



## [12] 发 明 专 利 说 明 书

[21] ZL 专利号 99110076. X

[43] 授权公告日 2003 年 4 月 16 日

[11] 授权公告号 CN 1105954C

[22] 申请日 1999.7.2 [21] 申请号 99110076. X

[71] 专利权人 贾敏忠

地址 台湾省台北市内湖区成功路四段 294 巷  
68 弄 12 号

[72] 发明人 贾敏忠

审查员 李 璐

[74] 专利代理机构 北京奥瑞专利事务所

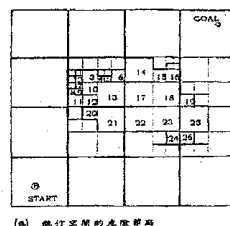
代理人 朱黎光

权利要求书 6 页 说明书 12 页 附图 10 页

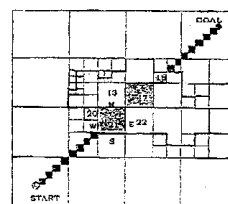
[54] 发明名称 用于通用航空的路径规划、地形回避及飞航环境警觉系统

## [57] 摘要

本发明提供用于通用航空的路径规划、地形回避及飞航环境警觉系统，是将一组高度超过最小飞行高度的地形节点被定位与聚集。本发明所发展的诸如碰撞检查、山区边界及区域增长技术等演算法是以此种地形模型上的基本运算。另以能见度图法做动态路径选择，配合用来减少对即时计算的需求。此方法藉建立地形的部分能见度图并排除不影响飞行路径选择的地形细节以减小搜索空间，与导航空间的大小无关。利用八分树地形模型的多重与可变解析度的特性，使一系列以地形资料做为参考的 CFIT 警告功能可以有效地应用现有的机载地形资料来源。



(a) 航行空间的危险节点

(b) 图 1 直接路径的元素  
图 2 碰撞节点

1、一种为通用航空执行即时飞行路径选择及路径规划的方法，其特征在于包括以下的步骤：

- 5       使用数字化地形高度资料(DTED)产生地形模型，该地形模型包含一组节点，每一个该节点包含 4 个参数 I、J、K、S，将 DTED 档案的每一个高度峰点 I、J、K 对映到对应的八分树的 3-D 位置码得到 4 个参数 I、J、K、S，参数 I、J 定义平面位置的 2-D 坐标，加上高度 K，I、J、K 定义空间位置的 3-D 坐标，引入高度的划分因子，它将地形高度分成许多带，参数 K 代表划分的高度，该八分树中，出现于对应的四分树的相同四分象限中具有等划分高度值的节点被合并，划分因子可以是非线性，或从一基线开始以取代平均海平面高度，参数 S 是节点的涵盖范围，且增加它以用来表示节点的大小，该 4 个参数 I、J、K、S 以它们的位元位置交错编码构成一个代表节点的整数；  
使用此地形模型提供导航空间；
- 15       存取与撷取地形模型以产生地形高层图；  
在导航空间上赋予起始点与目的点，以在地形高层图上决定直接飞行路径的地面轨迹；  
根据地面轨迹及飞行高度识别危险区带；  
使用该危险区带定出一组供回避的航点；
- 20       构建导航空间的能见度图，它是一组无碰撞的路径段；  
藉飞行路径搜寻算法连接起始点与目的点；以及  
从地形模型得到飞行路径的地形剖面。
- 2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：该地形模型是八分树地形。
- 3、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：该地形模型是四分树及八分树结构的衍生型。
- 25       4、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：每一个节点以一个整数表示。
- 5、根据权利要求 4 所述的方法，其特征在于：每一个地形高度资料具有它唯一对应的节点。
- 6、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：定义的该导航空间是用来
- 30       配置可能的飞行路径的区域；  
该导航空间结合八分树与四分树，以提供在地形高度资料上的 3-D 与 2-D

操作；以及

将 3-D 位置码中的 K 位元删除可得到 2-D 位置码。

7、根据权利要求 5 所述的方法，其特征在于：得以该地形高层图的步骤如下：

5       使用存取演算法存取该地形模型；

存取一个节点即表示存取该节点所涵盖的区域；

使用撷取演算法撷取该地形模型的节点参数，其中 I,J,K 参数赋予节点的平面位置与高度，来自对照表的不同色码被指定到每一个高度带，S 表示构成该地形高层图的节点所涵盖的范围。

10       8、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：

地面轨迹是直线线段，其形式是节点的数列；

危险区带是节点的数列，得自碰撞检查中其高度与飞行高度冲突的节点；

每一个无碰撞的路径段是直线线段，其形式是节点的数列；

航点表示于 2-D 的位置码中；以及

15       能见度图是执行每一条航点对间的线段的碰撞检查以决定一组无碰撞的路径线段架构而成。

9、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：由于导航空间中该危险区带的几何区域特征，使用根据能见度图的路径搜寻演算法。

10、一种执行即时动态碰撞检查的方法，其特征在于包括以下的步骤：

20       使用数字化地形高度资料(DTED)产生地形模型，该地形模型包含一组节点，每一个该节点包含 4 个参数 I、J、K、S，将 DTED 档案的每一个高度峰点 I、J、K 对映到对应的八分树的 3-D 位置码得到 4 个参数 I、J、K、S，参数 I、J 定义平面位置的 2-D 坐标，加上高度 K，I、J、K 定义空间位置的 3-D 坐标，引入高度的划分因子，它将地形高度分成许多带，参数 K 代表划分的高度，该八分树中，出现于对应的四分树的相同四分象限中具有等划分高度值的节点被合并，划分因子可以是非线性，或从一基线开始以取代平均海平面高度，参数 S 是节点的涵盖范围，且增加它以用来表示节点的大小，该 4 个参数 I、J、K、S 以它们的位元位置交错编码构成一个代表节点的整数；

使用此地形模型提供导航空间；

30       存取与撷取地形模型以产生地形高层图；

根据飞行高度识别导航空间上之节点的数列；

赋予飞行路径线段的地面轨迹，它是在地形高层图上的节点的数列；以及

藉搜寻沿着路径线段的每一个节点对照危险区带的节点数列，以决定与危险区带相冲突的飞行路径线段。

5 11、根据权利要求 10 所述的方法，其特征在于：所执行的碰撞检查是检查出现于两种节点数列中相同的节点。

12、一种执行即时动态天气状况回避的方法，其特征在于包括：

使用数字化地形高度资料(DTED)产生地形模型，该地形模型包含一组节点，每一个该节点包含 4 个参数 I、J、K、S，将 DTED 档案的每一个高度  
10 峰点 I、J、K 对映到对应的八分树的 3-D 位置码得到 4 个参数 I、J、K、S，参数 I、J 定义平面位置的 2-D 坐标，加上高度 K，I、J、K 定义空间位置的 3-D 坐标，引入高度的划分因子，它将地形高度分成许多带，参数 K 代表划分的高度，该八分树中，出现于对应之四分树之相同四分象限中具有等划分高度值的节点被合并，划分因子可以是非线性，或从一基线开始以取代平均  
15 海平面高度，参数 S 是节点的涵盖范围，且增加它以用来表示节点的大小，该 4 个参数 I、J、K、S 以它们的位元位置交错编码构成一个代表节点的整数；

使用此地形模型提供导航空间；

存取与撷取地形模型以产生地形高层图；

在导航空间赋予起始点与目标点以决定直接飞行路径在地形高层图上的  
20 地面轨迹；

根据地面轨迹与飞行高度识别危险区带；

赋予天气状况涵盖区域，它是以节点的数列表示；

将天气涵盖区域的节点数列加到危险区带的节点数列；

使用该新的危险区带配置一组航点供回避；

25 构建新导航空间的能见度图，其中是一组无碰撞的路径线段；

以飞行路径搜寻算法连结起始点与目标点；以及

从地形模型得到飞行路径的地形剖面。

13、根据权利要求 12 所述的方法，其特征在于：

天气状况涵盖区域是一组位置码，覆盖于该地形高层图；以及

30 天气状况可以是雷雨、风切或任何出现于空中的气候状况。

14、一种执行即时动态障碍物回避的方法，其特征在于包括：

使用数字化地形高度资料(DTED)产生地形模型, 该地形模型包含一组节点, 每一个该节点包含 4 个参数 I、J、K、S, 将 DTED 档案的每一个高度峰点 I、J、K 对映到对应的八分树的 3-D 位置码得到 4 个参数 I、J、K、S, 参数 I、J 定义平面位置的 2-D 坐标, 加上高度 K, I、J、K 定义空间位置的 3-D 坐标, 引入高度的划分因子, 它将地形高度分成许多带, 参数 K 代表划分的高度, 该八分树中, 出现于对应的四分树的相同四分象限中具有等划分高度值的节点被合并, 划分因子可以是非线性, 或从一基线开始以取代平均海平面高度, 参数 S 是节点的涵盖范围, 且增加它以用来表示节点的大小, 该 4 个参数 I、J、K、S 以它们的位元位置交错编码构成一个代表节点的整数;

使用此地形模型提供导航空间;

存取与撷取地形模型以产生地形高层图;

在导航空间赋予起始点与目标点以决定直接飞行路径在地形高层图上的地面轨迹;

根据地面轨迹与飞行高度识别危险区带;

赋予障碍物涵盖的区域, 它是以节点的数列表示;

将障碍物涵盖区域节点数列加到危险区带节点数列;

使用该新的危险区带配置一组供回避的航点;

构建新导航空间的能见度图, 其中是一组无碰撞的路径线段;

