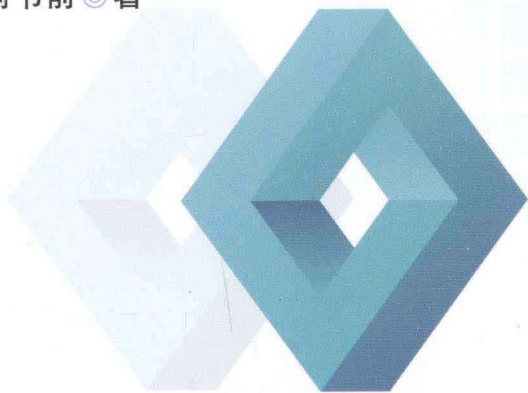


基于控制网格的 几何形体变形 研究及实践

邓正杰 石 春 何书前◎著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

海南师范大学学术著作出版项目资助

海南省自然科学基金(No. 611128, No. 613163, No. 615007, 2015)

国家自然科学基金(No. 61163042)项目资助

基于控制网格的 几何形体变形研究及实践

邓正杰 石春 何书前 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共6章,分别为综述、面向空间变形的控制网格构造、静态几何形体的空间变形、动态几何形体的空间变形、多编辑粒度的网格变形和空间变形开发及应用。本书中收录了大量的图形图像处理算法,并进行解释,且为实现时可能遇到的问题进行解答。这些算法都有实用价值。

本书可作为计算机各专业及软件有关专业的选修教材,也可作为大专院校教师的教学参考书,以及图形图像处理工作者、学生等的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

基于控制网格的几何形体变形研究及实践 / 邓正杰, 石春, 何书前著. —北京: 国防工业出版社, 2013.7
ISBN 978-7-118-08869-4

I. ①基… II. ①邓… ②石… ③何… III. ①计算机图形学 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 182594 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 6 字数 138 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 49.00 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

前 言

近年来,计算机图形学、计算机动画、数字家庭技术等取得了迅速发展,图形处理技术的应用由原先的以设计为主,逐渐加入了新的主题:模拟现实世界,即从以前的“把计算机设计的模型做到现实世界中”逐渐增加“把现实世界物体放入计算机的虚拟环境中”。几何形体变形是计算机图形学里模型设计与现实模拟等应用中的关键技术之一。几何形体变形需要提供给用户直观的操作手段、期望的变形效果,同时需要保证算法的高效率和鲁棒性。空间变形方法作为几何形体变形的一大类,正在迅速发展并被广泛采用。该类方法主要使用各种维度、各种形式的控制媒介,把原模型投影到高维参数空间,在用户修改控制媒介后,再投影回到原模型所处的空间中,从而得到变形结果。

几何形体变形是当今计算机图形学研究的一个主要方向,被广泛应用于多种领域中。空间变形是当前一个研究热点。本书围绕空间变形展开研究,并提出相关处理算法。其中主要包括控制媒介构造、模型局部变形、二维动画、图像重适配等。

变形技术是计算机图形学实现模拟的手段和重要技术之一。现实中的物体多种多样,如果设计者总是从零开始设计或者通过三维扫描来获得模型信息,效率不高。通过模型编辑可以由已有的模型得到类似的新模型,通过利用已有数据可以提高效率。有

了物体的模型,如果要对它的动作进行模拟,可以利用变形技术使该模型在局部特征基本不变的情况下,产生各种不同的姿势。

目前,变形相关问题仍然是图形处理研究的热点问题。虽然变形技术的研究成果十分丰富,但这些技术的使用友好度不高,仍然需要不断改进。因此,变形技术中的空间变形问题的解决非常值得介绍和推广。

本书基于空间变形相关的理论基础,针对现有的一些问题,提出了解决方案。其中主要有实现面向空间变形的控制网格构造,静/动态几何形体的空间变形,以及多编辑粒度的网格变形。最后,结合这些研究成果,搭建出一个三维动画片源制作系统,并给出在开发过程中遇到的常见问题和解答。

本书以空间变形的控制网格构造及使用为主线,根据研究内容的相关性进行组织。第1章对空间变形的各种方法根据控制媒介的维数进行了分类分析与总结,然后根据总结的理论框架流程次序,在后面几章中介绍一些其他算法。第2章介绍了在控制网格构造方面的工作,有控制笼、控制伞和指定句柄控制网格等控制媒介的构造。第3章和第4章讲述了对控制网格的使用,即空间变形方面的研究工作,包括静态几何形体变形和动态几何形体模拟等。第5章介绍了一种解决空间变形控制的编辑粒度受限的问题。第6章介绍了如何把空间变形与三维动画片源制作相结合,并介绍如何由虚拟场景产生有视差的双目视频流,还给出了使用Graphite开发的常见问题及解答。

