

新一代几何造型系统数据结构的研究与实现*

陈玉健 杨长贵 田绿竹 孙家广

(清华大学计算机系 北京 100084)

摘要 本文分析了国际上最有影响的2种几何造型数据结构:翼边结构和辐射边结构.并提出了一种新的数据结构邻维循环结构.邻维循环结构与辐射边结构一样,具有统一表示线框、表面和实体模型的能力,可以表示点有任意条邻边,边有任意个邻面的形体模型.在拓扑结构部分,邻维循环结构所占存储空间比辐射边结构的对应部分要小一半左右.而在各种拓扑关系的检索效率上,两者的效率相同.

关键词 几何造型,数据结构,邻维,翼边,辐射边.

1 翼边结构的缺陷

几何造型系统的数据结构决定系统所能表示的形体的覆盖域,也直接影响各种几何运算操作的效率以及空间存储效率.过于庞大的数据结构占据太多的存储空间,反之,过于简单的数据结构或者不支持某些形体的表示,或者大大降低运算操作的效率.例如,早期的造型系统采用翼边结构^[1]所表示的实体,每个顶点只能有3条邻边,每条边只能有2个邻面.翼边结构的逻辑意义如图1所示,其存储结构如图2所示.这种结构是以边为中心的,各种几何元素(点、边、面)均用定长的数据来表示,故很适合用早期的FORTRAN语言的数组来作为存储结构.然而,

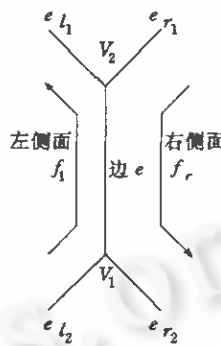


图1 翼边结构

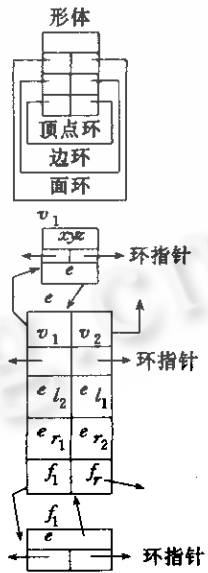


图2 形体的翼边存储结构

当一个形体上某些顶点有多于3条的邻边(如图3所示)或某些边有多于2个的邻面(如图4所示)时,就无法用翼边结构表示. GEMS 2.0 采用的对称数据结构^[2]是对翼边结构的一

* 作者陈玉健,女,1946年生,副教授,主要研究领域为CAD技术. 杨长贵,1954年生,博士,副教授,主要研究领域为计算机图形学,计算机辅助设计与制造. 田绿竹,女,1953年生,讲师,主要研究领域为CAD及工程图学,现为河北理工学院教师,在清华大学计算机系访问学者. 孙家广,1946年生,教授,主要研究领域为计算机图形学,CAD/CAM及工程数据管理.

本文通讯联系人:杨长贵,北京 100084,清华大学计算机系

本文 1995-06-23 收到修改稿

种改进,但这 2 种结构均难以支持非流形形体的几何造型.

