

文章编号:1001-9081(2009)12-3314-03

## 图形发生器中新的子区域划分表示及叠合算法

张 博<sup>1,2</sup>, 唐小萍<sup>1</sup>, 杨 勇<sup>1</sup>, 严 伟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209;  
2. 中国科学院研究生院信息科学与工程学院, 北京 100049)  
(zhangbojs@sina.com)

**摘要:**为实现直写曝光机中图形发生器的软件功能模块, 系统地给出了一种多边形的双向链接边表的表示方法及高效的平面子区域划分的叠合算法。该算法以计算几何中常用的平面扫描算法为基础, 对叠合过程中出现的各种情况, 给出了通用的处理方法, 针对多边形中出现空洞的情况, 提出了一种判别准则和基于图的重构的遍历搜索方法。根据分析, 该算法的时间复杂度含有对数因子, 优于传统的二次项复杂度, 并且具有线性的空间复杂度。由于双向链接边表的数据结构主要由指针和链表组成, 所以易于在计算机中实现。

**关键词:** 双向链接边表; 子区域划分; 叠合; 空洞

**中图分类号:** TP391.41    **文献标志码:** A

## Sub-region data structure and its composition algorithm in pattern generator

ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, TANG Xiao-ping<sup>1</sup>, YANG Yong<sup>1</sup>, YAN Wei<sup>1</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan 610209, China;  
2. College of Information Science and Engineering, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To realize the software functional module in pattern generator, this paper gave a new data structure, doubly-connected edge list, and a well-designed composite algorithm of the sub-regions by using the plane sweep algorithm in computational geometry. In that algorithm, a general approach was given to process any situation appearing in sub-regions composition. To find the internal-hollowed polygon, a discriminate method and a search method were proposed based on graph reconstruction. The time complexity in this algorithm has a logarithmic item and linear space complexity, better than the quadratic one. The data structure is easy to realize in PCs because it is mainly composed of pointers and linked-lists.

**Key words:** doubly-connected edge list; polygon sub-region; composition; internal-hollow; polygon

## 0 引言

电子束曝光技术是利用电子束对微细图形进行直接描画或投影复印的图形加工技术, 是集成电路制造中最重要的装备, 主要应用于掩模的制造和器件的直接光刻方面。而图形发生器是电子束曝光机中的核心部件, 它的软件部分负责掩模图形中基本图形的表示, 图形之间的运算以及掩模图形的分割, 这些图形数据的表示和运算速度直接决定了电子束光刻机的生产效率, 所以必须为掩模图形中的基本单元图形设计良好的数据结构以及高效的算法。目前, 国外的电子束曝光机中的图形发生器已经发展得相当成熟, 如美国 IBM 公司, J. C. Nability 曝光系统公司, 德国 Raith 公司, 等等, 在国内, 只有中国科学院电工研究所在 2005 年研制出第一台实用的图形发生器, 但是该装备在软件方面, 如图形子场的黑白翻转, 轮廓化和多边形自分割等模块中<sup>[1]</sup>, 只是用工程方法进行实现且没有在效率方面进行最优化设计, 也没有针对多边形及其相互运算给出一种系统而全面的数据表示方法<sup>[2]</sup>。作者借鉴了计算几何学中关于多边形表示及其基本运算算法, 系统地针对图形发生器中最常见的多边形设计了一种双向链接边表的表示方法以及子区域划分之间的叠合算法, 而

且针对图形发生器中的图形子场出现的空洞, 进行了充分的讨论并给出一种判别准则和识别算法。

## 1 多边形的双向链接边表的表示

为了方便计算出两个子区域划分的叠合, 必须建立起表示子区域划分的某种适当方式。简单的存储多边形一组线段, 并不利于表示某个多边形的边界, 如果能够引入结构性的、拓扑的信息将会非常便利。图形发生器中需要存储的信息和必要的基本操作有: 点的坐标, 边的信息, 指出多边形围绕的具体是哪个面, 沿边界遍历一周。

对于任一子区域的划分, 与之对应的双向链接边表为它的每张面、每条边和每个顶点都设置了一个记录。在每种记录中, 可以根据不同的应用来附加有用的信息。为了能够沿逆时针方向围绕某张面遍历一周, 在每条边对应的记录中存储一个指针, 指向下一-条边。通常, 每条边都隶属于两张面的边界, 于是采取一种方法将每条边的两端分别视为一条半边, 这样, 如图 1, 每一条边都被分成两条半边, 它们互为孪生兄弟。对任何一条半边, 都有唯一的一条后续半边, 以及唯一的一条前驱半边。在这里, 遵循如下原则: 在对给定的任何一条半边指定其后续半边的时候, 后续半边的方向, 应该能够沿逆时针方

