

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 4 月 30 日 (30.04.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/082768 A1

- (51) 国际专利分类号:
G05D 1/10 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/092627
- (22) 国际申请日: 2019 年 6 月 25 日 (25.06.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811229466.3 2018 年 10 月 22 日 (22.10.2018) CN
- (71) 申请人: 南京航空航天大学 (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) [CN/CN]; 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210001 (CN)。
- (72) 发明人: 魏小辉 (WEI, Xiaohui); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210001 (CN)。 廖

玮 (LIAO, Wei); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210001 (CN)。 李旭波 (LI, Xubo); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210001 (CN)。 高天驰 (GAO, Tianchi); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210001 (CN)。 李龙 (LI, Long); 中国江苏省南京市秦淮区御道街 29 号, Jiangsu 210001 (CN)。

(74) 代理人: 江苏圣典律师事务所 (JIANGSU SUNDY LAW FIRM); 中国江苏省南京市建邺区奥体大街 68 号 4A 栋 6 层, 杨文晰, Jiangsu 210019 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) **Title:** MULTI-BODY FORMATION RECONSTRUCTION METHOD FOR UNMANNED DEVICE CLUSTER CONTROL

(54) 发明名称: 一种用于无人设备集群控制的多体队形重构方法

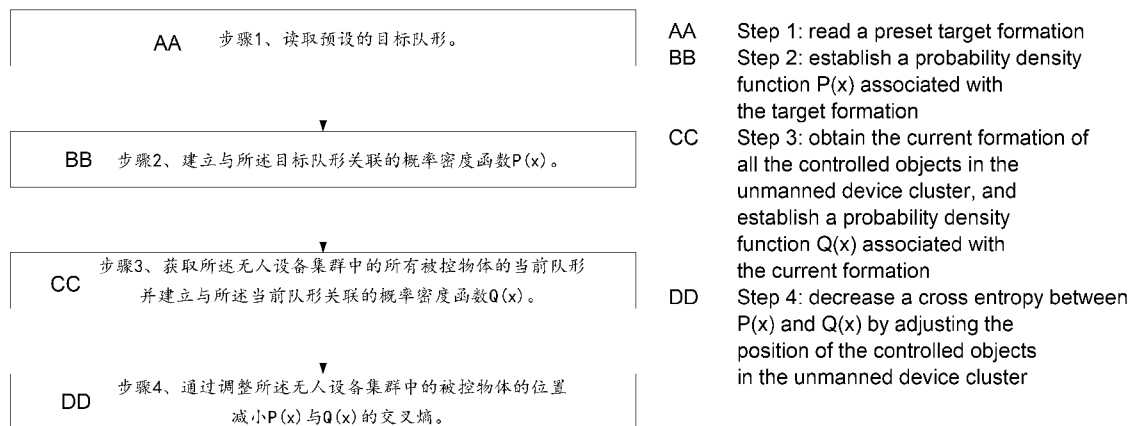


图 6

(57) **Abstract:** Multi-body formation reconstruction method for unmanned device cluster control Embodiments of the present invention relate to the technical field of unmanned device cluster control. Disclosed is a multi-body formation reconstruction method for an unmanned device cluster control. The method can solve the problem of being difficult to deal with the interference operating condition at present. The present invention comprises: step 1: reading a preset target formation; step 2: establishing a probability density function associated with the target formation; step 3: obtaining the current formation of all the controlled objects in the unmanned device cluster, and establishing a probability density function associated with the current formation; step 4: decreasing a cross entropy by adjusting the position of the controlled objects in the unmanned device cluster; and repeating executing the step 3 and the step 4 until the formation composed by the controlled objects in the unmanned device cluster is consistent with the target formation. The present invention is applicable for multi-body formation reconstruction of the unmanned device cluster control.

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

— 发明人资格(细则4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明实施例公开了一种用于无人设备集群控制的多体队形重构方法, 涉及无人设备集群控制技术领域, 能够缓减目前难以应对受到干扰的工况的问题。本发明包括: 步骤1、读取预设的目标队形; 步骤2、建立与所述目标队形关联的概率密度函数; 步骤3、获取所述无人设备集群中的所有被控物体的当前队形, 并建立与所述当前队形关联的概率密度函数; 步骤4、通过调整所述无人设备集群中的被控物体的位置, 减小交叉熵; 重复执行步骤3和步骤4, 直至所述无人设备集群中的被控物体组成的队形与所述目标队形一致。本发明适用于无人设备集群控制的多体队形重构。

一种用于无人设备集群控制的多体队形重构方法

技术领域

本发明涉及无人设备集群控制技术领域，尤其涉及一种用于无人设备集群控制的多体队形重构方法。

5 背景技术

近年来，无人设备集群技术开始被尝试应用在各个领域，例如无人机集群，无人车集群的应用就越来越广泛，尤其是在表演，运输，侦察等任务中均有或多或少的运用。在这些任务中，将集群中的个体排列成特定的队形成为了关键问题之一。随着集群中个体数量的增加，队形重构问题也变得越来越复杂，主要体现在路径规划，防止碰撞等方面。

队形重构一般可以分为三个子任务：第一，控制被控物体的队形变换到目标队形；第二，保持队形稳定，在扰动下能够自行恢复；第三，在移动过程中避免碰撞。目前现有的队形重构算法大多基于Leader-Follower模式，需要在所有的被控物体中确定一个leader，其它的个体作为follower按照某种方式跟随leader。还有一些算法是根据leader-follower模式改进而来的，例如将队形结构视作Henneberg结构的模式。这些算法都需要事先将队形中的位置与被控物体一一对应，然后进行路径规划。并且需要设定好充当follower、leader的无人设备，在任务执行过程中如果遭遇外界干扰导致当前队形被扰乱则需要对路径重新规划。

但在实际应用中，一旦集群的规模太大则几乎难以实时得通过路径重新规划，来解决外界干扰导致当前队形被扰乱的问题，就比方说：于2018年5月1日在西安城墙永宁门举行的1374架无人机编队表演，在实际演出过程中出现了重

大失误，结果是集群中的无人机大量掉落，事故原因被初步认定为，由于干扰或者设备故障的，无人机无法接收到GPS信号的情况，从而导致作为leader的无人机失控。这就是由于现有的控制算法难以应对受到干扰的工况，导致了所有直接或者间接跟随的无人机出现了混乱。

