



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110139794 B

(45) 授权公告日 2021.07.16

(21) 申请号 201780077990.0

(22) 申请日 2017.11.28

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110139794 A

(43) 申请公布日 2019.08.16

(30) 优先权数据
15/402,353 2017.01.10 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2019.06.17

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2017/043380 2017.11.28

(87) PCT国际申请的公布数据
W02018/131322 EN 2018.07.19

(73) 专利权人 三菱电机株式会社
地址 日本东京都

(72) 发明人 王烨宾 D·贾

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

代理人 黄纶伟 李辉

(51) Int.Cl.
B62D 15/02 (2006.01)

(56) 对比文件
US 2012188100 A1, 2012.07.26
US 2016200359 A1, 2016.07.14
CN 105857306 A, 2016.08.17
JP 5981010 B1, 2016.08.31
CN 104395946 A, 2015.03.04
JP 2014026516 A, 2014.02.06
CN 104260722 A, 2015.01.07
CN 103810898 A, 2014.05.21
CN 104369769 A, 2015.02.25
DE 102015201204 A1, 2016.07.28
JP 2010151619 A, 2010.07.08
KR 101655290 B1, 2016.09.08

审查员 周晓龙

权利要求书5页 说明书17页 附图33页

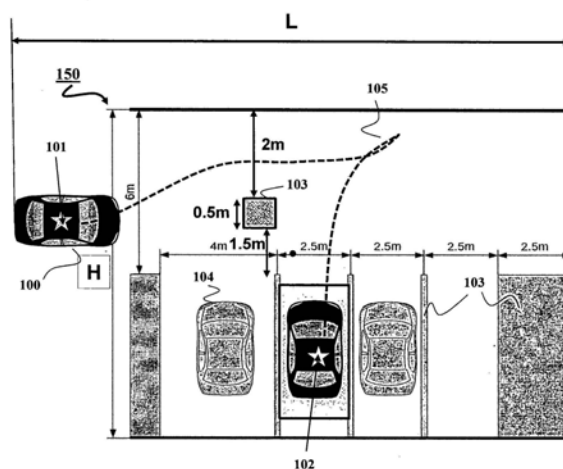
(54) 发明名称

用于停放车辆的系统、方法及非暂时计算机可读存储介质

(57) 摘要

本发明涉及用于自动化停车的方法和系统，该方法和系统使用车辆的几何结构和停车空间的地图确定通过路点集合连接车辆的初始状态与停放车辆的目标状态的无碰撞几何路径；并且使用车辆的运动学模型确定形成运动学图的运动学子图集合，该运动学图具有用运动学边连接的多个节点。各路点限定车辆的位置和方位，各运动学子图将几何路径的一对相邻路点连接，各节点限定车辆的状态，并且连接两个节点的运动学边根据车辆的运动学特性限定连接两个节点的无碰撞运动学路径。从运动学图选择运动学路径，并且使用车辆的动态模型确定作为时间的函数对运动学路径进行跟踪的参考轨迹。车辆的

运动根据参考轨迹。



1. 一种用于在停车空间内停放车辆的方法,其中,该方法使用连接到存储器的处理器,该存储器存储所述车辆的几何结构、所述停车空间的地图、所述车辆的运动学模型以及所述车辆的动态模型,其中,所述处理器与实施所述方法的所存储指令连结,其中,所述存储指令在由所述处理器执行时进行所述方法的至少一些步骤,该方法包括:

使用所述车辆的所述几何结构和所述停车空间的所述地图,确定通过路点集合连接所述车辆的初始状态与停放车辆的目标状态的无碰撞几何路径,各路点限定所述车辆的位置和方位;

使用所述车辆的运动学模型,确定形成运动学图的运动学子图集合,该运动学图具有用运动学边连接的多个节点,各运动学子图连接所述几何路径的一对相邻路点,各节点限定所述车辆的状态,并且连接两个节点的各运动学边根据所述车辆的运动学特性限定连接所述两个节点的无碰撞运动学路径;

从所述运动学图选择运动学路径,该运动学路径通过中间节点集合连接初始节点与目标节点,该初始节点对应于所述车辆的所述初始状态,该目标节点对应于所述车辆的所述目标状态;

使用所述车辆的动态模型,确定作为时间的函数对所述运动学路径进行跟踪的参考轨迹;以及

根据所述参考轨迹控制所述车辆的运动;

其中,确定所述几何路径的步骤包括:

建立几何图,该几何图通过无碰撞节点集合连接所述初始节点与所述目标节点,所述几何图中的各对节点由无碰撞边连接,该无碰撞边是仅使用所述车辆和所述停车空间的几何结构确定的;以及

从形成所述几何路径的所述路点集合的所述几何图选择节点集合;

此外,所述方法还包括:

对所述停车场的状态空间中的点进行采样,以产生采样状态;

如果所述几何图的节点的所有状态在所述采样状态的非可达区域内,则拒绝所述采样状态;否则,

确定所述几何图中的具有与所述采样状态最近的状态的最近节点;

向所述几何图添加所述采样状态的节点,并且如果边无碰撞,则经由所述边连接所添加的节点与所述最近节点;以及

重复所述采样、所述拒绝、所述确定以及所述添加,直到所述初始节点连接到所述目标节点。

2. 根据权利要求1所述的方法,所述方法还包括:

从与所述路点集合对应的种子集合起迭代地生长所述运动学图。

3. 根据权利要求1所述的方法,所述方法还包括:

使用所述车辆的至少一个传感器确定所述停车空间的至少一部分的几何结构;以及

从存储器选择所述车辆的所述几何结构,其中,所述传感器和所述存储器在工作上连接到所述处理器。

4. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述几何图包括初始树和目标树,该初始树从所述初始节点开始朝向所述目标节点,该目标树从所述目标节点开始朝向所述初始节点,并

且其中,所述最近节点包括来自所述初始树的第一最近节点和来自所述目标树的第二最近节点中的一个或组合。

5. 根据权利要求1所述的方法,所述方法还包括:

对于所述几何图的所述初始节点和各非叶节点,确定到达所述目标节点的最小成本;以及

选择以对于所述初始节点确定的所述最小成本将所述初始节点与所述目标节点连接起来的节点集合,以形成所述几何路径的路点集合。

6. 根据权利要求5所述的方法,所述方法还包括:

从所述几何图去除除了所述初始节点和所述目标节点之外的叶节点;并且

从所述几何图去除连接已去除的所述叶节点的边。

7. 一种用于在停车空间内停放车辆的方法,其中,该方法使用连接到存储器的处理器,该存储器存储所述车辆的几何结构、所述停车空间的地图、所述车辆的运动学模型以及所述车辆的动态模型,其中,所述处理器与实施所述方法的所存储指令连结,其中,所述存储指令在由所述处理器执行时进行所述方法的至少一些步骤,该方法包括:

使用所述车辆的所述几何结构和所述停车空间的所述地图,确定通过路点集合连接所述车辆的初始状态与停放车辆的目标状态的无碰撞几何路径,各路点限定所述车辆的位置和方位;

使用所述车辆的运动学模型,确定形成运动学图的运动学子图集合,该运动学图具有用运动学边连接的多个节点,各运动学子图连接所述几何路径的一对相邻路点,各节点限定所述车辆的状态,并且连接两个节点的运动学边根据所述车辆的运动学特性限定连接所述两个节点的无碰撞运动学路径;

从所述运动学图选择运动学路径,该运动学路径通过中间节点集合连接初始节点与目标节点,该初始节点对应于所述车辆的所述初始状态,该目标节点对应于所述车辆的所述目标状态;

使用所述车辆的动态模型,确定作为时间的函数对所述运动学路径进行跟踪的参考轨迹;以及

根据所述参考轨迹控制所述车辆的运动;

其中,确定所述运动学图的步骤包括:

对接近所述路点集合的所述停车空间进行采样,以产生采样状态;

如果所述运动学边无碰撞,则使用该运动学边连接所述采样状态与从至少一个路点开始的至少一个树,以更新该树;以及

重复所述采样和所述连接,直到满足终止条件,其中,所述终止条件包括形成了已连接几何图、所述运动学图上连接所述初始节点与所述目标节点的路径的数量超过阈值、连接相邻路点的树的节点的数量中的一个或组合。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中,所述采样是使用所述停车空间的状态的概率分布来有偏倚地执行的,该概率分布具有作为所述路点的状态的函数的均值和协方差。

9. 根据权利要求7所述的方法,所述方法还包括:

从所述路点集合 $X_0, \dots, X_M$ 选择两个相邻的路点 X_i, X_{i+1} ;

形成子图 SG_{i+1} ,该子图通过无碰撞节点和运动学边集合将子图 SG_i 连接到路点 X_{i+1} ,

其中,SGi是在针对两个相邻路点 X_{i-1} 、 X_i 的先前迭代期间确定的子图;并且

对于 $0 \leq i \leq M-1$,重复所述选择和所述形成。

10.根据权利要求9所述的方法,所述方法还包括:

使用初始树和目标树初始化所述子图,其中,所述初始树包括如下的子图Sgi:该子图包括与几何路点 $\{X_0, \dots, X_i\}$ 对应的节点,并且所述目标树包括与路点 X_{i+1} 对应的节点;

从所述车辆运动学模型的接近路点 X_i 、 X_{i+1} 的状态空间有偏倚地采样新状态X;

如果所述车辆能够遵循从所述新状态到所述初始树和所述目标树中的状态的无碰撞运动学路径,则向所述初始树和所述目标树中的至少一个添加所述新状态X;以及

重复所述采样和添加,直到所述新状态X被添加到所述初始树和所述目标树这两者。

11.根据权利要求10所述的方法,所述方法还包括:

根据所述路点 X_i 、 X_{i+1} 以及所述车辆和所述停车空间的几何结构,构建概率分布函数 $P(X|X_i, X_{i+1})$;

根据所述概率分布函数 $P(X|X_i, X_{i+1})$ 从所述状态空间进行采样所述新状态X;以及

重复所述采样,直到所采样的状态无碰撞。

12.一种用于在停车空间内停放车辆的方法,其中,该方法使用连接到存储器的处理器,该存储器存储所述车辆的几何结构、所述停车空间的地图、所述车辆的运动学模型以及所述车辆的动态模型,其中,所述处理器与实施所述方法的所存储指令连结,其中,所述存储指令在由所述处理器执行时进行所述方法的至少一些步骤,该方法包括:

使用所述车辆的所述几何结构和所述停车空间的所述地图,确定通过路点集合连接所述车辆的初始状态与停放车辆的目标状态的无碰撞几何路径,各路点限定所述车辆的位置和方位;

使用所述车辆的运动学模型,确定形成运动学图的运动学子图集合,该运动学图具有用运动学边连接的多个节点,各运动学子图连接所述几何路径的一对相邻路点,各节点限定所述车辆的状态,并且连接两个节点各运动学边根据所述车辆的运动学特性限定连接所述两个节点的无碰撞运动学路径;

从所述运动学图选择运动学路径,该运动学路径通过中间节点集合连接初始节点与目标节点,该初始节点对应于所述车辆的所述初始状态,该目标节点对应于所述车辆的所述目标状态;

使用所述车辆的动态模型,确定作为时间的函数对所述运动学路径进行跟踪的参考轨迹;以及

根据所述参考轨迹控制所述车辆的运动;

其中,所述方法还包括:

确定所述运动学图各节点的最佳成本,其中,节点的最佳成本表示通过所述运动学图的边使所述车辆从该节点移动到所述目标节点的最佳估计成本;并且

通过策略迭代确定由运动学路点集合和连接所述初始状态与所述目标状态的关联边表示的初始运动学路径。

13.根据权利要求12所述的方法,所述方法还包括:

初始化所述初始运动学路径 P_0 ,以包括当前状态 X_c ,作为第一运动学路点的初始状态 X_0 ;

确定所述当前状态的下一状态 X_n ,从而该下一状态与所述当前状态之间的边 $E(X_c, X_n)$ 产生从所述当前状态到所述目标状态的最小成本;

向所述初始运动学路径 $P_0 = \{P_0, X_n, E(X_c, X_n)\}$ 添加所述下一状态 X_n 和所述边 $E(X_c, X_n)$;以及

重复所述确定和添加,直到所述下一状态为所述目标状态。

14.根据权利要求1或7或12所述的方法,所述方法还包括:

通过去除对于在所述运动学路径中到达随后路点不必要的中间路点,对所述运动学路径进行平滑。

15.一种用于在停车空间内停放车辆的系统,该系统包括:

存储器,该存储器存储所述车辆的几何结构、所述停车空间的地图、所述车辆的运动学模型以及所述车辆的动态模型;

传感器,该传感器用于在工作上感测指示所述停车空间的至少一部分的几何结构的信息;

处理器,该处理器连接到所述存储器,并且被配置为:

使用所述车辆的所述几何结构和所述停车空间的所述地图,确定通过路点集合连接所述车辆的初始状态与停放车辆的目标状态的无碰撞几何路径,各路点限定所述车辆的位置和方位;

使用所述车辆的运动学模型,确定运动学子图集合以形成运动学图,该集合从与所述路点集合对应的种子集合生长,该运动学图具有用运动学边连接的多个节点,各运动学子图连接所述几何路径的一对相邻路点,各节点限定所述车辆的状态,并且连接两个节点的各运动学边根据所述车辆的运动学特性限定连接所述两个节点的无碰撞运动学路径;

从所述运动学图选择运动学路径,该运动学路径通过中间节点集合连接初始节点与目标节点,该初始节点对应于所述车辆的所述初始状态,该目标节点对应于所述车辆的所述目标状态;并且

使用所述车辆的动态模型,确定作为时间的函数对所述运动学路径进行跟踪的参考轨迹;以及

控制器,该控制器用于根据所述参考轨迹控制所述车辆的运动;

其中,所述处理器还被配置为:

对所述停车场的状态空间中的点进行采样,以产生采样状态,其中,所述采样是使用所述停车空间的状态的概率分布来有偏倚地执行的,该概率分布具有作为所述路点的状态的函数的均值和协方差;

如果所述几何图的节点的所有状态在所述采样状态的非可达区域内,则拒绝所述采样状态;否则,

确定所述几何图中的具有与所述采样状态最近的状态的最近节点;

向所述几何图添加所述采样状态的节点,并且如果边无碰撞,则经由该边连接所添加的节点与所述最近节点;以及

重复所述采样、所述拒绝、所述确定以及所述添加,直到所述初始节点连接到所述目标节点。

16.根据权利要求15所述的系统,其中,所述处理器通过以下方式来确定所述几何路

径:建立几何图,该几何图通过无碰撞节点集合连接所述初始节点与所述目标节点,所述几何图中的各对节点由无碰撞边连接,该无碰撞边连接是仅使用所述车辆和所述停车空间的几何结构确定的;以及从形成所述几何路径的所述路点集合的几何图选择节点集合。

17.一种非暂时计算机可读存储介质,该非暂时计算机可读存储介质存储有用于通过处理器执行权利要求1至14中的任一项所述的方法的程序。

用于停放车辆的系统、方法及非暂时计算机可读存储介质

技术领域

[0001] 本发明总体涉及用于车辆的路径规划,更具体地涉及用于将车辆自动停放到目标空间中的路径规划方法。

背景技术

[0002] 车辆(自主车辆或执行自动驾驶模式的车辆)所采用的多个控制系统为了避免障碍物(诸如其他车辆或行人)而且优化与车辆操作有关的一些准则这两者,预测车辆的将来、安全运动或路径。目标状态可以为固定位置、移动位置、速度向量、区域或其组合。周边环境(诸如道路边沿、行人以及其他车辆)由车辆的传感器感测,和/或该周边环境通过先验给定信息是至少部分已知的。

[0003] 用于控制以自动驾驶模式执行的自主或半自主车辆的一个任务将车辆自动停放到这里被称为目标状态的停车位置和方位中。停车任务可以如下制定。在给定了车辆动态、停车空间的地图、表示车辆的开始位置和方位的初始状态以及表示车辆的目标停车位置和方位的目标状态的情况下,确定车辆从初始状态到目标状态的期望路径或运动,然后控制车辆的致动器,例如,车辆的油门和方向盘,来确保车辆遵循期望的路径或运动。然而,由于对车辆运动的非完整约束以及停车空间(诸如停车库或停车场)中的通常狭窄的自由空间,自动停放车辆的路径规划非常有挑战性。

发明内容

[0004] 技术问题

[0005] 大多数现有路径规划解决方案仅处理特定停车场景,或者假定停车空间具有特定几何结构。比如,美国7737866中描述的方法计算用于平行停车和后向倒车的路径。美国8497782中描述的方法假定停车路径的特殊结构,忽视障碍物,并且基于停车空间的特定几何结构计算路径。而且,美国8862321中描述的方法解决平行停车,并且需要车辆的初始状态在所谓的可行开始区域内,从该区域,发起预编码的平行停车操纵。虽然实现了实时路径生成,但前面提及的方法或多或少地限制了障碍物的类型、停车空间的几何结构以及停车任务,并且未能考虑一般停车场景。

[0006] 因此,需要适于各种现实停车场景的、用于将车辆自动停放到目标空间中的系统和方法。

[0007] 技术方案

[0008] 一些实施方式的目的是公开一种允许用于车辆自动停放系统和方法的实时路径生成的路径规划方法。一些实施方式的另一个目的是提供降低由于狭小停车空间中的各种现实停车场景的自动停车的细节引起的路径规划的计算成本的方法。

[0009] 一些实施方式基于以下理解:可以使用基于采样的路径规划方法来寻找通过具有任意布局的停车空间的期望路径。然而,一些实施方式基于以下认识:将诸如快速探索随机树(RRT)方法及其变型例的基于采样的路径规划方法应用于自动化停车问题,会导致大量

计算浪费,这使得该任务在计算上不实用。在一般停车场景中,停车地点较远离车辆的初始(例如,当前)位置。另外,由于诸如停车库或停车场的空间的停车空间的狭小自由空间和复杂地图,到停车地点的路径可能具有不同的形式和形状。为此,为了寻找这种路径,会需要为了路径可行性而对整个停车空间进行采样和测试。因此,基于采样的路径规划方法的直接应用会不必要地对所有未探索状态空间进行采样,这导致用于实时停车应用的不实用解。

[0010] 一些实施方式基于可以使用至少两个阶段来对停车问题求解的认识。在第一阶段,构建连接车辆的初始状态与目标状态的运动学路径。在第二阶段,确定遵循运动学路径的实际轨迹。因为运动学路径可以使用比车辆的动态模型简单的运动学模型来构建,所以这种方法是有益的。

[0011] 两阶段问题分割可以将原始停车问题重新制定为以下内容。给定车辆的几何结构、停车空间的地图以及车辆的运动学模型,寻找可行的无碰撞路径,该路径在本文被称为运动学路径,将初始状态连接到目标状态。运动学可行性确保运动学路径是初始状态作为其初始值的车辆运动学的解,由此,可以由车辆从初始状态开始遵循。无碰撞特性保证车辆在沿着该运动学路径移动的同时在停车空间中不与障碍物碰撞。

[0012] 尽管有运动学模型通常比车辆的动态模型简单的事实,但在为了运动学路径的运动学可行性而需要对整个停车空间进行采样并测试时,用于自动化停车问题的解仍然可能在计算上不实用。与用于车辆公路驾驶的路径规划相比,用于车辆自动化停车系统的路径规划具有独特特性:环境中的无碰撞空间通常非常狭小,这需要基于采样的方法以远远更慢的速度探索停车空间。因此,构建通过无碰撞空间连接两个状态的运动学路径更具有挑战性。

[0013] 另外,一些实施方式基于以下的整体理解:用于整个停车空间的采样问题可以分成规划子问题集合。例如,可以开始建立来自初始和目标状态这两者的运动学图和/或将停车空间分成子空间集合。然而,随机分割无法提高计算效率,并且会导致零碎和/或不可行的运动学路径。

[0014] 一些实施方式基于以下认识:停车空间问题的采样需要分成子问题集合,使得可以连接各子问题的解,以确定连接初始和目标状态的可行运动学路径。另外,分成子问题集合应提供与如何对停车空间的分割状态采样有关的指引。这是因为在一般采样问题中,由于初始与目标状态之间的较大距离,采样状态接近在停车空间中建立的运动学树并被添加到该运动学树的概率低。该低概率意味着为确定与运动学树的接近性而采取的计算更可能是浪费的。为了避免浪费掉接近性检测中的计算,可以将采样状态当作运动学树的邻居,尽管远离两个树。然而,这种对待在碰撞检测阶段增加了计算浪费。这是因为在遥远的采样状态被当作运动学树的邻居时,具有采样状态与运动学树之间的无碰撞连接的概率低。应用于检测低概率事件的任何计算最可能是浪费的,由此引起低计算效率。

[0015] 一些实施方式基于以下认识:可以使用通过路点集合连接车辆的初始状态与所停车辆的目标状态的无碰撞几何路径,来将采样问题分成子问题集合,以建立运动学路径,这可以提高采样的计算效率并提供可行的运动学路径。

[0016] 几何路径可以仅使用车辆的几何结构和停车空间的地图来建立,即,不考虑车辆的运动学或动态模型。这样,简化了几何路径的计算。几何路径的无碰撞特性提高了可以从

几何路径开始建立无碰撞运动学路径的可能性。另外,一对路点(各路点限定车辆的位置和方位)提供采样问题的有利分割。

[0017] 具体地,使用车辆的运动学模型,可以确定连接各对相邻路点的运动学子图集合,以形成运动学图。例如,在一个实施方式中,例如使用线的直线段或不同的几何形状来连接两个相邻的路点。对于这种情况,可以将各子问题制定为“寻找连接两个相邻路点的运动学路径”。如果可以对所有子问题求解,则可以通过运动学路径将初始状态连接到目标状态。这进一步暗示对原始路径规划问题进行了求解。

[0018] 尤其,因为相邻的路点通常比车辆的初始和目标状态更彼此接近,所以可以使用停车空间的有偏倚采样来建立各运动学子图。为此,更可能将状态的各新样本添加到运动学子树中的一个,由此减少计算的浪费。

[0019] 在一个实施方式中,顺序对子问题求解。例如,子问题一被构建为“寻找连接初始节点和与第二路点对应的节点的运动学子图SG1”;子问题二被构建为“寻找连接运动学子图SG1与第三路点的运动学子图SG2”;最后,最后一个子问题被构建为“寻找将下一运动学子图到最后一个运动学子图与最后一个路点连接的运动学图”。在另一个实施方式中,并行对子问题求解,由此,使计算速度成数量级地加速。并行求解的子问题可以不同于顺序求解的子问题。

[0020] 一个实施方式使用有偏倚采样来引导状态采样,以构建运动学图。另外或另选地,一个实施方式将近似可达集用于采样步骤中,以提高采样状态的质量。通过将近似可达集考虑在内,拒绝了在连接上困难或成本高的采样状态。该处理可以减少由于低效样本而在碰撞检测中浪费的计算时间,而且提供使得能够快速构建运动学图的路点集合。

