控制与决策
Control and Decision

微小卫星集群在有界空间表面的均匀分布策略

康国华，郭玉洁，金晨迪，乔思元，吴佳奇

引用本文:
康国华, 郭玉洁, 金晨迪, 等. 微小卫星集群在有界空间表面的均匀分布策略[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2931-2938.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1761

微小卫星集群在有界空间表面的均匀分布策略

康国华†, 郭玉洁, 金晨迪, 乔思元, 吴佳奇

(南京航空航天大学 航天学院，南京 210016)

摘 要: 考虑微小卫星集群在轨服务的任务效率及星群在有限空间区域表面均匀分布的任务需求,提出基于改进独占球与势函数相结合的空间集群均匀分布度量模型和构型控制策略,该策略可以有效度量航天器集群空间均匀性、空间覆盖性和空间聚集性指标,并指导航天器集群在有限区域内实现无碰撞自组织的均匀分布构型. 仿真分析表明,均匀度模型具有良好的旋转对称性和平移对称性,可以有效指导集群实现均匀分布并具有良好低维投影均匀性.

关键词: 卫星集群控制；势函数；独占球；均匀分布；有界空间

中图分类号: V448 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.1761 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

引用格式: 康国华, 郭玉洁, 金晨迪, 等. 微小卫星集群在有界空间表面的均匀分布策略 [J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2931-2938.

Uniform distribution strategy of microsatellite swarm on bounded space surface

KANG Guo-hua†, *GUO Yu-jie*, *JIN Chen-di*, *QIAO Si-yuan*, *WU Jia-qi*

(College of Astronautics，Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing 210016，China)

Abstract: According to the efficiency of on-orbit service and the requirements of uniform distribution on the bounded space surface for satellite swarm, a distribution measurement model and corresponding configuration control strategy based on the combination of the improved monopolize ball and the potential function are proposed. It can measure the spatial uniformity, spatial coverage and spatial clustering index of satellite swarm effectively, and guide the satellite swarm to build the self-organizing uniform distribution without collision under the condition of limited awareness information in a limited area. Simulation analysis shows the good rotational symmetry and translational symmetry of the uniformity model, as well as the distribution uniformity of satellite swarm with good low dimensional projection shown.

Keywords: satellite swarm control；potential function；monopolized ball；uniform distribution；bounded space

0 引 言

微小卫星凭借低成本、高性价比的优势,可构建成类似蜂群、蚁群的协同任务集群,实现单颗卫星不能完成的功能,在空间领域有着广泛需求[1]. 如文献[2-3]提出的协同微小星集群,可实现聚光操控,汇聚太阳光线产生高温对空间目标进行软杀伤,如图1(a)所示;文献[4]将微小星群分布于大型航天器外围一定范围的球面上,调整姿轨使卫星视角覆盖航天器实现实时立体监测,如图1(b)所示;文献[5]在星群拦截空间目标的应用中,为提高目标拦截概率,协同星群形成正六边形均匀且紧密分布拦截面,如图1(c)所示.

为了保证星群高效执行上述操纵、监测、围捕等任务,需要星群在一定区域表面具有较好的分布均匀性,提高对目标区域的覆盖性,因此建立有限空间的集群均匀性度量模型并设计相应均匀分布控制策略是保证集群空间任务高效有序执行的关键.

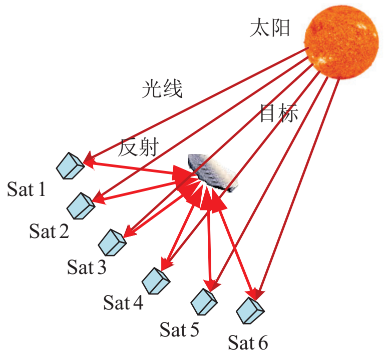
在上述微小星群的应用场景中,微小卫星体积(包络一般小于1 m)相比于机动范围(km量级)可以忽略,从理论上看是在有限空间下关于空间点集的均匀性问题,将影响星群在轨服务的质量和效率. 该问题在均匀设计领域已有相关研究,目前对于均匀性度量方法主要有基于距离概念[6]、基于最优设计的度量、基于偏差的度量[7-9],但对于有限空间内集群的均

收稿日期: 2018-12-23；**修回日期:** 2019-04-16.

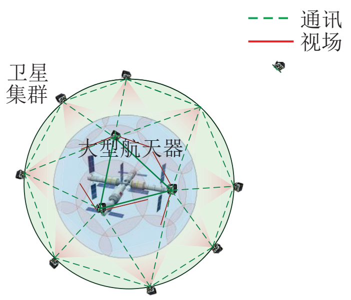
基金项目: 空间智能控制技术重点实验室开放基金项目(ZDSYS-2017-01).

责任编委: 刘德荣.

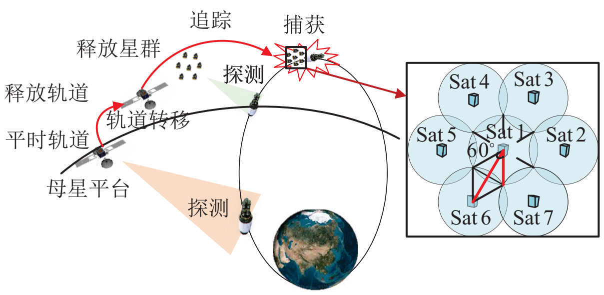
†通讯作者. E-mail: kanggh@nuaa.edu.cn.