5 发明内容

本发明的实施例提供一种用于无人设备集群控制的多体队形重构方法，能够缓减目前leader-follower模式的控制算法中，难以应对受到干扰的工况的问题。

为达到上述目的，本发明的实施例采用如下技术方案：

10 步骤1、读取预设的目标队形，所述目标队形是由指定数量的点的坐标构成的集合，所述指定数量匹配所述无人设备集群中的无人设备的数量；

步骤2、建立与所述目标队形关联的概率密度函数 $P(x)$ ；

步骤3、获取所述无人设备集群中的所有被控物体的当前队形，并建立与所述当前队形关联的概率密度函数 $Q(x)$ ；

15 步骤4、通过调整所述无人设备集群中的被控物体的位置，减小 $P(x)$ 与 $Q(x)$ 的交叉熵；

重复执行步骤3和步骤4，直至所述无人设备集群中的被控物体组成的队形与所述目标队形一致。

本实施例提供的多体队形重构的算法，做到了实时计算飞行并调整集群的
20 飞行队形，无需事先将队形中的位置与被控物体建立一一对应的关系，无需事先进行路径规划，各被控物体不存在 leader 和 follower 之分，每个个体按照算法产生的指令移动时不会发生碰撞，从而也就缓减了目前 leader-follower 模式的控制算法中，难以应对受到干扰的工况的问题。

附图说明

为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案，下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还

5 可以根据这些附图获得其它的附图。

图1为本发明实施例提供的目标队形示意图；

图2为本发明实施例提供的与目标队形有关的概率密度函数的等高线图；

图3为本发明实施例提供的被控物体的当前队形示意图；

图4为本发明实施例提供的与当前队形有关的概率密度函数的等高线图；

10 图5为本发明实施例提供的被控物体运行轨迹示意图；

图6为本发明实施例提供的方法流程示意图。

具体实施方式

为使本领域技术人员更好地理解本发明的技术方案，下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细描述。下文中将详细描述本发明的实施方式，

15 所述实施方式的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施方案是示例性的，仅用于解释本发明，而不能解释为对本发明的限制。本技术领域技术人员可以理解，除非特意声明，这里使用的单数形式“一”、“一个”、

“所述”和“该”也可包括复数形式。应该进一步理解的是，本发明的说明书
20 中使用的措辞“包括”是指存在所述特征、整数、步骤、操作、元件和/或组件，但是并不排除存在或添加一个或多个其他特征、整数、步骤、操作、元件、组件和/或它们的组。应该理解，当我们称元件被“连接”或“耦接”到另一元件时，它可以直接连接或耦接到其他元件，或者也可以存在中间元件。此外，这

里使用的“连接”或“耦接”可以包括无线连接或耦接。这里使用的措辞“和/或”包括一个或多个相关联的列出项的任一单元和全部组合。本技术领域技术人员可以理解，除非另外定义，这里使用的所有术语（包括技术术语和科学术语）具有与本发明所属领域中的普通技术人员的一般理解相同的意义。还应
5 该理解的是，诸如通用字典中定义的那些术语应该被理解为具有与现有技术的上下文中的意义一致的意义，并且除非像这里一样定义，不会用理想化或过于正式的含义来解释。

本发明实施例提供一种用于无人设备集群控制的多体队形重构方法，如图6所示，包括：

10 步骤1、读取预设的目标队形。

其中，所述目标队形是由指定数量的点的坐标构成的集合，所述指定数量匹配所述无人设备集群中的无人设备的数量。

步骤2、建立与所述目标队形关联的概率密度函数 $P(x)$ 。

15 步骤3、获取所述无人设备集群中的所有被控物体的当前队形，并建立与所述当前队形关联的概率密度函数 $Q(x)$ 。

步骤4、通过调整所述无人设备集群中的被控物体的位置，减小 $P(x)$ 与 $Q(x)$ 的交叉熵。

重复执行步骤3和步骤4，直至所述无人设备集群中的被控物体组成的队形与所述目标队形一致。

20 在本实施例中，步骤1中读取预设的目标队形的具体方式，包括：

获取所述目标队形中各个点的坐标的集合 $\{X_i\}$ 。

其中， $\{X_i\}$ 中的元素表示所述目标队形中各个点的目标位置， $i = 1, 2, \dots, N$ ，所述目标队形中的点表示为 $X_i = \{X_i^j\}$ ， X_i^j 表示第 i 个目标位置的坐标第 j 个分

量, $j = 1, \dots, n$, n 表示根据目标队形所在空间的维数, n 取值为2或3。

在本实施例中, 步骤2中建立与所述目标队形关联的概率密度函数 $P(x)$ 的具体方式, 包括:

确定以 X_i 为均值的多元正态分布 $P_i(x)$, 其中:

$$P_i(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sigma^n} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{X_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]$$

5 建立与所述目标队形关联的概率密度函数 $P(x)$, 其中, $P(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(x)$, $x = \{x^j\}$, x^j 表示其第 j 个分量, $j = 1, \dots, n$, N 表示被控物体的数量, n 表示根据目标队形所在空间的维数, n 的取值可以为2或3, σ 表示正态分布的标准差。

由于 $P_i(x)$ 是建立在 n 维空间里的一个函数, 所以自变量 x 有 n 个分量, x^j 表示 x 的第 j 个分量, x 就是一个形式参数, 好比常用 $f(x)=x+1$ 表示一个 x 的函数, 此处
10 的 x 就是一个形式参数, 那么 $f(y)=y+1$, 不论形式参数换成什么字母, 函数 f 所表示的意思是不变的。

最终的概率密度函数 $P(x)$ 可以表示为:

$$P(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sigma^n} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{X_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]$$

其中, $P_i(x)$ 是一个多元正态分布的概率密度函数, 这个多元正态分布的均
15 值是

$(X_i^1, \dots, X_i^n)$, 标准差是 σ , 其中的 x 指代集合 $(x^1, \dots, x^n)$ 中的元素, 即 $P_i(x)$ 表示成 $P_i(x^1, \dots, x^n)$ 。

在本实施例中, 步骤3中建立与所述当前队形关联的概率密度函数 $Q(x)$ 的具体方式, 包括:

20 获取所述当前队形中的所有被控物体的坐标的集合 $\{Y_i\}$, 其中, $Y_i = \{Y_i^j\}$, Y_i^j 表示所述当前队形中的第 i 个被控物体位置的坐标第 j 个分量。

确定以 Y_i^j 为均值的多元正态分布 $Q_i(x)$ ，其中：

$$Q_i(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sigma^n} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]$$

建立与所述当前队形关联的概率密度函数 $Q(x)$ ，其中， $Q(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i(x)$ ， $x = \{x^j\}$ ， $j = 1, \dots, n$ ， N 表示被控物体的数量， σ 表示正态分布的标准差。

最终的 $Q(x)$ 可以表示为：

5

$$Q(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sigma^n} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]$$

其中， $Q_i(x)$ 是一个以 Y_i 为均值， σ 为标准差的 n 元正态分布概率密度函数，自变量 x 有 n 个分量， x^j 表示 x 的第 j 个分量。 $Y_i = \{Y_i^j\}$ ， Y_i^j 表示所述当前队形中的第 i 个被控物体位置的坐标第 j 个分量。 $Q_i(x)$ 也是建立在 n 维空间里的一个函数，

10

所以自变量 x 有 n 个分量， x^j 表示 x 的第 j 个分量， x 就是一个形式参数，好比常用 $f(x)=x+1$ 表示一个 x 的函数，此处的 x 就是一个形式参数，那么 $f(y)=y+1$ ，不论形式参数换成什么字母，函数 f 所表示的意思是不变的。