[0021] 因此,一个实施方式公开了一种用于在停车空间内停放车辆的方法,其中,方法使用连接到存储器的处理器,该存储器存储车辆的几何结构、停车空间的地图、车辆的运动学模型以及车辆的动态模型,其中,处理器与实施方法的所存储指令连结,其中,指令在由处理器执行时,进行方法的至少一些步骤,该方法包括以下步骤:使用车辆的几何结构和停车空间的地图,确定通过路点集合连接车辆的初始状态与停放车辆的目标状态的无碰撞几何路径,各路点限定车辆的位置和方位;使用车辆的运动学模型,确定形成运动学图的运动学子图集合,该运动学图具有用运动学边连接的多个节点,各运动学子图将几何路径的一对相邻路点连接,各节点限定车辆的状态,并且连接两个节点各运动学边根据车辆的运动学特性限定连接两个节点的无碰撞运动学路径;从运动学图选择运动学路径,该运动学路径通过中间节点集合连接初始节点与目标节点,该初始节点对应于车辆的初始状态,该目标节点对应于车辆的目标状态;使用车辆的动态模型,确定作为时间的函数对运动学路径进行跟踪的参考轨迹;以及根据参考轨迹控制车辆的运动。

[0022] 另一个实施方式公开了一种用于在停车空间内停放车辆的系统,该系统包括:存储器,该存储器存储车辆的几何结构、停车空间的地图、车辆的运动学模型以及车辆的动态模型;处理器,该处理器连接到存储器,并且被配置为:使用车辆的几何结构和停车空间的地图,确定通过路点集合连接车辆的初始状态与停放车辆的目标状态的无碰撞几何路径,各路点限定车辆的位置和方位;使用车辆的运动学模型确定运动学子图集合,该集合形成运动学图,该运动学图具有用运动学边连接的多个节点,各运动学子图将几何路径的一对相邻路点连接,各节点限定车辆的状态,并且连接两个节点各运动学边根据车辆的运动

学特性限定连接两个节点的无碰撞运动学路径;从运动学图选择运动学路径,该运动学路径通过中间节点集合连接初始节点与目标节点,该初始节点对应于车辆的初始状态,该目标节点对应于车辆的目标状态;以及使用车辆的动态模型,确定作为时间的函数对运动学路径进行跟踪的参考轨迹;以及控制器,该控制器用于根据参考轨迹控制车辆的运动。

[0023] 又一个实施方式公开了一种上面具体实施程序的非暂时计算机可读存储介质,该程序可由处理器执行以执行方法,方法包括以下步骤:确定没有碰撞地连接车辆的初始状态与车辆的目标状态的几何路径,其中,几何路径包括路点集合,各路点由车辆的位置和方位限定,并且其中,几何路径仅使用车辆和停车空间的几何结构确定;确定具有用运动学边连接的多个节点的运动学图,各节点限定车辆的状态,并且连接两个节点的运动学边限定两个节点之间的无碰撞运动学路径,其中,运动学图的节点从与路点集合对应的种子集合起迭代地生长,并且其中,运动学边根据车辆的运动学特性连接两个节点;从运动学图选择运动学路径,该运动学路径通过中间节点集合连接初始节点与目标节点,该初始节点对应于车辆的初始状态,该目标节点对应于车辆的目标状态;确定跟踪运动学路径的参考轨迹,其中,参考轨迹是时间的函数;以及根据参考轨迹控制车辆的运动。

附图说明

[0024] [图1A]图1A是由一些实施方式解决的停车场景的示例。

[0025] [图1B]图1B是根据一些实施方式的车辆的几何表示的示例示意图。

[0026] [图1C]图1C是与图1A的停车场景对应的停车空间的地图的示意图。

[0027] [图2A]图2A是根据一个实施方式的自动化停车系统的功能图。

[0028] [图2B]图2B是根据一个实施方式的运动规划系统的整体结构。

[0029] [图3A]图3A是根据一些实施方式的运动规划的阶段的框图。

[0030] [图3B]图3B是根据一些实施方式的、运动路径到规划子问题集合的分割确定的示意图。

[0031] [图4A]图4A是根据一些实施方式的、将运动路径规划问题分成子问题集合的框图。

[0032] [图4B]图4B是根据一些实施方式的、具有将运动学路径规划问题分成子问题集合的路点集合的、图1A的停车场景的示意图。

[0033] [图4C]图4C是根据一些实施方式的、用于将车辆停放在停车空间内的方法的框图。

[0034] [图4D]图4D是根据一个实施方式的、形成运动学路径的运动学子图集合的示例。

[0035] [图5A]图5A是根据一些实施方式的、用于确定几何路径的方法的流程图。

[0036] [图5B]图5B是根据一个实施方式的、建立几何图的示意图。

[0037] [图5C]图5C是根据一些实施方式的、用于车辆的示例非可达区域的示意图。

[0038] [图5D]图5D是根据一个实施方式的、用于建立几何图的方法的流程图。

[0039] [图5E]图5E是根据一个实施方式的、用于选择运动学路径的方法的框图。

[0040] [图6A]图6A是根据一个实施方式的、使用由路点集合限定的运动学路径来将规划问题分成子问题集合的框图。

[0041] [图6B]图6B是被构建为解决图6A的子问题的运动学子图的示意图。

- [0042] [图6C]图6C是被构建为解决图6A的子问题的运动学子图的示意图。
- [0043] [图6D]图6D是被构建为解决图6A的子问题的运动学子图的示意图。
- [0044] [图7A]图7A是根据一个实施方式的、用于顺序求解子问题的方法的框图。
- [0045] [图7B]图7B是使用路点集合制定子问题的另选实施方式的示意图。
- [0046] [图8]图8是根据一个实施方式的、用于确定运动学图的方法的框图。
- [0047] [图9A]图9A是根据一个实施方式的、用于求解子问题的示例方法的框图。
- [0048] [图9B]图9B是根据一个实施方式的有偏倚采样的实施方案的框图。
- [0049] [图9C]图9C是根据一个实施方式的、用于有偏倚采样的方法的框图。
- [0050] [图10]图10是根据一个实施方式的、用于从运动学图选择运动学路径的方法的框图。
- [0051] [图11A]图11A是根据一个实施方式的用于对初始运动学路径进行平滑的流程图。
- [0052] [图11B]图11B是根据一个实施方式的、由图11A的流程图的块执行的方法的流程图。
- [0053] [图11C]图11C是在图1A中示出的停车场景的运动学路径的图。
- [0054] [图11D]图11D是例示了车辆100沿着运动学路径的运动的图。
- [0055] [图12]图12是根据一个实施方式的、用于进一步处理运动学路径以生成参考轨迹的方法的框图。
- [0056] [图13]图13是根据本发明的一个实施方式的系统的示意图。
- [0057] [图14]图14是根据一些实施方式的自动化停车系统的框图。

具体实施方式

[0058] 图1A示出了由一些实施方式解决的停车场景的示例。在该示例中,由具有尺寸 $L \times H$ 的矩形表示停车空间150的边界。车辆100具有初始状态101,例如,当前状态,并且需要停放在由目标状态102限定的停车地点处。各状态(例如,初始和目标状态)限定车辆的位置和方位。停车空间150包括障碍物。障碍物可以是停车空间的布局的一部分,即,非暂时障碍物103,诸如停车空间的墙壁和/或支柱。通常已知非暂时障碍物的维数。图1A描绘了这种维数的非限制性示例。

[0059] 另外或另选地,障碍物可以包括其他停放或移动的车辆104。可以基于车辆的类型确定车辆104和要停放的车辆100的几何维数。为了清楚起见,本公开考虑前轮驱动车辆;但不同的实施方式应用于包括后轮驱动和全轮驱动车辆的其他车辆。

[0060] 在一些实施方式中,在停车空间的地图上指定停车空间的布局和障碍物103的位置。这种地图可以预定或在停车期间或之前实时构建。各种实施方式确定连接初始状态和目标状态的运动学路径105,使得运动学路径可行且无碰撞。

[0061] 图1B示出了根据一些实施方式的车轮的几何表示的示例示意图。在该示例中,车辆被抽象化为矩形115。车辆状态包括位置 (x, y) 110和方位 θ 120,该位置表示该车辆的后轮轴的中点,该方位指示车体轴与水平轴之间的角度。

[0062] 确定车辆沿着路径多么快的移动的运动规划使用车辆100的动态模型。如这里使用的,车辆的动态模型解释车辆状态的时间相关变化。动态模型通常由微分方程来表示。在一个实施方式中,车辆的动态模型是五阶微分方程:

$$[0063] \quad \dot{x} = \cos(\theta)\cos(\zeta)v$$

$$[0064] \quad \dot{y} = \sin(\theta)\cos(\zeta)v$$

$$[0065] \quad \dot{\theta} = \sin(\zeta)\frac{v}{l}$$

$$[0066] \quad \dot{v} = a_1$$

$$[0067] \quad \dot{\zeta} = a_2, \quad (1)$$

[0068] 其中, v 是前轮的速度, ζ 是前轮与车辆方位之间的角度, a_1 是平移加速度, a_2 是转向角速度, 并且 l 是 (x, y) 与前轮的中点之间的距离。

[0069] 为了路径规划, 一些实施方式使用车辆的运动学模型, 该运动学模型在不考虑车辆的质量或引起运动的力的情况下描述车辆的运动。

[0070] 在一个实施方式中, 考虑以下运动学模型:

$$[0071] \quad \dot{x} = \cos(\theta)u_1$$

$$[0072] \quad \dot{y} = \sin(\theta)u_1$$

$$[0073] \quad \dot{\theta} = u_2, \quad (2)$$

[0074] 其中, $u_1 = \cos(\zeta)v$ 是后轮轴的中点的速度, $u_2 = \tan(\zeta)u_1$ 。

[0075] 如果路径是运动学模型 (2) 的解, 则它是运动学可行的。车辆状态 $X = (x, y, \theta)$ 仅在位于位置 X 的车辆不与任何障碍物碰撞且完全位于停车空间的边界内部是无碰撞的。初始状态 101 缩写为 $X_0 = (x_0, y_0, \theta_0)$, 并且目标状态 102 由 $X_f = (x_f, y_f, \theta_f)$ 表示。对于由矩形 $L \times H$ 表示停车空间的特定停车任务, 车辆状态总是属于状态空间 $X: [0, L) \times [0, H) \times [0, 2\pi)$ 。

[0076] 一些实施方式基于还被称为停车空间的地图的、停车空间的几何表示, 确定车辆状态是否没有碰撞。在一个实施方式中, 停车空间的地图通过将所有障碍物和停车空间的边界近似为简单几何形状来导出。在一个实施方式中, 环境 (等同地为停车空间) 中的障碍物 103 可以近似为矩形, 这些矩形通过对于各障碍物构建最小边界框来导出。凭借障碍物和停车空间的边界的几何近似, 可以由几何对象的列表完全描述停车空间或环境。

[0077] 图 1C 示出了与图 1A 的停车场景对应的停车空间的地图 130。两种类型的障碍物使用矩形表示合并在一起, 作为一种非暂时障碍物 103。为了路径规划, 可以取决于车载处理器的计算能力由多个几何形状来近似障碍物。比如, 在另一个实施方式中, 在计算能力不足时, 可以通过对于各障碍物构建边界圆来近似障碍物。另选地, 可以由多面体近似障碍物, 然而, 这可能增加路径规划中的计算负担。而且, 停车空间中的障碍物无法由相同几何形状来近似。

[0078] 图 2A 示出了根据一个实施方式的自动化停车系统的功能图。环境映射和定位块 201 构建或更新停车空间的地图, 并且通过感测环境和车辆操作状态来确定车辆的当前位置。例如, 可以使用惯性测量单元来感测车辆操作, 该惯性测量单元可以包括 3 轴加速器、3 轴陀螺仪和/或磁强计。可以使用全球定位系统传感器来提供车辆的位置和速度。感测环境 200 的传感器可以是: 摄影机, 这些摄影机捕捉包括其他车辆、行人以及建筑物的障碍物; 超声/雷达传感器, 这些超声/雷达传感器检测车辆与障碍物之间的距离; 等。在一个实施方式中, 还如图 1C 所示的处理环境地图, 以生成停车空间的几何表示。

[0079] 目标状态选择块 202 通过识别停车场候选来选择用于停放车辆的停车地点的目标状态, 并且向运动规划块 203 发送目标状态。在一个实施方式中, 由与停车库的管理关联的

单独系统跟踪可用的停车地点。另外或另选地,可以使用自动化停车系统的传感器230检测停车地点。在一个实施方式中,运动规划块检查来确定目标状态是否可停车,即,是否存在到停车地点的可行路径,并且向目标状态选择块202通知检查结果。如果目标状态不可停车,则目标选择块202选择另一个目标状态来评价。在另一个实施方式中,目标状态选择块202还可以评价目标状态是否可停车,并且仅向运动规划块发送可停车目标状态。

[0080] 如果目标状态可停车,那么运动规划203发起完全运动规划过程,以基于车辆模型210、车辆的初始和目标状态、以及停车空间的地图,确定参考轨迹241。在一个实施方式中,参考轨迹限定车辆速度和转向角随着时间的过去的轮廓。在另一个实施方式中,参考轨迹限定车辆状态 (x, y, θ) 随着时间的过去的轮廓。

[0081] 给定参考轨迹241,车辆控制器和致动器204确定并运用控制命令,以在参考轨迹是状态轮廓时强制车辆状态跟踪参考轨迹241,或者在参考轨迹是车辆速度和转向角轮廓时,强制车辆速度和转向角跟踪参考轨迹。在一个实施方式中,控制命令可以是油门压力或转向转矩。车辆控制器/致动器还可以使用信号243来确定控制命令。信号243可以是所测量转向角、或者使方向盘或油门移动的马达的所测量电流。

[0082] 图2B示出了根据一个实施方式的运动规划系统203的整体结构。运动规划系统203包括用于执行运动规划系统203的模块的至少一个处理器270。处理器270连接271到存储器280,该存储器存储几何信息281,诸如车辆的几何结构和停车空间的地图。存储器280还可以存储车辆282的模型,诸如车辆的运动学模型和车辆的动态模型。存储器280还可以存储运动规划器的内部信息283,包括但不限于:车辆的初始状态、停放车辆的目标状态、成本函数、各所计算状态的值、导致各状态的运动、几何图、运动学图、路点、参考轨迹。在一些实施方式中,存储器280可以包括存储的指令,这些指令实施用于自动化停车的方法,其中,指令在由处理器270执行时,进行方法的至少一些步骤。

[0083] 一些实施方式基于可以使用至少两个阶段来对停车问题求解的认识。在第一阶段,构建连接车辆的初始状态与目标状态的运动学路径。在第二阶段,确定遵循运动学路径的实际轨迹。因为运动学路径可以使用比车辆的动态模型简单的运动学模型来构建,所以这种方法是有益的。

[0084] 图3A示出了根据一些实施方式的运动规划203的阶段的框图。块301基于车辆的几何结构和停车空间的地图130、车辆的初始状态101和目标状态102、以及车辆运动学模型303,确定运动学路径。在块302中,进一步处理运动学路径,以生成是车辆动态模型304的解的参考轨迹。

[0085] 这种问题分割可以将原始停车问题重新制定为以下问题。在给定车辆的几何结构、停车空间的地图以及车辆的运动学模型的情况下,寻找可行的无碰撞路径,该路径在这里被称为运动学路径,将初始状态连接到目标状态。运动学可行性确保运动学路径是初始状态作为其初始值的车辆运动学的解,由此,可以由车辆在初始状态开始遵循。无碰撞特性保证车辆在沿着该运动学路径移动的同时在停车空间中不与障碍物碰撞。

[0086] 尽管有运动学模型通常比车辆的动态模型简单的事实,但在为了运动学路径的运动学可行性而需要对整个停车空间进行采样并测试时,用于自动化停车问题的解仍然可能在计算上不实用。与用于车辆公路驾驶的路径规划相比,用于车辆自动化停车系统的路径规划具有独特特性:环境中的无碰撞空间通常非常狭小,这需要基于采样的算法以远远更

慢的速度探索停车空间。因此,实时构建在无碰撞空间中连接两个状态的运动学路径更具有挑战性。

[0087] 图3B示出了经由对整个停车空间的状态采样进行的运动路径301的、到规划子问题312集合的分割311确定的示意图。从子问题312的解的并集选择运动学路径313。

[0088] 一些实施方式基于以下认识:停车空间问题的采样需要分成子问题集合,使得可以连接各子问题的解,以确定连接初始和目标状态的可行运动学路径。另外,分成子问题集合应提供与如何对分割的停车空间进行采样有关的指引。这是因为在一般采样问题中,如果初始和目标状态较远,则采样状态接近在停车空间中建立的运动学树并添加到该运动学树的概率低。该低概率意味着为确定与运动学树的接近性而采取的计算更可能是浪费的。为了避免浪费掉接近性检测中的计算,可以将采样状态当作运动学树的邻居,尽管远离两个树。然而,这种对待必然在碰撞检测中导致更多计算被浪费。这是因为对于被当作运动学树的邻居的采样状态即使较远离两个树,具有采样状态与两个树之间的无碰撞连接的概率低。应用于检测低概率事件的任何计算最可能是浪费的,由此引起低计算效率。

[0089] 一些实施方式基于以下认识:可以使用通过路点集合连接车辆的初始状态与所停车辆的目标状态的无碰撞几何路径,来将建立运动学路径的采样问题分成子问题集合,这可以提高采样的计算效率并提供可行的运动学路径。

[0090] 图4A示出了将运动路径规划问题分成子问题集合的框图。分割依赖块411,该块基于车辆的初始和目标状态与几何结构、以及停车空间,生成路点集合。各路点限定里程标车辆状态。通常,第一路点对应于初始状态 X_0 ,并且最后一个路点对应于目标状态 X_f 。而且,路点集合应满足以下连接特性:所有路点用无碰撞边连接,其中,边可以表示两个节点(或状态)之间的几何或运动学连接。在一个实施方式中,给定两个随机状态 X_1 、 X_2 ,它们之间的几何边可以是直线;并且它们之间的运动学边可以是满足车辆运动学(2)且对于任意有边界的 $0 \leq t_1 \leq t_2 < \infty$ 满足边界条件 $X(t_1) = X_1$ 、 $X(t_2) = X_2$ 的任意可行解。

[0091] 例如,经由路点的几何路径可以仅使用车辆的几何结构和停车空间的地图来建立,即,不考虑车辆的运动学或动态模型。这样,简化了几何路径的计算。几何路径的无碰撞特性提高了可以在几何路径上建立无碰撞运动学路径的可能性。另外,一对路点(各路点限定车辆的位置和方位)提供采样问题的有利分割。

[0092] 图4B示出了具有用于将运动学路径规划问题分成子问题集合的路点集合的、图1A的停车场景的示意图。路点集合限定车辆状态 $X_0, \dots, X_5$,其中,各路点限定包括车辆的位置和方位的车辆状态。路点 X_0 和 X_5 分别对应于初始和目标状态。例如,对应于状态 X_1 的路点限定车辆的位置420和方位425。类似地,对应于状态 X_2 的路点限定车辆的位置430和方位435。路点是无碰撞的,并且与无碰撞几何边(例如,直线427和437)连接。

[0093] 使用车辆的运动学模型的一些实施方式确定连接各对相邻路点的运动学子图集合,以形成运动学图。例如,可以将各子问题制定为“寻找连接两个相邻路点的运动学路径”。如果可以对所有子问题求解,则可以通过运动学路径将初始状态连接到目标状态。这进一步暗示对原始路径规划问题进行了求解。

[0094] 图4C示出了用于将车辆停放在停车空间内的方法的框图。方法使用连接到存储器的处理器,该存储器存储车辆的几何结构和停车空间440的地图。存储器还可以存储车辆的运动学模型303和车辆的动态模型304。处理器与存储的指令连结,这些指令实施方法,其

中,指令在由处理器执行时,进行方法的至少一些步骤。

[0095] 方法使用车辆的几何结构和停车空间440的地图,确定450无碰撞几何路径455,该无碰撞几何路径通过路点集合连接车辆的初始状态与停放车辆的目标状态。各路点限定车辆的位置和方位,例如,如图4B所示。方法使用车辆的运动学模型303,确定460形成运动学图的运动学子图集合,该运动学图具有用运动学边连接的多个节点。各运动学子图连接一对相邻路点,各节点限定车辆的状态,并且连接两个节点的运动学边根据车辆的运动学特性限定连接两个节点的无碰撞运动学路径。

[0096] 图4D示出了根据一个实施方式的、形成运动学路径的运动学子图集合的示例。在该示例中,运动学图445由四个运动学子图446、447、448以及449形成。例如,各个子图例如可以迭代地从与路点集合对应的种子集合起迭代地生长。

[0097] 尤其,因为相邻的路点通常比车辆的初始和目标状态更彼此接近,所以可以使用停车空间的有偏倚采样来建立各运动学子图。为此,更可能将状态的各新样本添加到运动学子树中的一个,由此减少计算的浪费。

[0098] 在一个实施方式中,顺序对子问题求解。例如,子问题一被构建为寻找连接与第一路点 X_0 对应的初始节点和与第二路点 X_1 对应的节点的运动学子图 SG_1 ;子问题二被构建为寻找连接运动学子图 SG_1 与第三路点 X_2 等的运动学子图 SG_2 ;最后,最后一个子问题被构建为寻找将下一运动学子图到最后一个运动学子图 SG_{M-1} 与最后一个路点 X_M 连接的运动学图。在另一个实施方式中,并行对子问题求解,由此,使计算速度成数量级地加速。并行求解的子问题可以不同于顺序求解的子问题。

[0099] 图5A示出了根据一些实施方式的、用于确定几何路径的方法的流程图。方法建立501几何图GG,该几何图通过无碰撞节点集合连接初始节点与目标节点。几何图中的各对节点由无碰撞边连接,该无碰撞边是仅使用车辆和停车空间的几何结构确定的。几何图除了几何图中的节点之间的边是几何的而不是运动学的之外,与运动学图类似。因为采用几何边,所以几何图可以比运动学图更快地构建。接着,方法从形成几何路径的路点集合的几何图选择502节点集合。

[0100] 例如,在一个实施方式中,为了根据车辆和停车空间的几何结构的无碰撞连接,通过以下方式建立几何图:例如对停车空间的状态空间均匀或随机地采样,并且测试相邻采样状态之间的连接。修剪不具有单个无碰撞连接的采样状态,并且采样状态的剩余部分形成几何图的节点。

[0101] 图5B示出了根据一个实施方式的、建立几何图的示意图。在该示例中,几何图使用初始几何树 GT_i 521和目标几何树 GT_t 522从两端建立,初始几何树具有与初始状态101对应的初始节点511,目标几何树具有与目标状态102对应的目标节点512。初始几何树具有节点集合 V_{GTi} 和边集合 E_{GTi} 。目标几何树具有节点集合 V_{GTr} 和边集合 E_{GTr} 。

[0102] 在当前迭代期间,根据特定采样方案对由 $X=(x,y,\theta)$ 表示的状态510采样,并且该状态已经被验证为无碰撞的。接着是确定位于初始几何树上的最近节点,例如,节点530。如果来自初始树521的最近节点530与采样状态510之间的几何边535是无碰撞的,则创建与采样状态510对应的新节点并将其添加到初始几何树的节点集合,并且向初始几何树的边集合添加边535。