以飞行路径搜寻算法连结起始点与目标点; 以及

从地形模型得到飞行路径的地形剖面。

15、根据权利要求 14 所述的方法, 其特征在于: 障碍物涵盖区域是一组位置码, 覆盖于该地形高层图; 以及

障碍物可以是地形、山峰以及任何人造障碍物。

16、一种执行即时地形遮蔽供地形警觉的方法, 其特征在于包括:

使用数字化地形高度资料(DTED)产生地形模型, 该地形模型包含一组节点, 每一个该节点包含 4 个参数 I、J、K、S, 将 DTED 档案的每一个高度峰点 I、J、K 对映到对应的八分树的 3-D 位置码得到 4 个参数 I、J、K、S, 参数 I、J 定义平面位置的 2-D 坐标, 加上高度 K, I、J、K 定义空间位置的 3-D 坐标, 引入高度的划分因子, 它将地形高度分成许多带, 参数 K 代表划分的高度, 该八分树中, 出现于对应的四分树的相同四分象限中具有等划分高度值的节点被合并, 划分因子可以是非线性, 或从一基线开始以取代平均

海平面高度，参数 S 是节点的涵盖范围，且增加它以用来表示节点的大小，该 4 个参数 I、J、K、S 以它们的位元位置交错编码构成一个代表节点的整数；使用此地形模型提供导航空间；

存取与撷取地形模型以产生地形高层图；

- 5 根据飞行路径的地面轨迹及飞行高度识别危险区带、山峰、及障碍物涵盖区域；

计算视线的地形遮蔽；以及

根据危险区域之参数 I, J, K, S 为地形遮蔽及警觉指定色码。

- 10 17、根据权利要求 16 所述的方法，其特征在于：每一个节点都是以整数代表。

18、根据权利要求 16 所述的方法，其特征在于：该计算视线地形遮蔽是使用相同的位置码表示法计算关于所选择的飞行高度及飞行方向的视线地形遮蔽；

- 15 危险区带、山峰及障碍物是以地形模型的节点的子集表示，且是从碰撞检查及寻找等量节点的区域得到；以及

I, J, K 参数赋予节点的平面位置及高度，来自对照表的不同色码被指定到每一个高度带；S 代表构成该遮蔽区域的该节点的涵盖范围。

19、根据权利要求 17 所述的方法，其特征在于：每一个地形高度资料具有它唯一对应的节点。

- 20 20、一种产生地形模型的透视影像的方法，其特征在于包括：

使用数字化地形高度资料(DTED)产生地形模型，该地形模型包含一组节点，每一个该节点包含 4 个参数 I、J、K、S，将 DTED 档案的每一个高度峰点 I、J、K 对映到对应的八分树的 3-D 位置码得到 4 个参数 I、J、K、S，参数 I、J 定义平面位置的 2-D 坐标，加上高度 K，I、J、K 定义空间位置的 3-D 坐标，引入高度的划分因子，它将地形高度分成许多带，参数 K 代表划分的高度，该八分树中，出现于对应的四分树的相同四分象限中具有等划分高度值的节点被合并，划分因子可以是非线性，或从一基线开始以取代平均海平面高度，参数 S 是节点的涵盖范围，且增加它以用来表示节点的大小，该 4 个参数 I、J、K、S 以它们的位元位置交错编码构成一个代表节点的整数；

- 30 使用此地形模型提供导航空间；以及

从地形模型存取与撷取参数 I, J, K, S 以产生透视影像。

21、根据权利要求 20 所述的方法，其特征在于每一个节点是以一个整数表示。

22、根据权利要求 21 所述的方法，其特征在于每一个地形高度资料具有它唯一对应的节点。

- 5      23、根据权利要求 20 所述的方法，其特征在于：该存取与撷取参数 I,J,K,S 包括：直接使用地形模型做为输入资料，不需要存取原始的 DTED 档案，其中 I,J,K 参数赋予平面位置及节点的高度，来自对照表的不同色码被指定到每一个高度带，S 代表构成该地形的透视影像的节点所涵盖的范围。

## 用于通用航空的路径规划、地形回避及飞航环境警觉系统

- 5 本发明广义而言与降低在控制下飞入地障的意外灾害有关，明确地说，与在控制下飞入地障之意外的地形警觉以及警告系统的地形资料处理及演算法有关。

在控制下飞入地障（Controlled Flight into Terrain, CFIT）警告所使用的资料是由飞行管理电脑、全球定位系统（GPS）接收机及其它的机载装备  
10 所提供。已知技术的 CFIT 警告是根据飞机所接收的最近位置及速度资料的曲线-配合外推预测三维的飞行路径。接着将此预测的飞行路径与邻近区域的内部地形高层图比较，并计算飞机与地形发生碰撞的潜在威胁的评估。上述类型的系统约可向前察看 120 秒。这就是所谓的“无障碍时间”相对于“还有多少时间碰撞”的警告，也就是“地形回避”相对于“地形警觉”。

- 15 美国的航空公司致力于降低 CFIT 意外灾害可回溯到 1947 年。已知技术的标准地面接近警告系统（GPWS）使用无线电高度计资料，如果飞机的地形净空不足，即会提供音响警告。如果飞入陡峭的地形，即会发生警告延迟的情形，因为标准的 GPWS 是靠俯视的无线电高度计侦测上升的地形。

- 20 Allied Signal 公司提供“加强”型的 GPWS—EGPWS，以及 Sextant Avionique 公司提供的“地面碰撞回避系统”（GCAS）可在座舱显示器上绘出飞行路径四周的地形，并提供早期预警。这两种系统都是环绕着三维地形资料建立，并根据飞机的爬升性能实施真正的前视预测能力。其技术分成三部分；GPS 及其它高精度导航系统的出现，提供精确的定位并以很短的时间更新；使用较高速及较大存储器的计算技术；以及精确、复杂的  
25 全球地形资料库，包括全球数字化地形高度资料库（DTED）。图 1 显示 DASSAULT ELECTRONIQUE GCAS 的 GPWX 系统概略图。

- 在 EGPWS 及 GCAS 中，地形资料库是系统的核心。前视演算法以此资料库与飞机的未来投影位置做比较，并根据此发出警告。使用 DTED 可使  
30 系统显示飞机附近的地形。飞行期间，会显示 DTED 中飞机下方的山峰及地形，以提供飞行员对飞航环境的警觉。很多前视警告，诸如与地形冲突

的飞行剖面或飞行路径都可以事先预警。在山区中紧急下降时，或是更改飞行路径以回避恶劣天候时，前视警告更有助于防止任何情况导致 CFIT。

不过，地形资料库占据了极大量的存储空间。如果在 10000 公里乘 10000 公里的区域内以每百公尺的间距绘制地形高层图，就需要  $10^{10}$  个网格点。

- 5 很明显，由于要连续存取  $10^{10}$  个网格点的计算非常庞大，因此需要减少或压缩这些资讯。此外，利用地形还可以做很多导航功能，诸如可以做最佳的飞行规划，或根据即时的飞航环境紧急变更路径，当演算法的复杂度增加时，这些都受制于资料撷取的数量及计算的成本。不再经由进一步处理或借助其它格式的地形实料，诸如特征或向量表示法，DTED 并无法给予
- 10 资料元素间的几何关系。

本发明的目的即是针对现有技术的不足而提供用于通用航空的路径规划、地形回避及飞航环境警觉系统。

- 在很多应用方面，特别是飞行管理，必须存取整个 DTED 资料库以决定或更改飞行的航点。在此所描述与地形警觉警告，以及与导航安全有关
- 15 的问题，是在编码的地形导航空间执行。数字化地形高度资料 (DTED) 的网格点档案的编码，是根据表示空间资料结构的衍生式四分树 (quad-tree) 表示法。DTED 档案中的每一个元素，都被编码成关于它在网格点档案中的位置的 Morton 编号序列，划分的高度资料 (scaled elevation data) 及涵盖等量 (等高度) 范围是其特点。在此种资料结构下，DTED 可以架构成
- 20 一组上升序列的整数。每一个整数代表一个节点，节点中的平面位置、划分的高度以及涵盖的范围交错编码成一组位元位置以构成一个整数。编码的数列被定义成地形的八分树 (Oct-tree) 模型。导航功能不仅为了高度资料而参考地形八分树，同时也在其上执行处理及运算，至此导航空间从 DTED 阵列转换到它的编码整数数列。

- 25 在以地形八分树为基础的导航空间上可以执行数种导航功能。以下展现一种以飞行高度定义动态危险区带的较佳实施例。在较佳实施例中，定出最小飞行高度上方的的一组地形高度节点的位置并聚集这些位置。本发明所发展的诸如碰撞检查、山区边界以及区域增长技术的演算法是在这些地形模型上的基本运算。在另一种较佳实施例中，采用能见度图法 (visibility
- 30 graph approach) 做动态路径选择，以降低对即时计算的需要。此方法藉建立地形的部分能见度图以缩小搜寻空间，并排除不影响选择飞行路径的地

形细节，且地形的大小与导航空间的大小无关。

一旦可以很容易地决定飞机飞行路径及地形区域的地势，数种用于飞机导航的 CFIT 警告功能也变得很容易执行。此外，它意含为了执行几何计算而存取具有地形高度资料的资料库。经由利用八分树地形模型的多重及可  
5 变解析度的特性，使用地形资料做为参考的一系列 CFIT 警告功能可以很容易地实施。其功能包括地面迫近警告、障碍物提示、地形遮障、地形透视影像、被动测距、即时路径选择及路径规划、气象显示覆叠、以及航点覆叠。

已知技术的路径规划方法是使用预先定义的障碍物模型。此外，撷取  
10 DTED 的资料的数量及计算的 cost 都是负面的因素。在本发明中，在执行飞行计划期间，危险区带动态地改变。此外，使用一层八分树地形，使得线上运算能力更为如裕。