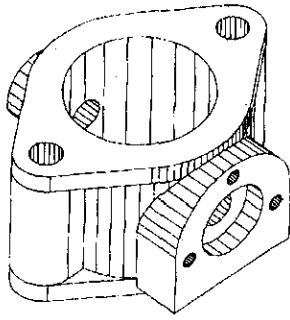


图 3 某些顶点有多于 3 条邻边的形体

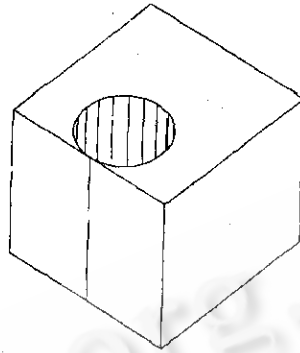


图 4 某些边有多于 2 个邻面的形体

2 辐射边结构的分析

Weiler 于 1986 年提出的辐射边结构^[3]拓宽了形体覆盖域,对点有任意条邻边,边有任意个邻面的形体结构也可以表示.图 5 所示为辐射边结构的总体框架,它由 2 部分组成.一部分是点、边、环、面的几何信息,即右列中的面(Face)、环(Loop)、边(Edge)、点(Vertex).另一部分用于描述点边环面之间的邻接关系即拓扑信息,即左列中的模型(Model)、区域(Region),外壳(Shell),面引用(Faceuse),环引用(Loopuse),边引用(Edgeuse),点引用(Vertexuse).其中,点表示三维空间的一个位置.边可以是直线或曲线边.环由首尾相接的一些边组成,而且最后 1 条边的终点与第 1 条边的起点重合.环也可以是 1 个孤立点.这里的面既可以是平面也可以是曲面,其边界由一个外环和若干个内环(包括零个)组成.外壳是一些点、边、环、面的集合.外壳所含的面集通常围成一个封闭的三维区域从而构成一个实体.外壳还可以由孤立点、边、面组成,用来表示中心点、轴向、剖面等非实体的模型.区域表示一组外壳.模型表示一组区域.

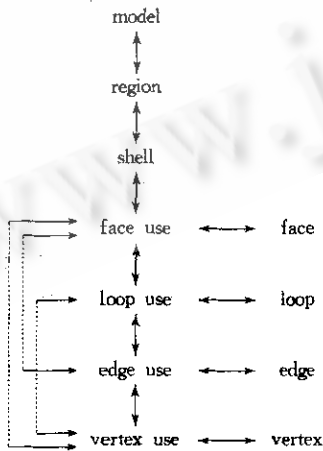


图 5 辐射边结构总体框架

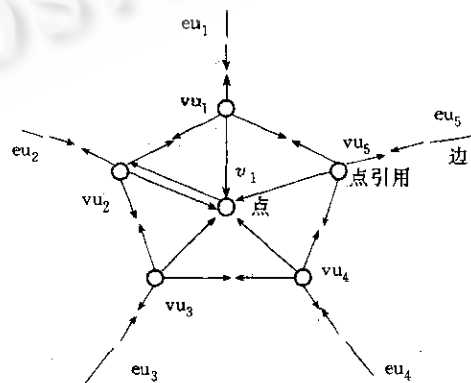


图 6 辐射边结构中边与点的关系

如图 6 所示为辐射边结构中 与一个顶点有关的几何/拓扑元素之间邻接情况. v_1 代表

一个顶点, 存储该顶点的几何信息(坐标). $vu_1 \sim vu_5$ 表示对该顶点的 5 个引用, 即有 5 条边 ($eu_1 \sim eu_5$) 以该顶点为端点. 不难看出, 对于每个点引用、辐射边结构中使用 5 个指针记录它与对应顶点及边的邻接关系. 其中点引用与对应顶点之间用一个指针邻接, 2 个指针用于建立同一顶点的点引用双向链表. 还有 2 个指针用于建立点引用与对应边的相互索引关系. 另外, 顶点本身还需一个指针建立它的引用链表.

图 7 所示为辐射边结构中 与 1 条边有关的几何拓扑元素之间的邻接关系. 不难看出, 若某个面的边界与该边共边, 则与点的情况类似要使用 5 个指针记录有关元素的相邻关系. 边引用与边之间用一个指针邻接; 2 个指针建立同一面的 2 侧(由 2 个面引用表示)所用的 2 个边引用之间的关系, 这对指针称为耦合边指针; 另外, 2 个指针建立 2 个边引用与邻面共边之间的邻接关系称为辐射边指针.