[0103] 对于采样状态510,向目标几何树应用类似的过程。即,识别位于目标几何树522上

的最近节点540。如果节点540与采样状态之间的几何边545是无碰撞的,则创建与采样状态对应的新节点并将其添加到目标几何树的节点集合,并且向目标几何树的边集合添加边545。如果边535和545这两者是无碰撞的,则连接初始和目标几何树,在这种情况下,连接初始节点和目标节点。为此,几何图是初始和目标几何树的并集。

[0104] 另外或另选地,一些实施方式使用可达性准则来执行采样。根据可达性准则,仅在状态空间中的样本从已经构建的图可达时保存该样本。在一个实施方式中,为了避免使用车辆的动态来测试可达性,可达性被定义为非可达性的不存在,并且非可达性是靠近车辆侧的预定区域。

[0105] 图5C示出了在限定车辆的位置和方位的状态510下的、车辆100的示例非可达区域553和557的示意图。在该示例中,在车辆的车轮向左或向右达到最大程度的情况下,非可达区域由在状态510下开始并以预定速度移动的车辆运动的圆表示。如果之前的样本状态530在非可达区域553和557内,则状态510不连接到状态530的节点。如果几何图的所有节点在采样状态的非可达区域内,则拒绝该采样状态。

[0106] 图5D示出了根据一个实施方式的、用于建立几何图的方法的流程图。在该实施方式中,采样状态X除了被测试为是无碰撞的之外,还由特定可驱动性准则评价,以提高路点的质量。可驱动性准则可以在构建运动学图时提高计算效率。

[0107] 方法对停车场的状态空间中的点采样550,以产生采样状态。如果与几何图的节点对应的所有状态在采样状态的非可达区域内560,则拒绝555采样状态。否则,方法确定570几何图中的具有与采样状态最近的状态的最近节点,并且向几何图添加580采样状态的节点,并且如果边无碰撞,则经由该边连接所添加的节点与最近节点。

[0108] 方法重复采样、拒绝、确定以及添加,直到初始节点连接到目标节点。例如,在一个实施方式中,只要连接初始和目标几何树,几何图的构建就停止。在另一个实施方式中,几何图的构建一直到特定数量的采样状态被添加到初始和目标几何树这两者才停止。

[0109] 几何图包括节点和表示节点之间的几何连接的边,使得初始节点与目标节点连接。给定几何图,可以存在从初始状态到目标状态的许多几何路径。有利的是选择减小特定成本函数的、来自几何图的几何路径。例如,一个实施方式通过执行两个步骤选择几何路径:a)对于各节点确定成本,其中,节点成本表示从由节点指定的状态到目标状态的最小成本;b)以初始节点开始,选择根据节点成本的节点集合,其中,初始节点的成本仅在车辆通过节点集合时达到最小。

[0110] 节点成本由边的成本确定。给定分别与车辆状态 X_i 、 X_j 对应的两个节点 N_i 、 N_j ,并且假定由边 $E_{i,j}$ 连接 N_i 和 N_j 。边 $E_{i,j}$ 的成本被定义为向量范数: $c(E_{i,j}) = \sqrt{(X_i - X_j)^T Q (X_i - X_j)}$,其中, Q 是正定矩阵。在这种情况下, Q 是1,边成本还原为欧几里德(Euclidian)向量范数。在几何图的构建期间,如上计算所有边的成本。对于任意节点 N_i ,其成本由 $V(N_i)$ 表示,并且可以通过执行以下值迭代来获得:

$$[0111] \quad V^k(N_i) = \min_{j \in I} \{V^{k-1}(N_j) + c(E_{i,j})\}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3)$$

[0112] 其中, I 是连接到节点 N_i 的节点的指标集合,并且 $V^k(N_i)$ 是第 k 个值迭代的节点成本 $V(N_i)$ 的值。几何图的一个值迭代意指对于固定 k 的所有节点执行值迭代(3)。值迭代需要节点成本的初始猜测,该节点成本是 $k=0$ 的节点成本。

[0113] 在一个实施方式中,对于所有节点, $V^0(N_i)=0$ 。已经确立,在 $k \rightarrow \infty$ 时, $V^k(N_i)$ 收敛到节点 N_i 的最小成本,由此,可以由值迭代获得节点的最小成本。迭代地进行值迭代,并且迭代实际上必须根据特定准则停止。在一个实施方式中,迭代在 k 达到预设大正数时停止。在另一个实施方式中,迭代在 $|V^k(N_i) - V^{k-1}(N_i)|$ 对于所有节点小于阈值时停止。

[0114] 将由值迭代产生的节点 N_i 的最小成本表示为 $V(N_i)$ 。通过执行策略迭代确定表示最佳几何路径的节点集合。即:假定 N_i 是最佳几何路径的一个节点,则通过求解下式确定 N_i 的下一节点:

$$[0115] \quad N_{\text{next}} = \operatorname{argmin}_{N_j \in I} \{V(N_j) + c(E_{ij})\}$$

[0116] 作为示例,在图5E中向几何图应用策略迭代(其中,策略迭代以与初始状态对应的初始节点开始,并且在目标节点处停止)给出由绿线表示的最佳几何路径,并且节点集合对应于车辆状态 $X_0, X_1, \dots, X_5$ 。

[0117] 在另一个实施方式中,由三个步骤确定最佳几何路径:a)通过去除除了初始和目标节点之外的所有叶节点修剪几何图,其中,叶节点仅具有一个邻居节点;b)在修剪之后,通过在几何图上执行值迭代,确定各节点的最小成本;c)在修剪之后,以初始节点开始,从几何图选择节点集合。该实施方式基于以下认识:最佳几何路径不包含任意叶节点,由此,在修剪之后在几何图上执行值迭代给出所有非叶节点的相同最小成本。该实施方式可以显著减轻确定节点的最小成本以及最佳几何路径的计算负荷。可以从限定最佳几何图的节点集合提取路点集合。

[0118] 图5E示出了根据一个实施方式的、用于选择几何路径455的方法的框图。方法对于几何图的初始节点和各非叶节点,确定591到达目标节点的最小成本,并且选择593以对于初始节点确定的最小成本连接初始节点与目标节点的节点集合,以形成几何路径的路点集合。例如,在确定节点的成本之前,方法可以从几何图去除除了初始节点和目标节点之外的叶节点,并且从几何图去除连接已去除叶节点的边。

[0119] 图6A示出了根据一个实施方式的、使用由路点集合限定的几何路径455来将规划问题分成子问题集合的框图。图6B、图6C以及图6D示出了被构建为解决图6A的子问题集合的运动学子图集合。例如,第一子问题601被定义为建立连接 X_0 和 X_1 (即,连接初始状态与第二路点)的第一运动学子图 SG_1 。图6B示出了构建运动学子图 SG_1 ,以运动学地连接 X_0 和 X_1 。

[0120] 第二子问题602被定义为建立第二运动学子图 SG_2 ,该第二运动学子图连接第一运动学子图 SG_1 和 X_2 ,即,连接第二路点与第三路点。图6C示出了构建运动学子图 SG_2 ,以运动学地连接 SG_1 和 X_2 。最终子问题M609被定义为建立连接 SG_{M-1} 和 X_M 的运动学图KG。图6D示出了运动学子图 SG_{M-1} ,并且示出了构建运动学图KG,以运动学地连接 SG_{M-1} 和 X_M 。前面提及的子问题的定义可以在处理器中顺序运行。

[0121] 图7A示出了根据一个实施方式的、用于顺序对子问题求解的方法的框图。方法对于来自集合475的每两个相邻路点710顺序730建立720运动学图740。

[0122] 在建立图740之后,方法移动750到下一对710,直到满足成功终止条件750或失败终止条件760为止。

[0123] 图7B示出了使用路点集合制定子问题的另选实施方式的示意图。子问题780至790被定义为建立分别连接 $\{X_0, X_1\}, \dots, \{X_{M-1}, X_M\}$ 的运动学子图 $SG_1, \dots, SG_M$ 。只要连接所有子图,运动学图就定义为子图的并集,并且连接。可以并行对该实施方式中的子问题求解。

[0124] 尤其,因为相邻的路点通常比车辆的初始和目标状态更彼此接近,所以可以使用停车空间的有偏倚采样来建立各运动学子图。为此,更可能将状态的各新样本添加到运动学子树中的一个,由此减少计算的浪费。

[0125] 图8示出了根据一个实施方式的、用于确定运动学图的方法的框图。方法对接近路点集合的停车空间进行采样810,以产生采样状态815。这样,采样状态向路点的至少一个状态偏倚。例如,采样可以使用具有作为路点的状态的函数的均值和协方差的停车空间的状态的概率分布来执行。

[0126] 如果运动学边无碰撞,则方法使用运动学边连接820采样状态与从至少一个路点开始的至少一个树,以更新树,并且方法重复830采样和连接,直到满足终止条件。例如,终止条件可以包括形成了已连接几何图、运动学图上连接初始节点与目标节点的路径的数量超过阈值、连接相邻路点的树的节点的数量中的一个或组合。

[0127] 图9A示出了根据一个实施方式的、用于对子问题 $i+1$ 求解的示例方法的框图。子问题 $i+1$ 强迫从路点 X_i 和 X_{i+1} 、停车空间的几何结构以及车辆运动学模型,建立运动学子图 SG_{i+1} 。子图 SG_{i+1} 被建立为连接子图 SG_i 和 X_{i+1} 。例如,子图 SG_i 可以被视为初始运动学树,在该初始运动学树中,其根节点对应于状态 X_0 。如果被当作子问题 $i+1$ 的目标状态,则以具有状态 X_{i+1} 的根节点初始化目标运动学树 T_t 。偏倚采样块901根据概率密度函数 $P(X)$ 对状态空间 X 采样,并且返回无碰撞状态 $X \in X$ 。连接块902进行采样状态与其位于子图 SG_i 和运动学目标树 KT_t 上的最近相邻节点之间的连接。采样状态仅在它可以没有碰撞地用运动学边连接到子图 SG_i 的、其最近节点时添加到子图 SG_i 。类似地,采样状态仅在采样状态可以没有碰撞地用运动学边连接到运动学目标树的、其最近节点时添加到树。而且,连接最近节点和具有采样状态的节点的边添加到最近节点位于的树。

[0128] 重复包括偏倚采样901和连接902的前面提及的步骤,直到满足特定停止准则为止。在一个实施方式中,准则是在采样状态 X 添加到子图 SG_i 和运动学目标树这两者时。在另一个实施方式中,准则是在添加到子图 SG_i 和运动学目标树 KT_t 这两者的采样状态的数量超过阈值时。

[0129] 图9B给出根据一个实施方式的偏倚采样901的实施方案的框图。首先,作为路点 X_i 和 X_{i+1} 的函数,构建911概率密度函数 $P(X)$ 。在块912中,以采样状态的概率密度函数匹配 $P(X)$ 的这种方式生成采样状态。重复采样912,直到914采样状态是无碰撞的913为止。

[0130] 例如,采样使用具有作为路点的状态的函数的均值和协方差的停车空间的状态的概率分布来执行。在一个实施方式中,概率分布是高斯的。

[0131] 图9C示出了根据使用高斯概率密度函数 $P(X)$ 920的一个实施方式的、用于偏倚采样的方法的框图,在该 $P(X)$ 中,其均值 μ 和协方差 σ 是 X_i 和 X_{i+1} 的函数。定义标量调整参数 $0 \leq \lambda_\mu \leq 1$,由下式给出高斯分布的均值:

$$[0132] \quad \mu = \lambda_\mu X_i + (1 - \lambda_\mu) X_{i+1}$$

[0133] 高斯分布的对角协方差矩阵计算为 $\sigma = \text{diag}(\lambda_x \sigma_x, \lambda_y \sigma_y, \lambda_\theta, \sigma_\theta)$,其中, σ_x 、 σ_y 、 σ_θ 由公式 $[\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\theta] = \text{dot}(X_i - \mu, X_i - \mu) + \text{dot}(X_{i+1} - \mu, X_{i+1} - \mu)$ 确定,其中, $\text{dot}(x_1, x_2)$ 表示向量 x_1 和 x_2 的点积,并且 $\lambda_x = \lambda_y > \lambda_\theta > 0$ 是对于概率密度函数反映特定准则调整的换算因数。在一个实施方式中, $\lambda_x = \lambda_y > \lambda_\theta > 0$ 可以用于反映人类启发。

[0134] 在另一个实施方式中,概率密度函数 $P(X)$ 是高斯过程,其中,其均值 μ 和协方差 σ 是

包括 X_i 和 X_{i+1} 的路点集合的函数。

[0135] 图10示出了根据一个实施方式的、用于从运动学图KG 465选择运动学路径的方法的框图。方法通过去除除了初始和目标节点之外的所有叶节点修剪1001运动学图,其中,叶节点由运动学边连接到仅一个邻居节点。方法在运动学图上,以与运动学图情况相同的方式,通过执行值迭代确定1002各节点的最小成本。以初始节点开始,块1003根据节点成本和运动学图选择初始运动学路径。在一个实施方式中,块1003使用如在根据几何图选择最佳几何路径(等同地为路点集合)中采用的策略迭代,选择初始运动学路径。例如,初始运动学路径包括节点集合,这些节点包括初始节点和目标节点。块1004对初始运动学路径进行平滑,以产生从初始状态开始且在目标状态结束的运动学路径。

[0136] 图11A示出了根据一个实施方式的、用于使初始运动学路径1110平滑1004的流程图。在一些实施方式中,对运动学路径进行平滑包括:去除对于在运动学路径中到达随后路点不必要的中间路点。例如,给定初始运动学路径 $P_0 = \{X_0, \dots, X_M\}$,如果 $M \leq 1$ 1120,则块1004不做任何事,即,返回1125路径。如果 $M=2$,则将中间路径定义为初始运动学路径 P_0 ,这被标记为1012。如果 $M>2$ 1130,则块1004尝试使子路径 $P_S = \{X_1, \dots, X_M\}$ 平滑1140,以产生平滑后的子路径SPS,并且返回中间路径 $\{X_0, \text{SPS}\}$,这被标记为1013。块1011通过尝试进行 X_0 与剩余节点之间的连接,来简化中间路径(P_0 或SPS),以产生较平滑的路径1150。

[0137] 图11B示出了根据一个实施方式的、由图11A的流程图中的块1011执行的方法的流程图。令 j 为被初始化为 M 的索引变量。块1165尝试用无碰撞运动学边连接 X_i 和 X_j 。如果连接成功,则块1180输出由 $\{X_1, X_i, M-j \leq i \leq M\}$ 构成的新路径;否则, j 增大1。如果 j 到达 $M-1$,则块1011停止并输出中间路径 $\{X_i, 1 \leq i \leq M\}$,否则,向块1165提供新 X_j ,以测试新连接。

[0138] 块1004输出节点集合,为了使车辆从初始状态 X_0 移动到目标状态 X_f ,运动学路径需要通过这些节点。运动学路径可以通过模拟初始值为初始状态且速度和转向角作为外部输入的车辆运动学模型来生成。使车辆从 X_i 移动到 X_j 所需的速度和转向角在运动学图的构建期间获得, X_i 和 X_j 是运动学路径的两个相邻节点。具体地,它们在通过边 $E(X_i, X_j)$ 连接 X_i 与 X_j 时求解,并且作为动作代码存储在边 $E(X_i, X_j)$ 中。

[0139] 图11C绘制了图1A所示的停车场景的、在平滑块1004中计算的运动学路径1190。图11D绘制了例示了车辆100沿着运动学路径1190的运动的示意图1195。

[0140] 一些实施方式使用车辆的动态模型,确定作为时间的函数对运动学路径进行跟踪的参考轨迹,并且根据参考轨迹控制车辆的运动。然而,块1004可能生成不满足模型(1)的车辆动态的运动学路径 $X_k(t)$, $t \in [0, t_n]$ 。

[0141] 图12示出了根据一个实施方式的、用于为了实时控制目的而进一步处理运动学路径以生成参考轨迹的方法的框图。在块1201中,从运动学路径和加速度约束1210生成初始轨迹 $X^0(t)$ 。块1202通过对以下最佳控制问题求解来生成参考轨迹1220。

$$[0142] \quad \min_{a_1(t), a_2(t), t \in [0, t_n]} \int_0^{t_n} (X(t) - X_k(t))^T W (X(t) - X_k(t)) dt$$

[0143] 其中

[0144] (1)

$$[0145] \quad |a_1(t)| \leq a_{1\max}$$

$$[0146] \quad |a_2(t)| \leq a_{2\max}$$

$$[0147] \quad X(0) = X_0, X(t_n) = X_f$$

[0148] $|X(t)X_k(t)| \leq \varepsilon$,

[0149] 其中, W 是正定矩阵, $a_{1\max}$ 是车辆的最大平移加速度, $a_{2\max}$ 是方向盘的最大角速度, 并且 ε 是小正标量。前面提及的最佳控制问题通常在时间上离散化, 并且转换成需要初始猜测来求解的非线性优化问题。

[0150] 在一个实施方式中, 初始猜测可以从运动学路径 $X_k(t)$ 生成, 并且转化车辆动态 (1)。在另一个实施方式中, 边界条件 $X(t_n) = X_f$ 以及 $X(0) = X_0$ 可能难以满足。考虑以下优化问题是有利的。

[0151]
$$\min_{a_1(t), a_2(t), t \in [0, t_n]} \Phi + \int_0^{t_n} (X(t) - X_k(t))^T W (X(t) - X_k(t)) dt$$

[0152] 其中

[0153] (1)

[0154] $|a_1(t)| \leq a_{1\max}$

[0155] $|a_2(t)| \leq a_{2\max}$

[0156] $|X(t) - X_k(t)| \leq \varepsilon$,

[0157] 其中,

[0158] $\Phi(X(0), X_k(0), X(t_n), X_k(t_n)) = (X(0) - X_k(0))^T S_0 (X(0) - X_k(0))$

[0159] $+ (X(t_n) - X_k(t_n))^T S_n (X(t_n) - X_k(t_n))$,

[0160] S_0 和 S_n 是正定矩阵。

[0161] 在另一个实施方式中, 在运动学路径的计算期间获得的、车辆从 X_0 移动到 X_f 的时间 t_n 可能太严格而不能满足, 由此危害前面提及的优化问题的可行性。一个实施方式可能通过将 t_n 缓和到 $(1+\alpha)t_n$ ($0 < \alpha < \infty$) 来生成运动学路径, 等同地为初始轨迹。

[0162] 图13示出了根据一个实施方式的系统的示意图。系统包括车辆1301, 该车辆包括被配置为执行自动化停车1350的处理器1302。车辆还包括至少一个传感器, 诸如LIDAR 1310和/或摄像头1320。LIDAR传感器1310是低分辨率第一传感器, 并且摄像头1320是高分辨率第二传感器。传感器1310和/或1320在工作上连接到处理器1302, 并且被配置为感测指示停车空间的至少一部分的几何结构的信息。使用该信息, 处理器1302确定和/或更新停车空间130的地图。为此, 处理器1302使用地图130执行自动化停车1350。

[0163] 图14示出了根据一些实施方式的自动化停车系统1400的框图。系统1400可以被实施在车辆1301之内。另外或另选地, 系统1400可以通信地连接到车辆。

[0164] 系统1400可以包括可以通过连接1420在工作上连接到其他部件的摄像头1410、惯性测量单元 (IMU) 1430、处理器1450、存储器1460、收发器1470以及显示器/屏幕1480的一个或组合。连接1420可以包括总线、线路、光纤、链路或其组合。

[0165] 收发器1470例如可以包括: 发送器, 该发送器被使得能够通过一种或更多种无线网络发送一个或更多个信号; 和接收器, 该接收器接收通过一种或更多种无线网络发送的一个或更多个信号。收发器1470可以基于各种技术许可与无线网络的通信, 这些技术诸如但不限于可以基于IEEE 802.11族的标准毫微微小区、Wi-Fi网络或无线局域网 (WLAN)、基于IEEE 802.15x族标准的无线个域网 (WPAN) (诸如蓝牙网络、近场通信 (NFC) 网络)、和/或诸如LTE、WiMAX等的无线广域网 (WWAN)。系统1400还可以包括用于通过有线网络通信的一个或更多个端口。

[0166] 在一些实施方式中, 系统1400可以包括图像传感器1410, 诸如CCD或CMOS传感器、

激光器和/或摄像头,这些传感器在下文中被称为“传感器1410”。例如,传感器1410可以将光学图像转换成电子或数字图像,并且可以向处理器1450发送所获取的图像。另外或另选地,传感器1410可以感测从场景中的目标物体反射的光,并且向处理器1450提交所捕捉光的强度。

[0167] 例如,传感器14101可以包括提供“颜色信息”的彩色或灰阶摄像头。术语“颜色信息”如这里使用的指彩色和/或灰阶信息。通常,如这里使用的,彩色图像或彩色信息可以被视为包括1至N个通道,其中,N是取决于用于存储图像的颜色空间的某一整数。例如,RGB图像包括三个通道,一个通道个用于红色、蓝色和绿色信息。

[0168] 例如,传感器1410可以包括用于提供“深度信息”的深度传感器。深度信息可以使用深度传感器以各种方式来获取。术语“深度传感器”用于指可以用于独立和/或结合一些其他摄像头获得深度信息的功能单元。例如,在一些实施方式中,深度传感器和光学摄像头可以是传感器1410的一部分。例如,在一些实施方式中,传感器1410包括RGBD摄像头,这些摄像头除了可以捕捉彩色(RGB)图像之外,还可以在启用深度传感器时捕捉每像素深度(D)信息。

[0169] 作为另一个示例,在一些实施方式中,传感器1410可以包括3D飞行时间(3DToF)摄像头。在具有3DToF摄像头的实施方式中,深度传感器可以采取连接到3DToF摄像头的闪光灯的形式,该闪光灯可以照亮场景中的物体,并且可以由传感器1410中的CCD/CMOS传感器捕捉反射光。深度信息可以通过测量光脉冲行进到物体并返回到传感器耗费的时间来获得。

[0170] 作为另外示例,深度传感器可以采取连接到传感器1410的光源的形式。在一个实施方式中,光源将结构化或纹理化光图案投射到场景中的物体上,该图案可以包括一个或更多个窄光带。深度信息通过探测由于物体的表面形状引起的所投射图案的几何失真来获得。一个实施方式从立体传感器确定深度信息,立体传感器诸如登记到RGB摄像头的红外线结构化光投射器和红外摄像头的组合。

[0171] 在一些实施方式中,传感器1410包括立体摄像头。例如,深度传感器可以形成被动立体视觉传感器的一部分,该被动立体视觉传感器可以使用两个或更多个摄像头来获得场景的深度信息。在捕捉场景中为两个摄像头共用的点的像素坐标可以连同摄像头位姿信息和/或三角测量技术一起用于获得每像素深度信息。