(a) 星群聚光对目标进行热干扰



(b) 大型航天器全域监测



(c) 空间目标围捕

图 1 卫星集群典型应用

匀度量模型及实现方法的研究相对较少[6]. 上述基于偏差的均匀性度量法最为常用,但该方法的均匀偏差计算复杂;算法中原点的特殊地位降低了均匀性度量的有效性,并且不考虑低维投影的均匀性.

1 问题描述

结合星群立体巡检的任务需求,集群成员是在有界空间的表面上而非内部运动,因此将星群均匀分布问题看作有限空间表面点集的均匀分布问题,进一步可以具体分为以下两种特殊情况:1)有限空间区域部分表面的均匀分布,即空间区域部分表面;2)有限空间区域全表面的均匀分布,即空间区域封闭表面.

均匀分布集群应满足以下规则:1)集群成员之间的距离应尽量大;2)若空间区域表面有边界,则集群成员与边界的距离应尽量大;3)低维投影也要满足均匀性要求.

针对上述场景及规则,本文提出一种改进独占球与势函数结合的均匀性评价模型. 该模型能够反映集群空间布局的覆盖性、均匀性指标,且易于计算. 基于此均匀度评价模型构造针对任意集群的布局优化算法,使集群在有限空间表面均匀分布,实现协同功能的最大化.

2 改进独占球结合势函数的均匀性度量法

2.1 改进的独占球法

文献[10-11]在对生态学中植物个体的空间格局研究后,建立了基于独占球的均匀度理论,用于解决空间均匀性度量问题. 该理论中独占球的构建可以概括为:以空间内分布的点集为圆心,以该点到紧邻点的距离一半为半径,构建该点的独占球,N维空间均匀度定义为

$$L=\frac{2^N H}{V_N(1)A_V}. \tag{1}$$

其中:H为多面体内总独占球体积,A_V为多面体体积. 若分布点集为完全均匀格局,则$L=1$.

独占球体现了点集成员对一定空间的独占作用,均匀分布的集群应具有一致的独占球半径,因此独占球半径方差可以一定程度地反映均匀性. 然而,在独占球均匀度定义中,不互为紧邻个体的独占球可能孤立,降低了独占球半径方差对于均匀性的敏感程度,且未考虑边界对独占球半径的限制,无法体现集群对有限区域的覆盖性. 为了提高均匀度模型的敏感性,并引入边界约束,本文对独占球的定义做出改进:扩大孤立独占球半径,使独占球相互紧邻;同时引入区域边界对改进独占球半径的约束,并基于上述改进独占球定义新的均匀度模型.

2.1.1 改进独占球定义

改进独占球构建思想为:n维空间的点集$S_n=\{x_1,x_2,\ldots,x_n\}$,对任意$x_i\in S_n$,以$x_i$为球心,$r(x_i)$为半径,构建独占球$B(x_i)$. 其中:$r(x_i)$从0开始逐渐增大,直至独占球与点集$S_n$中任意$x_i$的独占球相切停止增大,最终集群系统可以由若干相互连接的改进独占球所包含. 改进独占球及其半径定义如下.

定义1 对于3维空间中至多可数的点集$S_n=\{x_1,x_2,\ldots,x_n\}$,总存在两个点$x_i$、$x_j\in S_n$. 其中:$i\neq j$,使得$d_{ij}=\min\|x_l-x_m\|,l\neq m,1\leqslant l\leqslant n$, $1\leqslant m\leqslant n,\|*\|$为欧氏距离. 以$x_i$或$x_j$为圆心,以$d_{ij}/2$为半径的球即为对应的$x_i$或$x_j$的改进独占球. 对于其他任意点$x_k(k\neq i,j)$的改进独占球,其半径由与之相切独占球确定. 如该相切独占球圆心为x_o,独占球半径为$r(x_o)$,则x_k独占球半径为$r(x_k)=\|x_k-x_o\|-r(x_o)$.

如图2所示,在有限边界$abcd$范围内,存在点集S_4,其中x_1, x_2之间的距离是点集中任意两点间最小的,令$r(x_1) = \|x_1 - x_2\|/2$,则:以x_1为圆心,以$r(x_1)$为半径的球$B(x_1)$即为x_1的改进独占球;以x_2为圆心,以$r(x_2)$为半径的球$B(x_2)$即为x_2的改进独占球. x_4的独占球半径$r(x_4) = \|x_4 - x_2\| - r(x_2)$, x_3的独占球半径$r(x_3) = \|x_3 - x_4\| - r(x_4)$. 从图2可以直观看出:成员分布越紧密,改进独占球半径越小;成员分布越均匀,改进独占球半径方差越小.

