

多节点柔性着陆器非一致约束处理

柴敬轩¹, 吴新裕², 龚有敏², 梅 杰², 马广富²

(1. 哈尔滨工业大学(深圳), 空间科学与应用技术研究院, 深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学(深圳), 机电工程与自动化学院, 深圳 518055)

摘 要: 针对新型多节点柔性着陆器协同下降轨迹规划非一致约束的问题, 提出了一种基于控制障碍函数的分布式优化方法, 仅需要节点间的相对距离信息即可求解出各节点无冲突下降的轨迹。通过两种典型的多节点柔性着陆器协同下降场景仿真, 论证了所提方法的有效性。为解决多节点柔性着陆器的非一致约束问题提供了一种新思路。

关键词: 多节点柔性着陆器; 非一致约束; 小行星柔性附着; 控制障碍函数; 分布式优化

中图分类号: V448.22

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)03-0225-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230136

引用格式: 柴敬轩, 吴新裕, 龚有敏, 等. 多节点柔性着陆器非一致约束处理[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(3): 225-232.

Reference format: CHAI J X, WU X Y, GONG Y M, et al. Non-uniform constraints processing for multi-node flexible lander[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(3): 225-232.

引 言

小行星保留了太阳系起源、形成与演化的重要信息。小行星探索是人类进一步了解宇宙、探寻生命起源、开发和利用空间资源的必经之路, 对科技进步和人类文明的发展具有重要意义。

从科学成果来看, 不同探测形式所获得的信息也不同。目前世界上主要以小行星表面采样返回探测为主, 这是获取小行星科学数据最直接有效的途径, 技术难度也极为复杂。如已经取得成功的“隼鸟号1号”(Hayabusa 1)和“隼鸟2号”(Hayabusa 2)^[1-2]及目前已经成功完成采样并返回的“冥王号”(Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer, OSIRIS-REx)^[3]。附着采样返回的任务成果最为丰厚, 难度也最大。“隼鸟1号”第一次在“糸川”(25143 Itokawa)小行星着陆采样时就失败了, 因其着陆前姿态发生偏斜, 两次轻微反弹后, 采样器和太阳能帆板的前端一起触地, 致其意外进入安全模式^[4]; 而“罗塞塔号”(Rosetta)搭载的“菲莱号”(Philae)着陆器在着陆最后阶段也因制动问题, 发生了着陆弹跳, 并未按计划落入光照区, 导致其只进行了十几个小时的观测就进入了永久休眠^[5]。

小行星具有微引力、星表障碍复杂的环境特点。“微引力”是指小行星表面为微引力环境, 逃逸速度很

低, 着陆器易发生弹跳^[6]。“星表障碍复杂”是指小行星形状各异, 其地貌可能包含大量岩石、陨石坑、沟壑等陡坡以及非连续地貌^[7]。因此, 常规着陆器很难成功附着到小行星的表面。针对这一问题, 一直有学者从新型着陆器寻求突破。

近年来, 随着柔性材料, 包括流体、聚合物、胶体、颗粒材料和生物材料的快速发展^[8-10], 柔性机器人受到了学者们广泛的关注。柔性机器人最重要的特点是变形可控和对冲击具有吸收的能力。这些特点十分适合小行星着陆过程, 因此陆续有学者开始采用刚柔耦合的理念设计小行星着陆器。文献[11]提出了一种在常规刚性着陆器加装柔性板的构型, 希望用柔性板与星表接触而实现稳健附着; 文献[12]提出了一种由3个常规着陆器驱动一张柔性网的构型, 并对其附着稳定性进行研究, 得出了所设计的着陆器着陆效果优于刚性着陆器的结论; 文献[13]提出了一种由3个推力单元和安全气囊相互连接而成的结构, 重点研究了其多个节点协同控制的问题; 文献[14-15]提出一种由“绳索”和“伸缩筒”构成的行星着陆器, 并且经过大量的实物试验, 研究发现该着陆器可通过变形适应各种复杂的星表环境, 具有极强的鲁棒性, 但也存在运动规划复杂的劣势。综上可知, 引入柔性材料虽然可以增强着陆器附着的成功率, 但也会增加规划和控制的难

度,因此文献研究的重点多集中在柔性着陆器的规划和控制。

文献[16~17]从概念提出了一种采用“面团状”柔性材料构成的多节点着陆器,结构如图1所示。柔性着陆器的整体外形可通过节点的运动而改变,该变形可使着陆器与着陆区的星表地貌相匹配。其次在着陆的瞬间,刚性节点在触地时一旦有弹起趋势就会受到柔性材料的牵扯,不同节点之间也会相互制约,从而耗散掉部分动能,实现稳健的附着。然而新思路也同时引入了新问题。与常规的着陆器相比,“多节点”和“柔性连接”虽然使着陆器具有可变形、强感知能力的优势,但其需协调并处理的信息量也显著增大。若采用集中式处理的方式,现有的星载计算机能力无法满足运算处理^[18],必须采用分布式的架构,各个节点仅规划并控制自身的运动,处理自身获取到的信息。此外,采用分布式架构还可提高柔性着陆器的容错能力,增强系统的可扩展性。但分布式架构缺少统一的调度,各节点可能会出现规划冲突^[19],也就是非一致约束的问题。