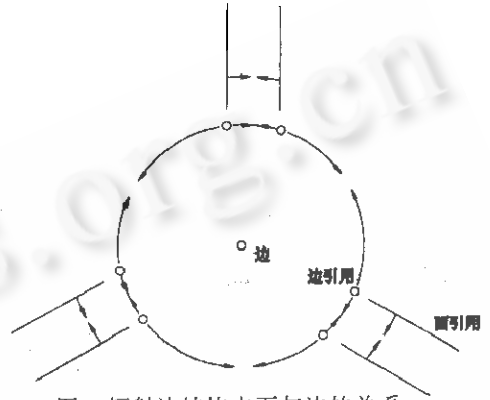


图 7 辐射边结构中面与边的关系

辐射边结构虽然有可以表示点有任意条邻边、边有任意个邻面的形体结构的优点, 但其数据结构过于庞大, 空间开销很大, 而且结构的重点放在点与边上, 用于点、边元素的邻接指针数是点边数的 5 倍.

3 GEMS4.0 造型系统所用的新结构

我们在开发新一代产品造型系统 GEMS4.0 时^[4], 采用了一个兼顾空间效率和时间效率的数据结构作为形体的边界表示模式. 在用户界面上采用特征模型, 并采用 CSG 模型作为上述 2 种模型之间的过渡. 我们所设计的边界表示模型采用以面为中心的数据结构, 它能够有效地记录非正则形体的各种几何/拓扑元素以及它们之间的邻接关系, 如图 8 所示.

任何一张曲面都作为 NURBS 曲面, 因而有控制点、节点矢量、权值等数据. 对于常用二次面如圆柱、圆台等, 数据结构还存有中心、半径、高度、轴向等几何信息. 在造型过程中, 经过求交分类, 原来的 1 张曲面可能分割成一些小面片(即剪裁曲面), 它们通过参数域上的环来表示. 1 张剪裁曲面由参数域上 1 个外环和若干个内环表示, 采用右手规则判断环所围成的有效区域, 外环逆时针, 内环顺时针. 外环的左侧、内环的右侧为面的有效参数区域.

参数域上的环是由参数域上的边(二维边)首尾相接而成. 每 1 条参数空间的边对应于三维空间的 1 条边, 不同的参数边可以对应于三维空间的相同边. 每条边的邻面以链表形式挂在相应三维边结点上. 每个顶点的邻边以链表形式挂在该顶点结点上. 因此, 这种结构能够表示点有任意条邻边、边有任意个邻面的形体模型.

一个造型系统最基本的几何元素只有 3 种: 点、边、面. 这 3 种元素之间的相邻关系只有 9 种: 点点、点边、点面、边点、边边、边面、面点、面边、面面. 造型数据结构一方面要能支持各种模型的表示, 另一方面要能支持方便快捷地获取这些相邻关系(拓扑信息). 在分析图 8 所示结构的有关性质之前, 先把图中各种结点的结构(见图 9)介绍如下.