收稿日期: 2009-06-12; 修回日期: 2009-08-26。

基金项目: 02 科技重大专项(2009ZX02037-06); 国家 863 计划项目(2009AA03Z341)。

作者简介: 张博(1986-), 男, 湖北京山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 直写光刻机中图形发生器中的软件算法; 唐小萍(1963-), 女, 重庆人, 研究员, 主要研究方向: 微电子光刻装备控制系统、整机集成; 杨勇(1975-), 男, 四川巴中人, 博士, 主要研究方向: 微电子专用设备; 严伟(1977-), 男, 四川内江人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向: 微电子光刻装备中的软件系统。

向遍历其对应的面。定义了半边的方向之后,若一条半边  $\bar{e}$  起始于  $v$ ,终止于  $w$ ,则  $Twin(\bar{e})$  起始于  $w$ ,终止于  $v$ 。为找到一张面的边界,还需要在对应的面记录中存放一个指针,指向任意一条参与围绕该面的半边,这样就可以通过后继边指针,围绕一张面依次访问边。

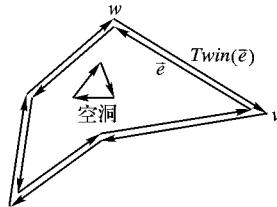


图 1 孪生半边和空洞

如果是空洞,按照顺时针方向来遍历其边界。这样,无论是哪张面,对于构成其边界上的那些半边来说,该面总是位于左侧。如前所述,通过指向其边界上任何一条半边的指针,可以遍历某张面的整个边界;如果某张面的边界由多个连通块组成,就应该为这张面设置多个指针,逐一指向每个连通块。这样,双向链接边表<sup>[3]</sup>由三组记录构成,一组对应于顶点,一组对应于面,还有一组对应于半边。在这些记录中,分别存有下列几何及拓扑信息:

- 1) 在对应于顶点  $v$  的顶点记录中,设有一个名为  $Coordinates(v)$  的域,存放  $v$  的坐标。此外,还有一个名为  $IncidentEdge(v)$  的指针,指向以  $v$  为起点的某一条半边。
- 2) 在对应于面  $f$  的记录中,设有一个名为  $OuterComponent(f)$  的指针,指向该面外边界上的任意一条半边。若是无界面,则为  $nil$ 。此外,还有一个名为  $InnerComponents(f)$  的列表,其中设有多个指针,分别对应于该面的各个空洞,每个指针所指的是对应空洞的边界上的某一条半边。
- 3) 在对应于半边  $\bar{e}$  的半边记录中,设有一个名为  $Origin(\bar{e})$  的指针,指向该半边的起点;另有一个名为  $Twin(\bar{e})$  的指针,指向其孪生半边;还有一个名为  $IncidentFace(\bar{e})$  的指针,指向其参与围成的那张面。半边记录中还设有两个指针  $Next(\bar{e})$  和  $Prev(\bar{e})$ ,分别指向其沿着  $IncidentFace(\bar{e})$  边界的后继边与前驱边。

## 2 子区域划分叠合算法

多边形的叠合运算,就是在给定分别对应于  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  两个子区域的双向链接边表之后,计算出  $\lambda_1 \cup \lambda_2$  的双向链接边表。首先,给出一种计算新的双向链接边表中的顶点记录和半边记录的方法,将  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  所对应的两个双向链接边表复制到一个新的双向链接边表中。此时,这个新的双向链接边表并不合法,因为它不是一个合法的子区域多边形表示。而这正是叠合算法所要完成的任务,通过计算两个边网络之间的交点,并适当地将两个双向链接边表中的相关部分链接起来,最终计算出叠合运算后新的双向链接边表。

计算顶点记录和半边记录采用的算法就是基于常用的一组线段之间交点的平面扫描算法<sup>[4-6]</sup>。先将来自两个子区域划分  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的边合并成为一个集合,再对该线段集合运用平面扫描算法。在求交点过程中,若当前事件点,即算法过程中发现的交点,同时涉及分别来自不同的多边形的边,则需要对新的双向链接边表进行调整,在这个交点处将原先的两个多

边形各自对应的双向链接边表链接起来。在这里介绍一种情况的详细处理过程(其他情况与此类似),如图 2 所示,  $\lambda_1$  的一条边  $e$  穿过  $\lambda_2$  的一个顶点  $v$ ,此时,在双向链接边表中,  $e$  就被替换成  $e'$  和  $e''$  以及对应的  $Twin(\cdot)$  边共四条。 $e$  原先对应的两条半边依然保留,而且还是分别以原先的端点为起点。然后通过设置  $Twin(\cdot)$  指针,将原先的两条半边分别与新生成的两条半边配对。