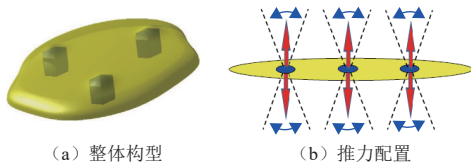


图1 多节点柔性着陆器示意图

Fig. 1 Illustration of multi-node flexible lander

所谓“非一致约束”是指:各节点的任务目标约束与整个着陆器固有约束相互冲突的情况。例如,在实际附着过程中,着陆器需以更具有“凝聚性”的形状附着。此时各个节点将分别确定各自的着陆点(也就是任务目标约束,任务目标约束往往是根据着陆器实时状况确定的,无法提前确定),在这种情况下各节点极有可能求解出相同的着陆点,或者是距离很近的着陆点。若不加以处理,各节点将会因间距过小而相互碰撞,从而违反节点之间安全距离的约束(固有约束)。值得一提的是,在集中式框架下各节点将进行全局的统筹规划,必然不会产生非一致约束。但在分布式框架下,各节点有自己的规划目标,在完成各自目标时才可能违反固有约束,因此非一致约束是在分布式框架下所特有的问题。

为解决分布式架构下,多节点柔性着陆器的非一致约束问题。本文以多节点柔性着陆器的协同轨迹规划问题为例,建立了节点的运动学模型和连接拓扑。采用控制障碍函数(Control Barrier Functions, CBF)

对非一致约束建模,并将其作为二次优化问题的不等式约束条件,各节点分布式求解上述优化问题,从而确定各自的运动轨迹。最后通过仿真论证提出非一致约束处理方法的有效性。

1 多节点柔性着陆器

多节点柔性着陆器计划采用“面团状”的柔性材料(如硅橡胶和硫化橡胶)^[20],其内部嵌入多个(本文以3个为例进行说明)具有机动和感知能力的刚性节点(后文统称为“节点”)。其构型如图1(a)所示。每个节点都搭载有宽窄视场相机、激光雷达、惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)等感知设备及科学载荷。节点可在柔性体内部小范围运动,但受到柔性体覆盖的影响,节点的推力输出方向单一,其推力大小连续可控,如图1(b)所示,仅通过改变节点的翻转和俯仰角而小范围改变推力方向。

由于柔性多节点着陆器的每个节点都具有感知能力,如图2(a)所示,可通过分布式敏感器的布局,更准确地感知星表环境;柔性多节点着陆器在着陆时可以通过柔性体与多节点间的相互作用,耗散掉部分着陆能量,从而减少着陆器的弹跳,如图2(b)所示;柔性多节点着陆器可通过柔性变形机制在着陆前匹配星表地貌,从而使着陆器着陆更稳健,如图2(c)和图2(d)所示。

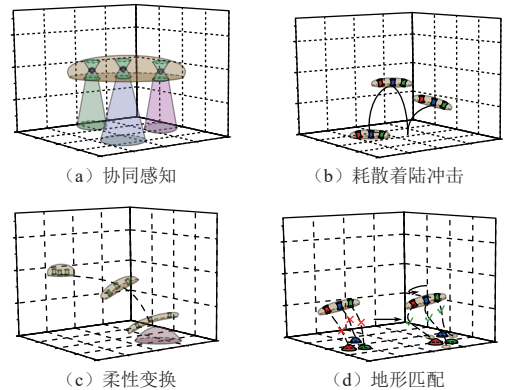


图2 多节点柔性着陆器的优势

Fig. 2 Advantages of multi-node flexible lander

1.1 多节点柔性着陆器建模

由上一节可知,希望各个节点是完全分布式控制的。为建立多节点柔性体着陆器的运动学模型,本文采用一种基于距离的无向图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 表示节点之间的连接拓扑,其中: \mathcal{V} 是多节点柔性着陆器中的节点集合,用边集 $\mathcal{E} = \{(i, j) \in \mathcal{V} (i \neq j) \mid \|x_{ij}\| \leq d_a \forall i, j \in \mathcal{V}\}$ 表示节点之间的相对距离,其中, d_a 为节点之间的最大

安全距离, 也就是柔性体最大的拉伸距离。则节点*i*的邻居可以被定义为 $\mathcal{N}_i := \{j \in \mathcal{V} | (i, j) \in \mathcal{E}\}$, 这意味着节点*i*可获取到节点*j*的信息。因为本文采用的是无向图, 所以 $j \in \mathcal{N}_i \Leftrightarrow i \in \mathcal{N}_j$ 成立。