从以下的详细描述并配合附图，将可明了本发明的目的及优点。

图 1 显示已知技术的 GPWS 的系统概略图。

15 图 2 显示位置码及 2-D、3-D 投影的位元交错编码。

图 3 显示有危险节点的导航空间的例子。

图 4 显示相关的飞行方向中可能的危险区带。

图 5 显示在危险区带扩展区间（危险区带参考图 3），使用危险节点数列的二分法搜寻决定边界节点。

20 图 6 显示在结合边界类型及航点位置。

图 7 显示危险区带扩张及导出航点。

图 8 显示相对于不同起始点与目的点的危险区带。

图 9 显示能见度图及它的树状结构。

图 10 显示即时飞行路径规划的实施例范例。

25 图 11 显示障碍回避的实施例的范例。

图 12 显示产生地形透视影像的实施例的范例。

### 较佳实施例详细说明

#### 1、地形模型

在影像处理的领域，藉将阵列递回地次分成许多四分象限，四分树可以  
30 代表二维区域（ $2^n \times 2^n$  二进位阵列的格式）。如果该四分象限是由 1s 或 0s 混合而成，它可以进一步次分成许多四分象限，此过程一直重复到一个四

分象限只由 1s 或 0s 构成（被称为叶端节点）为止。事实上，1s（或 0s）的大区域是由单一的四分象限或树状结构的节点表示。同样地，三维的物件可以八分树代表， $2^n \times 2^n \times 2^n$  阵列可次分成八分象限（octant）。如果八分象限中的元素都相同，该八分树结束；否则再进一步产生 8 个下一层的八分象限，以更详细表现八分象限。

在本发明的较佳实施例中，采用另一种形式的八分树结构。加入第四个参数 S，以代表叶端节点的大小。藉由它的三维座标及大小的资讯，地表的地区域可以用一个 3-D 的位置码表示。将地表的一个峰点 (I, J, K) 对映到一个节点的位置码的方法，是由三元素的 (I, J, K) 与 S 位元交错编码成 16 进位值所构成。因此，在每个位置上，S 位元在 K 位元之前，K 位元在 J 位元之前、以及 J 位元在 I 位元之前。在 (I, J, K) 与 S 交错编码之后，位置码是一组数字 (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, C) 其中之一。位置码中数字“8”或“C”出现的次数代表经过合并的节点的大小资讯。

在图 2 的例中，节点的第  $4^{n-1}$  个位元的组合（即每一个数字的第 1 个位元的组合）等于 I 值的二进位表示法。分别为第  $(4^{n-1}+1)$  个位元重复此种组合成为 J，第  $(4^{n-1}+2)$  个位元成为 K，以及第  $(4^{n-1}+3)$  个位元构成大小的值 S，其中  $n(n=1, 2, \dots)$  是解析度参数。虽然节点的 4 个分量（即 I, J, K, S）间完全独立，但它们是以一个单值代表。编码及解码处理，都可在此位元交错的设计下使用逐位元运算执行。

地形八分树中所使用的定址设计是 Morton 编号序列，它也是利用前述的位元交错编码构成。对 3-D 位置码的 I, J 位元执行 modulo-4 运算可以得到 2-D 的位置码，其中将 K 位元指定成 0，以及 S 位元保留不改变。在图 2 中，节点  $\langle 00001473 \rangle_{16}$  在 IJ 平面上的投影是  $\langle 00001033 \rangle_{16}$ ；对经过合并的节点  $\langle 0000148C \rangle_{16}$  而言，投影码是  $\langle 00001088 \rangle_{16}$ 。

## 25 2、导航空间的模型化

一般而言，目前的路径规划法是由两个阶段构成。在第一阶段，产生由所有可能路径构成的搜寻空间，它们都避开起始点与目的点间的障碍。一旦产生出搜寻空间，第二阶段是寻找一条满足特定限制条件的路径。典型上，这些方法是基于导航空间（障碍、地形及威胁）是静态的，且是事先完全知晓的假设。

很多已知技术的飞行路径规划演算法是利用对导航空间中路径的“成

本”的知识，藉着使定义路径“成本”的某些客观函数最小化得到最佳路径。这些演算法是“最短路径问题”的衍生。共同的策略是预处理搜寻空间以降低即时计算的成木。预处理的方法可分为两类，一是根据地形高度组织搜寻空间图，另一种是将预先计算的成木值嵌入搜寻空间的图中。另

5 本发明所描述的飞行路径规划演算法是根据对飞行高度、飞行距离及到目的地的时间的限制。虽然飞机已了然任务期间的导航空间，但障碍物会随着操作的限制条件改变，因此要在任务期间即时发觉。

本发明中所描述的飞行路径规划演算法是在代表导航空间的地形八分象限结构上执行，且不使用任何其它的资料格式来表示地形特征（线性或多

10 边形特征）。由于障碍的形状是随着高度动态地改变，因此以静态的多边形表示障碍并不适合即时的动态飞行路径规划。地形八分树被组织成线性数列，其中每一个元素代表树状结构的一个叶端节点。每一个节点以一个单整数表示，且表示网格点档案的等量元素组。使用八分树简化了从地形资料库中撷取障碍物的操作。

15 八分树地形模型包括 2-维（2-D）及 3-维（3-D）的资讯。不过树状编码的方法允许 2-D 的四分树空间与 3-D 八分树空间中对应的节点间一对一直接投影。此允许在四分树空间中计算 3-D 的飞行路径，大幅简化了计算工作。使用 2-D 表示法也简化了诸如邻接点的位置、决定两点间的路径段以及几何座标与节点位址间转换等工作。

### 20 3. 核心路径规划演算法

#### 3.1 障碍物的撷取

##### 3.1.1 发觉障碍物

在地形八分树中，划分高度值在飞行高度以上的节点是所谓的“危险节点”，此意味飞机进入被这些节点占据的地形区域就不安全。危险节点数列是四分树的子集，表示导航空间的节点。不过，危险节点数列并不提供

25 导航空间中任何明确的地势资讯（例如连接性或边界条件）。在图 3 中，显示危险区域中包含 26 个节点，组织成一个排序序列，但节点 1 或节点 26 是否属于相同的连接区域并不确定。此外，纵使危险节点被“散布”到整个导航空间，也只有少数几个危险节点会使指定的飞行路径濒于险境。例如，在图 4 中，有 5 个连接的危险区域，但对于要到目的 1 的路径而言，

30 可能的障碍物只限于区域 A 到 C。

与目前方向有关的危险节点称为障碍节点，并被组织成一组位置码，它代表飞机导航空间中危险区带所涵盖的范围。组织障碍物的步骤如下：

（1）根据高度临限值从地形八分树中撷取危险节点数列。以适当的垂直划分因数  $K$  将地形组织成区带或层面，例如 20 公尺的区带。检视八分树的每一个节点，看是否有  $K$  值（嵌在位置码中）超过临限值。 $K$  值小于临限值者略之不计。所得到的数列包括导航空间中所有具有潜在危险的节点。

（2）使用“产生与测试”策略，藉对位于指定的起始点（S）与目的点（G）间直接路径的碰撞检查（或是侦测交叉点）得到障碍物节点数列。直接路径是点 S 与 G 间的直线，决定在点 S 与 G 间的直线上的八分树节点。沿着线上的每一个点，从 S 点开始，对照危险叶端节点数列检查。如果线上的点与任何危险节点匹配，则搜寻空间叶端节点被存入数列中，供后续扩展危险区带。有时，沿着直接路径上的点，有超过一个以上的分量与相同的障碍物节点相交。

（3）增长连接的危险区带，以定出区域的顶点做为航点。危险区带扩展处理包括寻找毗邻于要被扩展的叶端节点的障碍物叶端节点。此扩展处理的主要目的是为得到一组在导航空间中对应于危险区带的航点；接着使用这些航点做为可能的飞行路径，偏离以避免与地形碰撞。

### 3.1.2 危险区带的扩展

计算它邻接的 4 个主要方向的位置码以扩展障碍物叶端节点。此项运算是递归地执行，一直到达边界节点，边界节点是在危险叶端节点数列中没有任何邻接节点的节点。邻接节点的大小与目前“正在扩展中”的节点的大小可能不同，其中  $2^d$  乘  $2^d$  的节点的大小是  $2^d$ ，且节点的层次定义为  $d$ 。为等大小的邻接节点搜寻危险节点数列。如果在数列中没有发现等大小的邻接节点，则重复此动作搜寻较大的邻接节点，且重复进行直到发现邻接节点，或是树状结构到达邻接根部的层次。

如果经过此项处理后仍未发现邻接节点，即显示也许存在一些大小较小的邻接节点，或该节点是边界节点。如果该节点未出现于节点数列中，它可能包含于上层已合并的节点中。具有二分搜寻程序的最后比较回圈中使用的投影码的节点涵盖被查询的节点，或是被查询的节点涵盖。可藉发现此项特征，以决定是否有任何大小相同的邻接节点的四分象限存在。如果测试中的节点的邻接节点涵盖用于最后比较回圈的位置码，就需要进行进

一步搜寻，否则目前的扩展节点是边界。例如，图 3 中的节点 21 的扩展处理，在“南方”遇到边界，在北及东方连接障碍物节点，以及在“西方”需要进一步处理到下一层，如图 5 所示。

使用分别对应于北方侧、东方侧、西方侧、南方侧的添加码 1、2、4 及 8 对障碍物的边界类型编码。零显示该节点没有任何一侧是在边界上。如图 6 显示危险区带及可能的航点的位置。例如，具有边界码 13 的节点是顶点节点。它在 NW 及 SW 对角方向有两个航点。航点是由其在对角方向的邻接节点的西北角的位置码表示。且在将它附加到航点数列前，还需要检查该航点是否位于危险区带数列以及已为航点数列中的一员。