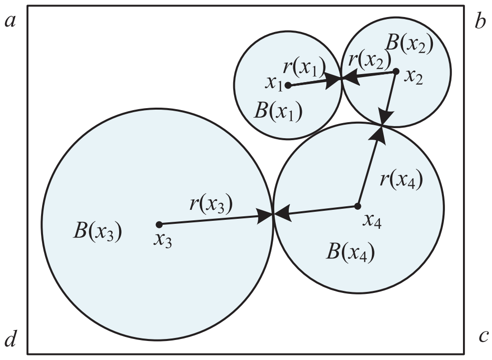


图 2 改进独占球示意图

2.1.2 改进独占球均匀度评价模型

改进独占球半径方差对集群均匀分布的敏感性更强,但无法用于不同场景下均匀性的比较,因此采用面积比模型和方差模型进行归一化处理.

1) 面积比模型C_B.

集群的改进独占球包含于区域边界内,采用改进独占球在有限区域表面投影的面积之和与有限区域的面积比构建改进独占球评价模型,用于评价集群对有限区域的覆盖程度,定义面积比模型C_B为

$$C_B = 1 - \frac{S_B}{S_P} = 1 - \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} \pi r_i^2}{S_P}. \tag{2}$$

其中: S_B是改进独占球在有限区域表面投影面积之和, S_P是有限区域表面P的面积, r_i是成员i的改进独占球半径. 由于所有的改进独占球都包含于有限区域内, C_B的取值范围是(0, 1]. 集群对空间区域的覆盖性越好, C_B越小.

2) 归一化方差模型C_D.

改进独占球定义扩大了孤立独占球半径,因此r_i的方差对均匀性更敏感. 定义归一化方差模型C_D为

$$C_D = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Big(\frac{r_i - \bar{r}}{B_{\max}}\Big/2\Big). \tag{3}$$

其中: $\bar{r}_i$是r_i的均值, $B_{\max}$是边界内接球的最大跨度,因此有$r_i - \bar{r} < \dfrac{1}{2}B_{\max}$; C_D的取值范围是[0, 1),当集群所有成员的独占球半径r_i相等时, C_D为0,集群分布越均匀, C_D越小.

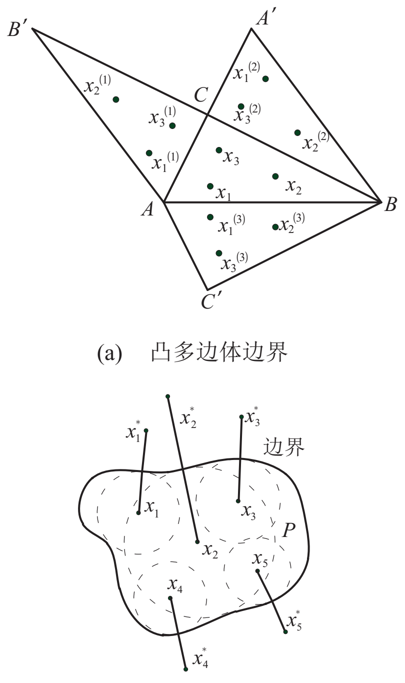
改进独占球的均匀度模型适用于任意有界区域表面点集分布的均匀性评价,面积比模型可以反映集群分布均匀性,归一化的方差模型提高了对非均匀分布的敏感性. 为了度量集群分布的聚散程度,需结合改进势函数模型来度量集群聚散性.

2.2 改进势函数法

为了度量均匀性,所归纳出的点集分布的两个规则类似于带电粒子的相互作用,文献[6,12]根据电荷分布规律提出了基于势函数的均匀性度量方法,该方法建立了点集关于边界的虚拟对称点,作为每条边界对点集成员的势函数作用点,但仅适用于立方体或凸多边体有限区域. 本文改进了点集关于边界对称点的定义,使势函数模型适用于任意区域中点集分布均匀性分析.

2.2.1 改进势函数定义

王艳云等[6]对凸多边体边界内点集关于边界的势函数进行了定义和证明,为节省篇幅不再赘述,其方法归纳为建立点集成员关于每一条直线边界的虚拟对称点,以模拟边界对点集的势函数作用,如图3(a)所示. 本文也采用该思路,任意形状边界可以看作由足够短且多的直线边界相连构成,边界上距离点集最近的一条边的势函数最大,为主导作用. 当直线边界足够短时,虚拟对称点取为点集关于边界上距离最近点的对称点,如图3(b)所示. 边界的对称点x_i^*为点x_i关于其最邻近边界点的对称点.



(a) 凸多边体边界

(b) 任意形状边界

图 3 边界对集群成员势函数作用

以图3(b)中有限区域P内5个点$x_1, x_2, \ldots, x_5$为例,与之对应的$x_1^*, x_2^*, \ldots, x_5^*$即为$x_1, x_2, \ldots, x_5$关于区域边界的对称点. 基于上述对边界对称点的改进,定义改进势函数如下.

定义2 若有限区域P内有点集$S_n = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$,点$x_1, x_2, \ldots, x_n$关于有限区域边界的对称成员分别为$x_1^*, x_2^*, \ldots, x_n^*$,则点$x_i$在有限区域$P$中的改进势函数$U(x_i)$为

$$U(x_i) = \sum_{j=1, j\neq i}^{n} \frac{1}{\|\boldsymbol{x}_{ij}\|} + \eta \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\|x_{ij^*}\|}. \tag{4}$$

其中:$x_{ij} = x_i - x_j, x_{ij^*} = x_i - x_{j^*}$;$\eta$为边界系数,若$P$的表面为闭曲面,则$\eta = 1$,否则$\eta = 0$;$\| * \|$为欧氏距离. $U(x_i)$的第1项表示成员x_i关于集群内其余成员x_j的势函数,由x_{ij}的反比函数构成;$U(x_i)$的第2项表示成员x_i受到有限区域边界作用的势函数,由x_{ij^*}的反比函数构成.