考虑一个具有3个自由运动节点的柔性体着陆器, 如图3所示。定义星体坐标系为 \mathcal{F}_w , 节点坐标系为 \mathcal{F}_i 。则节点*i*在星体坐标系 \mathcal{F}_w 下的轨迹为 $\delta_{wi}(t)$, 节点速度为 \mathbf{v}_{wi} 。将节点速度作为节点的控制输入, 则节点运动学模型为

$$\dot{\delta}_i(t) = \mathbf{v}_{wi} \quad (1)$$

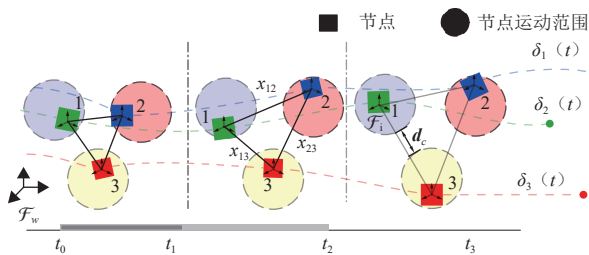


图3 节点间相对运动示意图

Fig. 3 Illustration of relative motion between nodes

值得注意的是, 本文采用分布式架构, 每个节点的控制输入是在其节点坐标系 \mathcal{F}_i 考虑的, 因此控制器使用的只能是节点坐标系获得的相对信息。用 \mathbf{v}_{wi}^b 表示节点坐标系下, 节点相对于星体坐标系 \mathcal{F}_w 的速度。 \mathbf{x}_{ij} 表示在节点坐标系 \mathcal{F}_i 下获得节点*i*与节点*j*的距离。

1.2 非一致约束分析

节点只能在柔性体内部进行小范围的运动, 节点之间的距离过近会导致节点之间的碰撞, 如图4所示。节点之间的距离过远会导致柔性体过度拉伸, 这与Renold^[21]集群法则中关于“凝聚力”与“独立性”的矛盾十分相似。这种位置的约束冲突就是一类典型的非一致约束。由于多节点柔性着陆器的各个节点相互独立。在分布式框架下, 每个节点都具有自己独立的控制器, 若不加以协调很容易出现上述矛盾。当多节点柔性着陆器被轨道器释放后, 需要经过协同展开→协

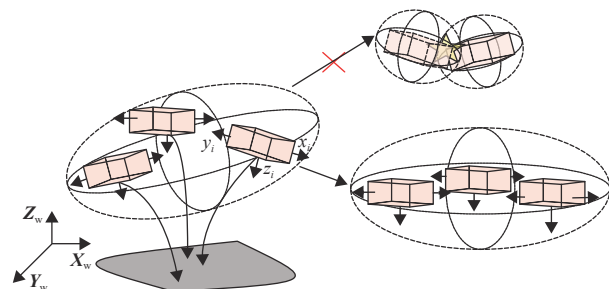


图4 节点碰撞示意图

Fig. 4 Illustration of nodes collision

同减速→协同避障→协同附着等几个阶段, 每个阶段都可能出现上述非一致约束。本文将以此种节点位置上的非一致约束问题为例, 后文展开论述。(假定各节点的任务目标为实现“凝聚力”, 而存在的固有约束为“独立性”约束)

由于柔性着陆器各节点在下降轨迹可能会面临“凝聚力”与“独立性”的矛盾, 为解决该问题, 应分别考虑这两种约束。首先考虑节点的“凝聚力”约束, 在某些任务目标下, 需要着陆器各节点的位置尽可能紧凑, 可将这种约束描述为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_{ij}(t)\| = 0, \forall i, j \in \mathcal{V} \quad (2)$$

其中: $\|\mathbf{x}_{ij}(t)\|$ 为各节点之间的相对距离, 当式(2)成立时, 各节点位置趋于一致。但式(2)只是理论上使节点之间的距离收敛到0, 以表示着陆器的“凝聚力”, 实际上各个节点都有碰撞体积, 因此节点之间的距离不会为0。

其次要考虑“独立性”, 也就是节点之间避碰的问题。同样用节点之间的距离 $\|\mathbf{x}_{ij}(t)\|$ 定义节点的“独立性”约束

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_{ij}(t)\| \geq d_c, \forall i, j \in \mathcal{V} \quad (3)$$

其中: d_c 为节点之间的安全距离 \mathcal{F}_w , 进一步将这种避碰约束定义为前向不变集

$$C := \{\mathbf{x}_i, i \in \mathcal{V} \mid \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \geq d_c, \forall i, j \in \mathcal{V} (i \neq j)\} \quad (4)$$

值得注意的是, 在实际中, 须保证“独立性”约束式(3)优先于“凝聚力”约束式(2), 因为碰撞会直接损坏节点, 并且“凝聚力”约束使各节点在相互距离收敛到0时, 势必会导致碰撞, 所以当约束出现冲突时, 必须对其优先级进行区分。综上所述, 多节点柔性着陆器非一致约束处理规则: 在满足固有约束(独立性)的同时尽可能保证任务目标约束(凝聚力)。

2 分布式非一致约束处理方法

受到文献[22~23]的启发, 本文通过控制障碍函数将非一致约束构建为二次规划(Quadratic Program, QP)问题的不等式约束, 通过求解该优化问题, 而确定各个节点的控制速度 \mathbf{v}_{wi} 。根据上述思路, 构建如下优化问题