[0172] 在一些实施方式中,系统1400可以在工作上连接到还可以并入各种传感器的多个传感器1410,诸如双前置摄像头和/或前和后面向摄像头。在一些实施方式中,传感器1410可以捕捉静止图像和视频图像这两者。在一些实施方式中,传感器1410可以包括能够以例如30帧每秒(fps)捕捉图像的RGBD或立体摄像机。在一个实施方式中,由传感器1410捕捉的图像可以为原始未压缩格式,并且可以在被处理和/或存储在存储器1460中之前压缩。在一些实施方式中,图像压缩可以通过处理器1450使用无损或有损压缩技术来执行。

[0173] 在一些实施方式中,处理器1450还可以从IMU 1430接收输入。在其他实施方式中,IMU 1430可以包括3轴加速器、3轴陀螺仪和/或磁强计。IMU可以向处理器1450提供速度、方位和/或其他位置相关信息。在一些实施方式中,IMU 1430可以与由传感器1410捕捉各图像帧同步地输出所测量的信息。在一些实施方式中,IMU 1430的输出由处理器1450部分用于融合传感器测量和/或进一步处理融合后的测量。

[0174] 系统1400还可以包括渲染图像(诸如颜色和/或深度图像)的屏幕或显示器1480。在一些实施方式中,显示器1480可以用于显示由传感器1410捕捉的活动图像、融合后的图像、增强现实(AR)图像、图形用户界面(GUI)、以及其他程序输出。在一些实施方式中,显示器1480可以包括和/或收容有触摸屏,该触摸屏许可用户经由虚拟键盘、图标、菜单、或其他GUI、用户手势和/或诸如光笔和其他书写工具的输入装置的某一组合来输入数据。在一些实施方式中,显示器1480可以使用液晶显示器(LCD)或发光二极管(LED)显示器(诸如有机LED(OLED)显示器)来实施。在其他实施方式中,显示器480可以为可穿戴显示器。在一些实施方式中,融合的结果可以在显示器1480上渲染,或者提交到可以在系统1400之内或之外的不同应用。

[0175] 示例性系统1400还可以用与本公开一致的方式以各种方式来修改,诸如通过添加、组合或省略所示功能块中的一个或更多个。例如,在一些构造中,系统1400不包括IMU 1430或收发器1470。进一步地,在特定示例实施方案中,系统1400包括各种其他传感器(未示出),诸如环境光传感器、麦克风、声传感器、超声传感器、激光测距仪等。在一些实施方式中,系统1400的部分采取一个或更多个芯片集等的形式。

[0176] 处理器1450可以使用硬件、固件以及软件的组合来实施。处理器1450可以包括一个或更多个电路,该一个或更多个电路可被构造为执行与传感器融合和/或用于进一步处理所融合测量的方法有关的计算过程的至少一部分。处理器1450从存储器1460检索指令和/或数据。处理器1450可以使用一个或更多个专用集成电路(ASIC)、中央和/或图形处理单元(CPU和/或GPU)、数字信号处理器(DSP)、数字信号处理装置(DSPD)、可编程逻辑装置(PLD)、现场可编程门阵列(FPGA)、控制器、微控制器、微处理器、嵌入式处理器核心、电子装置、被设计为执行此处所描述的功能的其他电子单元、或其组合来实施。

[0177] 存储器1460可以被实施在处理器1450内和/或在处理器1450之外。如此处所用的,术语“存储器”指任意类型的长期、短期、易失性、非易失性或其他存储器,并且不限于任意特定类型的存储器或数量的存储器、或上面存储存储器的物理介质的类型。在一些实施方式中,存储器1460保持促进自动化停车的程序代码。

[0178] 例如,存储器1460可以存储传感器的测量,诸如静止图像、深度信息、视频帧、程序结果、以及由IMU 1430和其他传感器提供的数据。存储器1460可以存储存储器,该存储器存储车辆的几何结构、停车空间的地图、车辆的运动学模型以及车辆的动态模型。通常,存储器1460可以表示任意数据存储机构。存储器1460例如可以包括主存储器和/或辅助存储器。主存储器例如可以包括随机存取存储器、只读存储器等。虽然在图14中被例示为与处理器1450分离,但应理解,主存储器的全部或部分可以设置在处理器1450内或另外与处理器位于一处和/或连接到处理器。

[0179] 辅助存储器例如可以包括与主存储器相同或类似类型的存储器、和/或一个或更多个数据存储装置或系统,诸如例如闪存/USB存储驱动器、存储卡驱动器、磁盘驱动器、光盘驱动器、磁带驱动器、固态驱动器、混合驱动器等。在特定实施方案中,辅助存储器可以在工作上容纳可移动介质驱动器(未示出)中的非暂时计算机可读介质或另外可配置为非暂时计算机可读介质。在一些实施方式中,非暂时计算机可读介质形成存储器1460和/或处理器1450的一部分。

[0180] 本发明的上述实施方式可以以大量方式中的任意一个来实施。例如,实施方式可

以使用硬件、软件或其组合来实施。当在软件中实施时,可以在任意合适的处理器或处理器集合上执行软件代码,而不管处理器是设置在单个计算机中还是分布在多个计算机之间。这种处理器可以被实施为集成电路,一个或更多个处理器在集成电路部件中。但处理器可以使用任意合适格式的电路来实施。

[0181] 而且,本发明的实施方式可以被具体实施为示例已经被提供的方法。作为方法的一部分执行的动作可以以任意合适的方式来排序。因此,可以构造以下实施方式,其中,虽然动作在例示性实施方式中被示出为顺序动作,但动作以与所例示的不同顺序来执行,这可以包括同时执行一些动作。

[0182] 序数术语(诸如“第一”、“第二”)在权利要求中用于修改权利要求元素本身不暗示一个权利要求元素超过另一个权利要求元素的任何优先权、在先或顺序或执行方法动作的时间顺序,而是仅用作区分具有特定名称的一个权利要求元素与具有相同名称(但用于序数术语)的另一个元素以区分权利要求元素的标签。