在本实施例中，步骤4中通过调整所述无人设备集群中的被控物体的位置，

15

减小 $P(x)$ 与 $Q(x)$ 的交叉熵，包括：

获取梯度下降模型，所述梯度下降模型为： $Y_i = Y_i - \gamma \frac{\partial E}{\partial Y_i}$ 。

其中， $\frac{\partial E}{\partial Y_i} = -\mathbb{E}_{X \sim P} \left[\frac{1}{NQ(X)} \frac{\partial Q_i(X)}{\partial Y_i} \right]$ ，由于这个期望的解析解较难求出，因此采取蒙特卡洛方法计算，在以 $P(x)$ 为概率密度函数的随机变量中采样 M 次，获得样本

$\{X_m\}$ ， $m = 1, 2, \dots, M$ ，因此 $\frac{\partial E}{\partial Y_i} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{NQ(X_m)} \frac{\partial Q_i(X_m)}{\partial Y_i}$ 。

20

所述交叉熵为： $E = -\int_{\Omega} P(x) \ln[Q(x)] dx$ ， $\Omega = \{(x^1, \dots, x^n) | x^1, \dots, x^n \in$

$(-\infty, +\infty)\}$ 。

利用所述梯度下降模型，更新所述被控物体的位置：

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial Y_i} &= - \int_{\Omega} P(x) \frac{\partial \ln[Q(x)]}{\partial Y_i} dx = - \int_{\Omega} P(x) \frac{1}{NQ(x)} \frac{\partial Q_i(x)}{\partial Y_i} dx \\ &= - \mathbb{E}_{X \sim P} \left[\frac{1}{NQ(X)} \frac{\partial Q_i(X)}{\partial Y_i} \right]\end{aligned}$$

其中， $Q_i(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sigma^n} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]$ ， $\mathbb{E}$ 表示计算期望值，且每次

更新所述被控物体的位置时，将位于 Y_i 处的被控物体移动至 $Y_i - \gamma \frac{\partial E}{\partial Y_i}$ ，

5 γ 用于表示移动的速率， γ 是一个大于0的常数。

进一步的，在每一次重复执行步骤3之前，衰减 σ 。由于本实施例采用的算法类似于优化，为了避免陷入局部最优解，应当将参数 σ 的初始值取的足够大，随着任务的进行，为了加快收敛速度，可以让 σ 随时间衰减。

在优选方案中，初始状态下 $\sigma = 10$ ，即在第一次执行步骤3时， $\sigma = 10$ 。

10 目前现有的队形重构算法大多基于 Leader-Follower 模式，需要在所有的被控物体中确定一个 leader，其它的个体作为 follower 按照某种方式跟随 leader，其中包括：

(1) 按照距离的方式：使得每一个 follower 与 leader 及它们的邻近个体保持一定的距离从而达到队形重构和保持的目的；

15 (2) 按照相对位置的方式：使得每一个 follower 相对 leader 的位置达到控制目标从而达到队形重构和保持的目的；

(3) 事件驱动的方式：将 leader 周围的空间划分为若干个区域，将 follower 穿越区域的分隔面作为事件传给控制器，然后控制器根据这些事件产生控制指令使得 follower 到达并保持在指定区域。

然而现有的算法并没有考虑对于由相同的个体构成的集群，任意两个个体互换，其队形不变的特性，从而增加了计算的复杂性。而且在任务执行过程中如果遭遇外界干扰导致当前队形被扰乱则需要对路径重新规划。

本实施例提供的方案，能够较为有效的解决上述问题，举例来说：

- 5 如图 1 所示的目标队形示意图，将一个由 20 个被控物体构成的无人机集群由任意初始位置重构成一个 S 形队列。

执行步骤 1，获取 S 形队列中所有点的坐标的集合 $\{X_i\}$ ：

$$\left\{ \left(5 + 2\cos\left(\frac{2\pi}{20}n\right), 6 + 2\sin\left(\frac{2\pi}{20}n\right) \right) \middle| n = 6, \dots, 15 \right\} \cup \left\{ \left(5 + 2\cos\left(\frac{2\pi}{20}n\right), 2 + 2\sin\left(\frac{2\pi}{20}n\right) \right) \middle| n = 15, \dots, 24 \right\}。$$

- 10 执行步骤 2，令 $P(x) = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} P_i(x)$ ，其中

$$P_i(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^2 \sigma^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \left(\frac{x_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]。P(x)的计算结果可参照如图 2 所示的与目标队形有关的概率密度函数的等高线图。$$

执行步骤 3，获取所有被控物体的当前队形用集合 $\{Y_i\}$ 表示，其中 $Y_i = \{Y_i^j\}$ ，并建立一个与所有被控物体当前队形有关的概率密度函数 $Q(x)$ ， $Q(x) =$

- 15 $\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} Q_i(x)$ ，其中 $Q_i(x)$ 是以 Y_i 为均值， σ 为标准差的多元正态分布即：

$$Q_i(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^2 \sigma^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \left(\frac{Y_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]$$

其中 $\sigma = 10$ 。

算结果可参照如图 4 所示的与当前队形有关的概率密度函数的等高线图，此时被控物体的当前队形可参照如图 3。

- 20 执行步骤 4，调整所有被控物体的位置使得 P 和 Q 的交叉熵变小；计算交叉熵的方法是：

$$E = - \int_{\Omega} P(x) \ln[Q(x)] dx$$

通过梯度下降法调整被控物体的位置，即用下式更新被控物体的位置：

$$Y_i = Y_i - 0.1 \frac{\partial E}{\partial Y_i}$$

其中： $\frac{\partial E}{\partial Y_i} = -\mathbb{E}_{X \sim P} \left[\frac{1}{20Q(X)} \frac{\partial Q_i(X)}{\partial Y_i} \right]$ ，由于这个期望的解析解较难求出，因此采取蒙特卡洛方法计算，在以 $P(x)$ 为概率密度函数的随机变量中采样 2048 次，每次采样的方法为：首先在集合 $\{1, 2, \dots, 20\}$ 中随机选择一个数，记作 i ，然后在以 $P_i(x)$ 为概率密度函数的随机变量中采样一次。获得样本 $\{X_m\}$ ， $m = 1, 2, \dots, 2048$ ，

$$\text{因此 } \frac{\partial E}{\partial Y_i} = \frac{1}{2048} \sum_{m=1}^{2048} \frac{1}{20Q(X_m)} \frac{\partial Q_i(X_m)}{\partial Y_i};$$

重复执行步骤 3-4，，然后令 $\sigma = 0.995\sigma$ ，直到交叉熵达到最小值。被控物体运行轨迹可以参照图 5。

当 σ 的取值足够大时，在任务进行过程中，被控物体之间不会发生碰撞，原因如下：

设 Y_i, Y_j 为两个不同的被控物体的位置，则 Y_i, Y_j 之间距离的平方

$$d^2 = (Y_i - Y_j)(Y_i - Y_j)^T, \text{ 则 } \frac{\partial d^2}{\partial t} = 2(Y_i - Y_j) \left(\frac{\partial Y_i}{\partial t} - \frac{\partial Y_j}{\partial t} \right)^T \propto (Y_i - Y_j) \left(\frac{\partial E}{\partial Y_i} - \frac{\partial E}{\partial Y_j} \right)^T,$$

