	自约束测地活动区域模型	248
10.6	先验知识对水平集演化的约束	251
10.6.1	静态先验形状对演化的约束	251
10.6.2	概率先验形状对演化的约束	253
10.6.3	实验结果与分析	254
10.7	本章小结	256
第 11 章	全局主动轮廓模型	258
11.1	引言	258
11.2	基于 ROF 的全局主动轮廓模型	259
11.2.1	基本理论	259

11.2.2	基于偏微分方程的标准全局主动轮廓模型	262
11.3	基于双 TV 范数的快速全局主动轮廓模型	264
11.3.1	模型的表示及分解	264
11.3.2	能量方程的转化求解	265
11.3.3	实验结果与分析	268
11.4	基于 Mumford – Shah 的分段常数全局主动轮廓模型	270
11.4.1	全局主动轮廓模型的表示	270
11.4.2	快速全局主动轮廓模型	273
11.4.3	实验结果与分析	275
11.5	本章小结	277
第 12 章	主动轮廓模型在人眼疲劳检测中的应用	279
12.1	引言	279
12.2	人眼检测中的图像预处理	280
12.2.1	滤波	280
12.2.2	边缘检测	282
12.2.3	二值化和灰度均衡	286
12.2.4	数学形态	289
12.2.5	几何特征	291
12.3	气球力主动轮廓模型人眼睛检测	294
12.3.1	气球力主动轮廓模型	294
12.3.2	人眼检测处理过程	296
12.3.3	实验结果与分析	299
12.4	人眼疲劳状态的识别	302
12.4.1	人眼图片倾斜旋转摆正预处理	302
12.4.2	眼睛垂直积分投影	303
12.4.3	波形特征参数计算及人眼疲劳识别	306
12.4.4	实验结果与分析	307
12.5	本章小结	310

附录 部分模型算法 Matlab 源程序代码 311

A1 传统的主动轮廓模型 311

A2 梯度适量流主动轮廓模型 312

A3 气球力主动轮廓模型 326

A4 贪婪法主动轮廓模型 327

A5 水平集 C - V 模型 340

A6 通用水平集模型 347

参考文献..... 373

第1章 概 述

1.1 引 言

计算机技术的发展,使得以往很难描述和表示的复杂图形对象在计算机上处理成为可能。激光扫描技术、电子成像技术、光学影像技术、三维轮廓测量技术等,为复杂图形表面的测量提供了多种可选工具,借助于这些工具获取目标对象的图形图像资料后,人们就可以对感兴趣对象进行定位、分割、特征参数提取、量化分析等处理,从而为研究变形曲线曲面的形貌变化提供准确的定量或定性数据。对于非刚性物体,在受到外力的作用下,物体不仅会发生位置整体上的变化,而且物体内部的物理介质在受到外力作用下,还会发生相对位置的变化,从而导致其外形也发生变化,如图 1.1 所示。

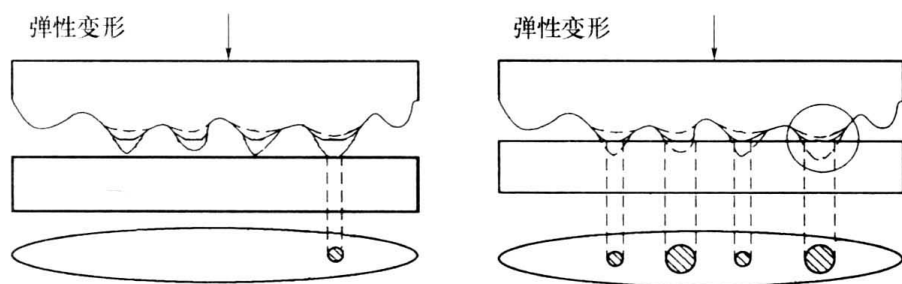


图 1.1 弹性变形表面形状变化

变形曲线曲面是受内外力作用下的一个变形体,其轮廓曲线或曲面在约束力作用下发生变形,最终停留在一个能量最低状态,这类表面在工程实际中有着广泛的应用,如受到挤压的金属表面产生的变形等。还有一类表面,在某种工况条件下,其整体或部分表面形状会随时间的变化发生变化,如相互作用的两表面由于相对运动产生的接触材料磨损而导致的表面变形等,如图 1.2 所示。磨损表面不仅在轮廓形状上

会发生变化,而且在几何拓扑结构上也会发生变化,可以由一个形体目标裂变为多个,也可能由多个形体目标合并为一个,需要对其表面形状的变化加以研究。这些情况的发生,使得在用计算机表示物体表面时,需要建立一种计算模型,它既符合人们对真实物理世界的认识,又能满足对物体表面形貌作进一步分析和对物体表面进行形变的需要。