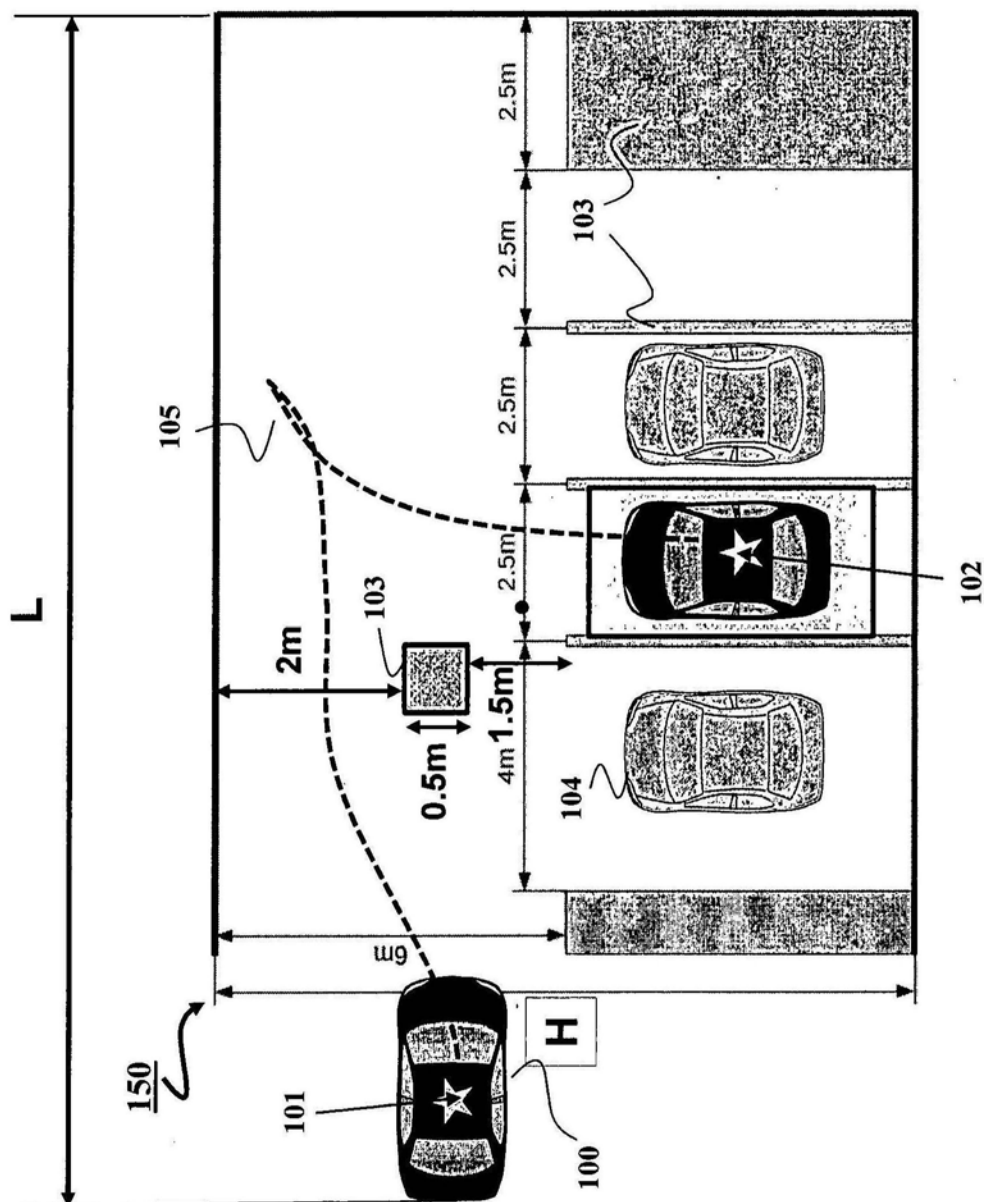


图1A

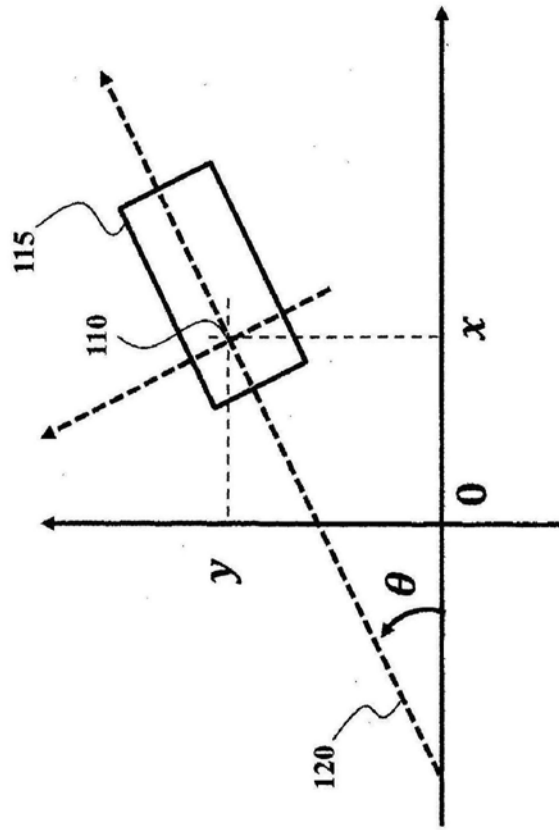


图1B

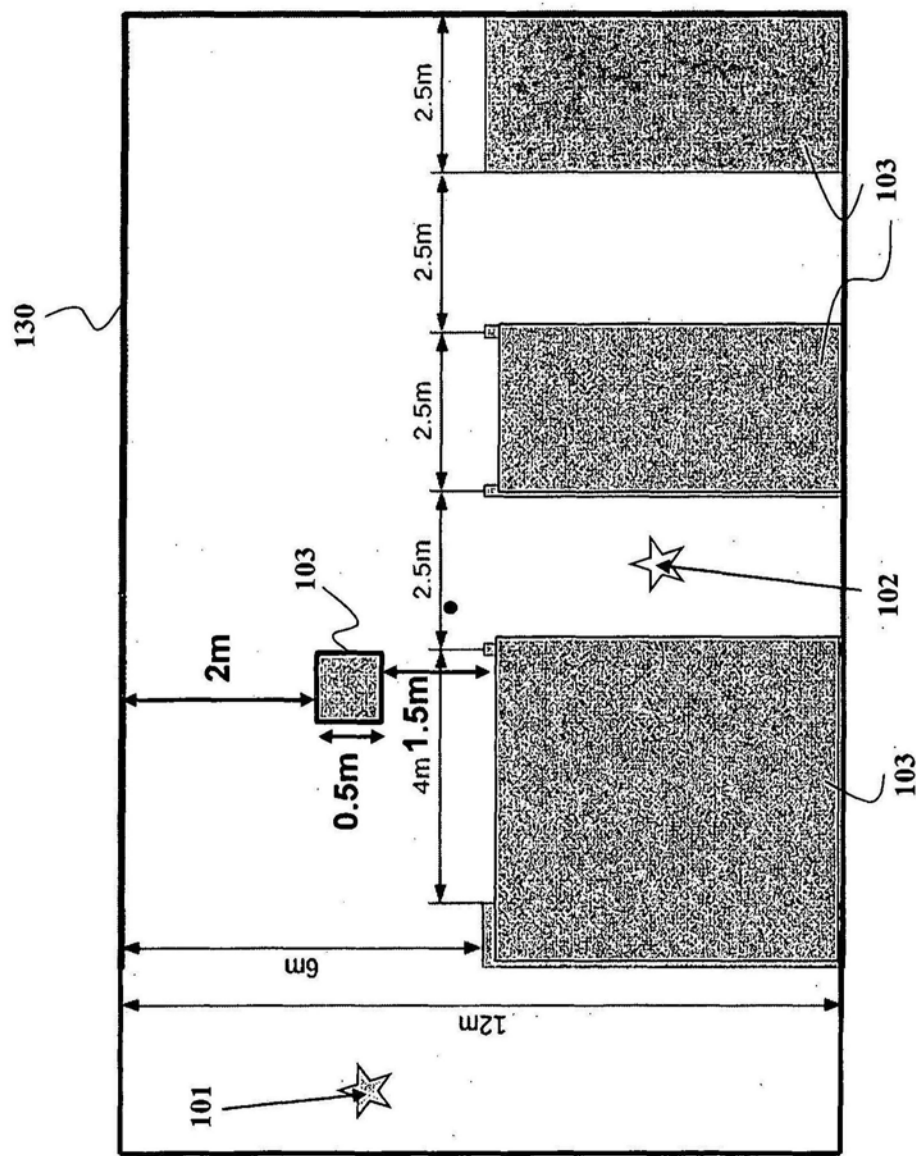


图1C

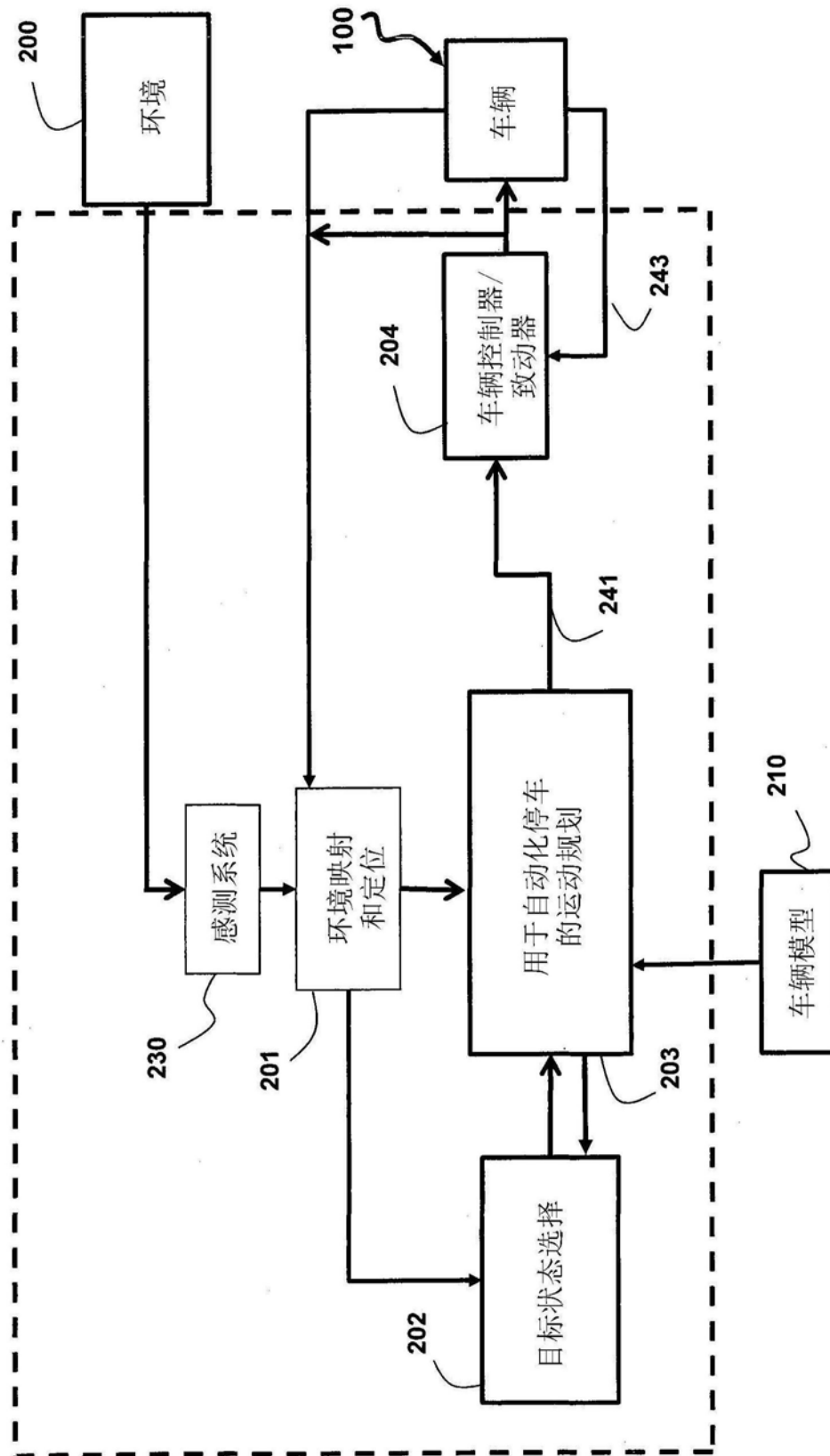


图2A

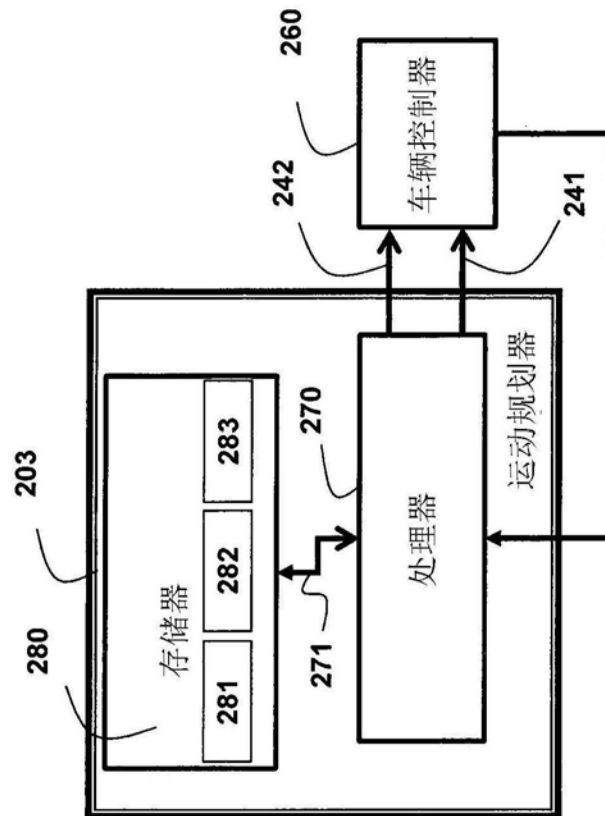


图2B

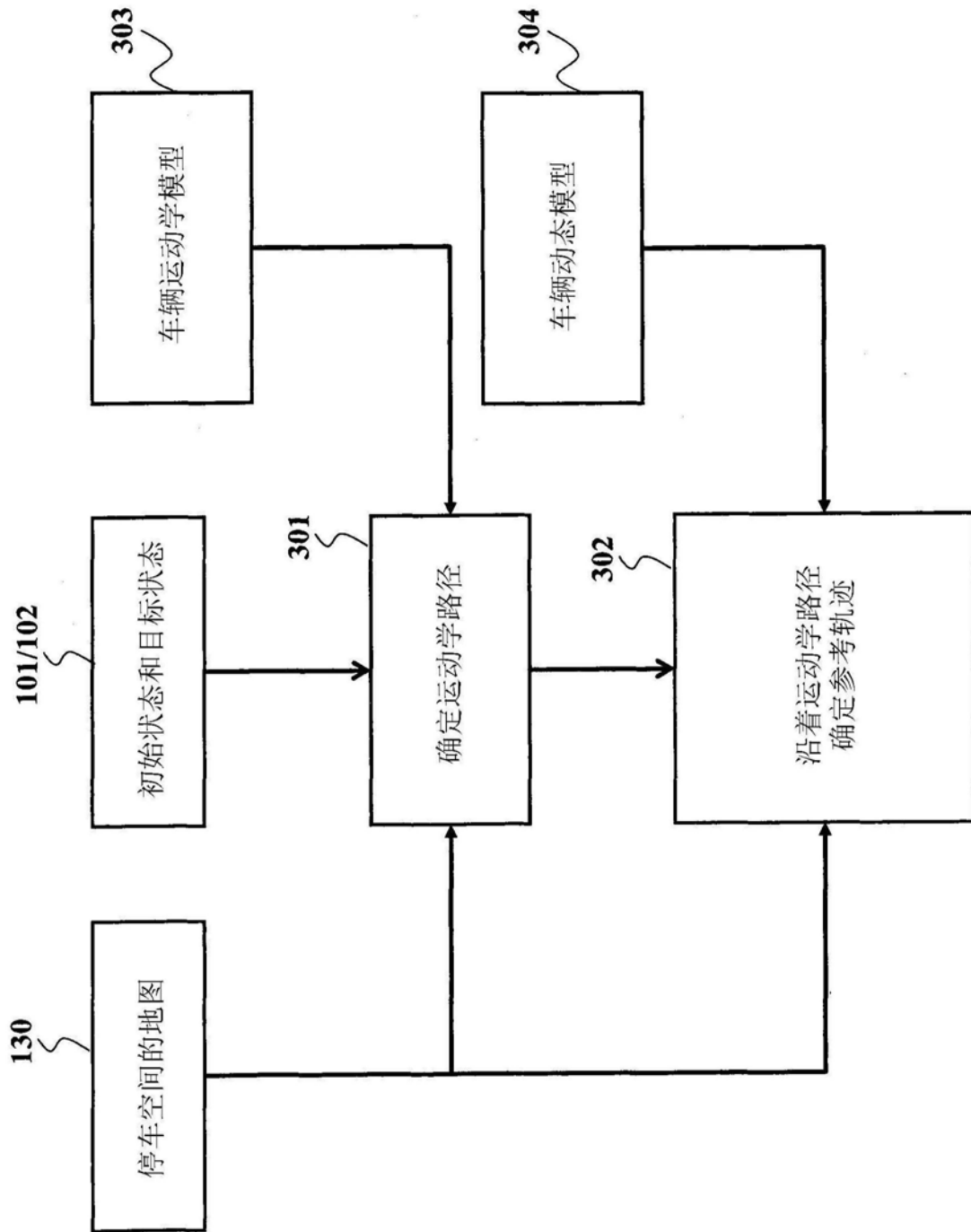


图3A

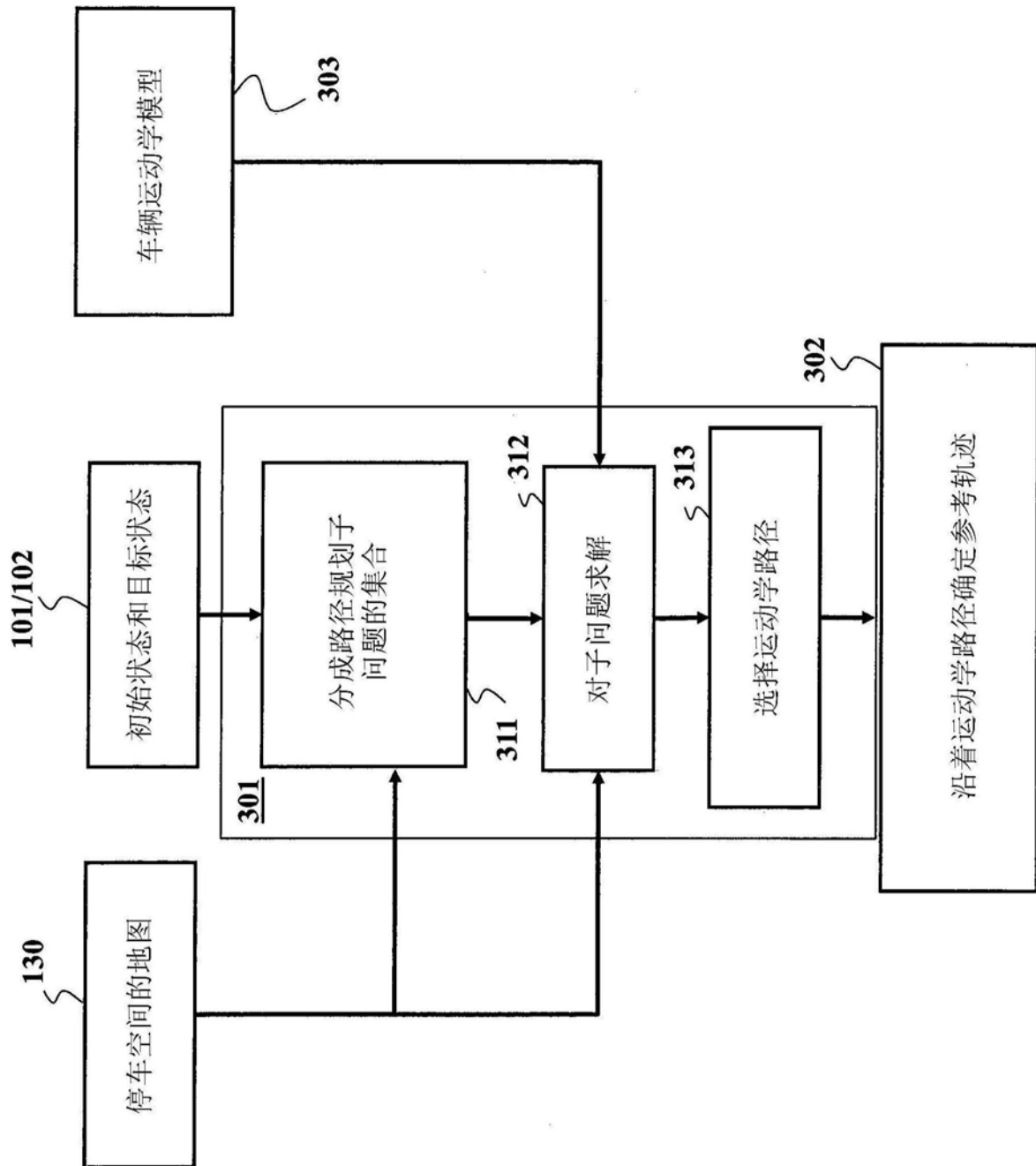


图3B

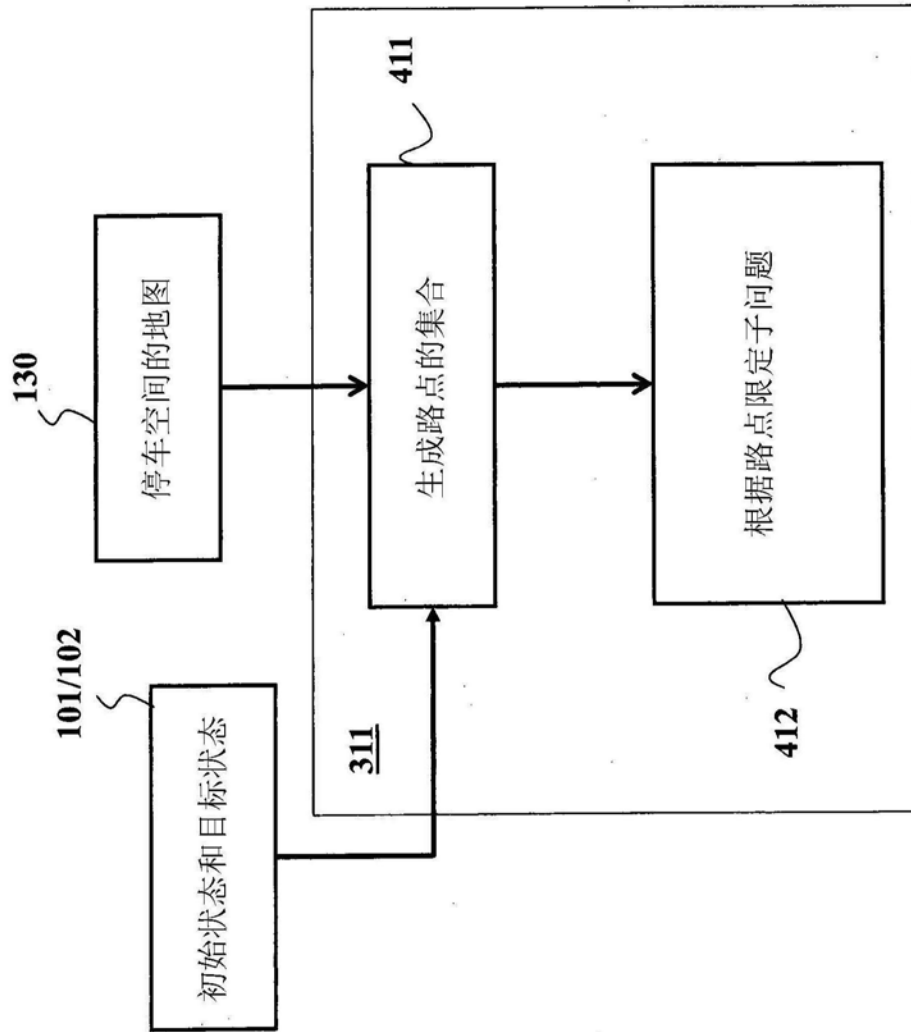


图4A