由于：

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial Y_i} &\propto \sum_{m=1}^{2048} (Y_i - X_m) \exp \left[-\frac{(Y_i - X_m)^2}{2\sigma^2} \right] \\ \frac{\partial E}{\partial Y_j} &\propto \sum_{m=1}^{2048} (Y_j - X_m) \exp \left[-\frac{(Y_j - X_m)^2}{2\sigma^2} \right] \end{aligned}$$

当 $\sigma \rightarrow +\infty$ 时， $\exp \left[-\frac{(Y_i - X_m)^2}{2\sigma^2} \right] = \exp \left[-\frac{(Y_j - X_m)^2}{2\sigma^2} \right]$ ，由于 $(Y_i - X_m) \neq$

$(Y_j - X_m)$, 所以 $\lim_{\sigma \rightarrow +\infty} \left(\frac{\partial E}{\partial Y_i} - \frac{\partial E}{\partial Y_j} \right) \neq 0$ 又因为 $\frac{\partial E}{\partial Y_i} - \frac{\partial E}{\partial Y_j}$ 关于 σ 是连续的, 因此存在一个 $s \in (0, +\infty)$ 使得当 $\sigma > s$ 时 $(Y_i - Y_j) \left(\frac{\partial E}{\partial Y_i} - \frac{\partial E}{\partial Y_j} \right)^T \neq 0$, 又因为 $\frac{\partial d^2}{\partial t}$ 关于时间 t 是连续的, 因此在任务执行过程中 $\frac{\partial d^2}{\partial t} \neq 0$, 即在任务执行过程中 $\frac{\partial d^2}{\partial t}$ 始终大于 0 或始终小于 0, 所以 d^2 关于时间 t 是单调的, 所以 d^2 的最小值出现在任务开始时
 5 或任务结束时, 在任务执行过程中不会发生碰撞。

本实施例提供的多体队形重构的算法, 做到了实时计算飞行并调整集群的飞行队形, 无需事先将队形中的位置与被控物体建立一一对应的关系, 无需事先进行路径规划, 各被控物体不存在 leader 和 follower 之分, 每个个体按照算法产生的指令移动时不会发生碰撞。

10 本说明书中的各个实施例均采用递进的方式描述, 各个实施例之间相同相似的部分互相参见即可, 每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处。尤其, 对于设备实施例而言, 由于其基本相似于方法实施例, 所以描述得比较简单, 相关之处参见方法实施例的部分说明即可。以上所述, 仅为本发明的具体实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内, 可轻易想到的变化或替换, 都应涵盖在本发明
 15 的保护范围之内。因此, 本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

权 利 要 求 书

1、一种用于无人设备集群控制的多体队形重构方法，其特征在于，包括：

步骤1、读取预设的目标队形，所述目标队形是由指定数量的点的坐标构成的集合，所述指定数量匹配所述无人设备集群中的无人设备的数量；

步骤2、建立与所述目标队形关联的概率密度函数 $P(x)$ ；

5 步骤3、获取所述无人设备集群中的所有被控物体的当前队形，并建立与所述当前队形关联的概率密度函数 $Q(x)$ ；

步骤4、通过调整所述无人设备集群中的被控物体的位置，减小 $P(x)$ 与 $Q(x)$ 的交叉熵；

重复执行步骤3和步骤4，直至所述无人设备集群中的被控物体组成的队形
10 与所述目标队形一致。

2、根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述读取预设的目标队形，包括：

获取所述目标队形中各个点的坐标的集合 $\{X_i\}$ ；

15 其中， $\{X_i\}$ 中的元素表示所述目标队形中各个点的目标位置， $i = 1, 2, \dots, N$ ，所述目标队形中的点表示为 $X_i = \{X_i^j\}$ ， X_i^j 表示第 i 个目标位置的坐标第 j 个分量， $j = 1, \dots, n$ ， n 表示根据目标队形所在空间的维数， n 取值为2或3。

3、根据权利要求2所述的方法，其特征在于，所述建立与所述目标队形关
20 联的概率密度函数 $P(x)$ ，包括：

确定以 X_i 为均值的多元正态分布 $P_i(x)$ ，其中：

$$P_i(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sigma^n} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{X_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]$$

建立与所述目标队形关联的概率密度函数 $P(x)$, 其中, $P(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(x)$,
 $x = \{x^j\}$, $j = 1, \dots, n$, N 表示被控物体的数量, σ 表示正态分布的标准差。

4、根据权利要求2所述的方法, 其特征在于, 所述建立与所述当前队形关
 5 联的概率密度函数 $Q(x)$, 包括:

获取所述当前队形中的所有被控物体的坐标的集合 $\{Y_i\}$, 其中, $Y_i = \{Y_i^j\}$, Y_i^j
 表示所述当前队形中的第 i 个被控物体位置的坐标第 j 个分量;

确定以 Y_i^j 为均值的多元正态分布 $Q_i(x)$, 其中:

$$Q_i(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sigma^n} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]$$

建立与所述当前队形关联的概率密度函数 $Q(x)$, 其中, $Q(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i(x)$,
 10 $x = \{x^j\}$, $j = 1, \dots, n$, N 表示被控物体的数量, σ 表示正态分布的标准差。

5、根据权利要求4所述的方法, 其特征在于, 所述通过调整所述无人设备
 集群中的被控物体的位置, 减小 $P(x)$ 与 $Q(x)$ 的交叉熵, 包括:

获取梯度下降模型, 所述梯度下降模型为: $Y_i = Y_i - \gamma \frac{\partial E}{\partial Y_i}$, 其中,

15 $\frac{\partial E}{\partial Y_i} = -\mathbb{E}_{X \sim P} \left[\frac{1}{NQ(X)} \frac{\partial Q_i(X)}{\partial Y_i} \right]$, $\frac{\partial E}{\partial Y_i} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{NQ(X_m)} \frac{\partial Q_i(X_m)}{\partial Y_i}$, 所述交叉熵为:

$$E = -\int_{\Omega} P(x) \ln[Q(x)] dx, \quad \Omega = \{(x^1, \dots, x^n) | x^1, \dots, x^n \in (-\infty, +\infty)\};$$

利用所述梯度下降模型, 更新所述被控物体的位置:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial Y_i} &= -\int_{\Omega} P(x) \frac{\partial \ln[Q(x)]}{\partial Y_i^j} dx = -\int_{\Omega} P(x) \frac{1}{NQ(x)} \frac{\partial Q_i(x)}{\partial Y_i} dx \\ &= -\mathbb{E}_{X \sim P} \left[\frac{1}{NQ(X)} \frac{\partial Q_i(X)}{\partial Y_i} \right] \end{aligned}$$