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{v}_{wi}} (\mathbf{v}_{wi}^b)^T \mathbf{v}_{wi}^b + \sigma^2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} \text{“任务目标”约束 } X - \sigma \\ \text{“固有存在”约束 } X \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

因为“凝聚性”约束为任务目标约束，仅是一种期望，并非必须满足的硬约束，所以引入 σ 作为“凝聚性”约束的松弛变量，可利用松弛变量来平衡凝聚性与固有的“独立性”矛盾。上述优化问题的目标函数中，最小化 σ 意味着尽可能实现“凝聚性”，其次通过二次型对节点的控制输入作为目标函数，可保证节点的控制能量尽可能小。

2.1 构建“独立性”约束

作为本文的基础，回顾文献[23]所提出的一种基于零障碍函数（Zero Control Barrier Functions, ZCBF）二次规划的控制方法。考虑如下控制系统

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (6)$$

其中： $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{x})$ 满足局部Lipschitz条件； \mathbf{u} 为控制输入，其控制任务是使状态 \mathbf{x} 满足前向不变集

$$C_o = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m | H(\mathbf{x}) \geq 0\} \quad (7)$$

其中： H 是一个连续可微的函数。根据上述控制任务，文献[23]中有如下定义。

定义 1^[23] 如果存在一类扩展 \mathcal{K} 函数 α 使得 $\sup_{\mathbf{u} \in \mathbb{R}^l} (\dot{H}(\mathbf{x}) + \alpha(H(\mathbf{x}))) \geq 0$ ，则 $H(\mathbf{x})$ 为前向不变集 C_o 上ZCBF，且对于任意的Lipschitz连续的控制量 \mathbf{u} 满足条件为

$$\mathcal{L}_f H(\mathbf{x}) + \mathcal{L}_g H(\mathbf{x})\mathbf{u} + \alpha(H(\mathbf{x})) \geq 0 \quad (8)$$

其中： \mathcal{L}_f 和 \mathcal{L}_g 分别为函数 $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{x})$ 的微分。上述定义论述了ZCBF的充要条件。而本文主要利用该函数，通过节点之间的相对距离信息构建各节点的“独立性”约束。设计如下ZCBF函数

$$H_{ij} := \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2 - d_c^2 \quad (9)$$

则前向不变集可改写成

$$C := \{\mathbf{x}_i, i \in \mathcal{V} | H_{ij} \geq 0, \forall i, j \in \mathcal{V} (i \neq j)\} \quad (10)$$

根据定义1^[23]可得出如下定理用以实现节点之间的避碰。

定理 1 如果节点的初始位置在不变集 C 内，且节点的控制输入 \mathbf{v}_{wi}^b 是Lipschitz连续的且满足式(11)，则节点位置 \mathbf{x}_i 将始终满足前向不变集，即节点之间的位置关系 \mathbf{x}_{ij} 将始终满足“独立性”约束。

$$\mathbf{x}_{ij}^T \mathbf{v}_{wi}^b \leq k_c (\|\mathbf{x}_{ij}\|^2 - d_c^2), \forall j \in \mathcal{N}_{di}, k_c > 0 \quad (11)$$

证明 将本文所设计的前向不变集式(9)代入定义1^[23]式(8)，可得

$$2(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^T (\dot{\mathbf{x}}_i - \dot{\mathbf{x}}_j) \geq -4k_c (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2 - d_c^2) \quad (12)$$

其中：扩展 \mathcal{K} 函数 $\alpha(H) = 4k_c H$ ，根据节点的运动学式(1)和节点之间相对坐标变换关系将式(12)改写为

$$-\mathbf{x}_{ij}^T \mathbf{v}_{wi}^b - \mathbf{x}_{ji}^T \mathbf{v}_{wj}^b \geq -2k_c (\|\mathbf{x}_{ij}\|^2 - d_c^2) \quad (13)$$

对于节点 i 而言，如果采用式(13)构建“独立性”约束。则节点 i 需要知道在其自身坐标系 \mathcal{F}_i 下，与所有邻居的相对距离信息 \mathbf{x}_{ij}^T ，以及在其所有的邻居坐标系，节点 i 、 j 的相对距离信息 \mathbf{x}_{ji}^T ，这样会增加节点信息获取的难度，节点 i 与节点 j 具有相同的邻居，也就是 $j \in \mathcal{N}_{di} \Leftrightarrow i \in \mathcal{N}_{dj}$ ，因此可将式(13)变换为

$$-2\mathbf{x}_{ij}^T \mathbf{v}_{wi}^b \geq -2k_c (\|\mathbf{x}_{ij}\|^2 - d_c^2) \quad (14)$$

对式(14)进行变换即可得到式(11)，综上所述证明了定理1。本文主要采用式(11)来构建固有约束条件，作为QP优化问题对控制目标的不等式约束，且该方法是完全分布式的，因为对于节点 i 而言，需要获取信息仅为在节点 i 坐标系，其邻居的相对距离信息 \mathbf{x}_{ji}^T 。