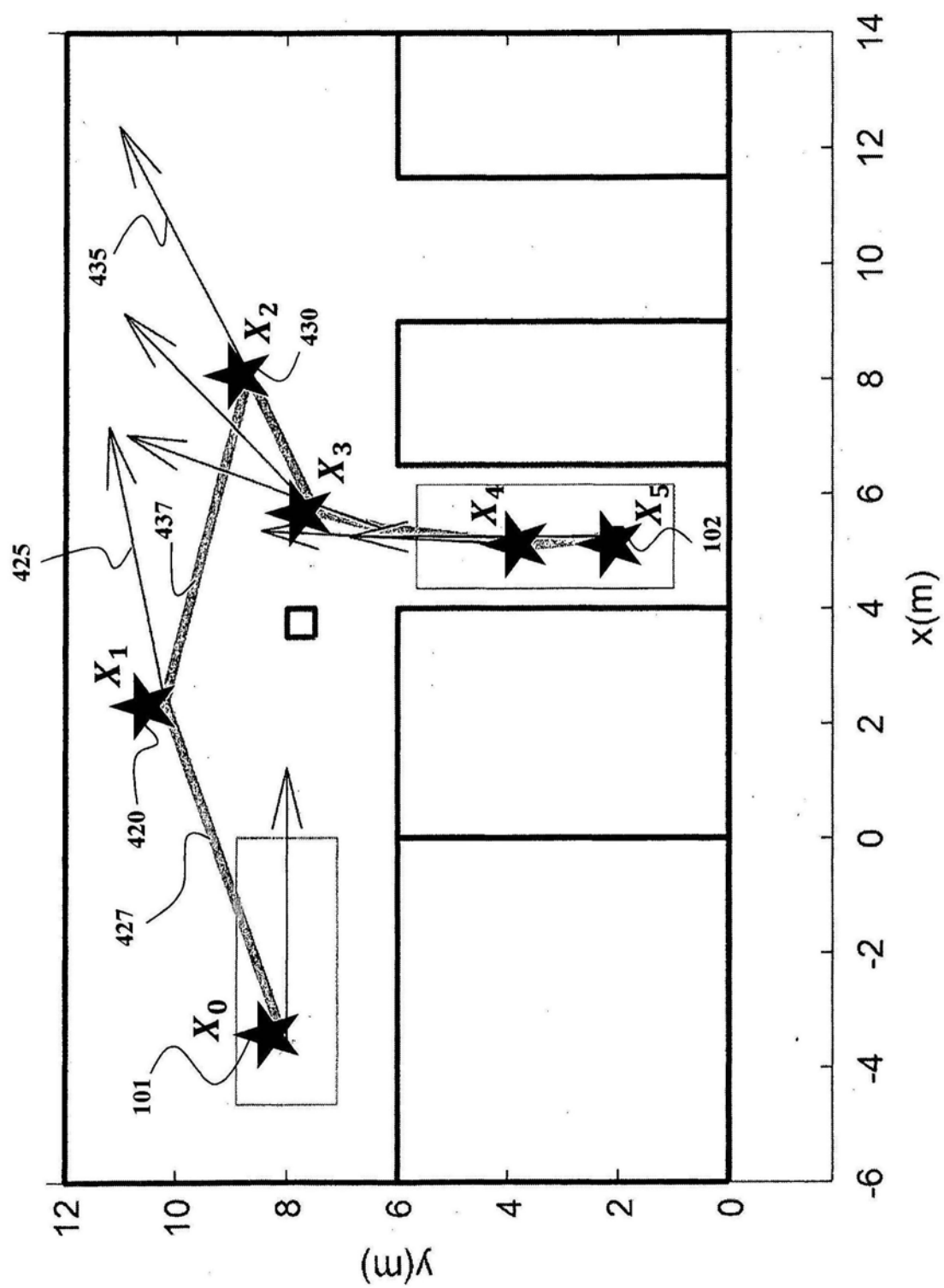


图4B

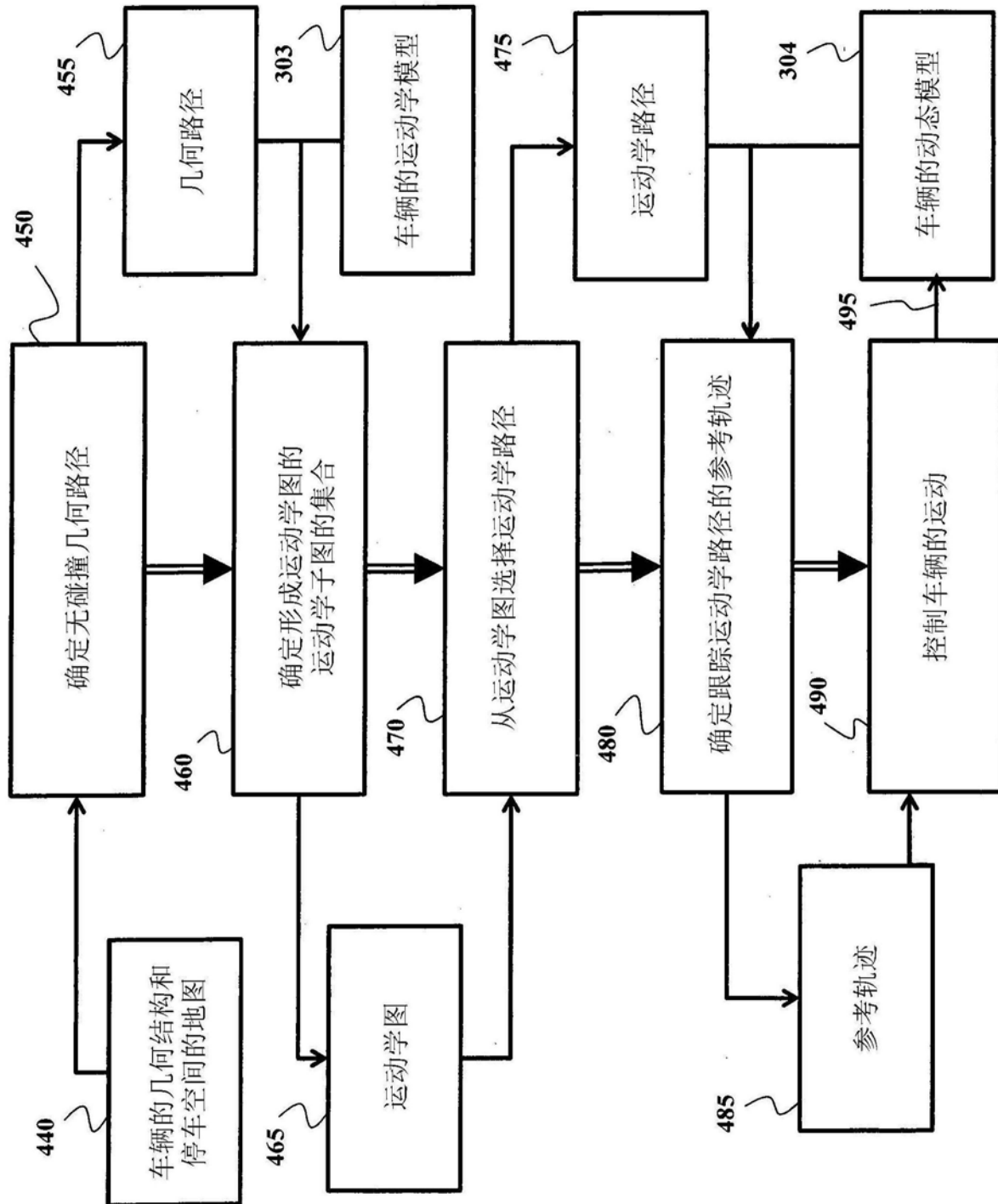


图4C

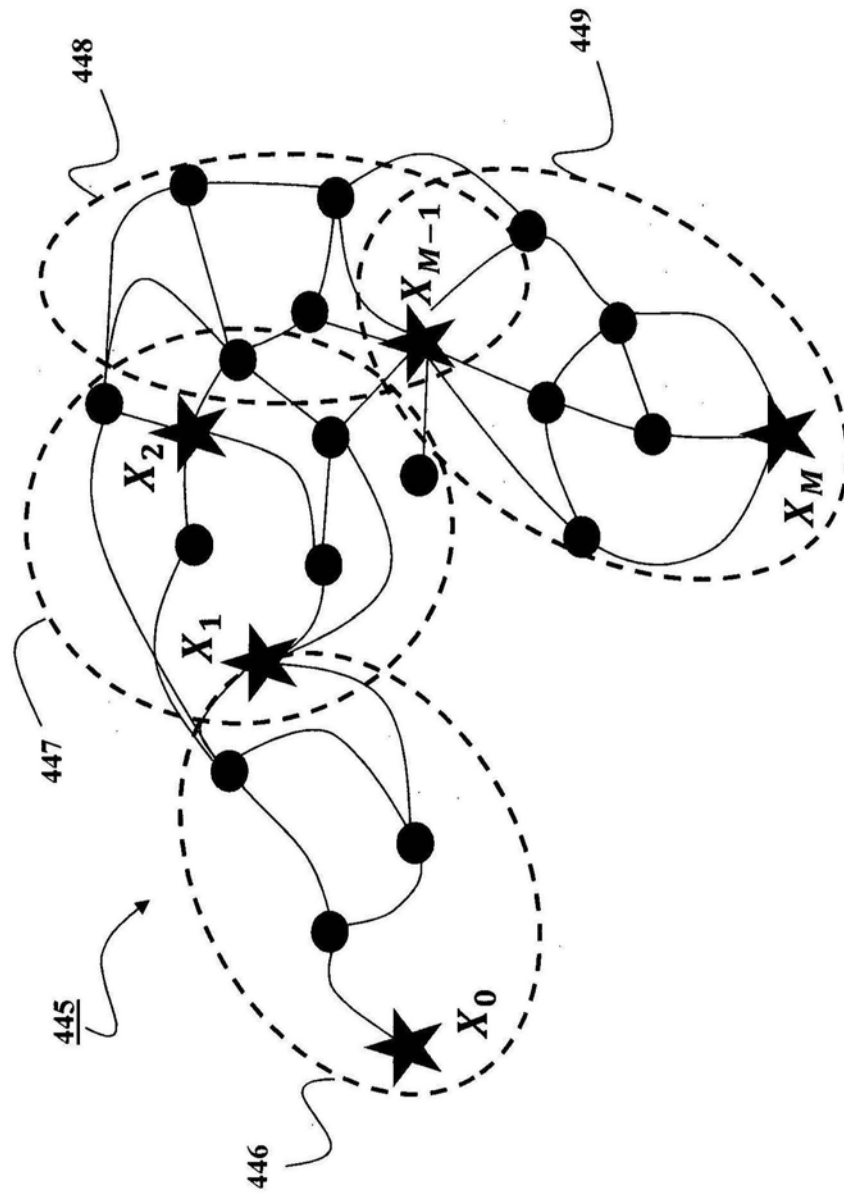


图4D

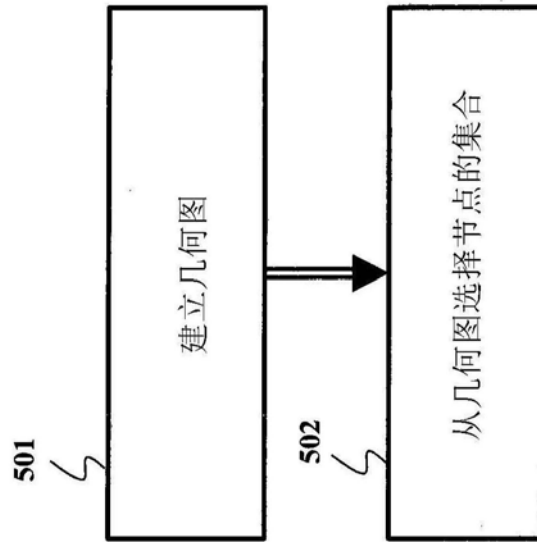


图5A

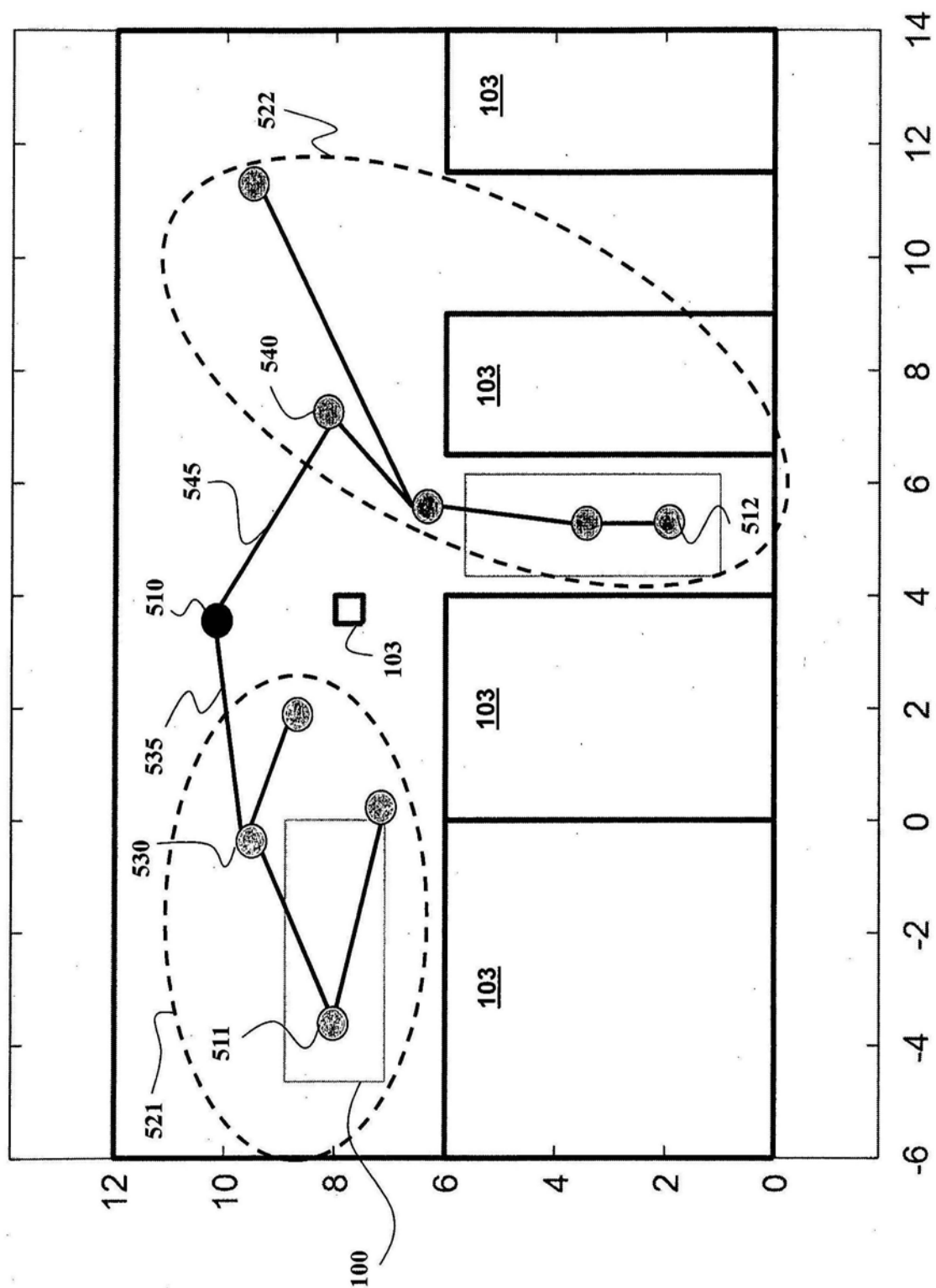


图5B

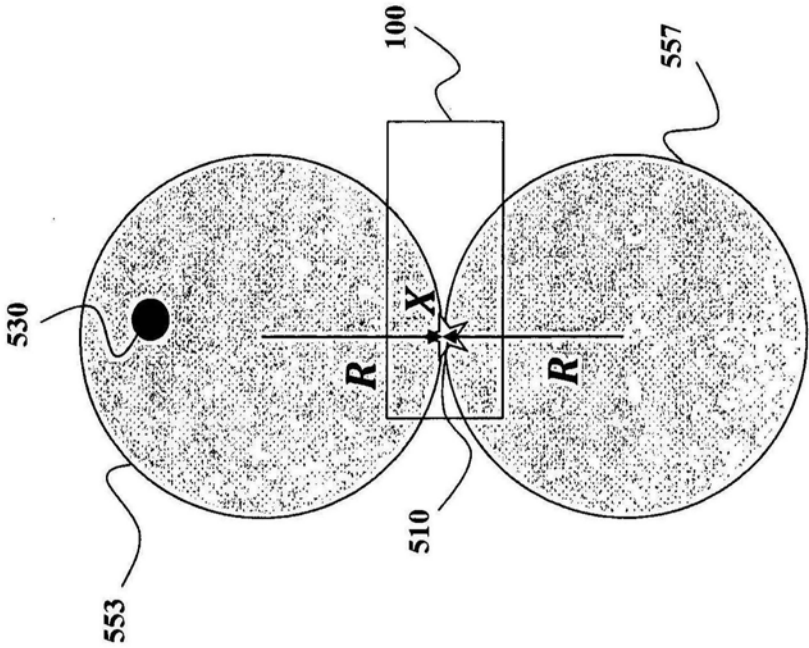


图5C

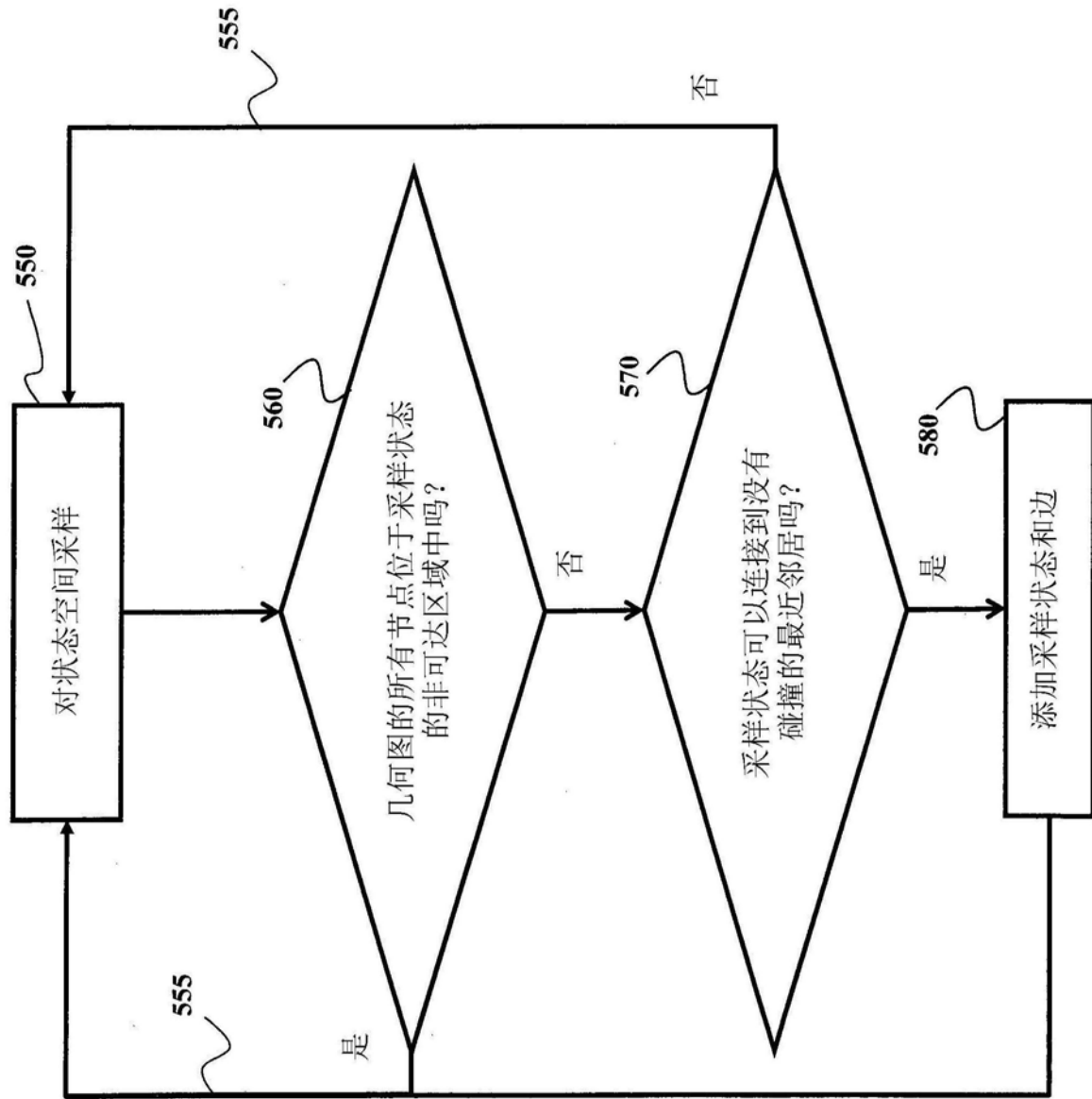


图5D

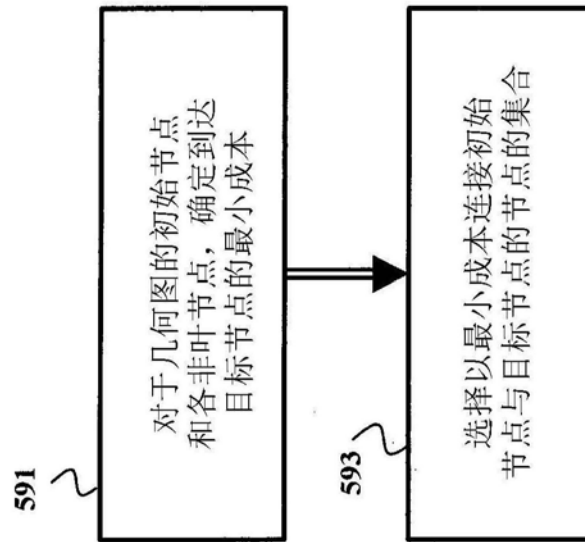


图5E

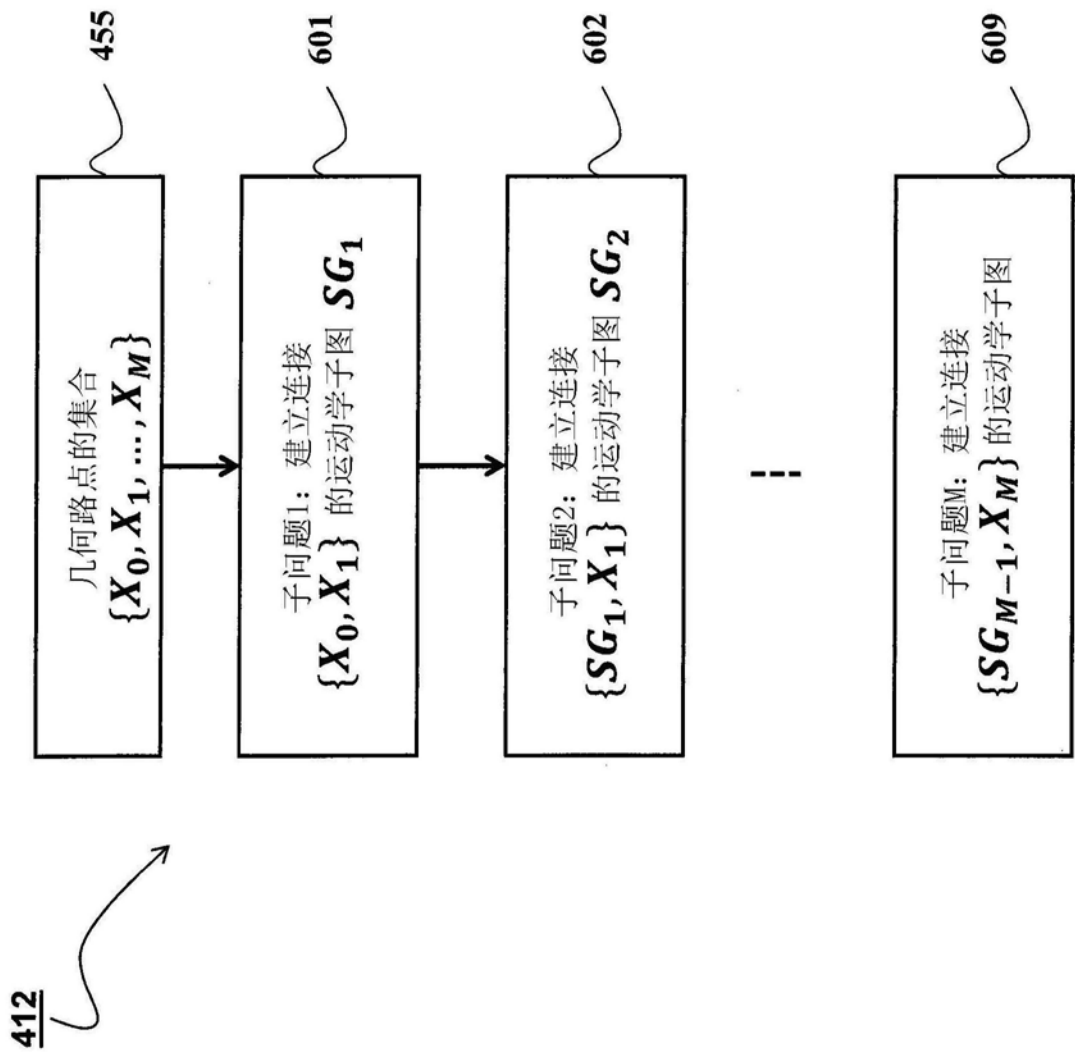