有限区域P上点集S_n的势函数为集群所有成员的势函数之和,即

$$U(S_n) = \sum_{i=1}^{n} U(x_i) = \sum_{i=1}^{n} \Big(\sum_{j=1, j\neq i}^{n} \frac{1}{\|x_i - x_j\|} + \eta \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\|x_i - x_j^*\|} \Big). \tag{5}$$

2.2.2 改进势函数均匀度评价模型

对$U(S_n)$进行归一化处理,假设集群任意两成员之间的相对距离满足$\|x_i, x_j\| > 1\,\mathrm{m}$,且$\|x_i, x_j^*\| > 1\,\mathrm{m}$,则无量纲化处理后任意两成员之间的势函数为$\dfrac{1}{\|x_i, x_j\|}$和$\dfrac{1}{\|x_i, x_j^*\|}$,再将$U(S_n)$除以用于求和的势函数总数$\dfrac{3n^2 - n}{2}$,得到对$U(S_n)$归一化后的势函数模型$C_P$,有

$$C_P = \frac{2}{3n^2 - n} U(S_n) = \frac{2}{3n^2 - n} \sum_{i=1}^{n} U(x_i) = \frac{2}{3n^2 - n} \sum_{i=1}^{n} \Big(\sum_{j=1, j\neq i}^{n} \frac{1}{\|x_i, x_j\|} + \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\|x_i, x_j^*\|} \Big). \tag{6}$$

根据以上定义,C_P收敛至区间(0,1)上,且C_P越小,点集S_n在区域P上越分散,分布均匀性越好.

改进势函数模型可以用于有限区域表面任意边界内集群的均匀性度量,势函数模型与独占球理论结合后可以度量随机格局的均匀性,并用于指导集群的均匀分布.

2.3 改进独占球与势函数结合的均匀度模型

2.3.1 模型定义

根据集群在有限区域表面分散且尽可能覆盖区域表面的需求,均匀度评价模型应综合考虑评价覆盖性和分散性的指标,因此,综合改进独占球模型和改进势函数模型,有限区域表面的分布均匀度评价模型可写为如下形式:

$$C = \frac{\sigma_1 C_P + \sigma_2 C_B + \sigma_3 C_D}{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}. \tag{7}$$

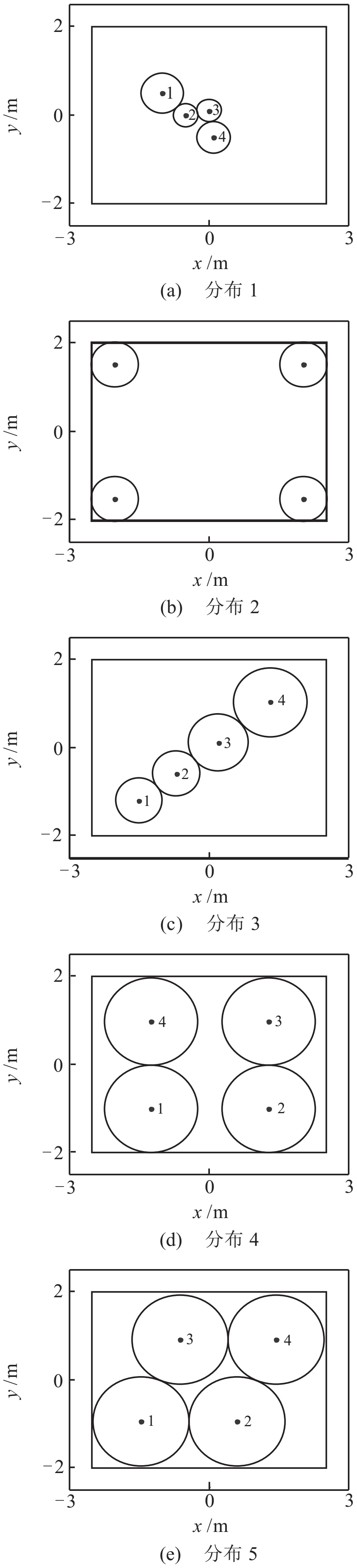
其中:C为有限区域表面分布均匀度,C_P为势函数评价模型,C_B为独占球面积比模型,C_D表示独占球半径归一化方差模型,$\sigma_i > 0 (i = 1, 2, 3)$表示3种模型的权重系数. C经归一化处理后的取值区间为(0,1),且C越小均匀性越好.