本书是著者为讲授图形图像处理而编写的参考书。全书由邓正杰策划、统稿和定稿。何书前和石春参与了第1章的编写工作。其余章节由邓正杰编写。罗笑南教授、刘鼎元教授、李峥博士给予了许多指导和帮助,梁云博士、苏卓博士、陈国源、王凤伟参与了本

书部分程序的编写和调试工作。本书得到海南师范大学学术著作出版项目、海南省自然科学基金(No. 611128, No. 613163, No. 613164)、国家自然科学基金(No. 61163042)等项目资助。

由于时间仓促,水平有限,本书中难免存在疏漏或不妥之处,欢迎读者随时提出批评。

著 者

二零一三年五月

目 录

第 1 章 综述	1
1.1 几何形体变形的研究背景	1
1.2 空间变形的理论框架	5
1.3 空间变形方法综述	11
1.3.1 基于控制体的变形	13
1.3.2 基于控制曲面的变形	19
1.3.3 基于其他控制组的变形	37
1.4 控制组构造方法综述	39
1.4.1 控制体构造	39
1.4.2 控制笼构造	40
1.4.3 非包络封闭型控制曲面构造	42
1.4.4 其他控制组构造	46
1.5 本书介绍的主要算法	47
1.6 本章小结	49
第 2 章 面向空间变形的控制网格构造	50
2.1 构造控制笼的基本策略	51
2.2 基于二次误差度量的控制笼构造方法	54

2.2.1	简化步骤	56
2.2.2	去除自相交步骤	63
2.3	用于局部控制的控制伞构造方法	68
2.3.1	控制伞的基本要素	69
2.3.2	控制伞的优化	71
2.4	指定句柄的控制网格构造方法	73
2.4.1	QEM 简化的基本框架	74
2.4.2	保留句柄的简化方法	75
2.5	构造方法实现及结果	77
2.5.1	基于二次误差度量的控制笼构造结果	77
2.5.2	控制伞构造结果	82
2.6	本章小结	83
第3章	静态几何形体的空间变形	85
3.1	空间变形方法分析	85
3.2	直接插值的格林坐标变形方法	86
3.2.1	格林坐标	88
3.2.2	直接插值的格林坐标	88
3.3	隐式控制伞的局部变形方法	96
3.3.1	影响区域	97
3.3.2	控制伞的自动调节	99
3.4	空间变形和曲面变形相结合	102
3.5	静态形体变形的实现及结果	104
3.6	本章小结	107

第4章 动态几何形体的空间变形	109
4.1 二维可变形动态形体模拟方法介绍	110
4.2 基于复数重心坐标的二维可变形动态形体模拟方法	113
4.3 动画编辑方法实现及结果	118
4.4 本章小结	122
第5章 多编辑粒度的网格变形	123
5.1 相关工作	124
5.2 可快速切换粒度的网格变形	126
5.2.1 控制网格构造	127
5.2.2 网格变形	130
5.2.3 算法流程	133
5.3 实验结果与分析	134
5.4 本章小结	137
第6章 空间变形开发及应用	139
6.1 三维动画视频制作方式	140
6.2 三维场景的观察和视频录制	142
6.3 三维动画制作系统实现及结果	146
6.4 Graphite 图形处理软件开发及常见问题	150
6.5 本章小结	166
附录	167
参考文献	169

第1章 综 述

几何形体变形的研究是图形图像领域的热点研究问题之一,被广泛应用于形体建模、形体编辑、动画制作、图像重适配等研究中。近年来,计算机图形处理、计算机动画、数字家庭技术等取得了巨大发展。图形处理技术的应用也从设计领域逐渐推广到对现实世界的模拟。要逼真地模拟现实世界,就要设计出模型,并用模型形象地描述现实世界中的各个物体。许多原始模型通过扫描、设计获得。而几何形体变形技术则是基于已有模型,进一步设计新模型或形成模型的新姿势。该技术通过利用已有模型数据,大大提高了设计效率。最近推出的三维显示电视,更是促进了三维交互应用的发展。在三维交互过程中,几何形体变形是关键技术之一。因此,几何形体变形研究变得非常重要。

本章首先介绍几何形体变形的研究背景,再介绍它的整体发展情况,然后讲述几何形体空间变形的方法,接下来讲述本书在几何形体空间变形方面的一些算法及其创新之处,最后对本章进行小结。