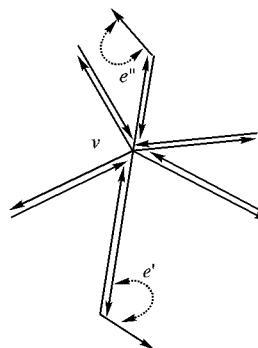


图 2 设置  $e$  两个端点处的链接

下一步,必须进一步设置好若干个  $Prev(\cdot)$  和  $Next(\cdot)$ 。两条新的半边,将分别在原先的半边中找到不是自己孪生兄弟的那条,然后将其  $Next(\cdot)$  指针复制过来。同时还要修改这两个  $Next(\cdot)$  指针所指向的半边,将其  $Prev(\cdot)$  指针指向各自对应的那条新的半边。如图 2 所示。下面,需要对  $v$  点周围的链接设置进行更新,只要通过测试以确定  $e'$  和  $e''$  在围绕顶点  $v$  的环形次序中所处的位置,就可以进一步找到来自  $\lambda_2$  的对应的  $Prev(\cdot)$  和  $Next(\cdot)$  四条边。比如,要从  $e'$  起沿顺时针方向找到下一条以  $v$  为起点的半边,然后将它(通过其  $Prev(\cdot)$  指针)与  $e'$  所对应的,以  $v$  为终点的那条半边(通过其  $Next(\cdot)$  指针)相互链接起来;要从  $e'$  起,沿逆时针方向找到下一条以  $v$  为终点的半边,然后将它(通过其  $Next(\cdot)$  指针)与  $e'$  所对应的,以  $v$  为起点的那条半边(通过其  $Prev(\cdot)$  指针)相互链接起来。 $e''$  的处理与之类似。

在完成顶点和半边的记录设置后,然后就是要计算出叠合而成的各张面的信息。针对需要构造的数据结构,要设置  $OuterComponent(f)$  和  $InnerComponents(f)$  列表和每条半边的  $IncidentFace(\cdot)$  域。最后,在每张新的面中还要做上标记,指明它在原来的两个子区域划分中,分别属于哪一张面。根据目前构造出来的双向链接边表,很容易就可以找出所有的边界环。然而,一个环既可能是某张面的外边界,也可能是某张面内部一个空洞的边界。如何加以区分呢?如图 3 所示,可以先在环中找到最左端的顶点  $v$ 。

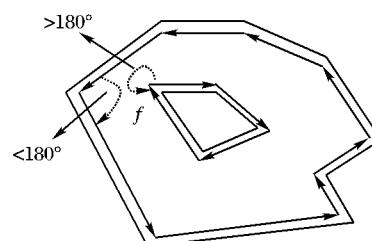


图 3 外边界与空洞边界的区分

考查在环上与  $v$  相关联的那两条半边。既然与之相关联的面总处在左侧,就可以计算出这两条半边朝这张面内部所张的角度,如果这个角度小于  $180^\circ$ ,则该环就是一圈外边界;

否则,就是某个空洞的边界。

为了判断一张面由哪些环(内环或者外环)构成,可以构造一张图  $G$ 。每一个环,无论是内环还是外环,都对应  $G$  中的一个图节点。设想无界面也有一条外边界,并专门为它设置一个图节点,对应于其假想的边界。两个环各自对应的图节点之间连有一条弧,当且仅当其中一个环为某一个空洞的边界,而且另一个环上有一条半边从左侧直接紧邻于空洞边界环上的最左端顶点。若某个环上最左端顶点的左侧根本就没有任何半边,则将该环所对应的图节点连接到无界面所对应的节点。在平面扫描算法求交点时,总是会找出直接紧邻于各事件点左侧的线段,则每个顶点以及相应的最左边的线段在平面扫描算法时已经求出。因此,为了构造图  $G$ ,首先要为每个环指定一个图节点,为确定  $G$  的各条弧,要从每个空洞的边界环上取出最左端的顶点  $v$ 。若  $e$  为紧邻与  $v$  左侧的那条半边,则需要找出  $e$  所在环所对应的图节点,以及以  $v$  为其最左端顶点的空洞环所对应的图节点,然后在它们之间添加一条弧。如图 4 所示,空洞环用单线条圆圈表示,外边界环用双线条圆圈表示。则确定图  $G$  后,用一次深度优先搜索就可以确定所有的连通子块。最后对每一张面都要做标记,记录原先属于哪个子区域,只需检查面  $f$  的边在形成的过程中是属于哪个面的即可做相应的记录。

