**快速自主飞行的鲁棒高效四旋翼轨迹规划**

**摘要:** 在这篇文章中，我们提出了一种稳健高效的四旋翼运动规划系统，用于在三维复杂环境中快速飞行。我们采用了一种运动学路径搜索方法，在离散控制空间中寻找一个安全、可实现运动学、最小时间的初始轨迹。我们通过B样条优化改进轨迹的平滑性和清晰度，该优化方法利用欧几里得距离场的梯度信息和动态约束，高效地利用B样条的凸包特性。最后，通过将最终轨迹表示为非均匀B样条，采用迭代时间调整方法来保证动力学可实现和非保守轨迹。我们在各种复杂的模拟环境中验证了我们提出的方法。该方法的能力也在具有挑战性的真实任务中进行了验证。我们将我们的代码作为开源软件发布。

**关键词:** 运动规划 路径规划 航空系统 感知和自主性 避碰

介绍

近年来，无人机在工业检测、搜救、包裹投递等领域有着越来越广泛的应用。为了在这些场景中实现完全自主，运动规划模块在生成安全和平滑的运动中起着至关重要的作用。

虽然四旋翼飞行器的轨迹生成已经做了大量的工作，但仍然有两个关键问题没有得到解决。首先，在给定有限的时间和机载计算资源，没有现有的工作保证以高成功率生成安全和运动动力学可行轨迹。其次，为了确保所产生的运动的kinodynamic的可行性，速度和加速度的约束往往是保守的。因此，所生成的轨迹的攻击性通常难以被调整以满足其中高飞行速度是优选的应用。

在本文中，我们提出了一种完整的、鲁棒的在线轨迹生成方法来系统地解决这两个问题。采用基于启发式搜索和线性二次最小时间控制的运动动力学路径搜索方法。该算法在离散控制空间中有效地搜索出安全可行且时间最小的初始路径。然后利用 b样条函数的凸包特性，结合梯度信息和动态约束条件，通过精心设计的 b 样条函数优化优化初始路径。该算法改进了初始轨迹，并快速收敛到一个平滑、安全、动态可行的轨迹。最后，将轨迹表示为非均匀 b样条，研究了导数控制点与时间分配之间的关系。在此基础上，采用迭代时间调整的方法，将不可行速度和加速度挤压出来同时避免对它们进行保守的约束。与现有方法相比，该方法能够在更短的时间内生成高质量的轨迹，且成功率更高。它能在动态可行性的前提下产生攻击运动。我们证明了该方法在众多复杂仿真环境中的有效性和鲁棒性。我们还证明，我们的方法是有能力的，即使挑战性的快速飞行，当轨迹应该在非常短的时间内重复生成的真实世界的实验。我们的贡献总结如下:

1) 我们提出了一个强大的和有效的系统的方法，结合kinodynamic路径搜索，B样条优化和时间调整，安全性，动态可行性和侵略性是从自下而上建立。

2) 我们提出了一个优化配方的基础上的船体属性的B-样条，巧妙地结合了梯度信息和动态约束，收敛速度快，生成平滑，安全和动态可行的轨迹。

3) 研究了非均匀B样条函数的导数控制点与时间分配的关系。应用基于关系的时间调整方法，以保证可行的和非保守的运动。

4) 我们提出了广泛的模拟和现实世界的评估，我们所提出的方法。源代码作为ros-package发布。

相关工作

硬约束方法

轨迹生成问题最近已被一些工作所解决。硬约束方法由最小捕捉轨迹生成开创[1]，其中轨迹被表示为分段多项式并通过求解二次规划（QP）问题来生成。[2]表明可以以封闭形式获得最小snap轨迹，其中通过迭代添加中间航路点来确保轨迹的安全性。工作[3]-[7]在两步管道中生成轨迹。首先提取由立方体[3]、[8]、球体[4]、[9]或多面体[5]序列表示的自由空间，然后进行凸优化，在可行空间内生成光滑轨迹。[6]，[7]提出了一种基于B样条的运动学搜索来寻找初始轨迹，然后通过弹性带优化方法进行优化。均匀B样条的使用保证了动态的可行性，但会产生保守运动。这些方法的一个共同缺点是轨迹的时间分配是由朴素启发式给出的。然而，选择不当的时间分配会显著降低轨迹的质量。此外，可行解只能通过迭代添加更多约束条件和求解二次规划问题来获得，这不利于实时应用。针对这些问题，[8]提出了一种寻找时间分配合理的路径，并通过优化保证轨迹的安全性和运动学可行性的方法。硬约束方法通过凸公式保证全局最优性。然而，自由空间中与障碍物的距离被忽略，这通常会导致轨迹接近障碍物。此外，运动学约束是保守的，使得弹道在快速飞行时速度不足。