1.1 几何形体变形的研究背景

计算机技术的飞速发展,不仅使人们对计算机相关理论了解

得更加深入,也促使了计算机作为一种工具跟其他学科,比如几何学、物理学、化学等结合起来,相辅相成,相得益彰。20 世纪 50 年代初,美国麻省理工学院的计算机旋风 1 号(Whirlwind I)的一个附件——图形显示器诞生,计算机跟几何图形的结合逐渐拉开序幕^[1]。“Computer Graphics”(计算机图形学)这个名词,首先由 Boeing 的图形设计师 William Fetter 于 1960 年提出^①。1963 年,美国麻省理工学院林肯实验室的 Ivan E. Sutherland 发表的论文“Sketchpad: A Man-machine Graphical Communications System”,介绍了交互系统 Sketchpad。使用该系统,用户可以在一个向量图形显示器上通过一个笔状输入设备进行交互设计。20 世纪 60 年代中后期,Jack Bresenham 等人提出了一系列在光栅化设备上绘制直线、圆、一般曲线等图形的算法^[2]。Steve Coons 介绍了参数曲面,且提出了早期的计算机辅助几何设计(Computer Aided Geometric Design, CAGD)概念。Pierre Bézier 在参数曲线和曲面上的工作(Bézier 参数曲线曲面等)也得到了广泛应用。计算机图形学^[3]经过几十年的发展,在图形基础算法、图形软件与图形硬件三方面都取得了长足的进步。

计算机图形学是一种使用数学算法将二维或三维图形转化为计算机显示器的栅格形式的科学^②。它研究的对象,通常由点、线、面、体等几何元素和灰度、色彩、线型、线宽等非几何属性组成,不仅包括三维图形,也包括二维图形以及图像。图像可以看作是将其栅格当作规整网格后配以相应颜色的二维图形。计算机图形学的主要研究内容就是研究如何在计算机中表示图形,以及利用

① http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_graphics

② <http://zh.wikipedia.org/zh/计算机图形学>

计算机进行图形的计算、处理和显示的相关原理与算法^①。

从应用的角度看,计算机图形学覆盖面广阔,从个人娱乐,例如三维动画、电影、游戏等,到国际科研合作,例如航天模拟训练、演示等;从粒子结构绘制到大型建筑设计;从粒子运动模拟到星系活动推演等。近年来,图形处理的应用由原先的以设计为主,逐渐加入了新主题:模拟现实世界,即从以前的“把计算机设计的模型做到现实世界中”逐渐增加“把现实世界物体放入计算机的虚拟环境中”。现实世界的模拟构造出一个多彩逼真的虚拟环境,并可应用到计算机动画和数字家庭等多媒体环境中,使虚拟环境又回馈服务于现实。特别是在数字家庭应用方面,以数字电视为主体的多媒体环境丰富并改善了人们的生活。

从各种角度观察计算机图形学的研究内容,范围广,种类繁多,有曲线曲面造型、实体造型、图形交互技术、计算机动画、自然景物仿真、虚拟现实、光栅图形生成算法、真实感图形技术与显示算法、非真实感绘制、科学技术可视化、图形硬件和图形标准等。

本书主要对计算机图形学研究对象的几何元素进行分析、编辑,所以在这里把研究对象统称作“几何形体”。几何形体编辑是计算机图形学里的关键技术之一,在曲线曲面造型、图形交互技术、计算机动画等领域都发挥着重要的作用。它通过对已有的几何形体进行编辑修改,得到新的几何形体。不仅可以协助用户构造新的几何形体,丰富种类,还可以使用已有几何形体,减少不必要的从零开始构造的工作。几何形体编辑主要包含以下几种类别:变形、分割、融合、插值、修补、重构、简化、滤波等。其中几何形体变形作为其中一种编辑方法,在几何形体编辑中占据着重要的