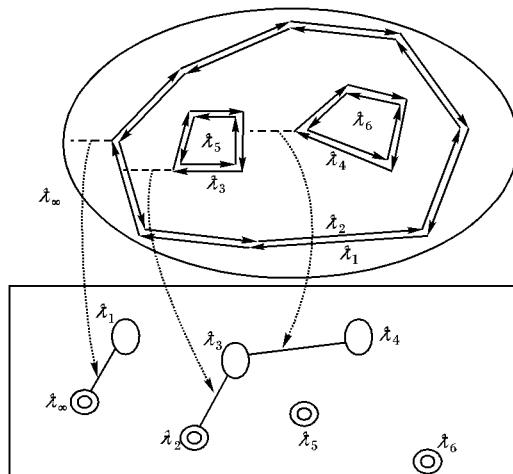


图 4 子区域划分及其对应的图  $G$

将以上的分析归纳起来,可以得到如下的算法:

#### 算法 MAPOVERLAY( $\lambda_1, \lambda_2$ )

输入:用双向链接边表形式存储的两个平面子区域划分  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ 。

输出: $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  的叠合,也存储为一个双向链接边表。

- 1) 生成一个新的双向链接边表  $\vartheta$ ,将  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  对应的两个双向链接边表复制到  $\vartheta$  中。
- 2) 应用前面介绍的平面扫描算法,计算出  $\lambda_1$  的各边与  $\lambda_2$  的各边之间的全部交点。在每个事件点处,除了前面介绍的相交算法中的操作之外,还要完成如下工作:  
若该事件点同时涉及  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  中的边,则按照上面分析的方法对  $\vartheta$  进行更新;  
找到紧邻于该事件点左侧的那条半边,将它存于  $\vartheta$  中对应于该点的顶点处。  
3) /\* 现在,  $\vartheta$  双向链接边表中的顶点和边的信息已经全部计算出来了,只是有关面的信息还有待计算。 \*/  
4) 通过对  $\vartheta$  的遍历,找出其中的所有边界环。

#### 5) 构造一张图 $G$ :

其中的每个节点,分别对应于一个边界环;

其中的每条弧,都连接了一个空洞环与紧邻与该环最左端顶点左侧的另一个环。找出  $\vartheta$  中的所有连通子块(用以计算弧的信息,在上面的第 2 步已经计算出来了)。

#### 6) for( $G$ 的每一个连通子块)

do 找到该连通子块的唯一的外边界环;由此环围成的面,记作  $f$ ;

生成对应于  $f$  的一个面的记录。

将  $OuterComponent()$  指向该外边界环的某条半边;

生成一个  $InnerComponents()$  列表。

将各内外环上的所有半边的  $IncidentFace()$  指针,指向对应于  $f$  的面记录。

#### 7) 给找出的每张面都做上标记,指明各张面在 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 中分别被包含于哪张面中。

### 3 结语

给定任意两个平面子区域划分  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,其复杂度分别为  $n_1$  和  $n_2$ 。令  $n = n_1 + n_2$ ,上述算法可以在  $O(n \log n + k \log n)$  的时间内计算出  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的叠合,其中  $k$  为叠合结果的复杂度。叠合后的每个多边形都是双向链接边表的完整表示。按照前述给出算法执行后,两个子区域划分叠合后将产生新的子区域划分如图 5 所示。

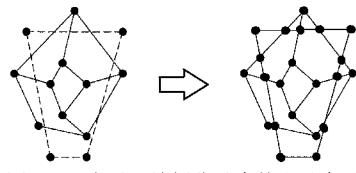


图 5 两个子区域划分叠合前和叠合后

本文为实现直写曝光机中图形发生器的软件功能模块,这些模块包括窗口裁减、尺寸修正、场切割、轮廓化、黑白翻转、自分割,等等,系统地提出了一种多边形子区域划分的数据结构(双向链接边表的表示方法),然后介绍了基于平面扫描算法的不同多边形之间的叠合的算法,在阐述算法过程中,给出了数学上简单却完备的证明过程,并且可以为多边形之间的并、交、差,以及取反等布尔运算提供基本操作。

### 参考文献:

- [1] 陈建辉.可变矩形电子束曝光机图形数据转换软件的实用化研制[D].北京:中国科学院电工研究所,2002.
- [2] 刘伟.纳米级电子束曝光系统用图形发生器技术研究[D].北京:中国科学院电工研究所,2005.
- [3] de BERG M, van KREVELD M, OVERMARS M, et al. Computational geometry algorithms and applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [4] MAIRSON H G, STOLFI J. Reporting and counting intersections between two sets of line segments [C]// Theoretical Foundations of Computer Graphics and CAD. Berlin: Springer-Verlag, 1988: 307 - 325.
- [5] NIEVERGELT J, PREPARATA F P. Plane-sweep algorithms for intersecting geometric figures[J]. New York: Communication of the ACM, 1982, 25(10): 739 - 747.
- [6] FINKE U, HINRICH K. Overlaying simply connected planar subdivisions in linear time [C]// Proceedings of 11th Annual ACM Symposium. New York: ACM Press, 1995: 119 - 126.