2.3.2 平面均匀性评价效果分析

考虑空间中某平面上长方形区域$P = \{(x, y, z) | x = \pm 2.5, y = \pm 2, z = 0\}$内4个成员构成的集群分布问题,分别进行5种常见分布的均匀性分析,成员坐标设置如表1所示,绘制成员的分布及相应改进独占球的情况如图4所示. 其中:分布1表示星群初始释放阶段,成员在P内某一区域过于集中,对P的覆盖性较差;分布2表示星群释放后成员分布过于分散的情况,成员对P的覆盖性较差;分布3表示某任务阶段星群在P内的线型编队分布,若以这条线为轴建立坐标系,则集群分布在该轴正交轴上的低维投影均匀性较差;分布4表示星群在P内均匀编队,成员分布在区域内4个格子的中心,对P的覆盖性较好,但低维投影的均匀性仍不是最优;分布5的成员相对于分布4在P内交错分布,提高了对P的覆盖性,且低维投影的均匀性优于分布4. 已知集群所有成员的位置信息,根据式(3),取$\sigma_i = 1$,计算以上5种分布的均匀度C如表2所示.

表1 5种集群分布下的成员坐标

	分布1	分布2	分布3	分布4	分布5
成员1	$(-1, 0.5)$	$(-2, -1.5)$	$(-1.5, -1.2)$	$(-1.25, -1)$	$(-1.45, -0.95)$
成员2	$(-0.5, 0)$	$(-2, 1.5)$	$(-0.7, -0.6)$	$(1.25, -1)$	$(0.62, -0.95)$
成员3	$(0, 0.1)$	$(2, -1.5)$	$(0.2, 0.1)$	$(-1.25, 1)$	$(-0.62, 0.95)$
成员4	$(0, -0.5)$	$(2, 1.5)$	$(1.3, 1)$	$(1.25, 1)$	$(1.45, 0.95)$



(a) 分布 1

(b) 分布 2

(c) 分布 3

(d) 分布 4

(e) 分布 5

图 4　5 种有限区域内的分布

由图 4 和表 2 可见, 分布 1、分布 2、分布 3 的均匀性较差, 分布 4 和分布 5 的均匀性较优于分布 1、分布 2、分布 3, 而有限区域 P 上分布 5 的覆盖性和低维投影均匀性略优于分布 4, 因此分布 5 的均匀性最优. 根据表 2, 均匀度 $C_5 < C_4 < C_3 < C_1$、C_2, 且在 4 成员构成的集群分布中 $C_5 \approx C_4$, 与图 4 结果一致.

表 2　5 种分布下的均匀度模型

	分布 1	分布 2	分布 3	分布 4	分布 5
C_P	1.105 1	0.461 2	0.700 4	0.434 4	0.481 5
C_B	0.927 9	0.842 9	0.761 3	0.371 7	0.324 3
C_D	0.008 9	0	0.018 1	0	0
C	0.680 6	0.434 7	0.493 2	0.268 7	0.268 6

对于有限空间内点集均匀性分布问题, 通常采用解析函数求极值的方法进行证明[6-7,10-12], 本文也采用该思路, 为节省篇幅不再赘述. 所提出的有限区域表面分布均匀度模型满足以下特性:

1) 旋转对称性: 有限区域表面 P 内点集 $S_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的位置坐标一旦确定, 集群均匀度不受空间坐标系定义的变化而改变;

2) 平移对称性: 有限区域 P 及点集 $S_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 整体平移, 集群均匀度不变;

3) 低维投影: 将集群成员分布投影在低维空间坐标系上, 均匀度评价模型及分布策略对于投影在低维空间坐标系上的集群均匀性具有良好的评价效果和指导效果.

3　星群在空间有限区域表面均匀分布实现

3.1　空间有限区域表面均匀分布策略

考虑三维空间中微小卫星集群包含 n 个成员, 每个成员卫星质量为 m, 卫星体积相比于机动范围可以忽略, 个体 i 的位置、速度矢量为 x_i、v_i, 有限区域表面汇聚可基于文献 [13-15] 中的分岔势函数实现. 将式 (7) 中均匀度模型用于指导集群协同控制, 此时该星群系统的二阶运动方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i; \\ m\dot{v}_i = -\bigtriangledown U_B(x_i). \end{cases} \tag{8}$$

其中 $U_B(x_i)$ 为有限区域表面均匀分布势场. 基于第 2.3 节均匀度模型构建, 将改进独占球的半径 r_i 与人工势函数结合, 用于集群在有限区域表面的均匀分布实现. 将点集的均匀性度量模型作为反馈量调整 r_i 的大小, 改进独占球的重叠部分产生排斥作用, 孤立且不相切的部分产生吸引作用, 改变半径后的改进独占球作用示意图如图 5 所示.

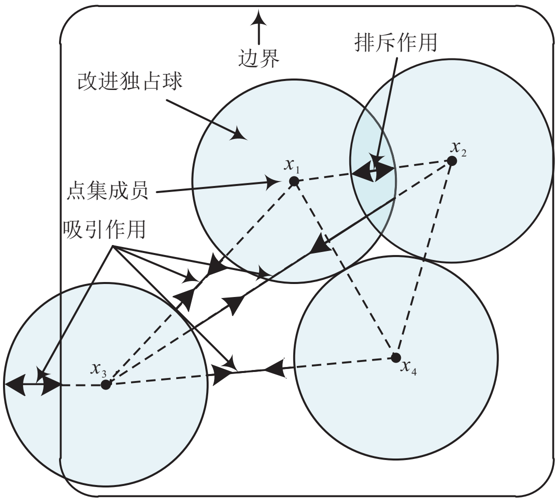


图5 改进独占球作用示意图

基于改进独占球的人工势函数$U_B(x_i)$由式(4)变形构成,具体形式为

$$U_B(x_i)=U_b(x_i)+U_r(x_i^*)=\\ \sum_{j=1,j\neq i}^{n}\frac{r_i+r_j}{\|x_{ij}\|}+k_i\sum_{j=1}^{n}\frac{r_i+r_{j^*}}{\|x_{ij^*}\|}. \tag{9}$$