图6A

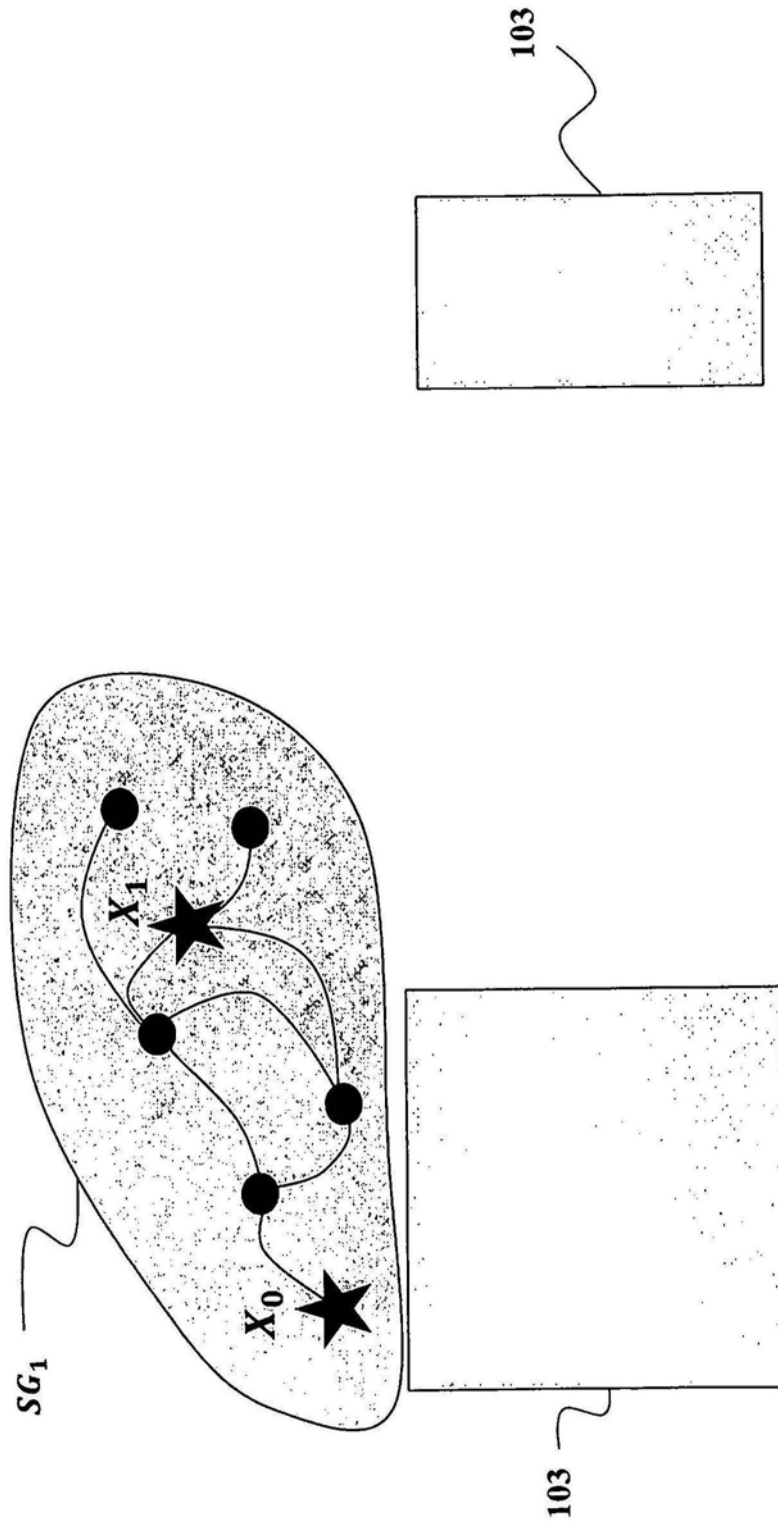


图6B

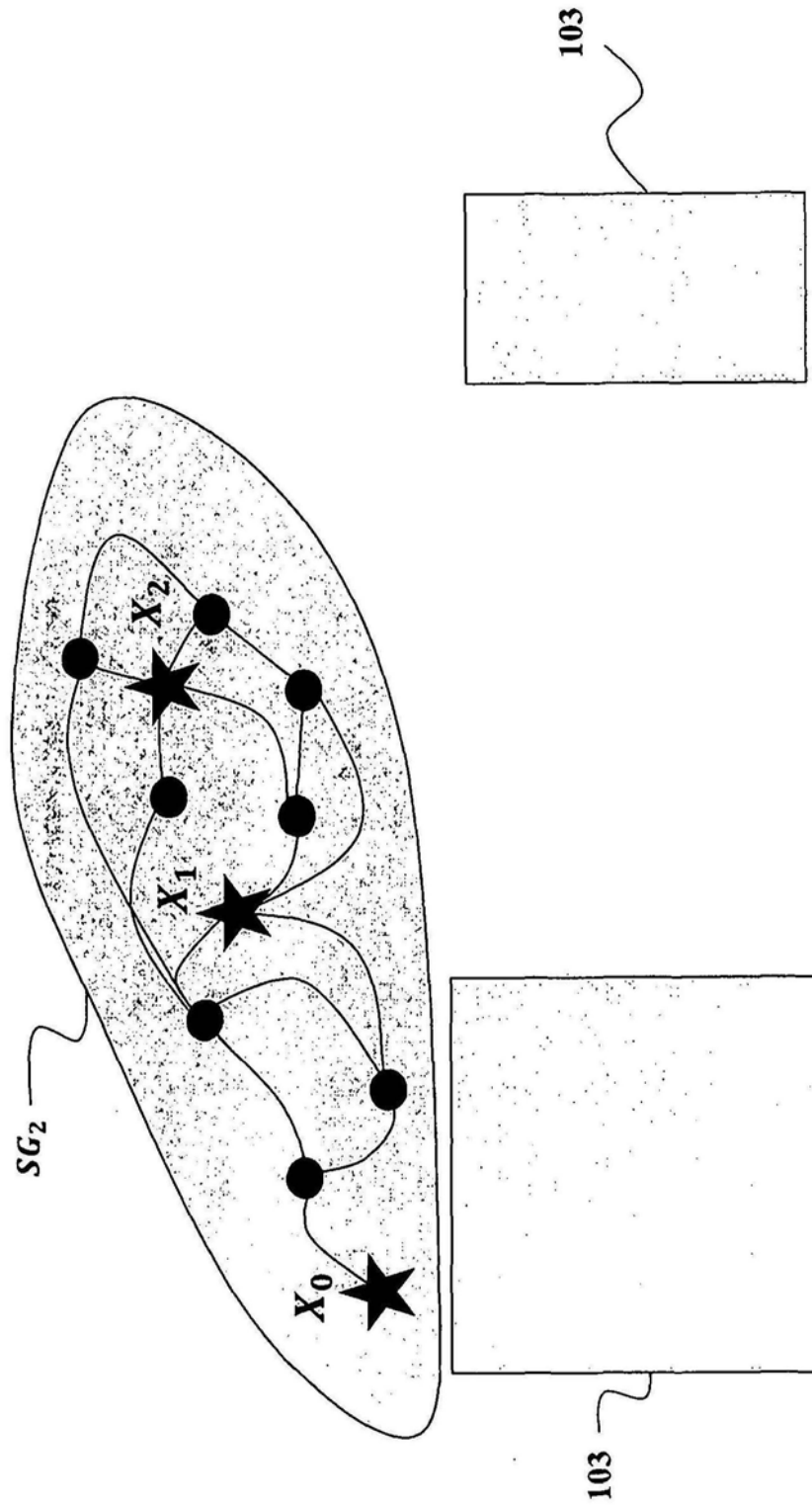


图6C

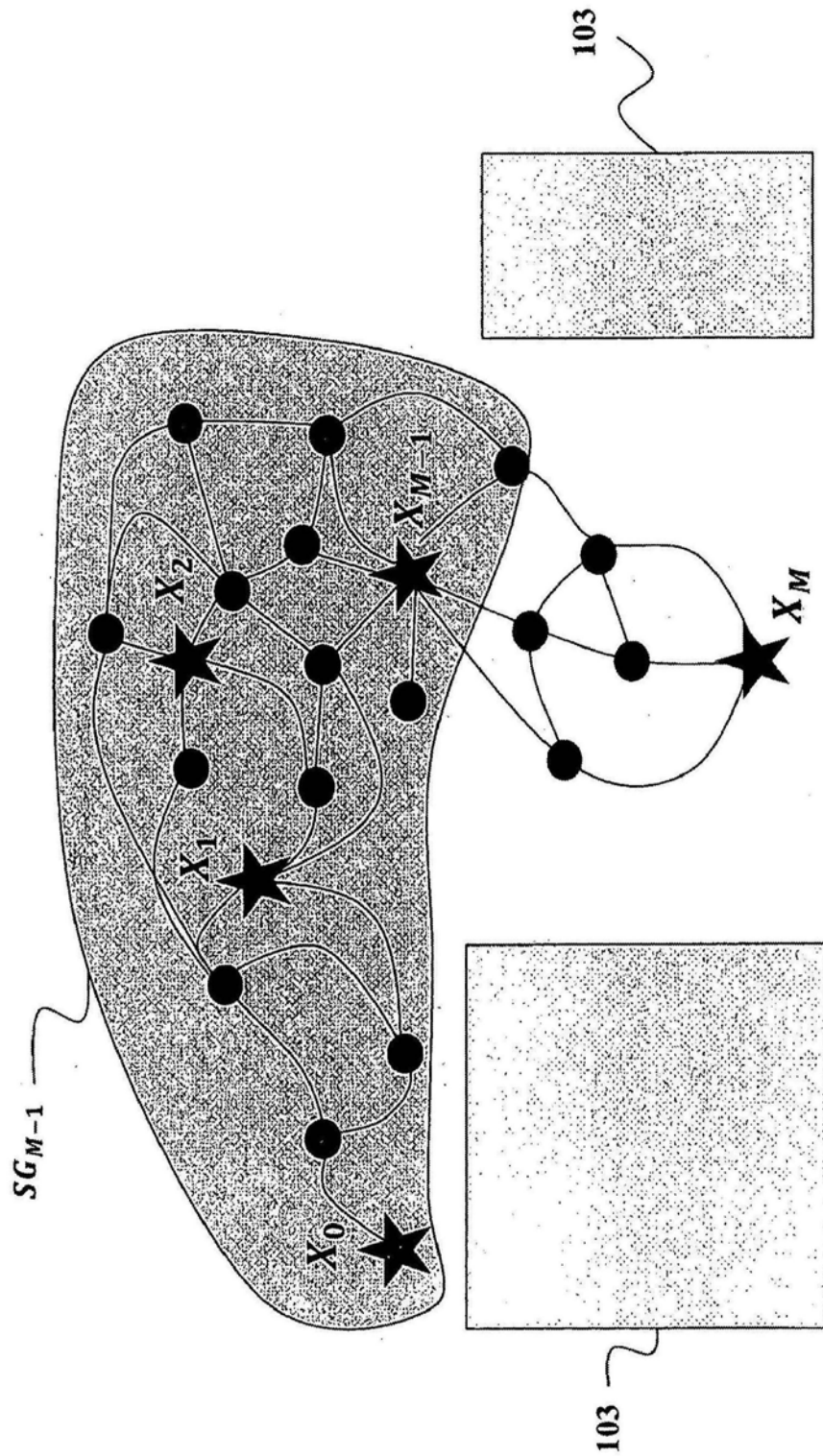


图6D

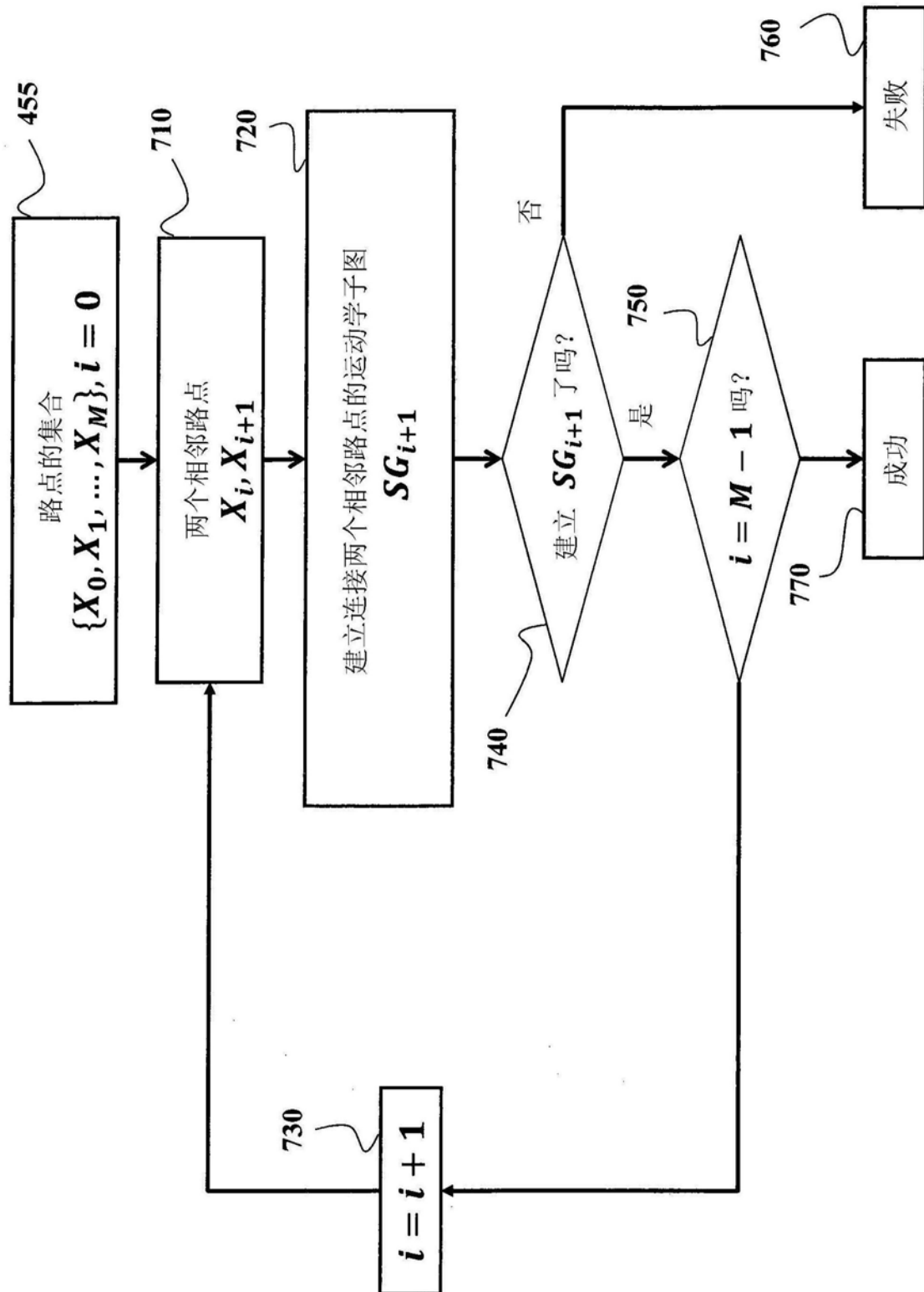


图7A

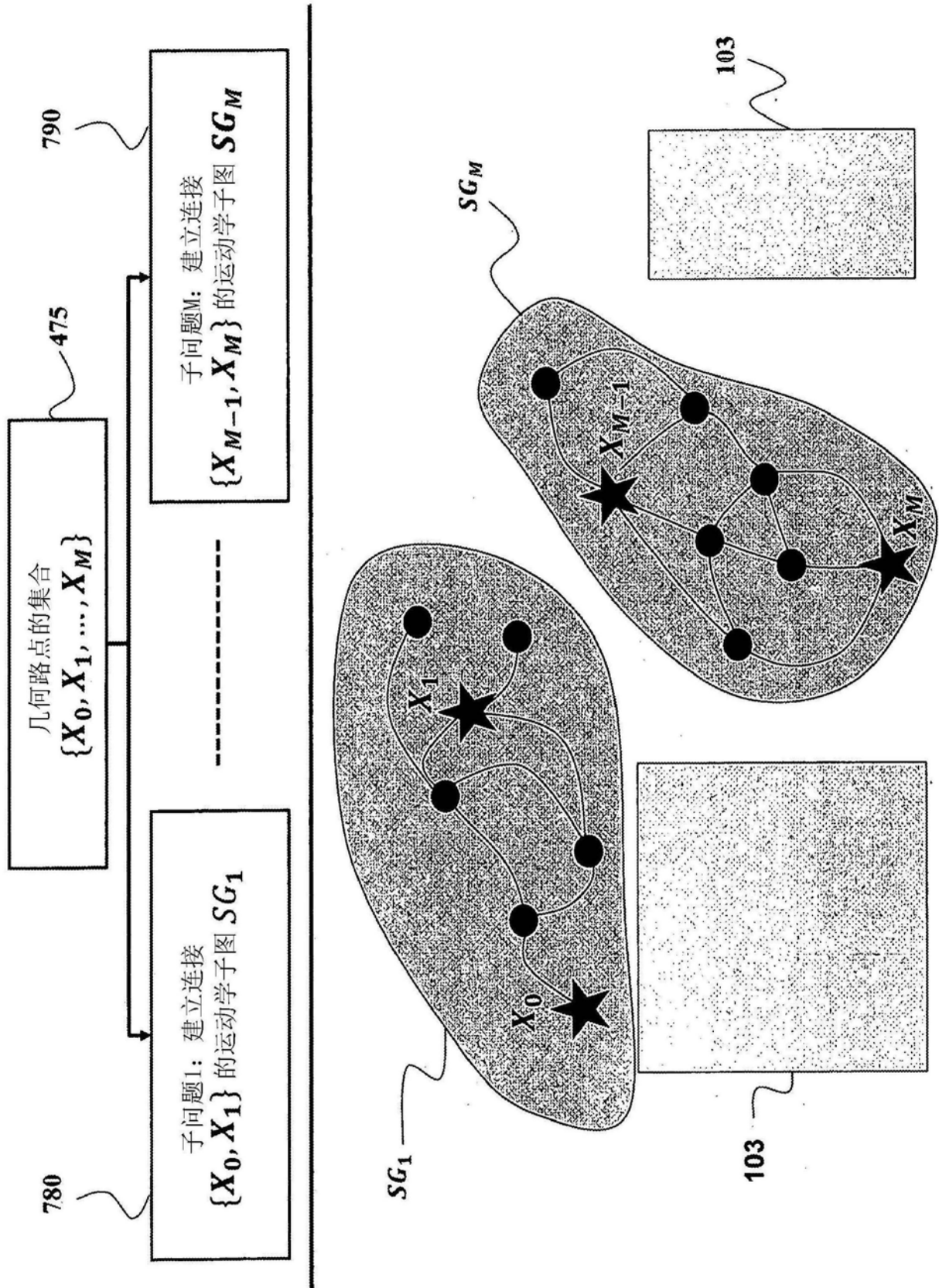


图7B

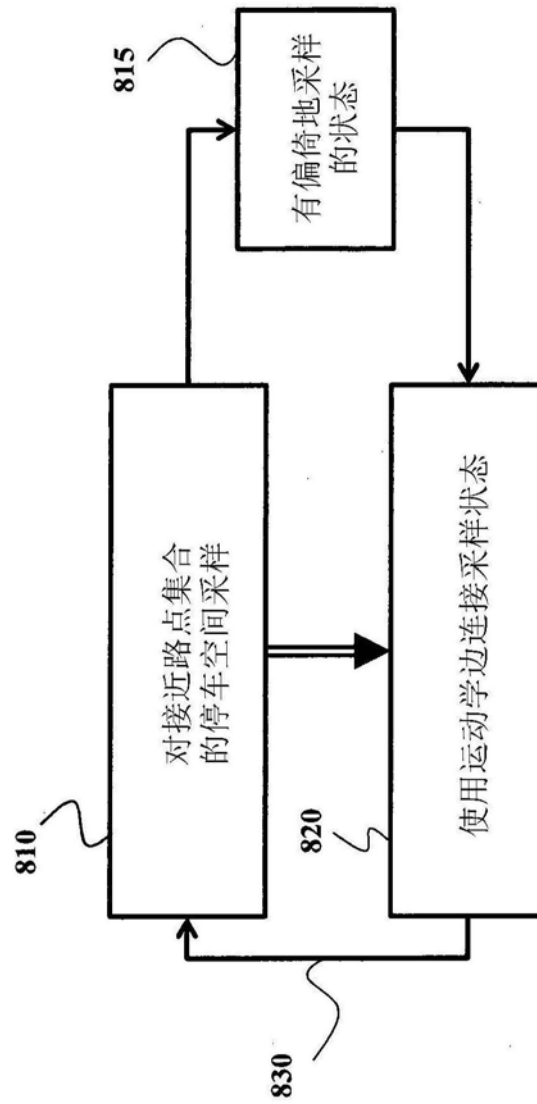


图8

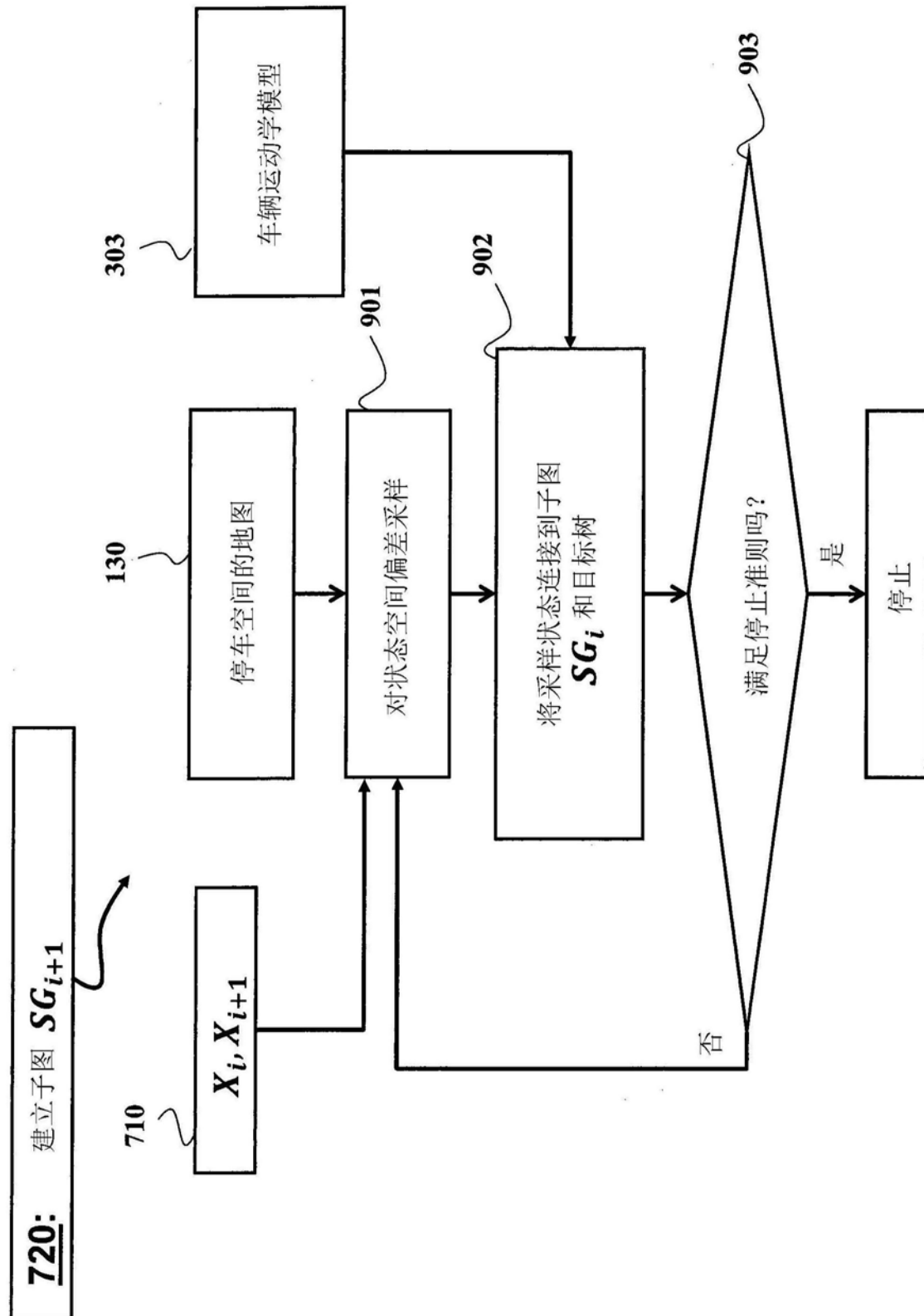


图9A

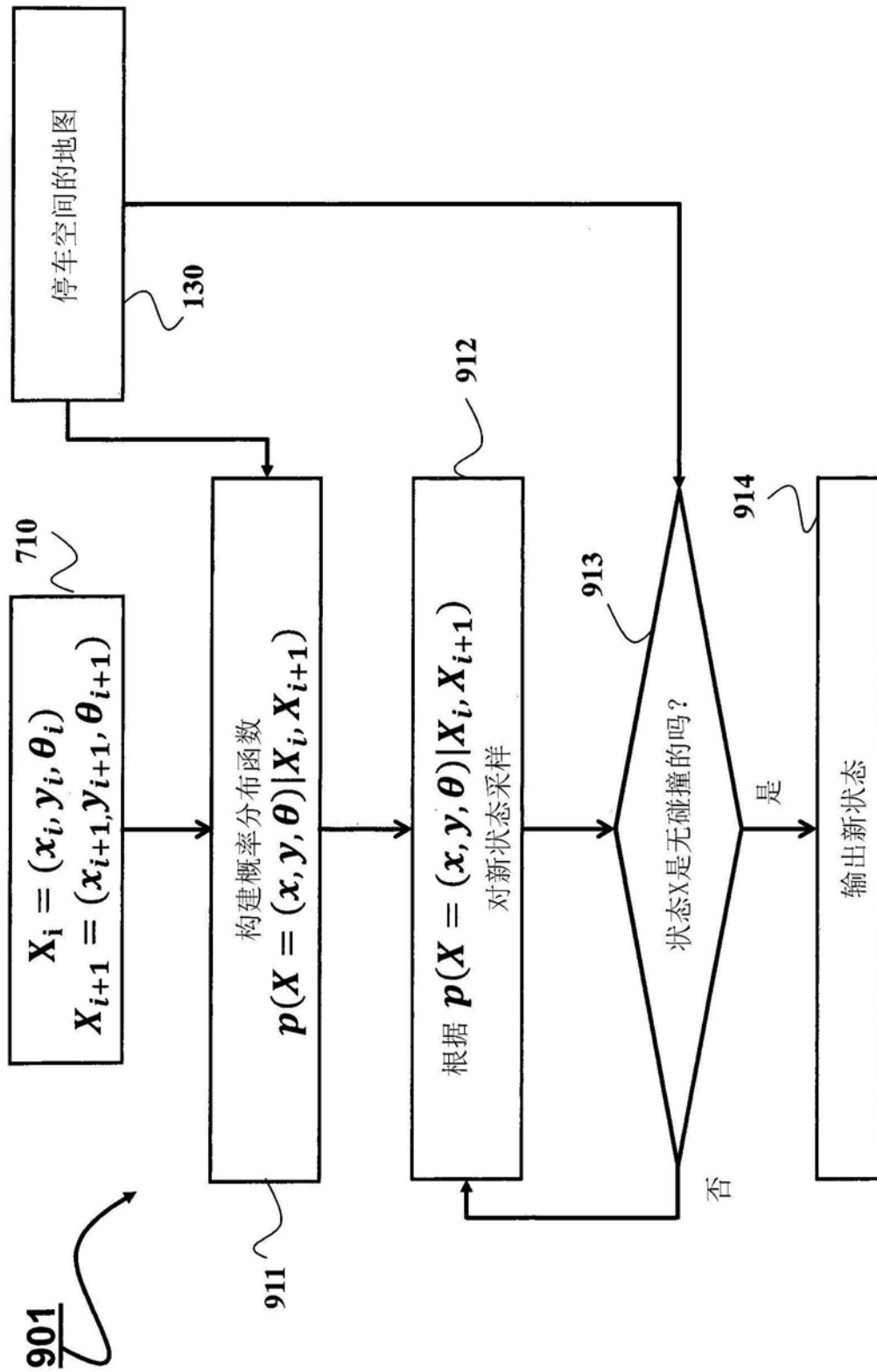