CSGexp 为 CSG 表达式的根结点, 指针 p_node 指向 CSGnode 类型结点构成的链表,

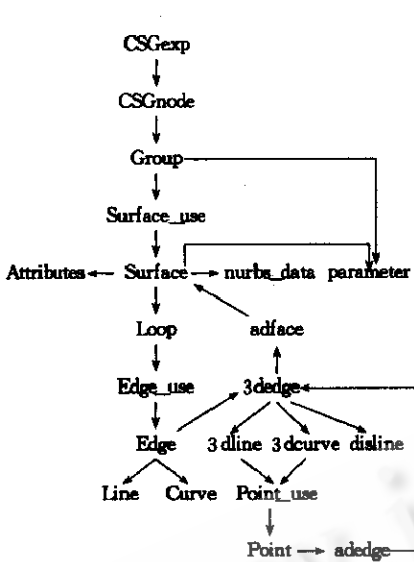


图8 GEMS 4.0中形体的数据结构

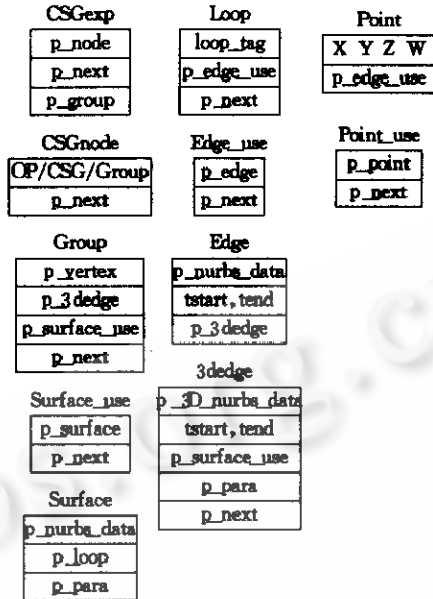


图9 GEMS 4.0中几何/拓扑元素的结构

实际上是一个 CSG 表达式。p_group 指针用来存储表达式运算结果，p_next 用来构造表达式链表。CSGnode 为表达式中的运算符或运算对象，运算对象可以是 1 个体或 1 个 CSG 表达式。

Group 可以表示 1 个体，这时，用 p_surface_use 指针可遍历体的所有面，它还可以是 1 条边或 1 个孤立点，分别用指针 p_3dedge 或 p_vertex 索引。

Surface_use 是对面的引用，属于拓扑元素范畴。

Surface 是面的几何定义，包括曲面的 NURBS 定义数据(控制点、权值、节点矢量、阶数等)、NURBS 曲面的参数域上的环以及当曲面为二次面时的几何参数(中心、半径、轴向等)，分别用 3 个指针索引。

Loop 是曲面参数域上的环，环有外环、内环之分，loop_tag > 0 时表示外环，反之表示内环，环由一个边引用的链表构成，p_next 用于链接同一个面的不同环。

Edge_use 是边引用结点，是个拓扑元素。

Edge 是几何元素，包括参数域上边的几何定义，如边的 NURBS 定义数据(用 p_nurbs_data)指针、边的起始参数与终止参数 tstart, tend 以及边所对应的三维空间边的指针。

3dedge 表示三维空间的 1 条边，其定义包括边的 NURBS 数据(p_3D_nurbs_data)，边的起始和终止参数(tstart, tend)，当边为圆锥曲线时的几何参数如中心、半径、曲线所在平面法向等(p_para)以及该边所有的邻面(用 p_surface_use 指针为邻面表表头)。

对于每 1 条参数域上的边 Edge，在三维空间有 1 条对应的边 3dedge。以四边域曲面为例，四边域曲面的参数域是 1 个方形区域。方形边界由 4 条直线边组成。这种直线边就是 Edge 类型的几何元素。每条直线边对应于三维空间曲面的某段边界线。这种边界线就是 3dedge 类型的几何元素。

Point_use 为点引用，是拓扑元素。

Point 为顶点,是几何元素,包括点的几何坐标和权值以及该点所有的邻边(用 p-edge-use 作为邻边表表头).

adface 指向边的邻面表,即所有共享该边为边界线的面组成的链表. adedge 指向点的邻边表,即所有共享该点为端点的边组成的链表. disline 指向边的离散表示. 它由曲线上一组适当密度的离散点组成. 用于支持边的显示和交互拾取功能.

由于 Group 结点对面的个数及封闭性均无任何要求,故它既可以表示 1 个封闭体也可以表示一些面构成的组合面(在 NC 加工时有用);又由于 Group 结点设了边指针和点指针,所以 Group 结构既可以表示体模型,也可以表示面模型,还可以表示线框与点. 当 Group 用于表示体模型时,除了包含边界表示模型所需的面、环、边、点及邻接信息外,还有为实现特征造型所需的信息. 例如:当体为圆柱时,圆柱的底面中心、半径、长度、轴向等几何信息. 这些信息在进行特征操作及 CAPP 和 CAM 等后继应用中都是很重要的. 它们还用于加速几何求交和检索等操作.