其中, $Q_i(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sigma^n} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_i^j - x^j}{\sigma} \right)^2 \right]$, E 表示计算期望值, 且每次更新所述被控物体的位置时, 将位于 Y_i 处的被控物体移动至 $Y_i - \gamma \frac{\partial E}{\partial Y_i}$, γ 用于表示移动的速率, γ 是一个大于0的常数。

5 6、根据权利要求5所述的方法, 其特征在于, 在每一次重复执行步骤3之前, 衰减 σ 。

7、根据权利要求6所述的方法, 其特征在于, 在第一次执行步骤3时, $\sigma = 10$ 。

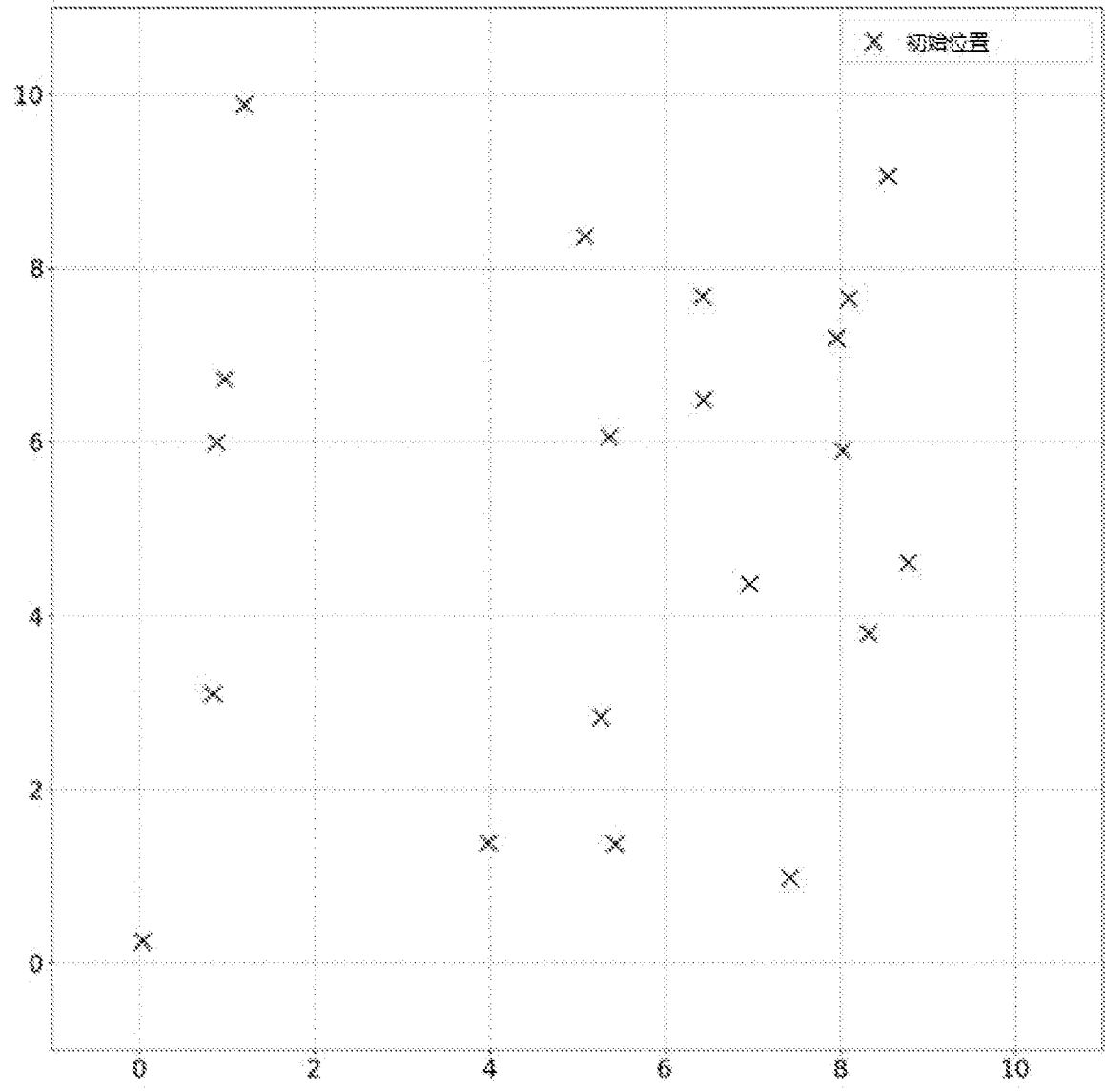


图 1

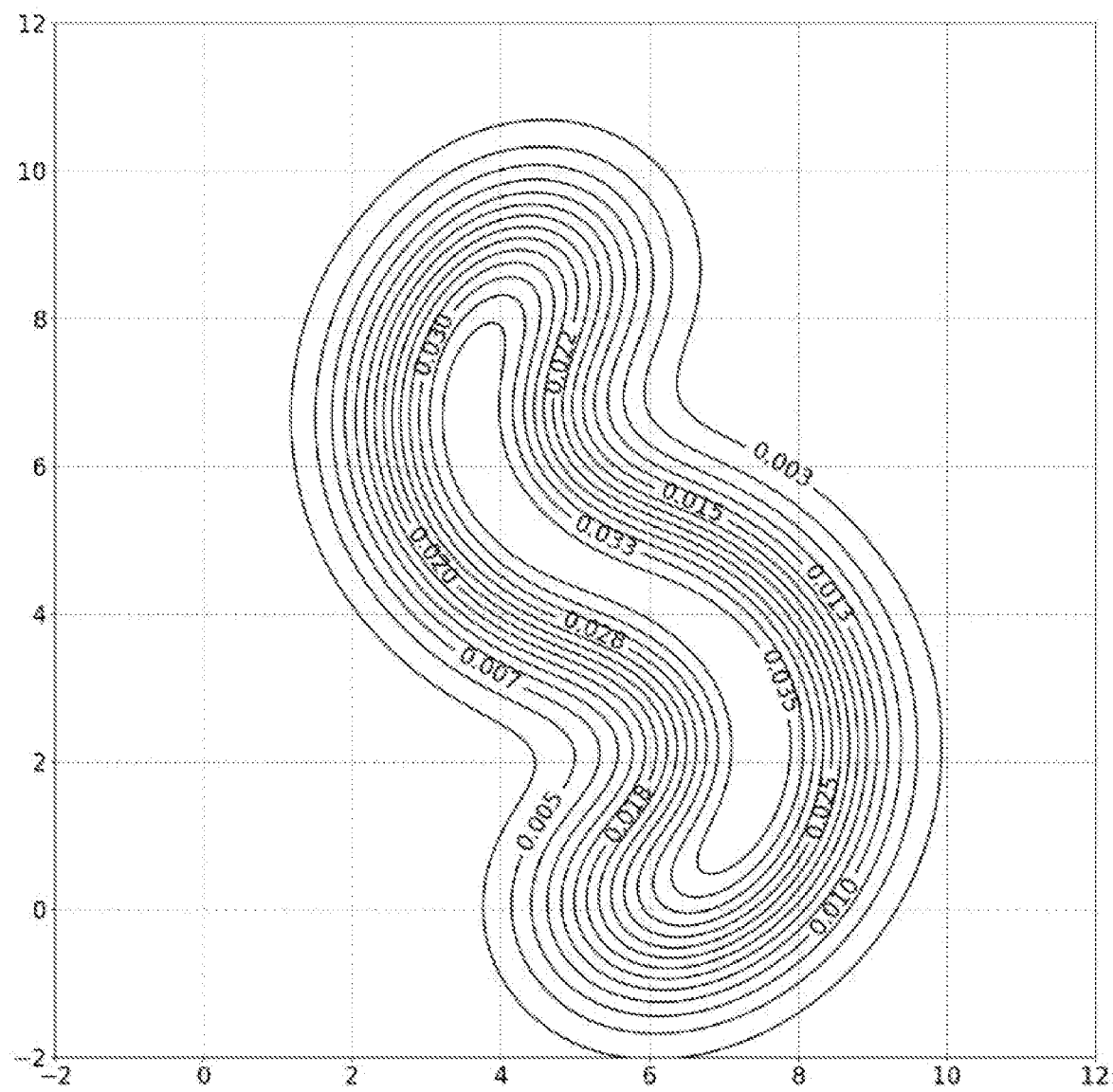


图 2

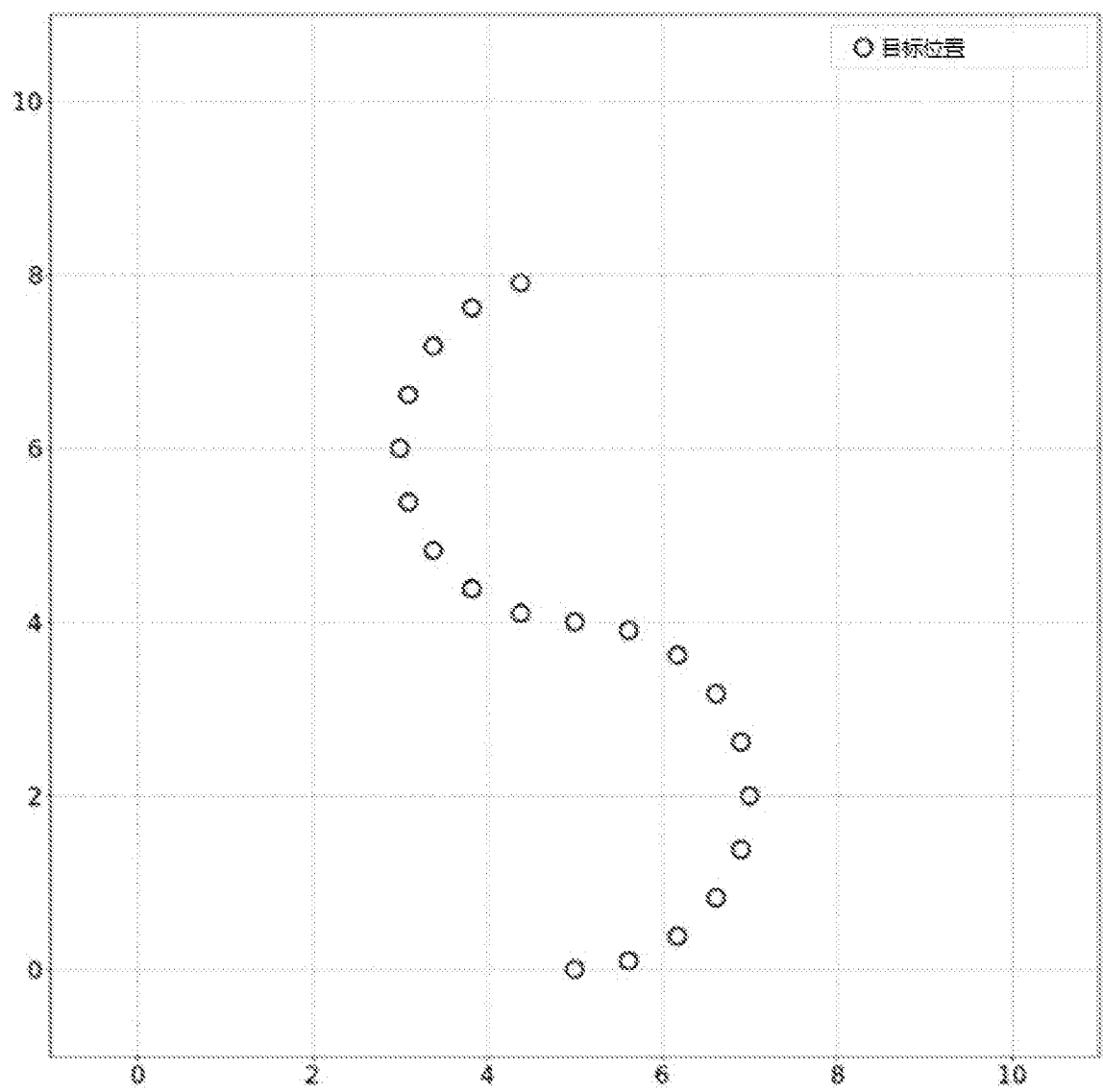


图 3

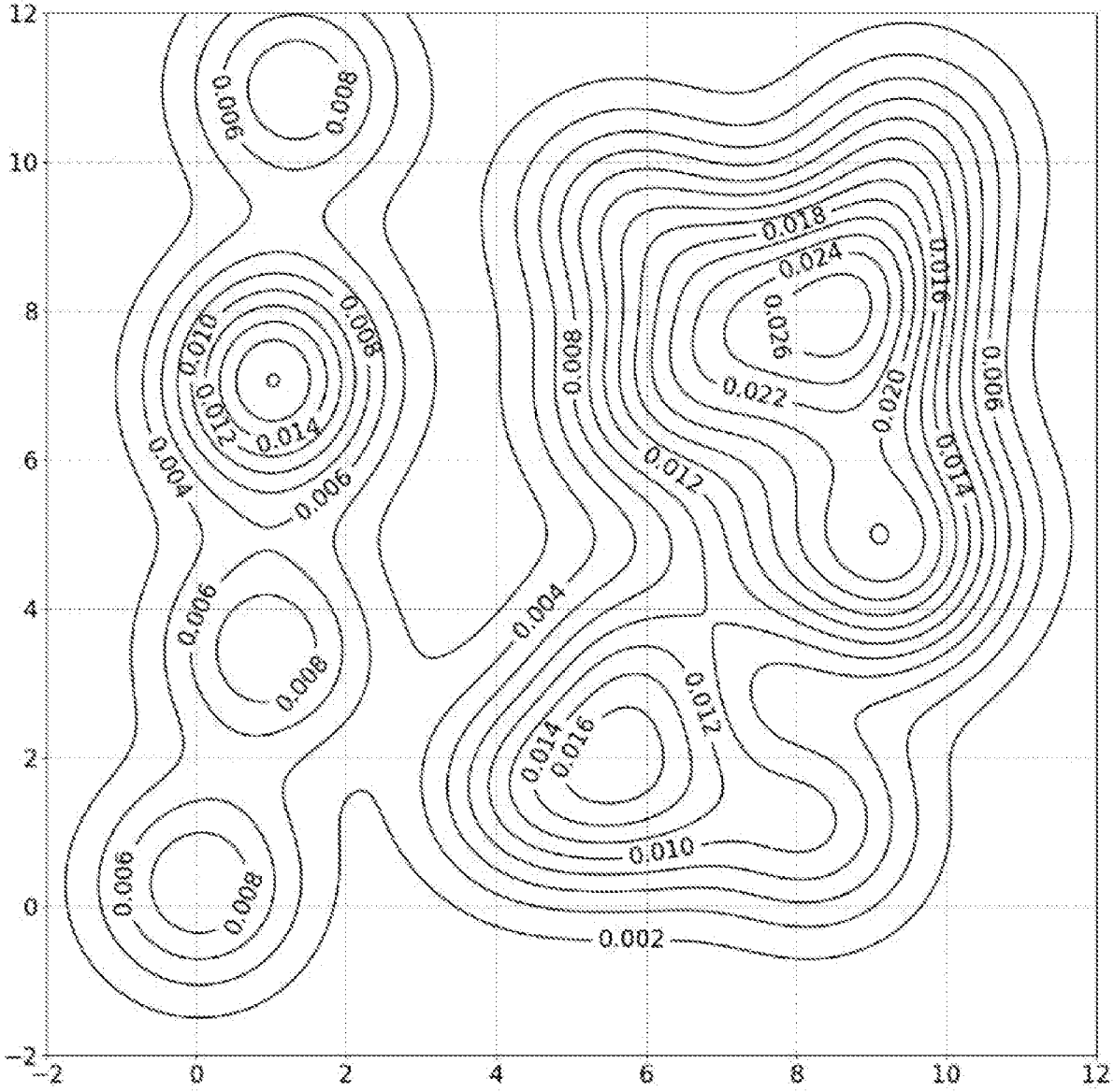


图 4

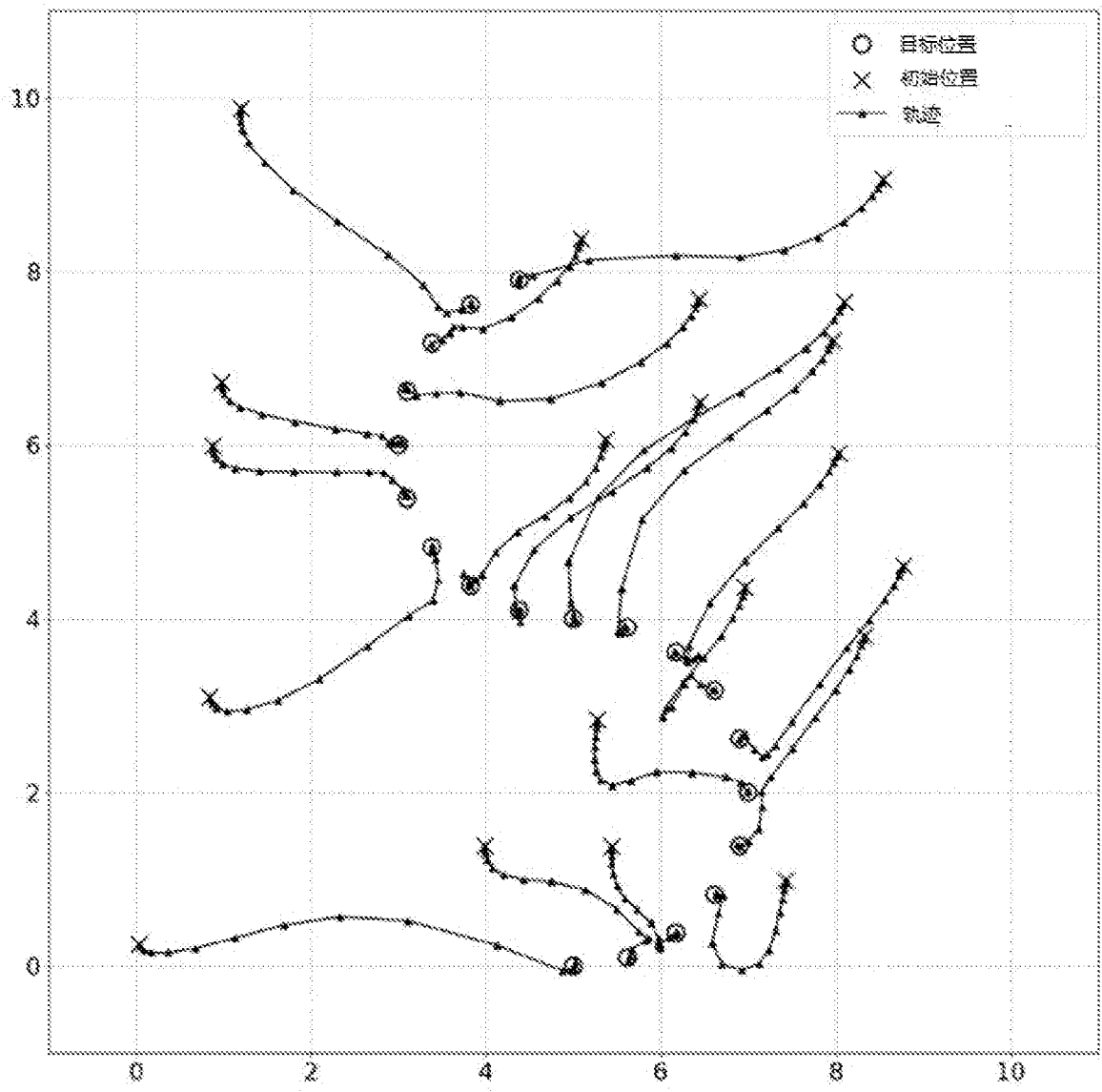


图 5

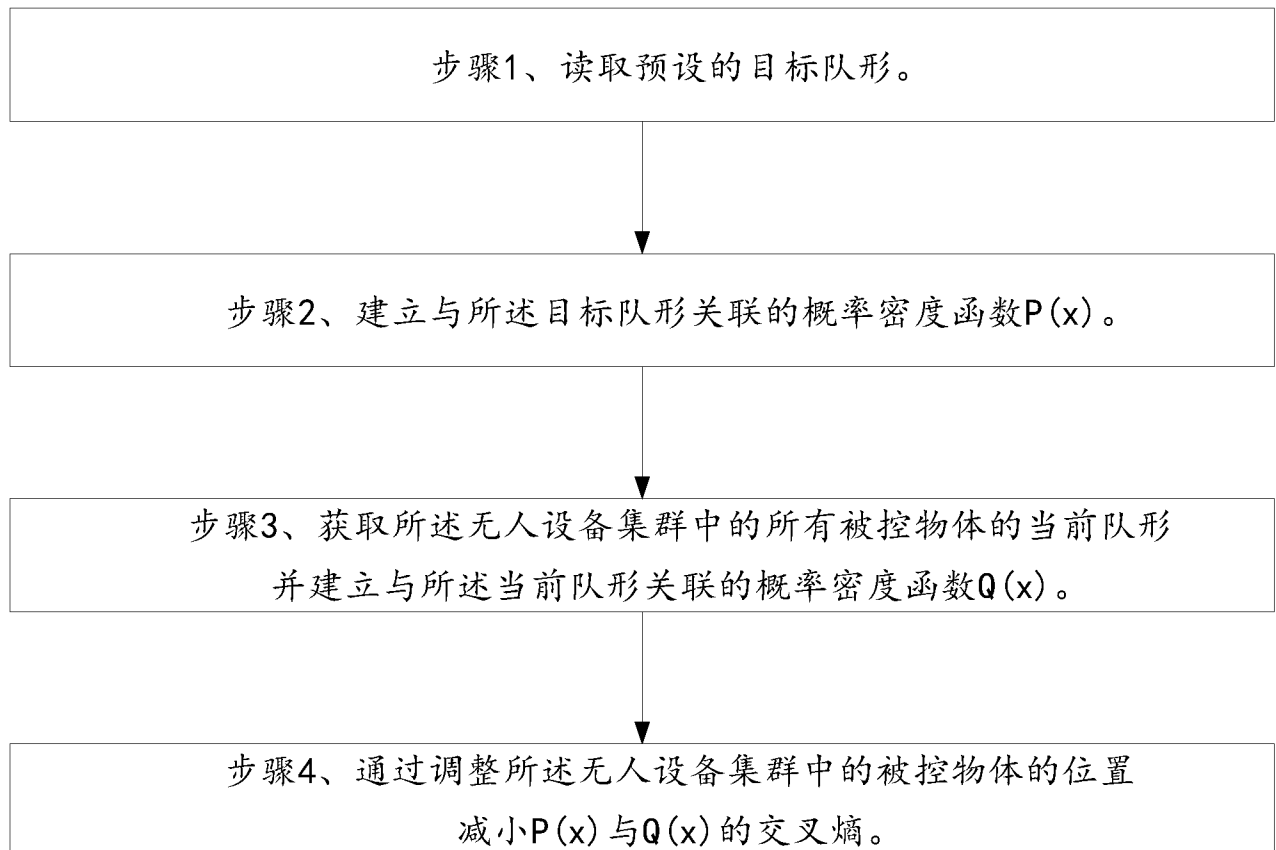


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/092627

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05D 1/10(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05D; G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNKI, DWPI, SIPOABS; 无人机, 无人车, 队形, 重构, 概率密度函数, 交叉熵; UAV, unmanned aerial vehicle, formation, refactor, reconstruct, probability density function, cross entropy