还有两种方法可以用来缩小扩展节点的大小，或是使用较粗解析度层的节点近似。当需要较详细资讯时实施第一种方法。其方法是次分目前的扩展节点，并分别扩展每一个下一层的四分象限。在此情况，将目前的扩展节点当成边界节点处理，且它的边界类型被更新。此项处理被递归地执行，直到发现邻接节点，或一直处理到边界节点。第二种方法是利用地形八分树的层系特性。为减少顶点的数量（且因此缩小能见度图的大小），而非目前扩展的节点的大小，将等大小的邻接节点的位置码指定为边界节点，并结束扩展处理。亦即，近似处理是“截除”比目前的扩展解析度水准低的节点。目前已扩展的节点的边界码按上述方法更新。

### 3.1.3 航点定位

每逢邻接节点被定位，它显示在目前的方向需要进一步扩展，否则该节点已遇到一个边界节点。在所有 4 个主要方向都检视过后，即得到障碍物节点的边界类型。从该边界类型，可以直接决定该节点是否是障碍物节点。扩展处理从邻接节点递归地进行，并使用障碍物节点数列参考已扩展的节点，以避免重复检视相同的障碍节点。图 7 显示危险区带的扩展。在扩展处理期间，得到边界节点的边界类型以决定是否是危险区带的顶点。如果它是顶点节点，接着在“对角方向”毗邻危险区带产生一个航点，如图 7b 所示。

在对 SEED 数列的所有成员施加扩展处理之后，就得到沿着起始点与目的点间直接飞行路径上的危险区带，它与飞行路径的整体方向有关。图 8a-d 显示具有危险节点的飞航区，以及沿着起始点与目的点节点间的不同直接路径上的障碍物对应区域。危险区带的确实地势资讯是撷取自特定的

地形八分树，并被转换成一组航点。接着使用这些航点构建出导航空间中的能见度图，以决定最佳路径。

### 3.2 导航空间的转换

能见度图是根据获取阶段期间所得到的一组航点所构建。这组航点暗  
5 含了导航空间中危险区带的几何资讯。演算法是考虑所有的点对 ( $W_{from}$ ,  $W_{to}$ ) 所构成，其中  $W_{from}$  及  $W_{to}$  是危险区带的起点、终点、或中间航点。要决定  $W_{from}$  及  $W_{to}$  是否是有效飞行路径段的端点，检查  $W_{from}$  及  $W_{to}$  的直线相对于危险区带的“碰撞”。若且唯若连接两点间的线段没有发生交错， $W_{from}$  及  $W_{to}$  间的节点被能见度图内的链结连接。

10 碰撞检查的原则与用于检查起始点目的点间的直接路径的碰撞相同。只要侦测到碰撞，航点对的测试即告终止，否则测试将持续进行到达  $W_{to}$ 。在测试过所有可能的航点对组合后，所得到的结果是能见度图，其航点是图的节点，航点所构成的路径段是圆的弧。在图 9 中存在数条路径，它们是由通过航点序列连接起始点与目的的点的许多直线所构成。

15 所使用的能见度图法与绝大多数路径规划问题中所用的方法相同，其中障碍物空间的能见度图是由多边形障碍物数列所构建。不过，以下的考虑是针对根据地形八分树的飞行路径规划演算法：

聚集沿着起始点与目的点间的理想直接路径的障碍节点，以及那些限于直接路径（或目前方向）附近的可能障碍物得到危险区带。此方法意含  
20 将导航空间中不相关的危险节点删除，并因此使航点的数量最小化。由于航点仅代表危险区域的障碍物的子集，此项处理提供了整个导航空间的部分能见度图。图 8a-d 显示部分结构与它的能见度图的范例。

在碰撞检查期间共要检查  $W(W-1)/2$  个航点对，其中  $W$  是包括起始点  $S$  与目的点  $G$  的航点的数量。构建能见度图的时间复杂度正比于  $W(W-2)/2$ 。  
25 对任何导航空间而言，可以很容易看到航点  $W$  的数量小于顶点  $n$  的数量。此外，包含  $W$  个航点的能见度图的大小小于  $n$  个顶点的能见度图的大小。很明显，藉缩小能见度图的大小可以大幅增进搜寻的速率。

### 3.3 飞行路径搜寻

在前节中已描述，能见度图是以飞行路径段的数列的形式来表示，路  
30 径规划问题已转换成搜寻开始节点与目的节点间的能见度图的问题。例如，图 9 显示代表导航空间的路径段的能见度图，在图中有 7 个节点，包括开

始与目的点。它被重建成树状结构用以说明其结构，在其中目的节点 G 与其它节点在树中出现超过一次。

有数种技术可以用来搜寻图中的路径，包括诸如深度优先、宽度优先及启发式搜寻。较佳实施例中描述启发式搜寻法，所加诸的限制条件使并入路径规划演算法中的连接数量最少。搜寻期间，路径段经过选择，亦即尽量远离目前的位置，期望尽量靠近目标点，以最短的方法与搜寻最少连接的方法期望撷取资料，评估增加航点的影响，藉以决定那一组航点可在常式中被扩展。

寻找真正的最佳路径需要毫无遗漏的搜寻。不过，最佳路径也许不是即时空用需求所要的，因为可能会使撷取路径的性能降低。对能见度图中大量的节点而言，包罗无遗的方法的计算负荷极为惊人，可以采用更有效率的启发式搜寻法，它是根据衍生自 Dijkstra 的演算法，也是熟知的 A\*法。

#### 4.即时动态环境应用

如所预期，飞机的飞行路径需要即时修改以匹配飞行条件，且环境中的障碍物会改变，要根据目前的障碍物空间，为每一次飞行规划的改变存取地形资料库以重建能见度图，规划新的飞行路径必须在数秒内完成以便做到即时导航，此时间间隔包括飞行路径规划计算，以及架构路径搜寻空间。

典型上，在即时的导航环境中，新的飞行路径需要在请求的数秒内完成。事实上，撷取航点与搜寻能见度图所花的时间，比规划处理整个路径的时间少得多。将建议路径规划演算法应用到即时动态环境的策略，是根据观察将演算法应用到具有随机产生的起始点与目的点的特定地形所得，并量测每一阶段所花的时间。这些量测包括产生航点的时间，架构能见度图的时间，以及在地形八分树的不同解析度中发现路径的时间。接着使用这些离线计算时间的结果用来“调整”指定地形的即时动态飞行路径规划演算法。

要改变导航空间的解析度，使用金字塔结构的四分树来代表导航空间与危险节点。得到金字塔结构第 K 层方法是在第 K+1 层的  $2 \times 2$  的窗口上施加最大值函数。不过，在金字塔结构的上部各层中，可能因树状节点只取最大高程值的“合并”而使路径被遮蔽，因此，在该层中可能找不到路径。在即时的应用中，最好避免在高解析度层建立大的能见度图所致使的

瓶颈。另一方面，避免较粗解析度层也很重要，它很容易隐藏有效路径。

决定适当处理解析度层的方法，首先在预先定义的解析度层得到航点，估计能见度图的大小，接着决定是否有需要切换到其它的层做路径规划。

例如，图 10 展现在飞行任务期间连续改变目的点的即时模拟，起始点是 (255, 101)，目的点是 (96, 251)。预定的空速为 400 公尺/秒，飞行高度及作业的层设定成与使用者互动。飞行期间，赋予新的飞行路径规划新的目的点 (241, 242)；演算法根据 5-秒的限制条件预测新的起点是 (204, 148)。在相同层中发现路径，且飞行高度如图 10 所示。也可使用不同的基准线、划分因数、时间限制及飞行高度。

DTED 的源档案是中国台湾国立中央大学太空暨遥测研究中心提供的 5000 分之一比例尺的高度资料，称为数字地形模型资料 (DTM)。DTM 档案是由 40 公尺的水平网格每一个交叉点的高度值所构成，它的值是从 20.48 平方公里的 DTM 方块中包含 256K 个高度值的 SPOTLandmass 地图上的等高线作数学内插而得。原始档案可以大到  $2^{16} \times 2^{16}$  个网格点，但实施例中被限制到  $2^9 \times 2^9$  个网格点以网化编码的处理。

如前所述，路径规划演算法可以在金字塔结构中较粗解析度层执行，以符合即时的限制条件。不过，地形高度资料是连续地改变，且地形八分树表示法与地形相关，因此，与指定飞行高度相关的障碍物位置与连接性无法预测。一般来说，路径规划处理的实际作业层是由最小飞行高度决定，其必然也决定航点的数量，飞行高度低将产生大量的危险节点与障碍节点，因此，可以为某特定的作业环境采用较粗的作业层，以保持航点的数量低于预先定义的边界值。由于即时的应用端视计算系统的性能、飞机的速率而定，即时的限制条件、允许规划的时间及预先定义的处理层可以改变。

## 5. 地形回避与飞航环境警觉

### 5.1 动态障碍物及天气情况回避

本发明不仅根据四周的地形提供警告，且能给予沿着飞行路径前方的地形资讯，它是从路径规划函数得到。一旦新的路径在线上规划完成，即可以很容易地与 GPWS 及 GCAS 的警告功能耦合。其它的类型危险涵盖区域，诸如障碍物、山峰、天气状况（出现于空域中的雷雨、风切或任何气象状况）也可以一组位置码表示，覆叠于地形高程图上，并按前述方法执行。图 11 显示实施例的范例。