2.2 构建“凝聚性”约束

接下来讨论节点间的“凝聚性”约束构建问题，考虑如下节点速度控制输入 \mathbf{v}_{wi}

$$\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij}^T \mathbf{v}_{wi}^b \geq k_p \left\| \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij} \right\|^2 \quad (15)$$

其中： k_p 为增益，进一步改写式(15)可得

$$\frac{\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij}^T}{\left\| \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij} \right\|} \mathbf{v}_{wi}^b \geq k_p \left\| \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij} \right\| \geq 0 \quad (16)$$

其中： $\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij} \neq 0$ ，式(16)表示从节点坐标系 \mathcal{F}_i 上看，节点 i 的速度 \mathbf{v}_{wi} 与其所有邻居相对方向向量加和 $\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij}^T / \left\| \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij} \right\|$ 的内积大于0，这意味着节点 i 的速度方向将始终朝向其所有邻居的中心，节点的速度大小将取决于节点与所有邻居所构成中心的相对距离，并受到增益 k_p 的控制，这样每个节点将不断向其所有邻居的中心运动，从而实现凝聚性。

定理 2 考虑多节点柔性着陆器的互联拓扑关系固定，若节点的控制速度满足Lipschitz连续和式(16)，则柔性着陆器具有凝聚性。

证明 定义能量方程 U_p

$$U_p := \frac{1}{4k_p} \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \|x_i - x_j\|^2 \geq 0 \quad (17)$$

对 U_p 求导可得

$$\dot{U}_p = \frac{1}{2k_p} \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^\top (\dot{\mathbf{x}}_i - \dot{\mathbf{x}}_j) = \frac{1}{k_p} \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^\top \dot{\mathbf{x}}_i \quad (18)$$

根据节点之间的相对变换关系, 将式 (18) 改写为

$$\dot{U}_p = -\frac{1}{k_p} \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij}^\top \mathbf{v}_{wi}^b \quad (19)$$

将式 (15) 代入式 (18) 可得

$$\dot{U}_p \leq -\sum_{i \in \mathcal{V}} \left\| \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij} \right\|^2 \leq 0 \quad (20)$$

由于 \mathbf{v}_{wi}^b 满足 Lipschitz 连续, 根据 LaSalle's 不变集理论, 则各节点“凝聚性”约束式 (16) 成立。

2.3 构建优化问题

在 2.1 节与 2.2 节分别建立了 QP 优化问题的“独立性”与“凝聚性”约束。但上述两种约束无法同时满足。因此引入松弛变量对“凝聚性”约束进行放松

$$\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij}^\top \mathbf{v}_{wi}^b \geq k_p \left\| \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij} \right\|^2 - \delta_i \quad (21)$$

综上所述, 每个节点的控制速度可以通过求解如下优化问题获得

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{wi}^b = \arg \min_{\mathbf{v}_{wi}^b \in \mathbb{R}^6, \delta_i \geq 0} (\mathbf{v}_{wi}^b)^\top \mathbf{v}_{wi}^b + \delta_i^2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij}^\top \mathbf{v}_{wi}^b \geq k_p \left\| \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_{ij} \right\|^2 - \delta_i \\ \mathbf{x}_{ij}^\top \mathbf{v}_{wi}^b \leq k_c (\|\mathbf{x}_{ij}\|^2 - d_c^2), \forall j \in \mathcal{N}_{di} \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

最小化 $\|\mathbf{v}_{wi}^b\|$ 可以节约燃料, 并且能使节点在末端速度尽可能的低。最小化 δ_i 可使节点获得最大限度的“凝聚性”, 也就是各节点在不发生碰撞时, 柔性体能处于最小体积状态, 从而能避开一些环境中的复杂障碍物。

3 仿真分析

为验证所提出的非一致约束处理方法的有效性, 本文构建了两种典型的多节点柔性着陆器协同附着场景。为突出非一致约束问题, 在仿真中仅考虑节点的动力学, 不考虑其推力、姿态、质量变化等影响。

3.1 场景一仿真结果分析

场景一: 在仿真中设定各节点的初始位置分别为:

节点1 $(-0.25, -0.45, 9)$; 节点2 $(0, 0.5, 9)$; 节点3 $(0.35, -0.35, 9)$ 。而各节点的目标位置统一为 $(0, 0, 0)$ 。将各节点的目标位置设置为同一点, 是为了模仿多节点的独立的任务规划结果 (各节点可能同时认定一个点为最佳位置)。在实际运行中, 由于缺少集中的目标分配, 各节点都认为 $(0, 0, 0)$ 是自身最佳的着陆点。

场景一的仿真结果如图 5~9 所示。由图 5 可见, 各节点受“独立性”约束影响, 并没有运动到同一点, 而是在距离目标点处 0.15 m (节点间最小距离) 处均匀分布。可见当任务目标约束与固有约束相冲突时, 本文所提出的方法可以在保证固有约束的前提下, 最大