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109472064 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 15 March 2019 (2019-03-15) description, paragraphs 5-83, and figures 1-6	1-7
A	CN 102591358 A (BEIHANG UNIVERSITY) 18 July 2012 (2012-07-18) entire document	1-7
A	CN 103941728 A (BEIHANG UNIVERSITY) 23 July 2014 (2014-07-23) entire document	1-7
A	CN 108594853 A (ARMY ENGINEERING UNIVERSITY OF PLA) 28 September 2018 (2018-09-28) entire document	1-7
A	US 2018074520 A1 (ARROWONICS TECHNOLOGIES LTD.) 15 March 2018 (2018-03-15) entire document	1-7

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

18 September 2019

Date of mailing of the international search report

30 September 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/092627

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109472064	A	15 March 2019	None			
CN	102591358	A	18 July 2012	CN	102591358	B	08 July 2015
CN	103941728	A	23 July 2014	None			
CN	108594853	A	28 September 2018	None			
US	2018074520	A1	15 March 2018	US	10114384	B2	30 October 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/092627

A. 主题的分类 G05D 1/10 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G05D; G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNABS, CNKI, DWPI, SIPOABS; 无人机, 无人车, 队形, 重构, 概率密度函数, 交叉熵; UAV, unmanned aerial vehicle, formation, refactor, reconstruct, probability density function, cross entropy																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 109472064 A (南京航空航天大学) 2019年 3月 15日 (2019 - 03 - 15) 说明书第5-83段、图1-6</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102591358 A (北京航空航天大学) 2012年 7月 18日 (2012 - 07 - 18) 全文</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103941728 A (北京航空航天大学) 2014年 7月 23日 (2014 - 07 - 23) 全文</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108594853 A (中国人民解放军陆军工程大学) 2018年 9月 28日 (2018 - 09 - 28) 全文</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2018074520 A1 (ARROWONICS TECHNOLOGIES LTD) 2018年 3月 15日 (2018 - 03 - 15) 全文</td> <td>1-7</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 109472064 A (南京航空航天大学) 2019年 3月 15日 (2019 - 03 - 15) 说明书第5-83段、图1-6	1-7	A	CN 102591358 A (北京航空航天大学) 2012年 7月 18日 (2012 - 07 - 18) 全文	1-7	A	CN 103941728 A (北京航空航天大学) 2014年 7月 23日 (2014 - 07 - 23) 全文	1-7	A	CN 108594853 A (中国人民解放军陆军工程大学) 2018年 9月 28日 (2018 - 09 - 28) 全文	1-7	A	US 2018074520 A1 (ARROWONICS TECHNOLOGIES LTD) 2018年 3月 15日 (2018 - 03 - 15) 全文	1-7
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
PX	CN 109472064 A (南京航空航天大学) 2019年 3月 15日 (2019 - 03 - 15) 说明书第5-83段、图1-6	1-7																		
A	CN 102591358 A (北京航空航天大学) 2012年 7月 18日 (2012 - 07 - 18) 全文	1-7																		
A	CN 103941728 A (北京航空航天大学) 2014年 7月 23日 (2014 - 07 - 23) 全文	1-7																		
A	CN 108594853 A (中国人民解放军陆军工程大学) 2018年 9月 28日 (2018 - 09 - 28) 全文	1-7																		
A	US 2018074520 A1 (ARROWONICS TECHNOLOGIES LTD) 2018年 3月 15日 (2018 - 03 - 15) 全文	1-7																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td style="vertical-align: top;"> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期 2019年 9月 18日		国际检索报告邮寄日期 2019年 9月 30日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 孟田革 电话号码 86-10-62411653																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/092627

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109472064	A	2019年 3月 15日	无	
CN	102591358	A	2012年 7月 18日	CN 102591358	B 2015年 7月 8日
CN	103941728	A	2014年 7月 23日	无	
CN	108594853	A	2018年 9月 28日	无	
US	2018074520	A1	2018年 3月 15日	US 10114384	B2 2018年 10月 30日