## 5.2 供地形警觉的地形高程图及地形遮蔽

地形高程图的产生，以及危险区带、山峰，与所选择的飞行高度及飞行方向相关的障碍物的视线地形遮蔽的计算，都可以相同的位置码表示。使用存取演算法撷取地形模型中的节点参数。I, J, K 参数指定平面位置及节点的高度，来自对照表的不同色码被指定到每一个高度带；S 表示构成该遮蔽区域的该节点涵盖的区域。节点的子集得自碰撞检查及寻找具有等量节点的区域，代表危险区带、山峰、及障碍物。

## 5.3 地形模型的透视影像

提供一种产生地形模型的透视影像的方法，包括从地形模型撷取与存取资料供产生影像。使用存取演算法撷取地形模型中节点的参数。I, J, K 参数赋予平面位置及节点的高度，来自对照表的不同色码被指定到每一个高度带；S 表示构成该地形透视影像的节点涵盖的区域。直接使用地形模型做为输入资料，不需要存取原始的 DTED 档案。图 12 显示透视影像实施例的范例。

## 6. 结论

已知技术的规划方法是使用预先定义的障碍物模型。不过，在飞行计划执行期间，每逢飞行高度改变，带障碍物区域也改变。除此之外，在已知技术的 DTED 方法中，撷取的资料量以及计算的成本都是负面的因素，常在标准 DTED 系统中演算法的复杂度增加，最佳的飞行计划或是在即时的飞航环境中紧急改变路径，都可能会受资料撷取量及计算成本的限制。

在本发明中，提供一种根据八分树地形的 GFIT 警告演算法，它以各种不同程度的解析度直接表示地形。八分树结构藉截除或近似不需要的资料，能在较粗解析度的层次以足够的精确度将地形模型化，允许有效率地执行地形参考工作。在本较佳实施例中，藉使用八分树地形模型的特征，地形警觉及警告系统相关的功能，比根据 DTED 的已知方法执行起来更有效率。此外，与已知技术的飞行前规划系统相较，较佳实施例显现即时飞行路径规划的能力。

对在飞航环境中的长程全球路径规划而言，无论是在预先规划或在即时的飞航环境中，八分树阶层式的分解结构避免路径规划阶段中超量的地形细节。藉利用八分树地形模型的启发式特性，路径规划演算法可以在八分树地形的任何一层作业。此外，路径规划法藉建立导航空间的部分能见

度图以缩减搜寻空间的大小，并不影响路径的选择及回避地形的细节。本发明所描述的八分树地形及能见度图法，已适合即时计算的要求。

5 对与 CFIG 警告相关的功能及障碍物回避而言，可以使用例如与飞行路径规划相同的设计。藉以八分树地形或附加一层八分树地形取代 DTED，可以很容易地实施预测飞行路径与地形资料库间的比较，藉以侦测可能的碰撞并给予警告，或得到新的路径供回避。此外，可以更有效率的方法执行地形警觉及显示。

10 虽然以上描述了本发明具代表性的实施例，此项描述并非限制本发明的范围，它可以各种形式的实施例实施。例如，即时飞行路路径规划演算法可以嵌在飞行管理电脑（FMC）中做为飞行管制。另一方面，当在山区或在有建筑物或人造障碍物的都会区，从即时飞行路径规划与编码的地形资料库得到的飞行路径及地形剖面，给予飞机前视能力，特别是通用航空的应用上。因此，此能力可以很容易地延伸到在控制下飞入地障、地面接近警造及障碍物回避。此外，地形警觉及显示也可耦合至座舱飞航资讯显示  
15 （CDTI）成为其特性之一。

从地形资料库的观点，以有限的成本，地形模型可以单独使用，或与 DTED 资料库的已知技术平行使用，甚至取代目前的 DTED 资料库，在军用的领域，诸如任务规划、地形回避、地形追随、地形匹配、雷达及威胁视线遮蔽、通视遮蔽等都可实施。在非航空方面的应用，诸如海床表示、声  
20 纳涵盖、GSM 基地台涵盖范围的估计等，也都可以适用。

虽然本发明是参考较佳实施例显示与描述，并以附图的方式说明，但不能视为对其的限制。熟悉此方面技术的人士，可想像出的各种的等效修改、删减及替换，以及任何特殊的实施例，都不会偏离本发明的范围。

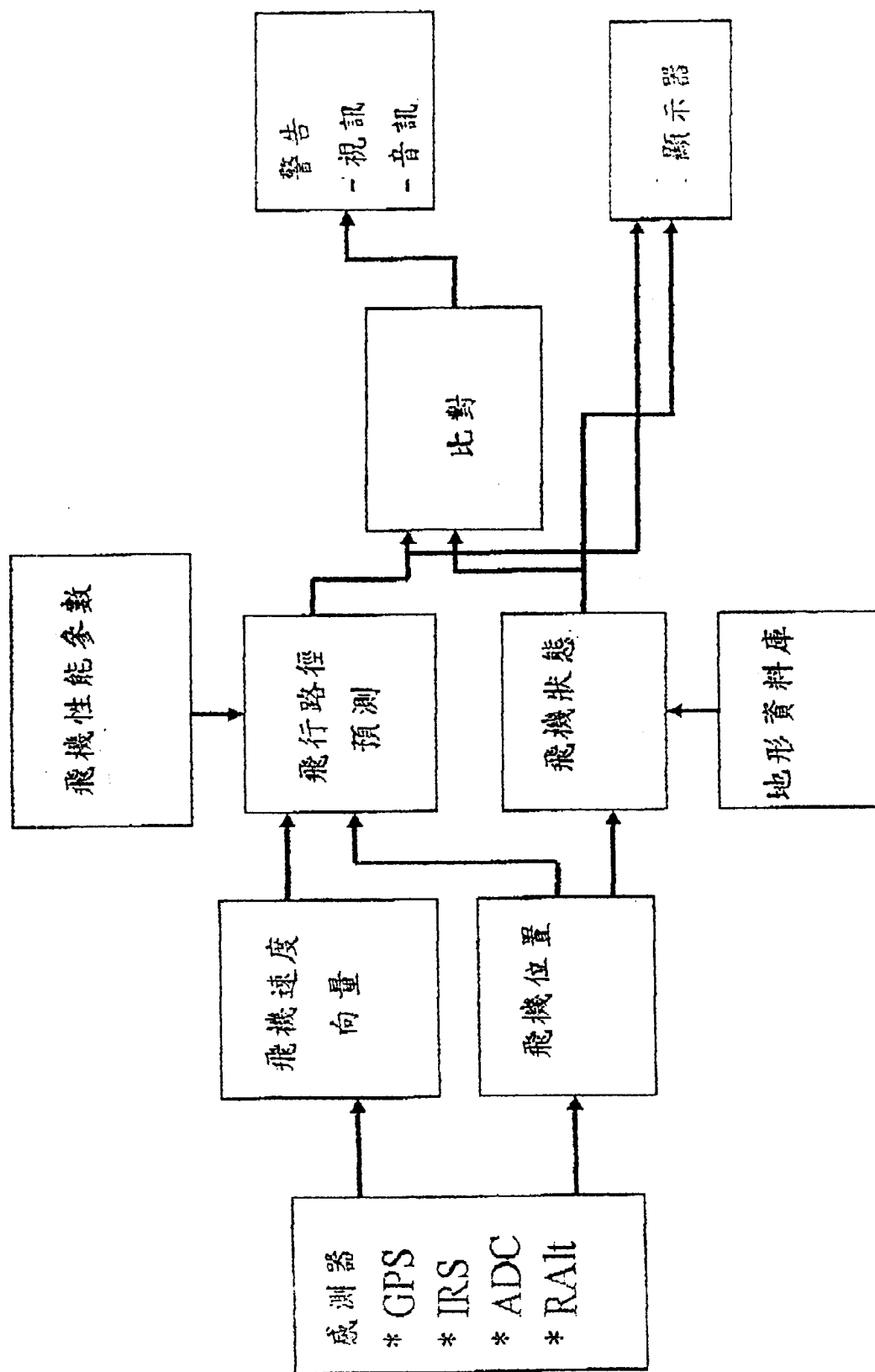
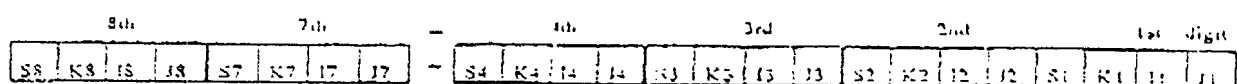
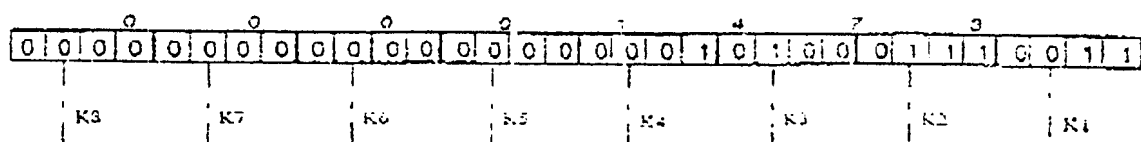


圖 1



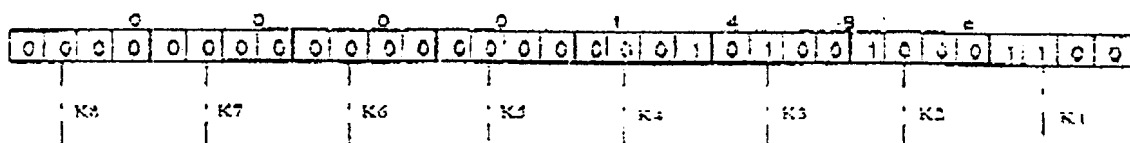
S-大小 K-高度 J,1-平面压梯



位置码 =  $\langle 00001473 \rangle_{16} = 3184_{10}$

投影码 =  $\langle 00001033 \rangle_{16}$

$K = \langle K8, K7, K6, K5, K4, K3, K2, K1 \rangle_2 = \langle 00000100 \rangle_2 = 4_{10}$