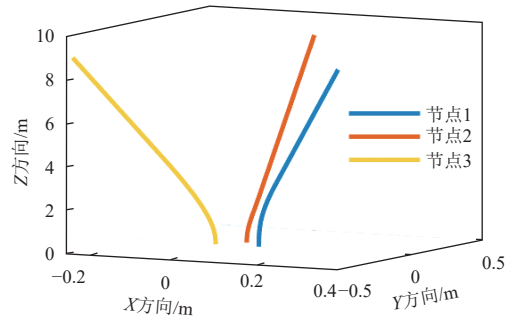


图 5 各节点着陆轨迹 (场景一)

Fig. 5 Trajectories of nodes (case 1)

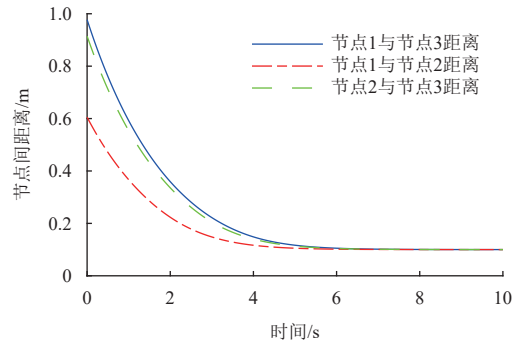


图 6 节点间距离 (场景一)

Fig. 6 Distance evolution between nodes (case 1)

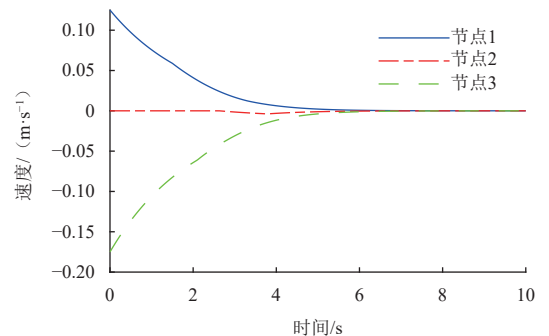


图 7 各节点 x 向运动速度 (场景一)

Fig. 7 Velocity evolution of the nodes in x direction (case 1)

限度地满足任务目标。由图7~9可见,各节点3轴速度变化也比较平缓,各节点协同效果较好。

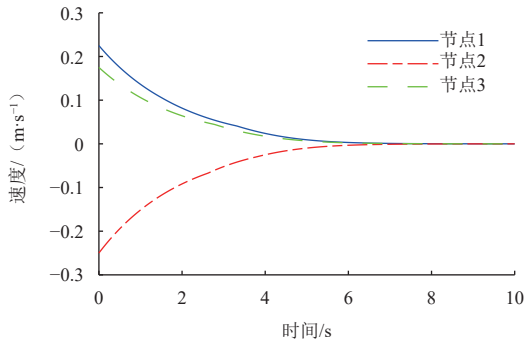


图8 各节点y向运动速度(场景一)

Fig. 8 Velocity evolution of the nodes in y direction (case 1)

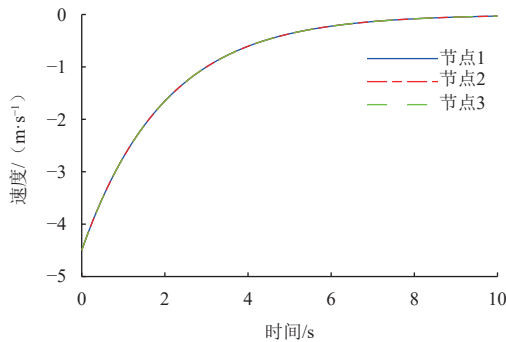


图9 各节点z向运动速度(场景一)

Fig. 9 Velocity evolution of the nodes in z direction (case 1)

3.2 场景二仿真结果分析

场景二:在仿真中给定各节点的初始位置为:节点1(0.2, 0.8, 9);节点2(-0.707, -0.707, 9);节点3(0.707, -0.707, 9)。目标位置为:节点1(-0.707, 0.707, 0);节点2(0, -1, 0);节点3(1, 0, 9)。这样设置参数是为了模拟着陆器在着陆前绕其中心旋转90°,如图2(d)所示,使各节点能避开星表尖锐障碍。剩余通用参数设置见表1。

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters setting

仿真参数	数值
速度增益 k_p	0.55
分类函数系数 k_c	0.25
仿真步长/s	0.01
节点间最小距离 d_c/m	0.1
节点间最大距离 d_r/m	1.9

场景二构建了多节点柔性着陆器的旋转运动,其仿真结果如图10~14所示。由仿真结果可见,各个节点准确到达了目标位置。通过场景二仿真可知,当各

节点的目标约束与固有约束无冲突时,本文所提算法并不会对节点的任务目标产生影响。因此可以将本文

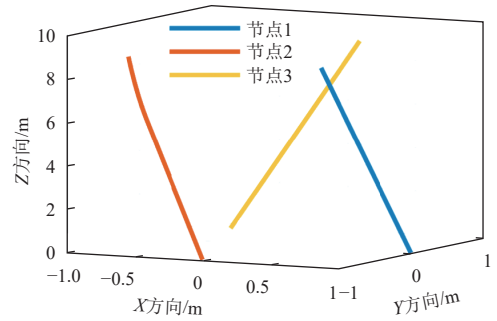


图10 各节点着陆轨迹(场景二)