软约束方法

还有一些方法将轨迹生成定义为考虑平滑性和安全性的非线性优化问题。[10]通过使用梯度下降方法最小化其平滑性和碰撞代价来生成离散时间轨迹。[11]具有类似的问题公式，但优化是通过无梯度采样方法来解决的。[12]将它们扩展到连续时间多项式轨迹。由于时间参数化是连续的，它避免了数值微分误差，更准确地表示四旋翼的运动，但它的成功率很低。为了解决这个问题，[13]首先使用基于信息采样的路径搜索方法找到一个无碰撞的初始路径，该路径用作非线性优化的更高质量的初始猜测，从而提高成功率。在[14]中，轨迹被参数化为均匀B样条。由于B样条本质上是连续的，因此不需要显式地强制连续性，这减少了约束的数量。由于其局部性，所以对于局部重新规划也特别有用。软约束方法利用梯度信息将轨迹推至远离障碍物的位置，但存在局部极小值问题，并不能很好地保证成功率和运动学可行性。我们的优化方法还利用梯度信息来提高轨迹的安全性。然而，不同于以往计算昂贵的沿轨迹线积分的方法，基于B样条的凸包性质重新设计了公式，使其更简单。极大地提高了计算效率和收敛速度。

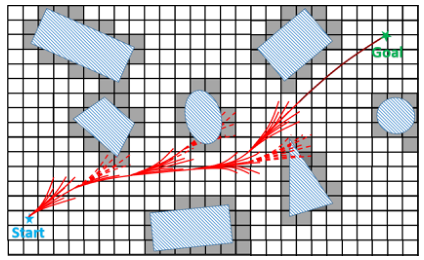


图2. 运动学路径搜索机制。红色曲线表示由公式3生成的运动基元。紫色曲线是第节中解释的解析展开

运动学路径搜索

我们的前端运动学路径搜索模块源于首次为自动驾驶汽车[15]提出的混合状态A\*搜索。它在体素网格图中寻找一个安全且动力学可行的轨迹，该轨迹相对于时间持续时间和控制成本最小。如图Alg1和图2所示，搜索循环类似于标准的A\*算法，其中和分别表示开集和闭集。使用考虑到四旋翼动力学特性的运动基元作为图边，而不采用直线。在第三节b部分中，使用Node结构记录了一个基元、基元结束的体素以及gc和fc成本。结构节点用于记录基元、基元结束的体素以及和成本（第III-B节）。函数***Expand()***迭代体素网格映射，除了最小的体素外，位于同一体素的网格映射将被函数***Prune()***修剪。函数***CheckFeasible()***检查剩余基元的安全性和动态可行性。这一过程将持续到任何基元达到目标或***AnalyticExpand()***(章节III-C)成功。

基本操作生成

首先讨论***Expand()***中使用的运动基元的生成。四旋翼系统的微分平坦性允许我们用三个独立的一维时间参数化多项式函数表示轨迹[1]：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

其中，。从四旋翼系统的角度来看，它是线性时不变系统。令作为状态变量，令作为输入变量，状态转移方程可以为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

状态方程的完整解表示为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

其给出初始状态为且控制输入为的四旋翼系统的轨迹。

在***Expand()***中，给定四旋翼飞行器的当前状态，一组离散化控制输入被应用于时间段。实际上，我们选择，这对应于二重积分器。每个轴统一离散为，这就产生个基元。

实际成本与启发成本

由于我们的目标是找到在时间和控制成本方面最优的轨迹，因此我们将轨迹的成本定义为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

在该定义下，***EdgeCost()***计算由离散化输入和持续时间生成的运动基元的代价为：。

按照A\* 的术语，使用来表示从起始状态到当前状态的最优路径的实际成本。假设该最优路径由个基元组成，被计算为



在A\*算法中使用一个可接受的且信息量充足的启发式函数对于加速搜索来说是必不可少的。因此，我们还设计了一个函数***Heuristic()***。通过使用庞特里亚金最小原理[16]，我们计算了一个从到目标状态最小化的闭合形式轨迹：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

其中，是当前位置、当前速度、目标位置和目标速度。是公式4定义的成本。为了找到使成本最小化的最佳时间，我们将代入并找到的根。选择最小成本和可行轨迹的根并表示为，并且使用作为启发式。最后，被定义为：