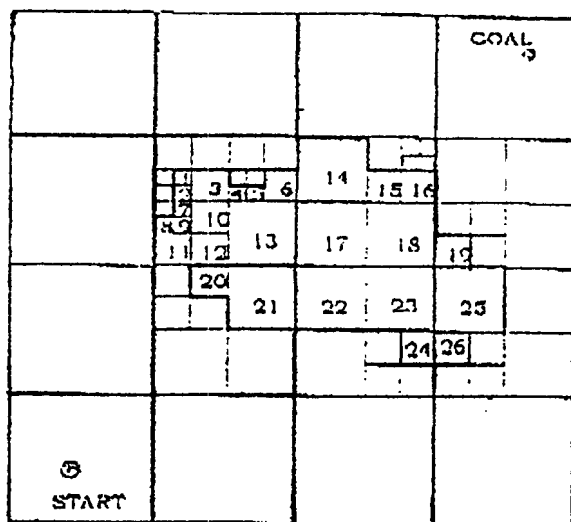


位置码 =  $\langle 0000148c \rangle_{16} = 3212_{10}$

投影码 =  $\langle 00001088 \rangle_{16}$

$K = \langle K8, K7, K6, K5, K4, K3, K2, K1 \rangle_2 = \langle 00000101 \rangle_2 = 5_{10}$

图 2



(a) 航行空间的危险节点

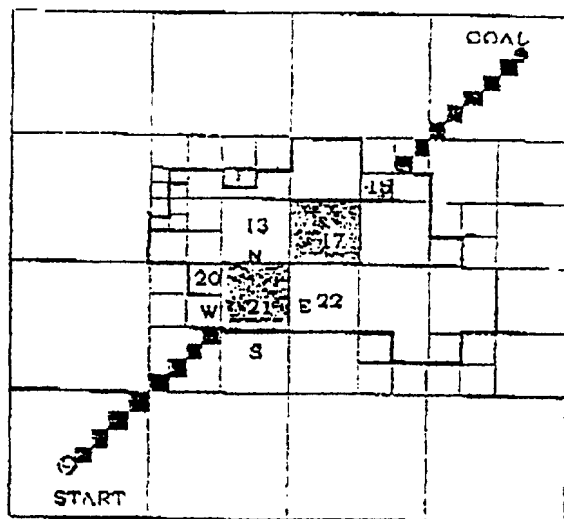
(b) 直接路径的元素  
碰撞节点

图 3

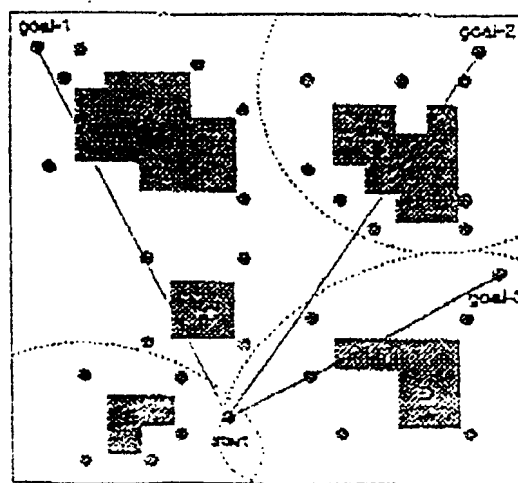
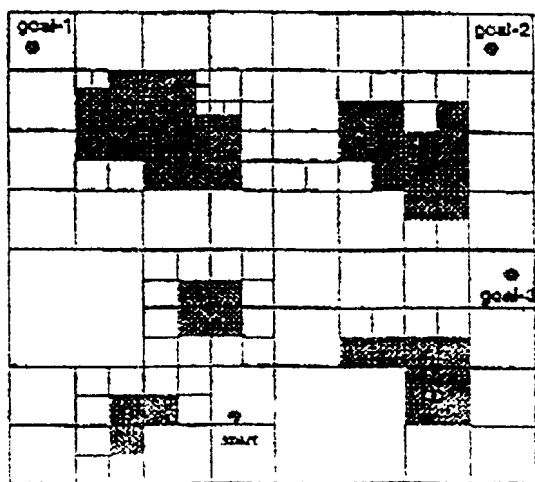
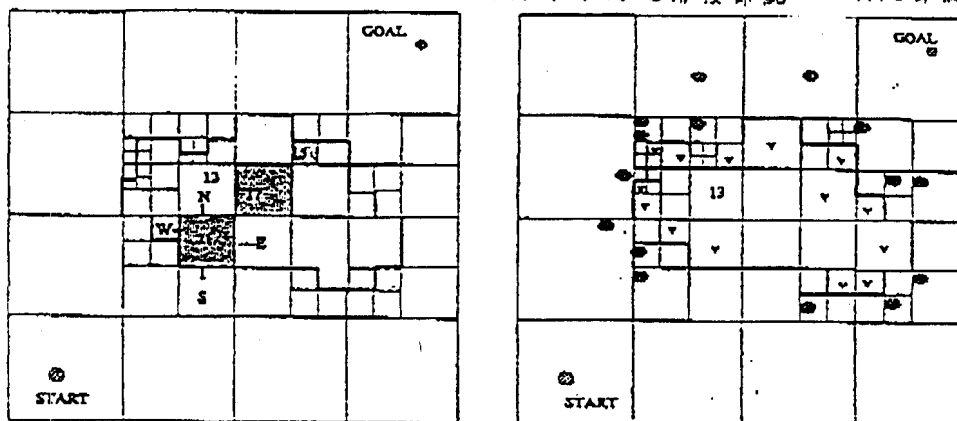


图 4

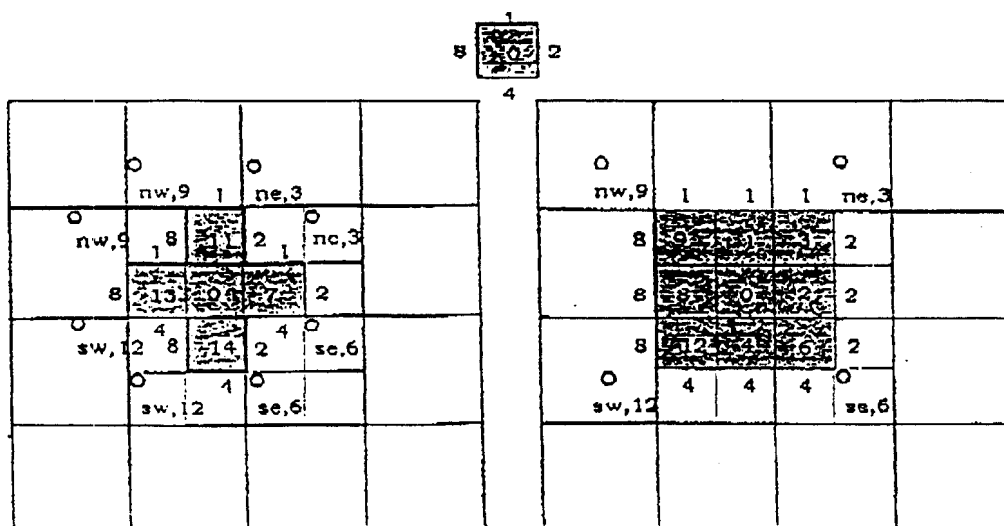
■ - 碰撞節點 (Obstacle)    ◆ - 頂點節點對角線方向之鄰接節點    ▼ - 頂點節點