其中:$U_b(x_i)$为区域表面集群成员之间作用势场,$U_r(x_i^*)$为区域表面边界作用势场;k_i为边界作用系数,若成员i在有限区域内,则$k_i=-1$,表示区域表面边界对成员i的排斥作用,否则$k_i=1$,表示区域表面边界吸引作用;$x_{ij}=x_i-x_j$,表示成员之间位置矢量差,x_i^*为x_i关于有限区域边界的对称点的位置矢量;r_i为个体i的独占球半径.

将集群成员的r_i初值取为集群中紧邻距离最小两成员其距离的一半,使得改进独占球半径的方差为0. r_i随着集群个体位置的演变共同增大,直至集群所有独占球“充满”区域表面时停止.由于独占球无法完全填满区域表面,C_B无法收敛至0,令$\delta(0,1)$为填充系数,表示改进独占球对区域表面的“充满”程度,假设$C_B=\delta$时所有改进独占球“充满”区域表面,改进独占球半径的变化规律为

$$r_i=\begin{cases}r_i+\varepsilon(C_B-\delta),\ (C_B-\delta)>0;\\ r_i,\ \text{otherwise}.\end{cases} \tag{10}$$

其中ε为改进独占球半径的变化系数.在式(10)对r_i的调整下,式(9)的势函数动态变化,集群最终均匀分布于有限区域表面,具有较好的覆盖性和分散性.均匀度模型与均匀分布控制策略的关系如图6所示.

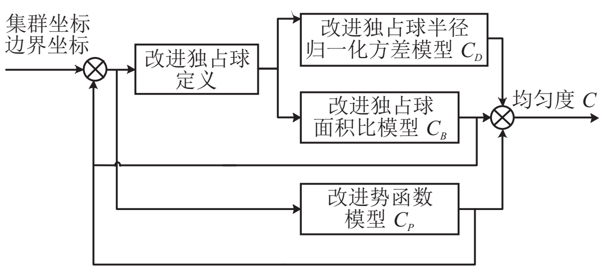


图6 均匀度模型与均匀分布策略

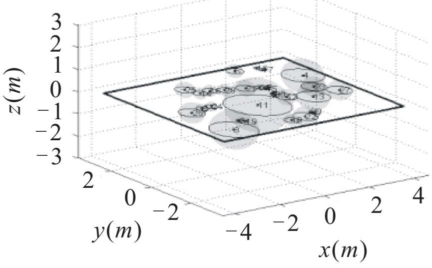
3.2 星群有限区域表面均匀分布仿真验证

考虑30个同质量m的成员构成集群,成员体积大小忽略,所有成员以随机初始位置和速度分布于参考坐标系o-xyz以o为中心的一定范围内.假设各成员不受外力作用,能够感知自身及周围一定范围内其他成员的位置速度状态量,并能根据集群行为提供所需加速度.分别设置空间有限区域的表平面$\{P_1(x,y,z)|x\in(-4,4),y\in(-3,3),z=0\}$和球面$\{P_2(x,y,z)|x^2+y^2+z^2=17\}$,星群运动仿真基于式(8)构建,集群成员在有限区域表面均匀分布势场$U_B(x_i)$基于式(9)构建.根据以上势函数设置,集群将收敛在有限区域表面P上,覆盖区域表面.

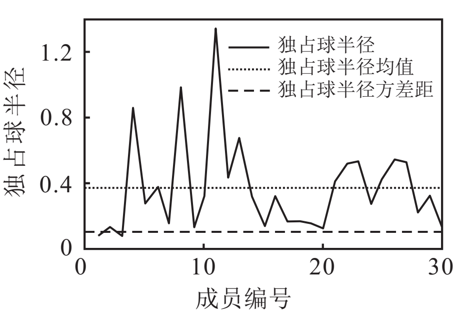
根据上述设置进行仿真,仿真时间为900 s,图7和图8分别为P_1集群初始分布和均匀分布.由式(7),取$\sigma_i=1$,绘制P_1上集群均匀度C的变化曲线如图9所示.

由图9可见,随着迭代次数的增加,由30个成员构成的集群在分布策略下实现有限区域的均匀覆盖分布,独占球半径均值增大,方差减小,集群势函数减小,均匀度降低.在160 s时基本实现对有限区域的均匀覆盖分布.

图10和图11分别为P_2集群初始分布和均匀分布.由式(7),取$\sigma_i=1$,绘制P_2上集群均匀度C的变化曲线如图12所示.