Fig. 10 Trajectories of nodes (case 2)

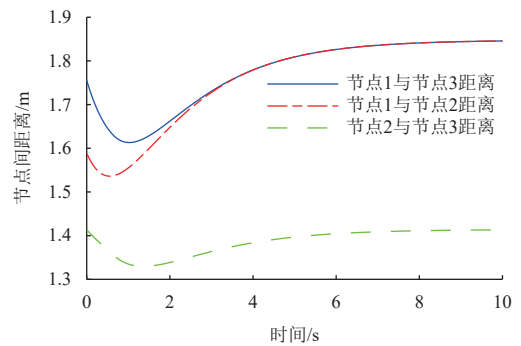


图11 节点间距离(场景二)

Fig. 11 Distance evolution between nodes (case 2)

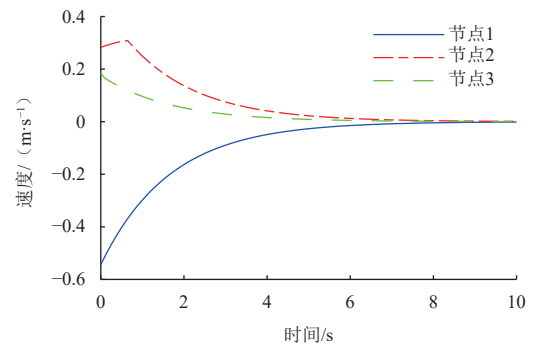


图12 各节点x向运动速度(场景二)

Fig. 12 Velocity evolution of the nodes in x direction (case 2)

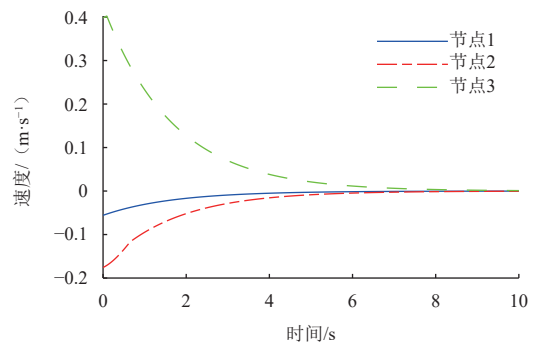


图13 各节点y向运动速度(场景二)

Fig. 13 Velocity evolution of the nodes in y direction (case 2)

所提出非一致约束处理方法直接整合进已有制导轨迹优化方法中。

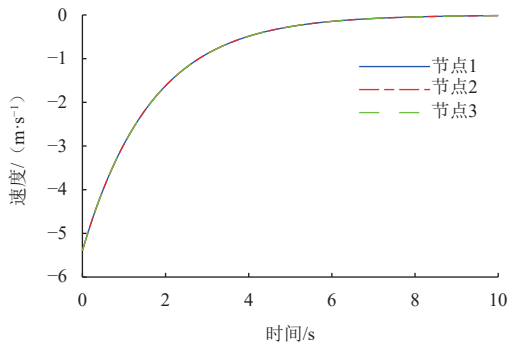


图14 各节点 z 向运动速度(场景二)

Fig. 14 Velocity evolution of the nodes in z direction (case 2)

4 结论

针对近期学者们所提出的一种面向小行星附着的多节点柔性着陆器, 本文研究了该新型着陆器在附着过程中可能出现的非一致约束问题。给出了非一致约束的定义, 并指出非一致约束是多节点柔性着陆器在分布式架构下所特有的一类约束。以多节点柔性着陆器的轨迹规划问题为研究场景, 提出了一种基于控制障碍函数的非一致约束建模方法, 进而通过构建分布式优化问题求解各节点的无冲突下降轨迹。通过仿真对所提的方法进行了验证, 仿真结果表明本方法可以有效解决非一致约束问题。未来计划将所提出的方法与现有的轨迹优化方法相结合, 实现多节点柔性着陆器分布式的多节点协同轨迹优化。