(a) 遞迴地擴展至節點21之4個  
主要方向之鄰接節點

(b) 依據頂點所定出之航點

圖 5



○ 航點之位置為頂點節點對角線方向之鄰接節點  
NW, NE, SW, SE代表對角線方向的鄰接節點

圖 6

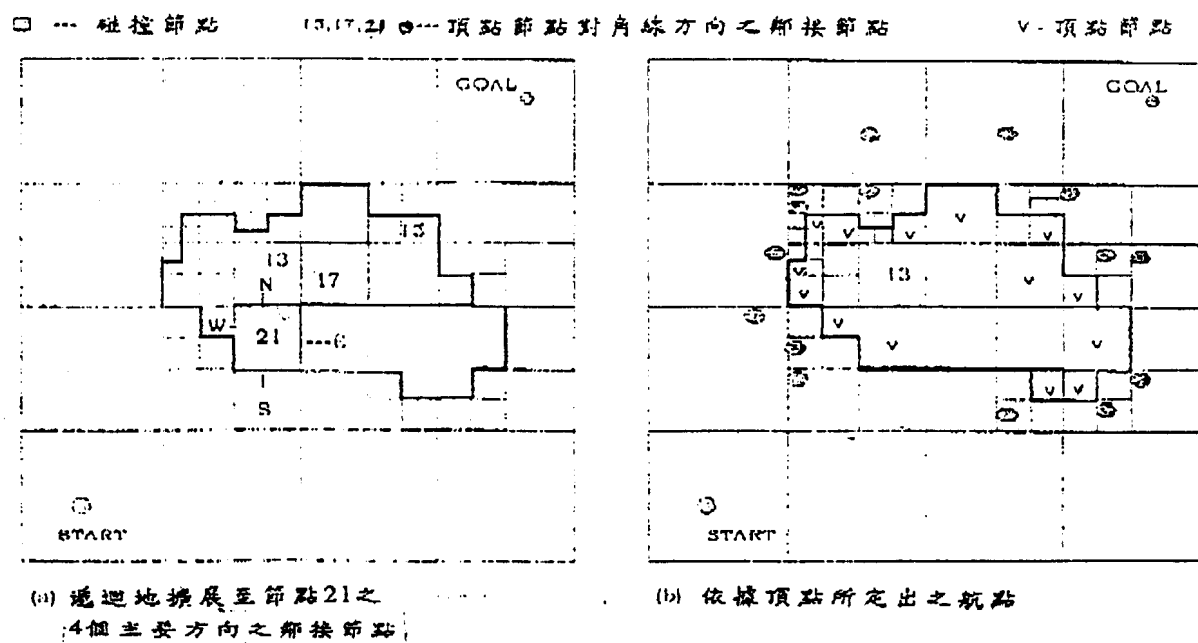
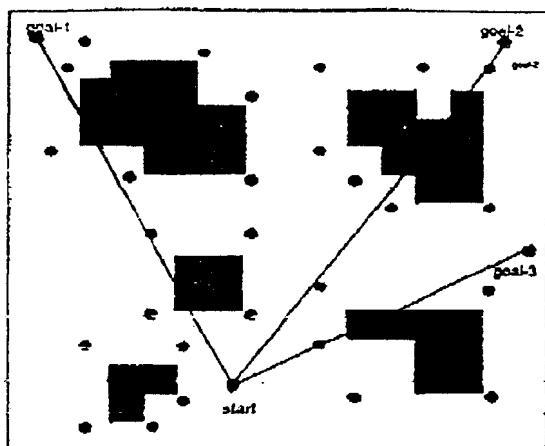
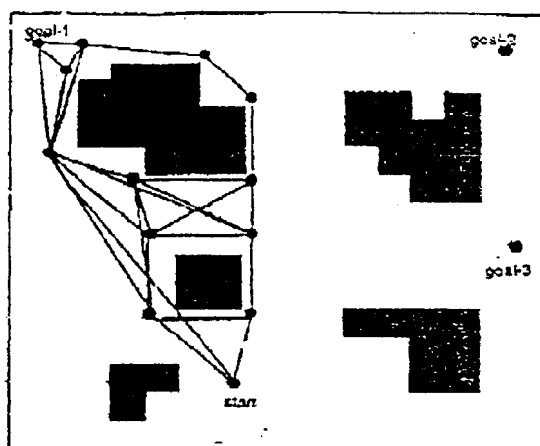


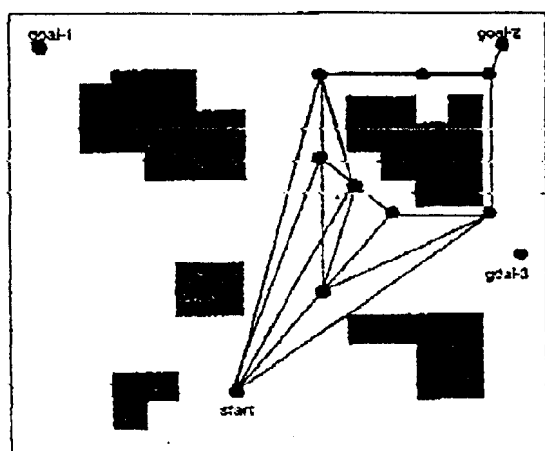
圖 7



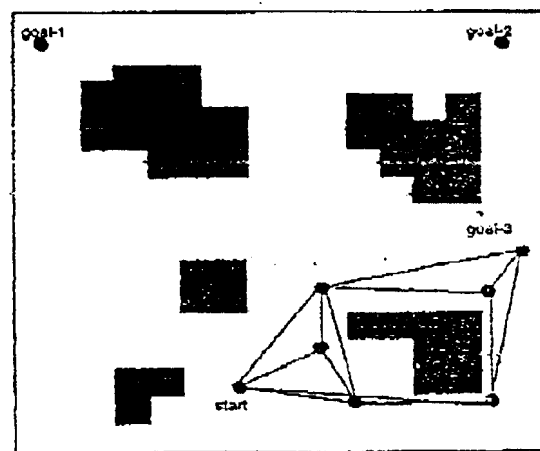
(a) 含有32个航点的航行空间



(b) 由起始点到第1目的点的路径，具有13个航点



(c) 由起始点到第2目的点的路径，具有10个航点



(d) 由起始点到第3目的点的路径，具有7个航点

图 8

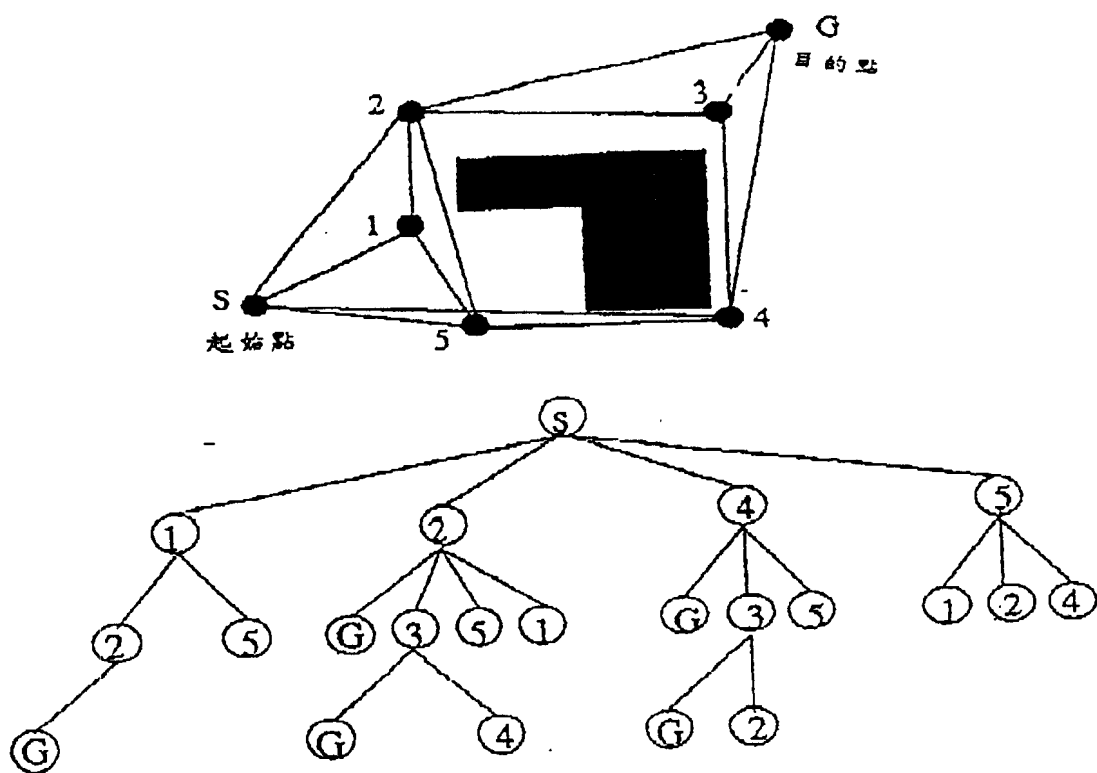


图 9

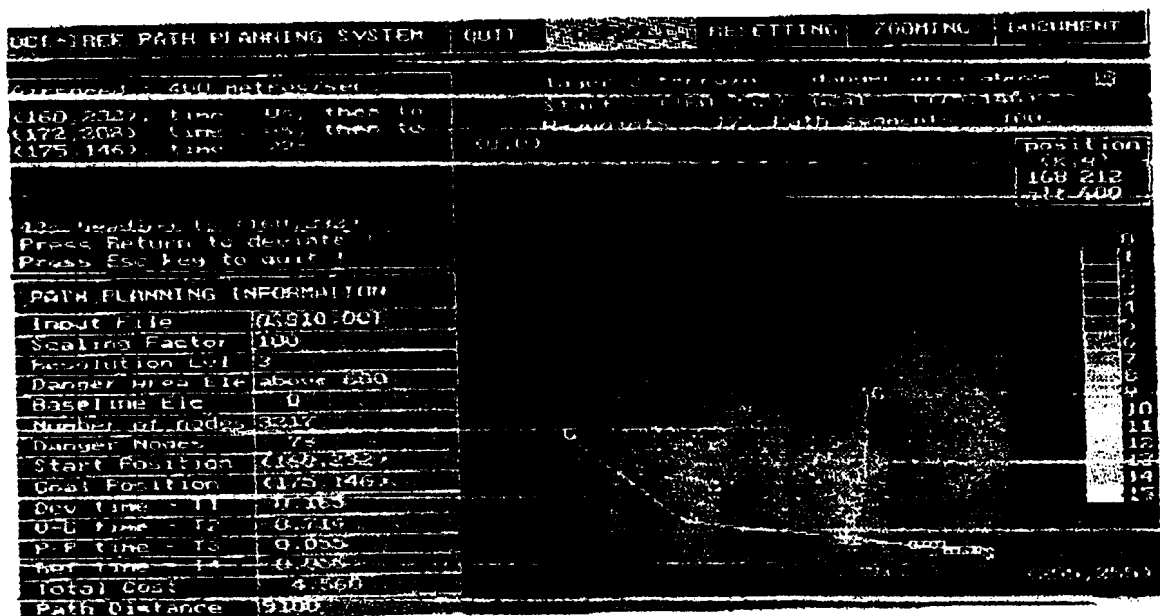
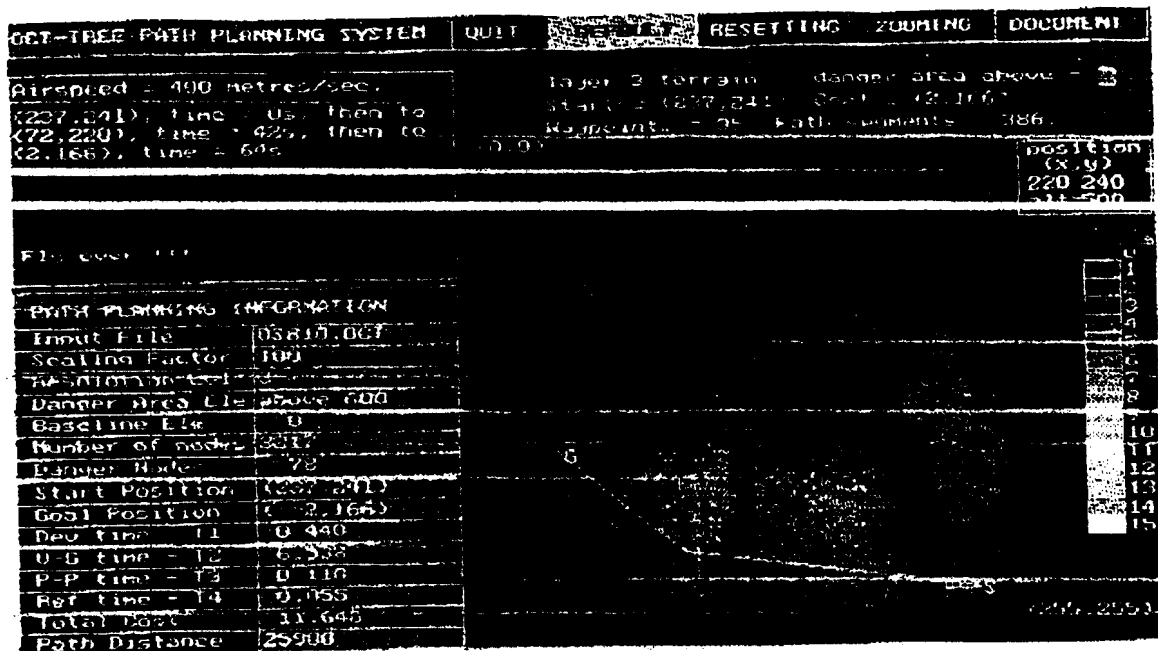