分析扩展

由于控制输入是离散化的，所以很难有一个基点正好在目标状态。为了解决这个问题并且加快搜索，引入了一种解析展开格式。当一个节点从开集中弹出时，从到的轨迹使用第3.2节中相同的方法计算。如果通过安全性和动态可行性检查，则提前终止搜索。该策略具有较高的搜索成功率和较早的搜索终止时间，在稀疏环境下尤其有效。

最优性与完备性

理论上，不能保证路径搜索的最优性和完全性，但实际运行效果较好。对于最优性，评估表明，牺牲最优性是可以接受的而且可以调整的。此外，假设初始路径位于最优附近，将认为找到了最优点。对于完整性，评估表明，在实践中，它可以在大多数情况找到一个可行的解决方案。另外，我们的方法可以扩展以支持可变长度的基元和[15]所描述的可变分辨率体素网格，以提供更强的完整性保证。

B样条轨迹优化

如章节3.4所述，路径搜索产生的路径可能是次优的。此外，由于忽略了自由空间中的距离信息，这条路径往往接近障碍物，如图5所示。因此，我们在提出的B样条优化中提高了路径的平滑度和间隙。利用均匀B样条的凸包特性，结合欧几里得距离场和动态约束的梯度信息，在很短的时间内收敛，生成平滑、安全、动态可行的轨迹。

均匀B样条

B样条是由其次数唯一确定的分段多项式，关于个控制点和节点向量，且。B样条轨迹由时间参数化，其中。对于均匀B样条，每个节点跨度具有相同的值。为了计算时间在的位置，我们首先将归一化为。然后，可以使用矩阵表示[17]来评估位置:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

这里是由确定的常数矩阵。在实现过程中，被设置为3。导数的计算完全相同，因为B样条的导数也是B样条。B样条的凸包性质（图3）对于设计的优化公式是必不可少的。我们在第4.2节中表明，它对于确保整个轨迹的动态可行性和安全性是非常有用的。

凸包性质

凸包性质（图3）在我们的方法中被广泛使用，以确保动态可行性和安全性。

对于动态可行性，约束所有速度和加速度控制点就足够和，和由公式7计算，其中为时间跨度

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

为了保证B样条的安全性，我们需要保证它的所有凸包都是无碰撞的。同样，我们需要确保凸包中任何一个被占用的体素与任何一个点之间的距离大于0(图4)，即。与此同时，体素与任何一个控制点之间的距离用表示。我们也有，因为在凸包内。将它们结合起来，总是有效的。

因此，如果我们确保：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

则保证凸包是无冲突的。

问题表述

对于由个控制点，我们优化个控制点的子集。第一个和最后一个控制点不能更改，因为它们决定了边界状态，总成本函数定义为:：



其中和是平滑度和冲突成本。和是对速度和加速度的软限制。、和综合考虑了平滑性、安全性和动态可行性。

我们通过一个函数来定义平滑代价，该函数捕获了轨迹的几何信息，并且不依赖于时间分配，这与最近许多使用平方snap或jerk积分的工作不同。因为优化后的时间分配可能会被调整，这将改变轨迹的导数，使优化的snap(jerk)变得没有意义。我们使用弹性带代价函数[18][19]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

从物理的角度来看，这个公式将轨迹视为弹性带，其中每个项和分别是连接节点,和,的两个弹簧的合力。如果所有项都等于零，则所有控制点将均匀分布在一条直线上，这是理想光滑的。

同理，碰撞代价也可以用作用在每个控制点上的障碍物的排斥力表示:



其中是与最近障碍物之间的距离。是可微分的潜在成本函数，其中指定障碍物清除的阈值：

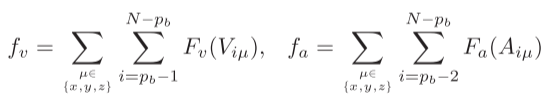


如第IV-B节所示，必须满足等式8，使得轨迹是无碰撞的。由于碰撞成本推动控制点远离障碍物，是明显的。此外，是仅取决于B样条的参数化的可调参数。实际上，只要我们选择显著小(在我们的实现中，)，则轨迹在大多数情况下是安全的。这在极端情况下可能无效，例如，环境非常混乱。即使如此，我们也可以重新参数化B样条以选择较小的rj，j+1，在此之后仍然满足等式。

我们以类似于等式12的成本惩罚沿着轨迹超过最大允许值和的速度或加速度。一维速度的损失为：



其中，。加速惩罚具有相同的形式。应用凸包属性（图3），我们定义和，以便惩罚不可行的速度和加速度控制点。



时间调整

虽然我们在路径搜索和优化中限制了运动动力学的可行性，但有时我们会得到不可行的轨迹。基本原因是梯度信息倾向于延长整体轨迹，同时将其推离障碍物。因此，四旋翼必须更积极地飞行，以便在相同的时间内行进更长的距离，如果原始运动已经接近物理极限，则这不可避免地导致过度积极的运动。