^① <http://zh.wikipedia.org/zh/计算机图形学>

地位。

几何形体变形是最近几年的计算机图形研究热点之一。根据已有的变形相关文章,可把变形处理的形体分为:曲面模型、实体模型、二维图形或图像、多部件模型。曲面模型的表示方式^[4]有:网格曲面(Mesh Surface)、参数曲面(Parametric Surface)、隐式曲面(Implicit Surface)、细分曲面(Subdivision Surface)。实体模型的表示方式有:体素(Voxels)、构造实体几何(Constructive Solid Geometry, CSG)、扫描体(Sweep)。二维图形或图像的结构相对简单,但是因为图像处理有其特殊性,所以在这里把它单列出来。多部件模型包含多个拓扑上不相连的模型,比如点云(Point Cloud)、深度图像(Range Image)、多边形集(Polygon Soup)。还有多个简单模型的集合,例如由多块相互分离的骨骼组成的骨架等。不同应用领域,通常需要不同的几何形体表示方式。而多边形网格曲面,以其可以以任意精度来表示任意拓扑物体表面的能力,而被广泛采用于很多领域,比如 CAD、医学、游戏、电影等^[4],特别是三角网格曲面(因为现有图形显示硬件主要通过绘制三角形来显示物体)。因此,现有的很多变形方法首先针对网格曲面表示的形体进行处理,然后根据方法特点的不同,再处理其他方式表示的形体。本书研究所用的三维形体也主要采用三角网格来表示,但是后面将会讲述到本书研究的空间变形方法同样适用于许多其他方式表示的形体,而与形体的拓扑结构无关。

多边形网格形体的交互变形在近几年倍受关注,研究人员也提出了大量的方法。因为这些方法需要提供给用户直观的操作手段、期望的变形效果,并且需要在交互过程中保持高效率和鲁棒性^[5],所以该研究领域是很有挑战性、很有难度的。现有的形体变形方法,从是否考虑形体的拓扑信息来分类,主要可以分成两大

类:空间变形和基于模型曲面的变形(简称曲面变形)^[5]。

图像变形是几何形体变形的另一个研究热点。随着数码相机等电子设备进入普通家庭,再加上互联网的高速发展,人们能够获取到的图像资源大大增加。但是对于单幅图像来说,未必总能满足用户的需求,这就促进了图像编辑研究的发展,例如缩放、去噪、细节增强、补洞等。图像缩放是其中一个应用,是为了把图像放在不同的尺度下显示,同时保持尽可能多的原有图像信息^[6]。它可以看作是一种图像大小发生变化的变形。由于用户使用的不同显示尺寸的设备越来越多,例如宽屏电视、手机、上网本等,促使图像变形成为图像编辑的热点。

各种变形方法各有优缺点,可相互借鉴,本书主要研究空间变形方法,其间也使用了一些曲面变形方法。而对于图像变形,本书是从空间变形的角度去实现的。接下来,本文将概述空间变形方法,也讲述一些跟本书方法相关的曲面变形方法。

1.2 空间变形的理论框架

在介绍空间变形的理论框架之前,先分析曲面变形方法的一些特点,以便于对比。

曲面变形,即基于模型曲面的变形,需要计算出一个目标表面上的光滑变形场,并在变形过程中保持该场相对不变。对于线性方法,它们通常求解一个表示一些二次能量的欧拉-拉格朗日偏微分方程(Euler-Lagrange PDE)的(双)拉普拉斯(Laplacian)系统。而对非线性方法,它们通常使用牛顿法或高斯牛顿法等技术去求解最小化高阶能量函数。

这种计算的强度和数值的鲁棒性跟曲面的复杂度和质量有很

大的相关性^[5]。首先,当网格质量不够好时,比如存在退化的三角形,要解的线性系统有可能变成奇异的。同样,网格裂缝或非流形等拓扑瑕疵也会导致类似问题。为了能够应用曲面变形方法,就需要在变形之前对原模型进行重新网格化、补洞、光滑等操作。其次,即使网格质量很好,若网格复杂,将会导致需要大量时间去求解庞大的线性或非线性系统。

空间变形和曲面变形不同。上述问题对空间变形方法来说,就无需考虑了。这是因为空间变形方法是通过使物体所处的空间区域发生变形来隐式地使物体变形的。图 1-1 使用自由形体变形(Free-Form Deformation, FFD)方法^[7]对兔子模型进行变形。图 1-1(a)是初始兔子模型及其所处长方体状的空间区域;图 1-1(b)是被扭曲的空间区域和发生变形的兔子模型。

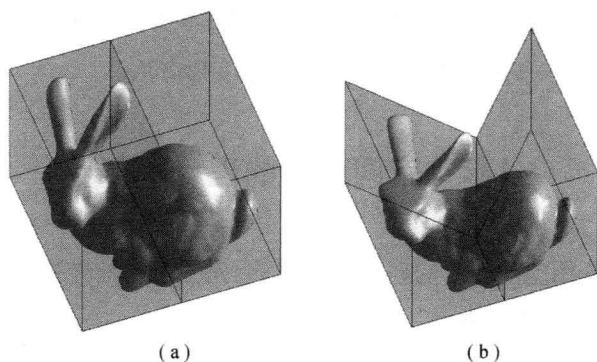


图 1-1 自由形体变形方法的空间变形效果

空间变形方法可以看作是一个 d 元变换函数^[5]。

$$f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d \quad (1.1)$$

$$S' = \{f(p) \mid p \in S\} \quad (1.2)$$

其中,式(1.2)就是把初始模型 S 上的所有点变换成变形后的模

型 S' 。通常在模型设计或编辑处理过程中, $d=2,3$ 。因为空间变形函数 f 以单个顶点为输入方式, 并不依赖于模型的特殊表示方式, 所以它可以处理三角网格或者三维扫描得到的点云等。