参 考 文 献

- AKIRA F. The rubble-pile asteroid itokawa as observed by Hayabusa[J]. *Science*, 2006, 312(5778): 1330-1334.
- YUICHI T, MAKOTO Y, MASANAO A, et al. System design of the Hayabusa 2 Asteroid sample return mission to 1999 JU3[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 91: 356-362.
- CHESLEY S R, FARNOCCHIA D, NOLAN M, et al. Orbit and bulk density of the OSIRIS-REx target asteroid(101955)Benu[J]. *Icarus*, 2014, 235: 5-22.
- YANO H, KUBOTA T, MIYAMOTO H, et al. Touchdown of the Hayabusa spacecraft at the Muses sea on Itokawa[J]. *Science*, 2006, 312(5778): 1350-1353.
- BIELE J, ULAMEC S, MAIBAUM M, et al. The landing of philae and inferences about comet surface mechanical properties[J]. *Science*, 2015, 349(6247): aaa9816.
- ZENG X Y, LI Z W, GAN Q B, et al. Numerical study on low-velocity impact between asteroid lander and deformable regolith[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022, 45(9): 1644-1660.
- HUANG C Y, YU Y, CHENG B, et al. Long-term trends of regolith movement on the surface of small bodies[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 110(3): 2283-2296.
- MARECHAL L, BALLAND P, LINDENROTH L, et al. Toward a common framework and database of materials for soft robotics[J]. *Soft Robotics*, 2021, 8(3): 284-29.
- SINATRA N, TEEPLE C, VOGT D, et al. Ultragente manipulation of delicate structures using a soft robotic gripper[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(33): 5425.
- XIONG J Q, CHEN J, LEE P S. Functional fibers and fabrics for soft robotics, wearables, and human-robot interface[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(19): 2002640.
- FENG R Y, YOSHIDA K, LI J F, et al. Rebound stabilization for an asteroid lander by flexible plate design[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 131: 107969.
- ZHANG Y, YU Y, BAOYIN H X. Dynamical behavior of flexible net spacecraft for landing on asteroid[J]. *Astrodynamics*, 2021, 5: 249-261.
- ZHAI G, LI J, SUN Y Y, et al. Research on asteroid landing with a new flexible spacecraft[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 35(5): 04022068.
- LITTLEFIELD Z, SUROVIK D, VESPIGNANI M, et al. Kinodynamic planning for spherical tensegrity locomotion with effective gait primitives[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2019, 38(12-13): 1442-1462.
- SUROVIK D, WANG K, VESPIGNANI M, et al. Adaptive tensegrity locomotion: controlling a compliant icosahedron with symmetry-reduced reinforcement learning[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2021, 40(1): 375-396.
- 崔平远, 张成宇, 朱圣英, 等. 小天体柔性附着技术[J]. *宇航学报*, 2023, 44(6): 805-816.
- CUI P Y, ZHANG C Y, ZHU S Y, et al. Technologies for flexible landing on small celestial bodies[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(6): 805-816.
- YAN W F, FENG R Y, BAOYIN H X. Stability of a flexible asteroid lander with landing control[J]. *Aerospace*, 2022 9(11): 71.
- 徐瑞, 李朝玉, 朱圣英, 等. 深空探测器自主规划技术研究进展[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2021, 8(2): 111-123.
- XU R, LI Z Y, ZHU S Y, et al. Research progress of autonomous planning technology for deep space probes[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(2): 111-123, 109.
- 赵宇庭, 徐瑞, 李朝玉, 等. 基于动态智能体交互图的深空探测器任务规划方法[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2021, 8(5): 519-527.
- ZHAO Y T, XU R, LI Z Y, et al. Mission planning based on dynamic agent interaction graph for deep space probes[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(5): 519-527.
- 崔平远, 陆晓莹, 朱圣英, 等. 小天体柔性附着状态协同估计方法[J]. *宇航学报*, 2022, 43(9): 1219-1226.
- CUI P Y, LU X X, ZHU S Y, et al. Cooperative state estimation method for small celestial body flexible landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(9): 1219-1226.
- OSABER R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(3): 401-420.
- IBUKI T, WILSON S, YAMAUCHI J, et al. Optimization-based

distributed flocking control for multiple rigid bodies[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 1891-1898.

- [23] AMES A D, XU X, GRIZZLE J W, et al. Control barrier function based quadratic programs for safety critical systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 62(8): 3861-3876.

作者简介:

柴敬轩(1994-), 男, 博士生, 主要研究方向: 深空探测、多航天器编队控制等方面的研究。

通信地址: 广东省深圳市南山区西丽哈尔滨工业大学(深圳)空间科学与应用技术研究院(518055)

电话: 18101366180

E-mail: cjx6666@vip.163.com

龚有敏(1991-), 男, 助理教授, 主要研究方向: 行星探测着陆制导等。本文通信作者。

通信地址: 广东省深圳市南山区西丽哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院(518055)

E-mail: hitgym@163.com

Non-Uniform Constraints Processing for Multi-Node Flexible Lander

CHAI Jingxuan¹, WU Xinyu², GONG Youmin², MEI Jie², MA Guangfu²

(1. Institute of Space Science and Applied Technology, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055)

Abstract: To address the issue of non-uniform constraints in the cooperative descent trajectory planning of the novel multi-node flexible lander, a distributed optimization method based on control barrier functions is proposed. This method requires only relative distance information between nodes to solve the conflict-free descent trajectories for each node. The effectiveness of the proposed method is demonstrated through simulations of two typical scenarios of cooperative descent of the multi-node flexible lander. This approach offers a new perspective for addressing the non-uniform constraints problem of the multi-node flexible lander.

Keywords: multi-node flexible lander; non-uniform constraints; asteroid soft landing; control barrier function; distributed optimization

Highlights:

- The landing advantages of multi-node flexible lander were analyzed through its structure .
- The non-uniform constraints problem of multi-node flexible lander was defined and its modeling method was given.
- Based on the control barrier function, a method to solve the non-uniform constraints problem of multi-node flexible lander was proposed.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]