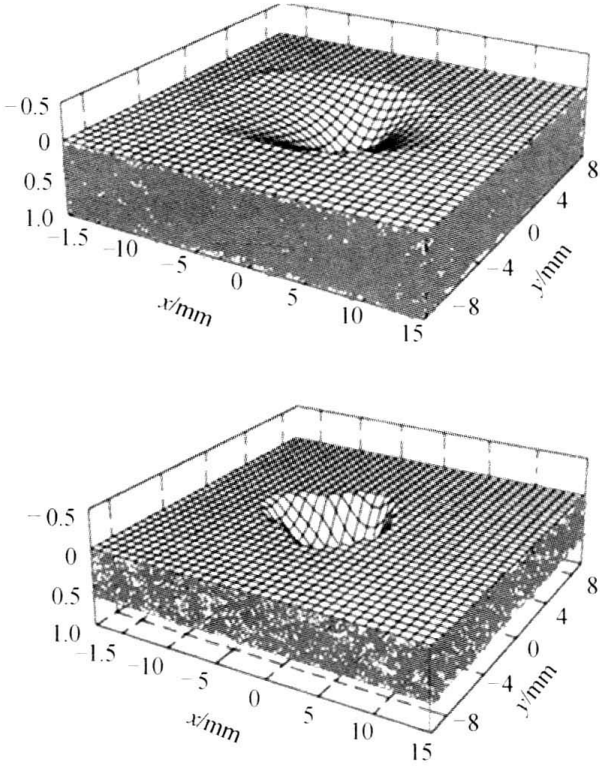


图 1.2 磨损变形表面形状变化

1.2 变形曲线曲面模型

变形曲线曲面有着广泛的应用,通过变形曲线曲面描述复杂形状的三维物体,进而产生分析和演示表面所需的计算机动画;通过变形曲线曲面轮廓抽取,提取变形曲线曲面的几何形状特征,建立变形曲线曲面的几何模型;通过对变形曲线曲面轮廓边缘的提取,获得动态目标的跟踪信息,在此基础上进行特征提取和模式识别;还可以利用变形曲线

曲面在影像上所表现出来的特性,对图形内容进行分割等,近年来,人们对此展开了大量的研究^[1,2,3]。

表面在相互接触和作用过程中会改变物体的表面形貌拓扑结构,使得简单问题变得非常复杂,早在 20 世纪 80 年代,Sederberg 等人就对实体几何模型的自由变形进行了研究^[4],所使用的表面模型和算法主要依赖于物体拓扑结构的静态变化,对于动态变化的拓扑结构,这些方法就不再适用。随后 Terzopoulos 等人在动力学基础上提出了多维连续可变形模型^[5],在可能发生变形的部位采用支持动态拓扑变化的模型,而在其他地方,则采用经过预处理的模型,这样可显著减少系统的计算量。这种方法适用于事先可以确定感兴趣的区域,其欠缺是在两种模型的边界处存在着不连续性。进入 20 世纪 90 年代,Gibson 等人对变形模型在计算机图形学和医学图像分析等领域展开了研究^[6,7],对变形模型的方法和原理提供了一些理论上的支持。最近一些时期,Montagnat 和 Nealen 等人对变形曲线曲面的拓扑结构、几何形状描述、图形学中的物理变形模型演化等进行了阐述^[8,13],为研究表面的变形过程提供了技术指导。通常可以按照几何建模和物理建模的方式对变形曲线曲面进行建模^[9],变形曲线曲面模型分类结构图如图 1.3 所示。

1.2.1 变形曲线曲面几何模型

物体的几何模型主要包括物体所处的位置信息、尺寸信息、形状信息、纹理信息等^[10,11,12],常采用的建模方法包括通过数学函数定义的二次曲线曲面、超二次曲线曲面、隐式曲线曲面等;通过一组指定的采样点集定义的样条曲线曲面,如 Bezier 曲线曲面、B-样条曲线曲面、NURBS 曲线曲面等,这些模型既可以表示二维平面上轮廓曲线特性,也可以表示三维空间上的轮廓曲面特性,是对表面特性的一种连续表示方式,如图 1.4 所示;还可以通过测量仪器获取物体表面的点云数据,再通过三角形网格或四边形网格来构造三角形面片或四边形面片,通过小的面片来模拟三维物体的整体表面,小的面片的位置形状发生变化,就会导致表面轮廓局部形状的变化,这是一种表面轮廓的离散表示方式,主要用于三维物体的表面建模。这些基于参数的几何模型,在