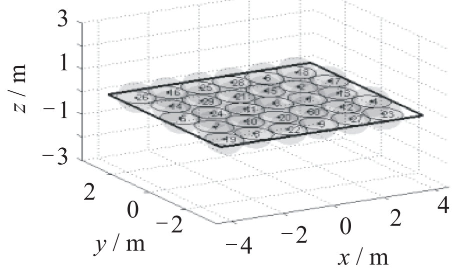


(a) 集群分布

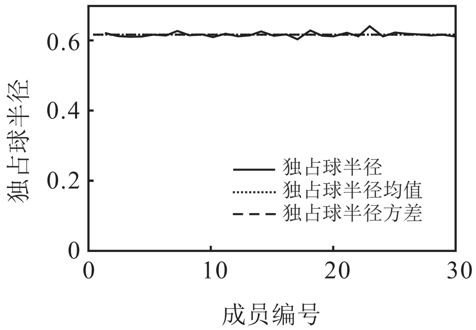


(b) 独占球半径、均值和方差

图7 P_1表面上集群初始分布及独占球半径



(a) 集群分布



(b) 独占球半径、均值和方差

图 8　P_1 表面上仿真 160 s 的集群分布及独占球半径

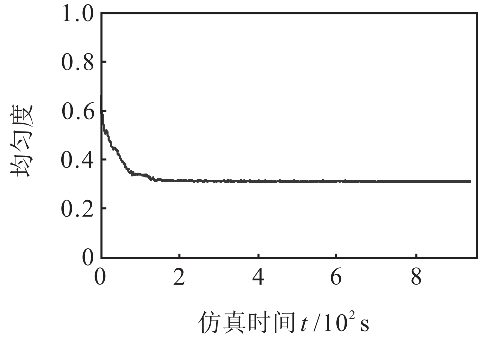
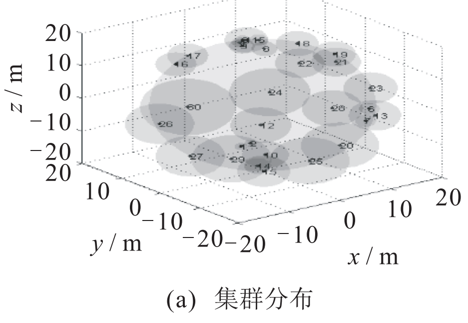
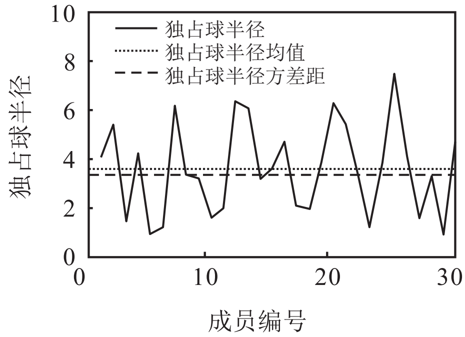


图 9　P_1 表面上集群均匀度变化曲线

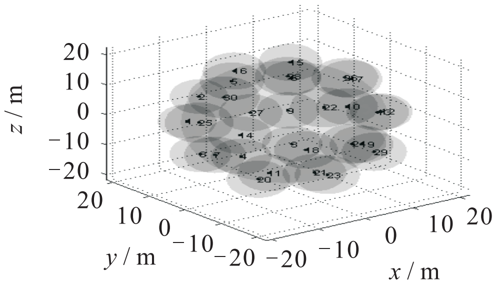


(a) 集群分布

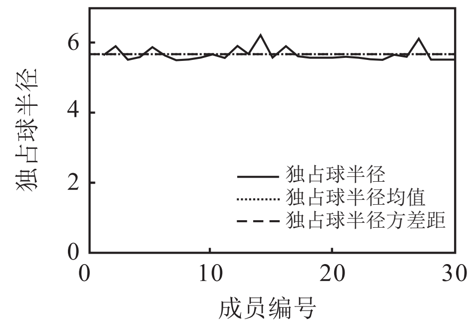


(b) 独占球半径、均值和方差

图 10　P_2 表面上集群初始分布及独占球半径



(a) 集群分布



(b) 独占球半径、均值和方差

图 11　P_2 表面上仿真 160 s 的集群分布及独占球半径

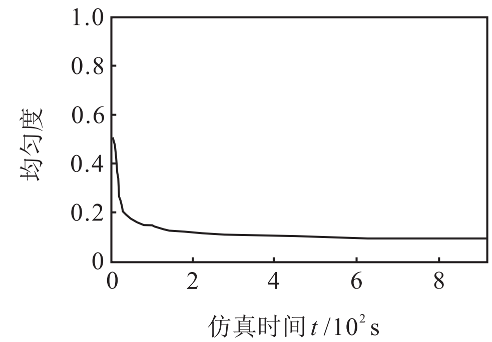


图 12　P_2 表面上集群均匀度变化曲线

由图12可见,随着迭代次数的增加,集群在分布策略下实现空间球面区域的均匀覆盖分布,独占球半径均值增大,方差减小,集群势函数减小,均匀度降低. 在200 s内基本实现对有限区域的均匀覆盖分布,600 s时实现稳定. 表明所提出的改进独占球与势函数结合的方法快速有效,可以不预先设置构型,自动优选出构型实现均匀分布.