接下来考察这种结构是否支持形体运算方便地获取 9 种拓扑邻接信息. 从一个面的环指针可以检索到该面边界上的所有边,由这些边可以检索到该面的所有相邻点,而这些边的邻面就是该面的所有邻面. 可见,要获得面边、面点、面面相邻信息是容易的. 再看边面、边边、边点的相邻关系,每 1 条边的邻面可由其邻面表直接获得,边的邻接顶点可由其点表直接获得,从边的邻接顶点的邻边表即可获得边的所有邻边. 最后,看看点与各种元素的邻接关系. 点的邻边可直接在点的邻边表中获得,由邻边表可获得点的所有邻面,亦可获得点的所有邻接点. 所以,9 种拓扑关系的检索均可直接或 1 次间接地获得,而不必遍历形体的整个结构,与辐射边结构比较发现二者在 9 种拓扑关系的检索效率方面是相同的.

图 10 所示为 GEMS4.0 中顶点与边的邻接关系示意图. 与辐射边结构比较,每个顶点处可节省 3 个指针.

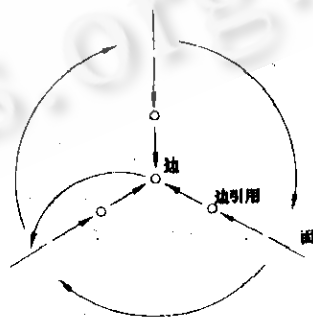
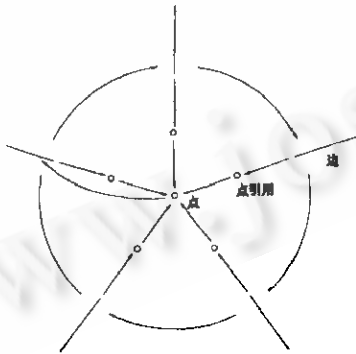


图 10 GEMS 4.0 中顶点与边的邻接关系 图 11 GEMS 4.0 中边与面的邻接关系

图 11 为 GEMS4.0 中边与面的邻接关系示意图. 与辐射边结构比较,每条边处也可节省 3 个指针. 另外,在 GEMS4.0 中每个面都只作为 1 个面只有 1 侧,而在辐射边结构中每个面都有 2 侧,所以 GEMS4.0 的数据结构中拓扑邻接部分所用存储空间约比辐射边结构的对应部分小一半.

由于在图 10、图 11 所示的结构中,相邻维元素点一边、边一面的邻接关系成循环状,故此形象地把这种数据结构称为邻维循环结构.

4 小 结

在本文中,我们首先分析了早期最有影响的造型数据结构——翼边结构,举出实际上合法、而该结构不能表示的形体模型例子,接着分析了著名的辐射边结构,在此基础上提出了一种新的数据结构——邻维循环结构.在邻维循环结构上检索各种拓扑关系的效率与辐射边结构相同,但是新的数据结构在拓扑表示部分所占的空间只有辐射边结构的一半.故邻维循环结构在存储效率上优于辐射边结构.

参考文献

- 1 Baumgart B. A polyhedron representation for computer vision. In: AFIPS Conf. Proc., 1975, 589~596.
- 2 孙家广,陈玉健.几何造型中的数据结构.计算机学报,1989,12(3):181~193.
- 3 Weiler K J. Topological structures for geometric modeling. Ph. D Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, August 1986.
- 4 杨长贵,陈玉健,孙家广.新一代几何造型系统——GEMS 4.0.计算机学报,1995,18(3):561~570.

RESEARCH AND IMPLEMENTATION OF THE DATA STRUCTURE FOR NEW GENERATION GEOMETRIC MODELING SYSTEM

Chen Yujian Yang Changgui Tian Lüzhu Sun Jianguang

(Department of Computer Science Tsinghua University Beijing 100084)

Abstract Two most influential data structures for modeling i. e., winged edge and radial edge structure are analysed. A new data structure——structure cycling between adjacent dimensions is proposed. Similar to radial edge structure, the new structure is capable of representing wireframe, surface and solid models in a unified scheme. It is also capable of representing a model with some vertices having arbitrary number of adjacent edges and some edges having arbitrary number of adjacent faces. The topological part of the new structure is about half in size compared with the same part of the radial edge structure. However the efficiency for accessing topological relation is the same for the two structures.

Key words Geometric modeling, data structure, adjacent dimension, winged edge, radial edge.