图9B

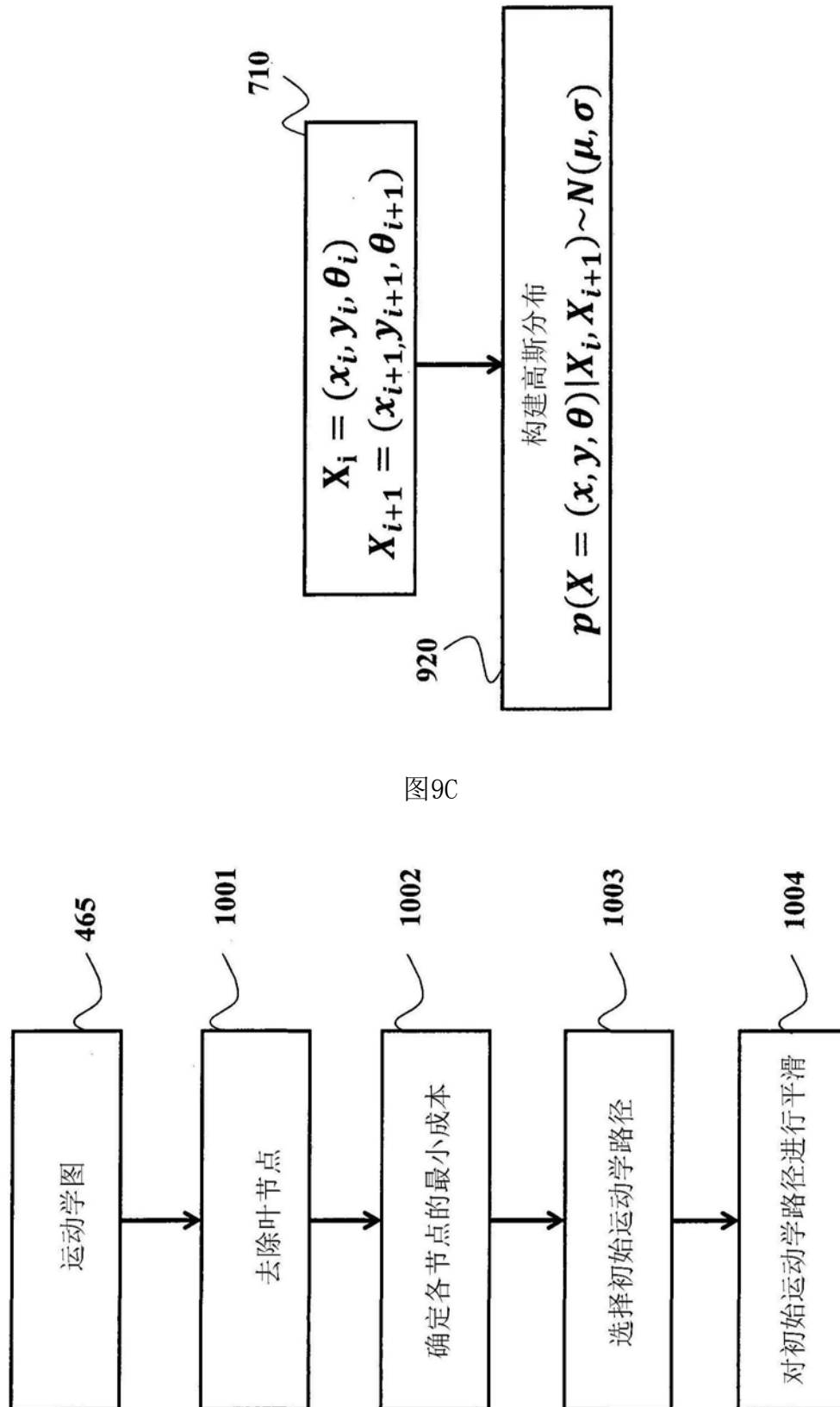


图9C

图10

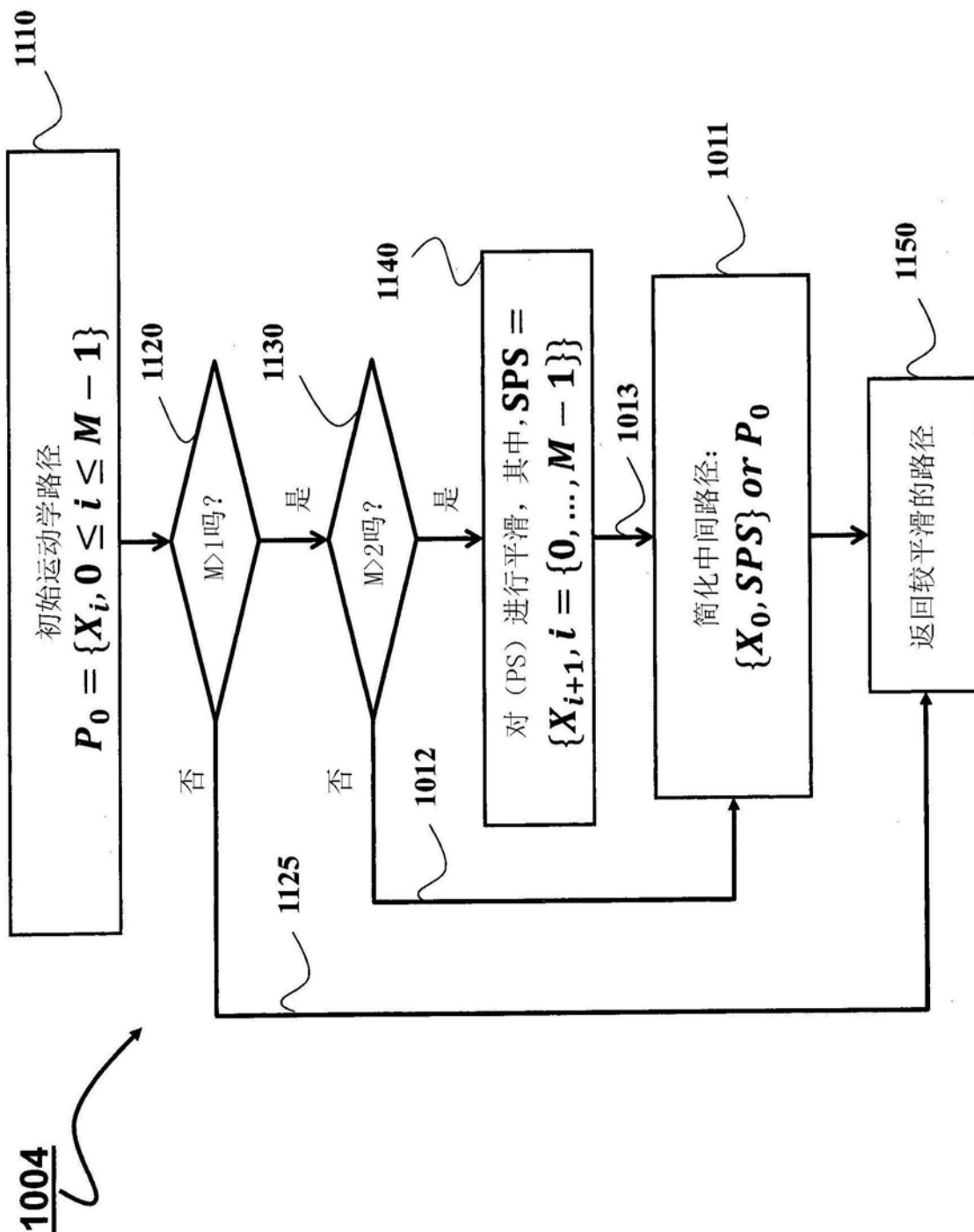


图11A

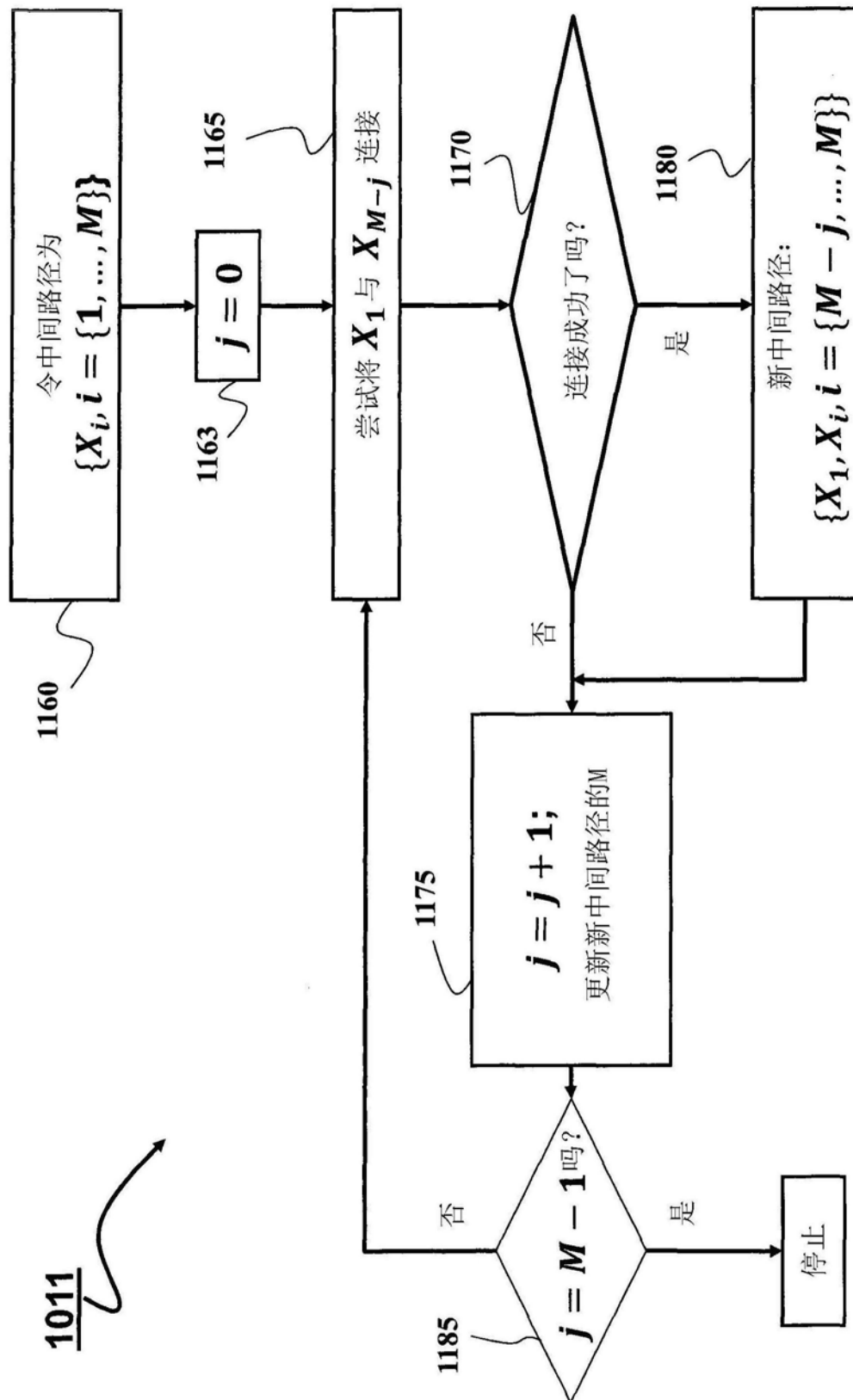


图11B

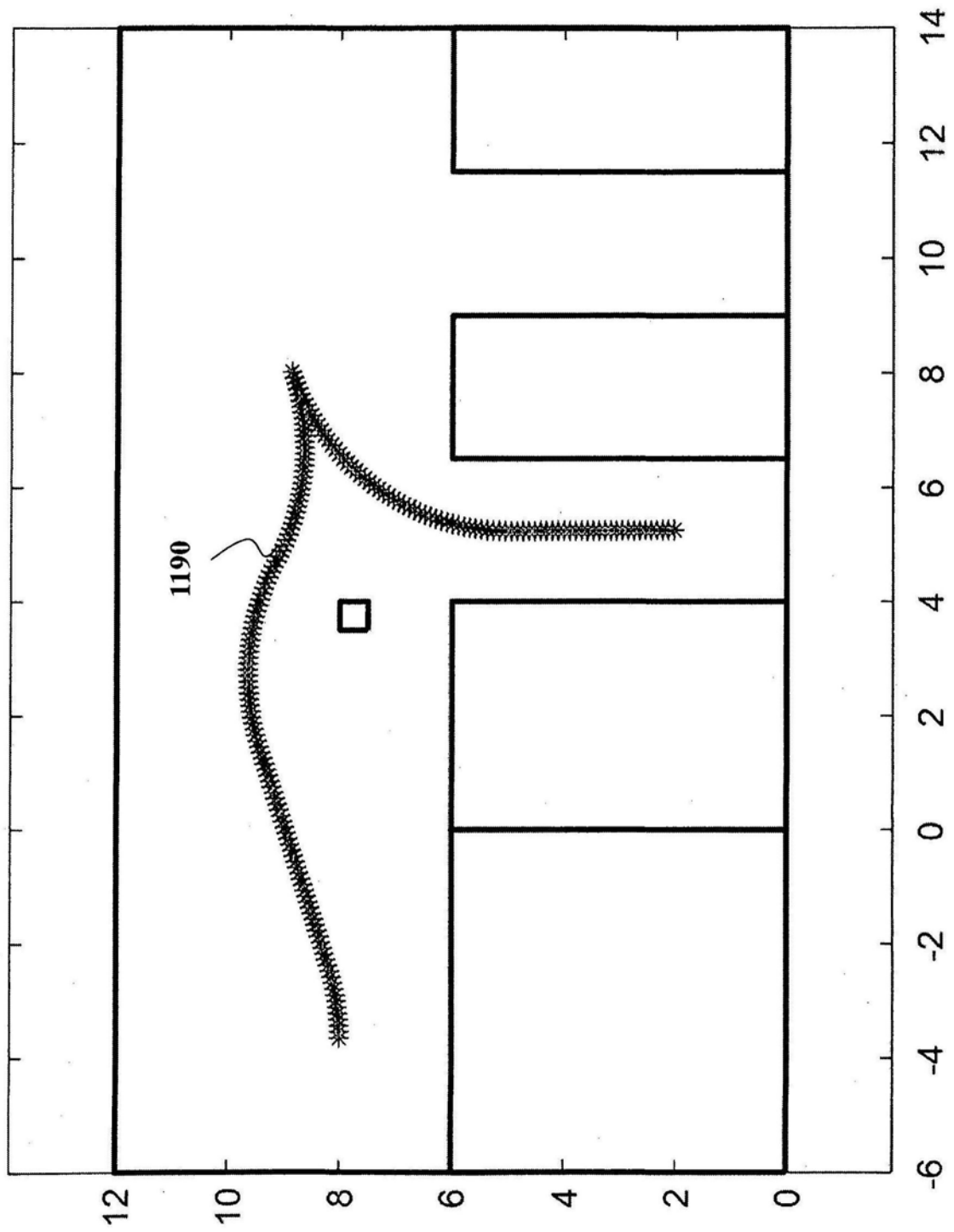


图11C

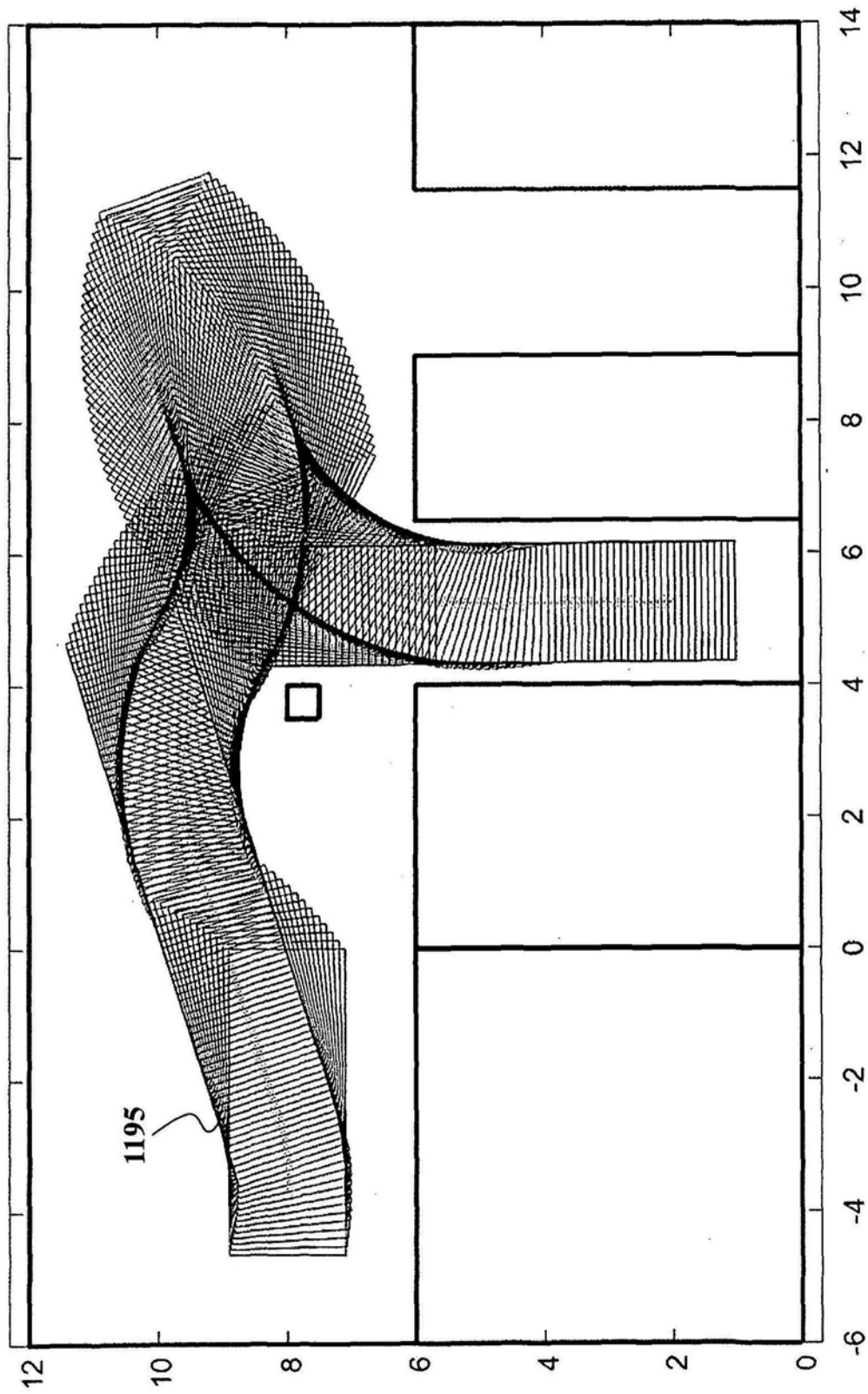


图11D

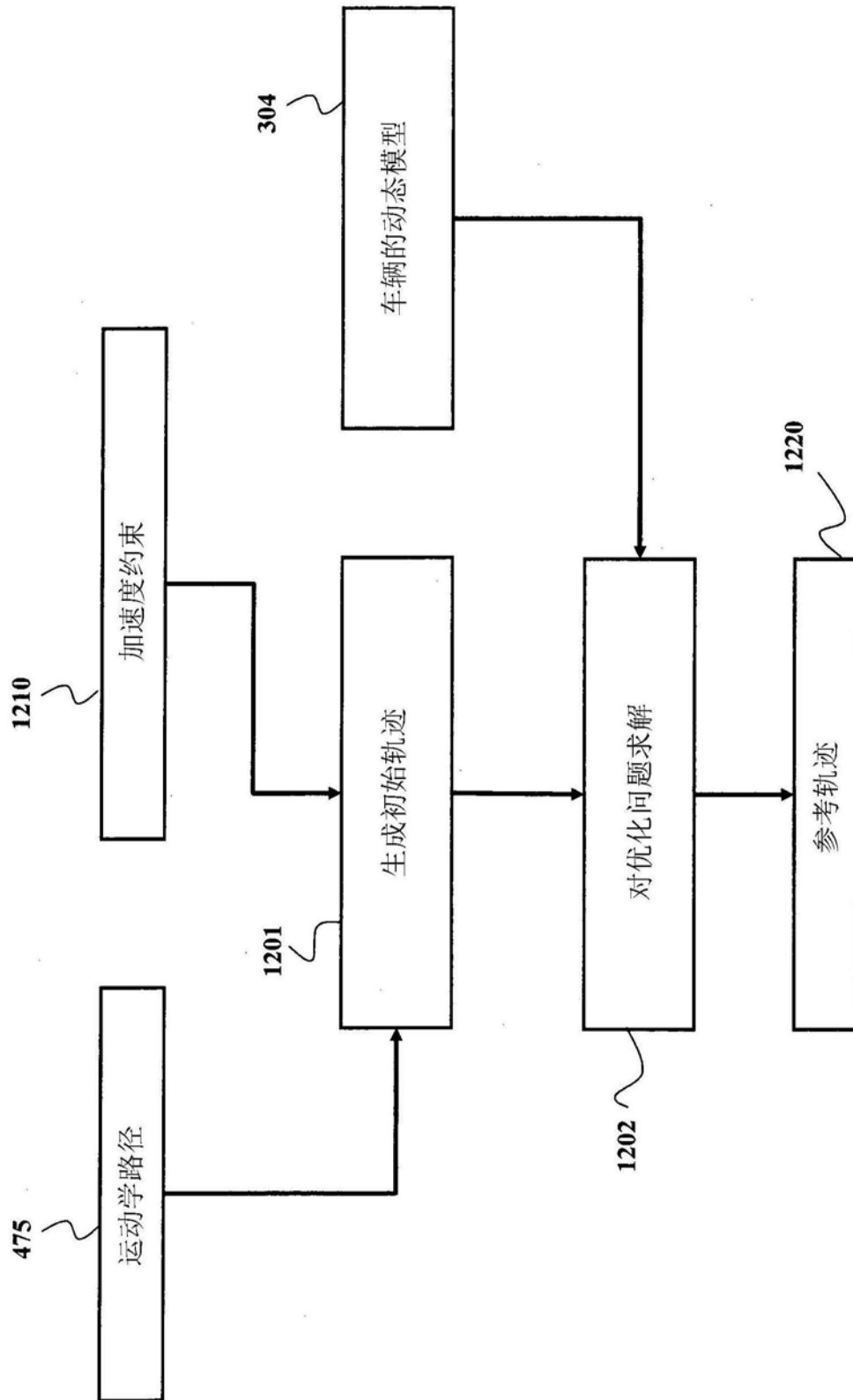


图12

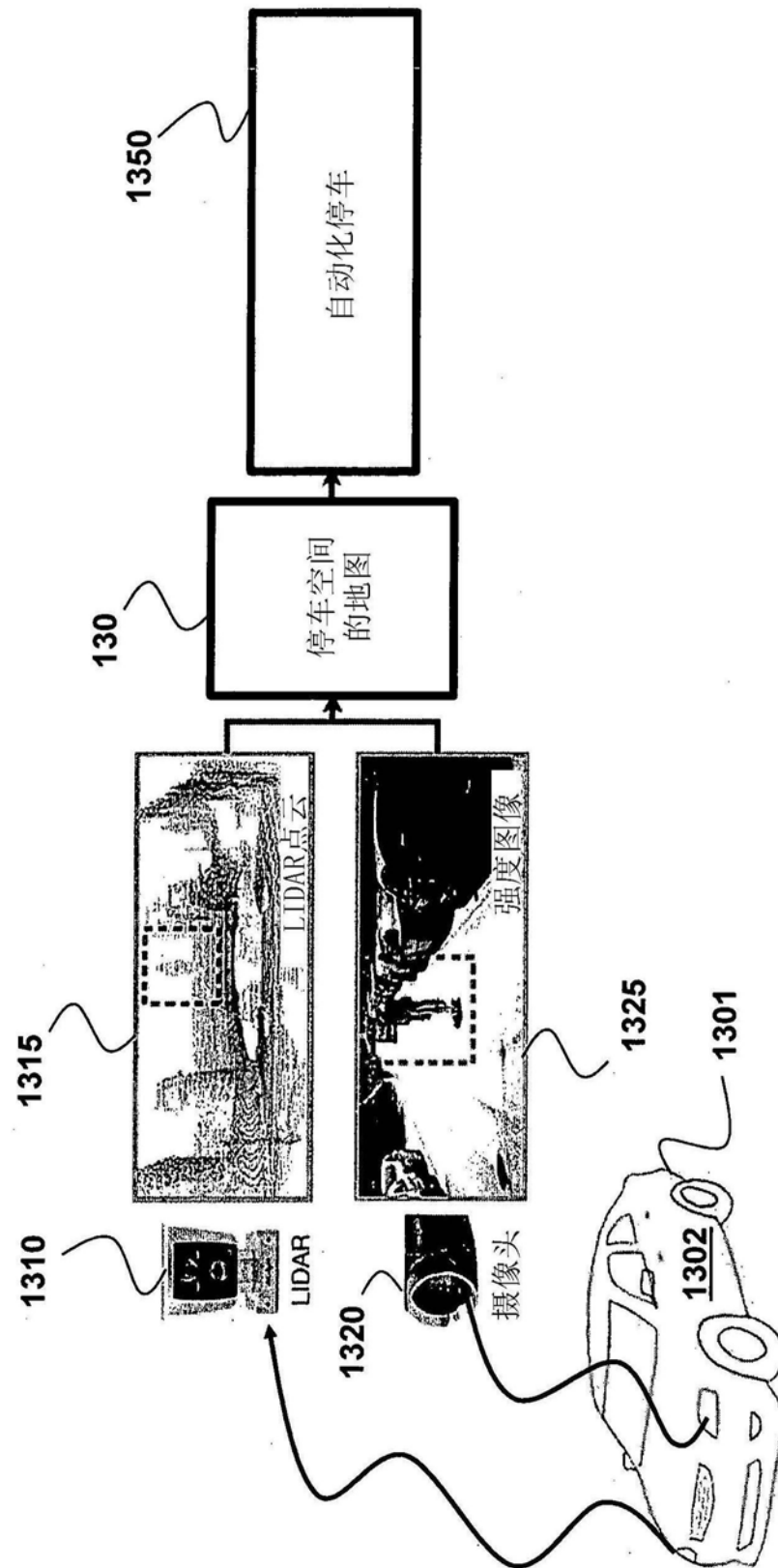


图13

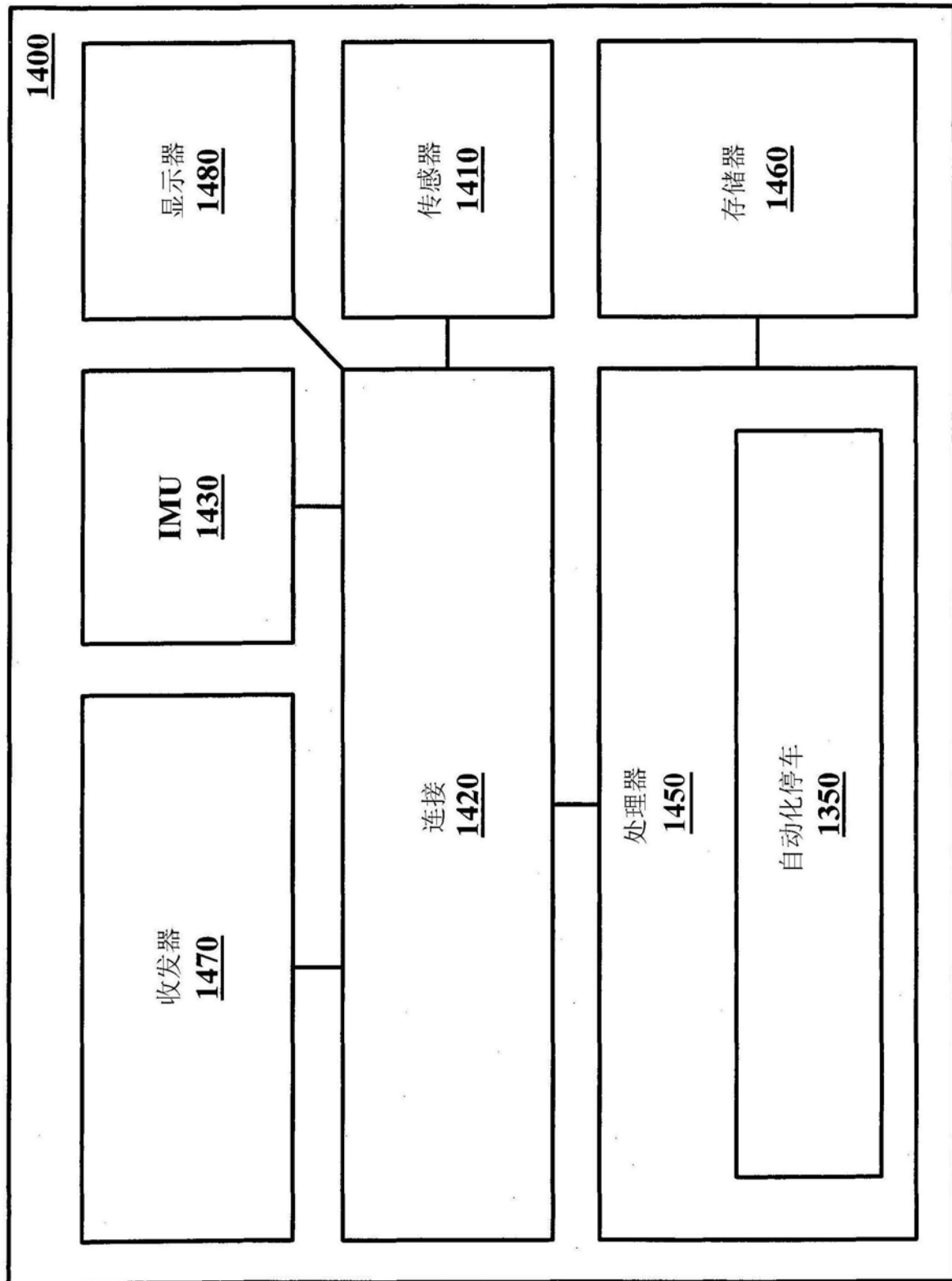


图14