4　结　论

本文针对微小卫星集群在轨服务时在有限空间表面均匀分布问题进行研究. 以微小卫星集群在轨高效执行操纵、监测、围捕等任务时的特殊构型为背景,结合均匀性、覆盖性和聚集性的任务需求,首先提出基于改进独占球与势函数结合的有限空间区域表面均匀性度量模型,对集群系统的分布均匀性、覆盖性、聚集性指标进行量化评价;然后在此基础上构建用于有限空间区域表面集群均匀分布的势函数,得到自组织均匀分布方案. 算例仿真结果表明,所提出

均匀度评价模型简单且易于计算,均匀分布策略快速有效,具有普适性. 本文工作为微小卫星集群协同控制提供了一个新思路.

参考文献(References)

[1] 闻新. 卫星集群系统的应用现状与发展动态[J]. 人民论坛·学术前沿, 2018(12): 80-91.
(Wen X. The application status and development trend of satellite cluster system[J]. Frontiers, 2018(12): 80-91.)

[2] 康国华, 杨炳辉, 刘瑶, 等. 基于微小卫星编队的聚光操控技术[J]. 航天控制, 2018, 36(2): 42-47.
(Kang G H, Yang B H, Liu Y, et al. The technology of light control based on small satellite formation[J]. Aerospace Control, 2018, 36(2): 42-47.)

[3] 闻新, 秦钰琦. 新概念航天器之应用——改变小天体轨道的“天基镜群”[J]. 中国航天, 2014(8): 29-31.
(Wen X, Qin Y Q. Application of new concept spacecraft: Space-based mirror groups to change the orbits of small objects[J]. Aerospace China, 2014(8): 29-31.)

[4] Fredrickson S, Duran S, Mitchell J. Mini AERCam inspection robot for human space missions[C]. Space 2004 Conference and Exhibit. California: AIAA, 2004: 5843.

[5] 樊昊, 高晓光, 王云辉. 子母拦截器集群拦截策略研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1700-1702.
(Fan H, Gao X G, Wang Y H. Research on group inter-ception strategy of multiple kill vehicle[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(8): 1700-1702.)

[6] 王艳云, 唐煜. 任意凸多面体上布点均匀性的度量[J]. 应用数学学报, 2009, 32(5): 849-857.
(Wang Y Y, Tang Y. Measure of uniformity of points distributed in a general convex polyhedron[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2009, 32(5): 849-857.)

[7] 胡东红, 李德华, 王祖喜. 均匀性度量中的密集性偏差与稀疏性偏差[J]. 数学物理学报, 2002, 22(1): 128-134.
(Hu D H, Li D H, Wang Z X. New measurements of uni-formity-compression discrepancy and Sparseness Discrep-ancy[J]. Acta Mathematica Scientia, 2002, 22(1): 128-134.)

[8] 张国秋, 王文璇. 均匀试验设计方法应用综述[J]. 数理统计与管理, 2013, 32(1): 89-99.
(Zhang G Q, Wang W X. A citation rview on the uniform experimental design[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2013, 32(1): 89-99.)

[9] 胡风华, 李敬兆. 无线传感器网络的节点分布均匀性分析[J]. 现代电子技术, 2013, 36(5): 41-47.
(Hu F H, Li J Z. Analysis of distribution uniformity of nodes in wireless sensor networks[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(5): 41-47.)

[10] 罗传文. 对均匀的数学描述及其与混沌的关系[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 3788-3792.
(Luo C W. The math-ematical description of uniformity and its relationship with chaos[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(6): 3788-3792.)

[11] 罗传文, 刘丹丹, 王刚. 均匀度理论[J]. 生物数学学报, 2006(1): 105-112.
(Luo C W, Liu D D, Wang G. Uniform theory[J]. Journal of Biomathematics, 2006(1): 105-112.)

[12] 胡东红, 李德华, 王祖喜. 均匀性度量的势函数模型[J]. 数学物理学报, 2016, 36(5): 607-612.
(Hu D H, Li D H, Wang Z X. Potential function model of uniformity measurement [J]. Acta Mathematica Scientia, 2016, 36(5): 607-612.)

[13] Bennet D J, Mcinnes C R. Distributed control of multi-robot systems using bifurcating potential fields[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58(3): 256-264.

[14] Sun J F, Chen H B. A decentralized and autonomous control architecture for large-scale spacecraft swarm using artificial potential field and bifurcation dynamics[C]. 2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Florida: AIAA, 2018: 1860.

[15] 曾志峰, 陈士橹, 徐敏. 一种可用于飞行器群系统编队及简捷重构的算法[J]. 航天控制, 2016, 34(1): 29-36.
(Zeng Z F, Chen S L, Xu M. The novel algorithm for formation and simple reconfiguration of swarming flight vehicles system[J]. Aerospace Control, 2016, 34(1): 29-36.)

作者简介

康国华(1978−), 男, 研究员, 博士生导师, 从事卫星总体设计、卫星导航增强、星群协同控制等研究, E-mail: kanggh@nuaa.edu.cn;

郭玉洁(1993−), 女, 硕士生, 从事星群协同控制的研究, E-mail: gyjgfr@163.com;

金晨迪(1994−), 男, 硕士生, 从事航天器姿态控制的研究, E-mail: jinchdi@163.com;

乔思元(1992−), 女, 硕士生, 从事航天器轨道的研究, E-mail: 562316362@qq.com;

吴佳奇(1993−), 男, 硕士生, 从事星群协同控制的研究, E-mail:wjqjump@163.com.

(责任编辑:郑晓蕾)