相比之下, 曲面变形方法可以看作一个偏移函数^[5]。

$$h: S \rightarrow \mathbb{R}^d \quad (1.3)$$

$$S' = \{p + h(p) \mid p \in S\} \quad (1.4)$$

其中, 函数 h 有时需要基于整个曲面 S 才能决定各个点 p 的偏移量。图 1-2 所示的是一个使用拉普拉斯坐标^[8]曲面变形方法处理的例子。在图 1-2(a) 中选取初始长方体模型的底部一层点作为约束固定点; 在图 1-2(b) 中拖拉图 1-2(a) 的顶层一个顶点做变形; 在图 1-2(c) 中则约束上下两底面的点; 在图 1-2(d) 中拖拉图 1-2(c) 的中间一个顶点做变形。

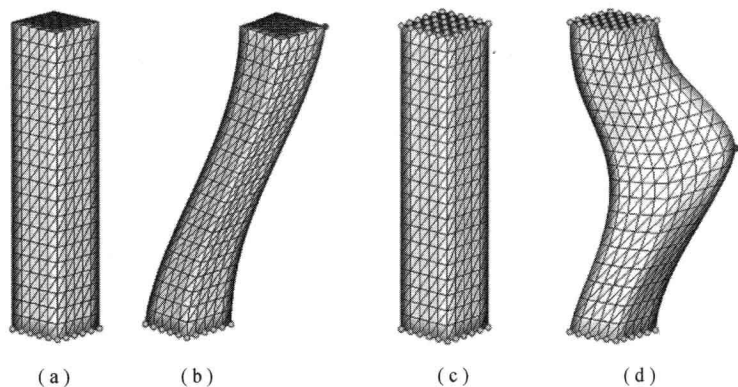


图 1-2 拉普拉斯坐标曲面变形效果

从上面的描述可以知道, 空间变形的变换函数 f 和曲面变形的偏移函数 h 是不同的。空间变形处理模型上的点, 而与模型的表示无关, 还可以通过定制所要变形的空间来控制变形的范围, 可局部, 也可全局。空间变形方法可以说是一类有高交互性的、强大

的且直观的建模技术^[9]。

不同的空间变形的变换函数 f 有很大的差别。为了能够更好地对空间变形方法进行分类、分析,空间变形的理论框架可以进一步细化为联合映射^[9]。

$$F: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^d \quad (1.5)$$

该映射 F 把一个世界坐标空间 $X(X \subset \mathbb{R}^d)$,通过一个局部参数空间 $U(U \subset \mathbb{R}^m)$,映射到一个变形了的世界坐标空间 $\tilde{X}(\tilde{X} \subset \mathbb{R}^d)$ 。而参数空间 U 由特定的空间变形技术定义,不同的方法将会定义不同的 U 。图1-3是对 $d=2$ 的情况,使用三角形的重心坐标进行变换(一种简单的空间变形)的例子。

其中,图1-3(a)和图1-3(b)分别是用网格表示的初始的和变形后的世界坐标空间。使用其中黑色边三角形来构造参数空间($m=3$)。通过计算初始空间中各个点相对于该三角形3个顶点的重心坐标,可分别得到图1-3(c)、图1-3(d)和图1-3(e)。其中颜色反映参数坐标值的过渡,三角形所处的平面的参数坐标值为0。

把映射 F 中的两个映射分别称作嵌入函数和回归函数。这里把嵌入函数表示为 $U=E(X)$,而把回归函数表示为 $\tilde{X}=R(U)$ 。这两个函数的组合就构成了空间变形映射^[9]。

$$F(X) = R \circ E(X) = R(E(X)) = R(U) = \tilde{X} \quad (1.6)$$

前面说空间变形与模型表示方式无关,并不意味着模型表示在变形中总是不可利用的。有些空间变形,比如自由形体变形,就可以很自然地应用于参数曲面,并利用其参数性质。相比于隐式曲面表示的模型要先采样,然后再变换采样点来说,网格曲面表示的模型更加方便,可以直接使用网格顶点作为需要变换的点。