图10.

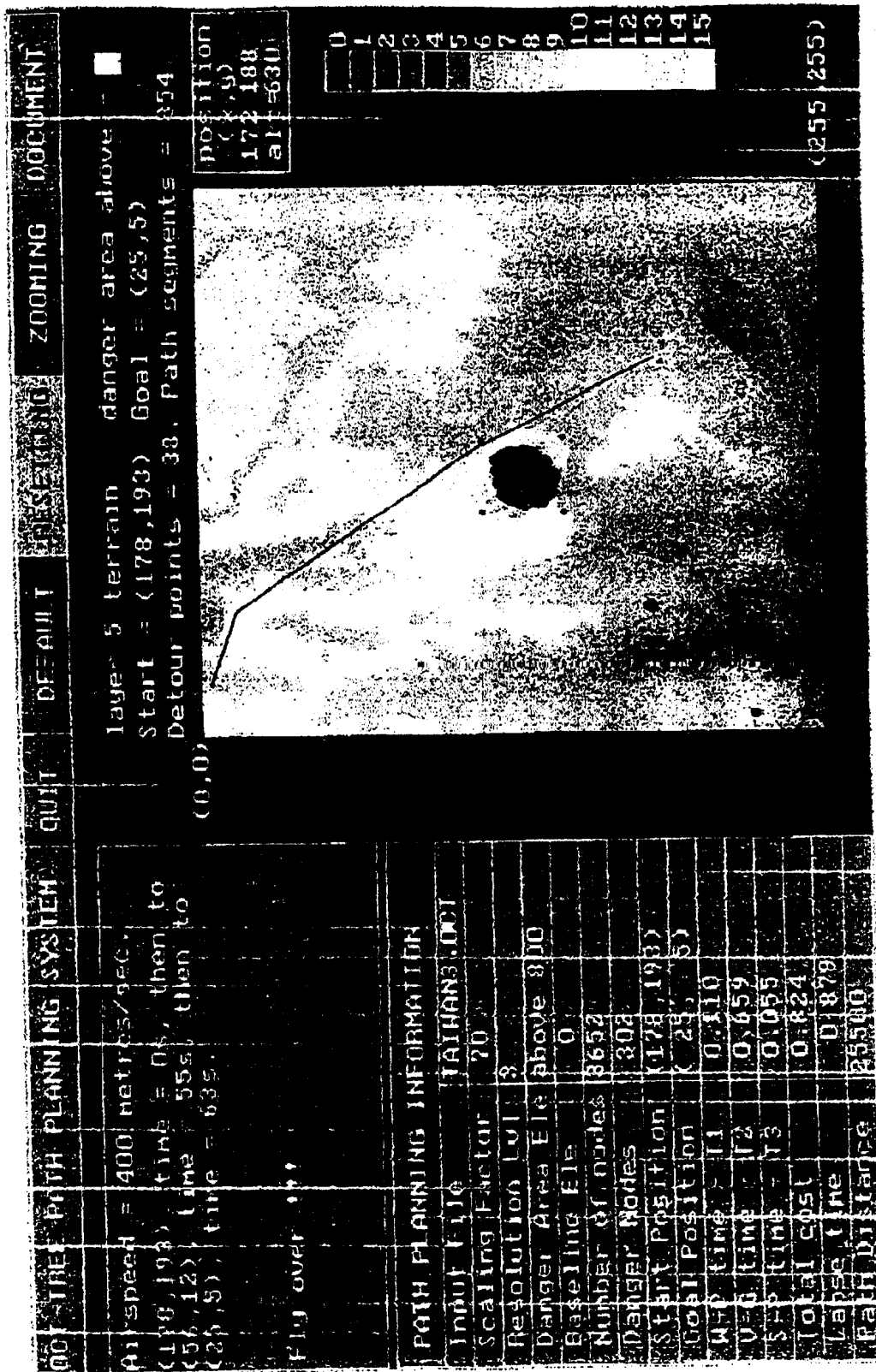


图 11.

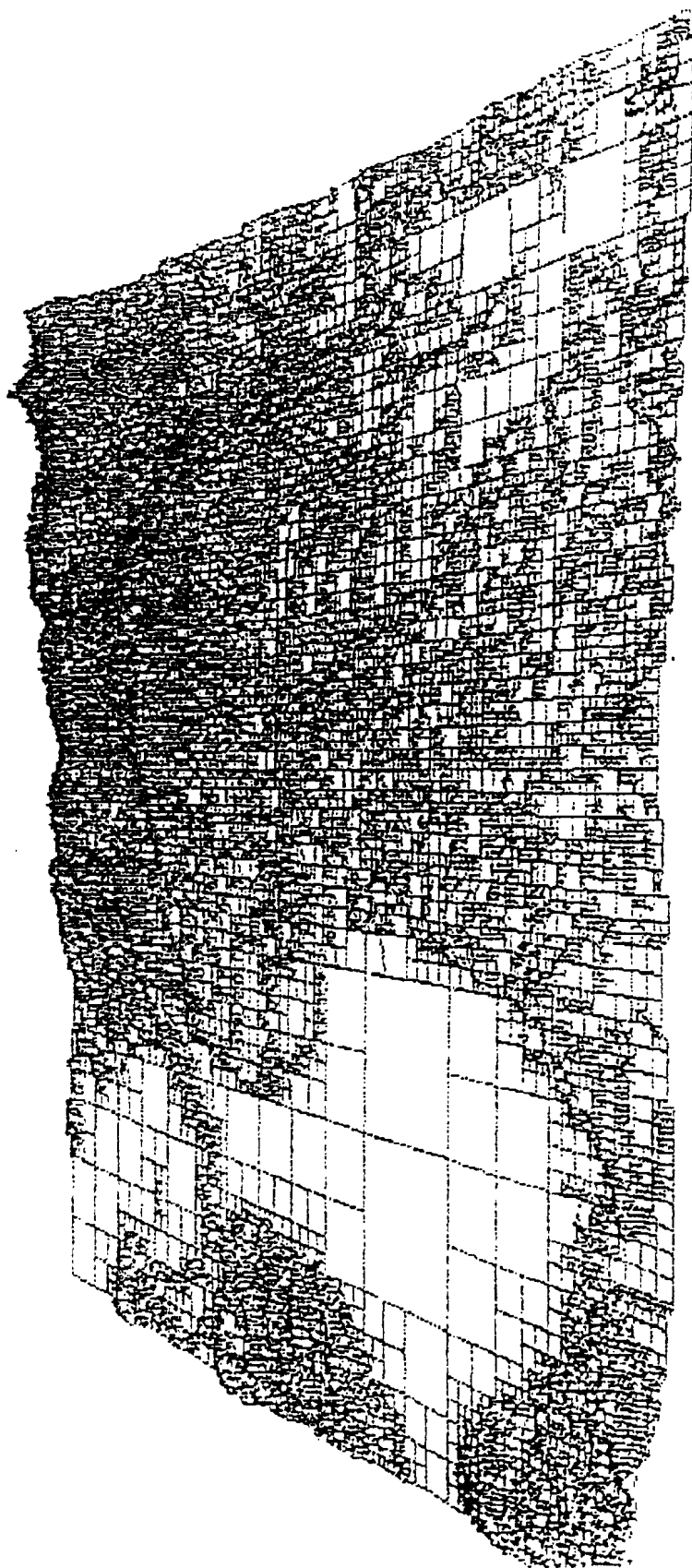


图 12