为了保证动态的可行性，我们采用了一种基于非均匀B样条的导数控制点和时间分配（节点跨度）之间的关系的时间调整方法。由于这些关系，我们可以通过调整相关的时间分配来改变飞行攻击性。因此，动态可行性可以确保没有过度保守的约束。

首先介绍了时间平差的数学基础。然后是Alg.2是为了解决过于激进的轨迹。

非均匀B样条

非均匀B样条是B样条的一种更一般的形式。与均匀B样条的唯一区别是它的每个节点跨度是相互独立的。非均匀B样条的一阶导数和二阶导数的控制点可以通过下式计算：



利用凸体性质（图3），为了加强由非均匀B样条表示的轨迹的动态可行性，将一阶和二阶导数的所有控制点都控制在可行域内就足够了。我们证明了这可以通过改变V-B节中不可行控制点的相应结点跨度来实现。

线结跨度调整

迭代时间调整

基于推导Sect.V-B Alg.2是用来执行动态的可行性。迭代的方式发现不可行速度和加速度控制点V andAofthe轨迹(第2行)和调整相应的结跨越(3 - 10行)。因为一个结跨越影响几个控制点,反之亦然,边界和和两个常数略大于1(5号线9)可以防止任何时间被延长。

实施细节

实验设置

本文中提出的运动规划方法在C++11中使用通用非线性优化求解器NLopt实现。我们设置用于路径搜索，,,在所有实验中，对于优化，对于时间调整。世界实验来验证我们提出的规划方法。

首先，我们进行快速自主飞行实验，在未知的杂乱环境（第七-B节）。我们使用配备VelodyneVLP-163-DLiDAR的自主开发的四旋翼平台（图6（a））。采用LOAM[20]来估计四旋翼的姿态并生成密集点云图。为了获得高速率的状态估计的反馈控制，我们融合了基于激光的估计与IMU和声纳测量的扩展卡尔曼滤波器（EKF）。包括运动规划、状态估计、映射和控制在内的所有模块都运行在双核3.00 GHz英特尔i7- 5500 U处理器上，该处理器具有8 GB RAM和256 GB SSD。

然后，在第VII-C节中，我们专注于测试我们提出的方法在攻击性飞行中的快速重新规划能力，为此我们使用更轻重量和敏捷的四旋翼平台（图6（b））。为了消除机载传感器带来的不确定性，运动捕捉系统OptiTrack 5提供了精确的姿势反馈，并预先构建了环境地图。运动规划和控制模块在Nvidia TX 2计算机上运行。

重新规划策略

1. 后向地平线地方规划：当四旋翼飞行器在未知环境中飞行时，由于传感范围有限，它必须频繁地重新规划其轨迹。为了提高效率，我们采用了滚动时域规划方案，其中仅在已知空间内生成轨迹（图7）。一旦运动基元在该范围之外结束，则终止路径搜索，并且随后进行优化和时间调整。在未知的空间中规划往往是无用的，因此可以节省这些努力。
2. 重新规划触发机制：在两种情况下触发重新规划。首先，如果当前轨迹与新出现的障碍物碰撞，则触发该安全轨迹6，这确保一旦检测到任何碰撞，就可以获得新的安全轨迹。第二，计划者在固定的时间间隔被调用。它使用最新的环境信息定期更新轨迹。

欧氏距离场

我们维护体素网格图的EDF用于我们的优化，其通过有效的O（n）算法[21]计算，其中n = N3是更新的体素网格的数量。为了补偿由体素网格图引入的EDF的离散化误差并有利于数值优化，使用三线性插值来提高距离和梯度信息的准确性[14]。EDF的全局更新是非常昂贵的，并且可以阻塞对于快速自主飞行至关重要的规划模块。为了解决这个问题，我们仅使用增量更新策略[22]更新感测范围内的体素网格。

结果

分析与比较

1. 比较的路径搜索:我们比较路径搜索方法[23],综合起来使用时间最优控制配方生成原语。比较是40×40×5地图随机部署100障碍和最大速度和加速度限制设置为3米/秒和2 m / s2。由于分辨率ofvoxel网格是我们建议的方法的性能的关键因素,不同的分辨率用于综合评价(表,列1行3 - 5)。对于一个公平的比较,我们使用[23]的开源实现。结果列在表5所示静力学,这两种方法生成kinodynamic可行的轨迹。我们的方法要快一个数量级,倾向于生成路径更短的时间。然而,控制成本略高。的体素裹粗,我们的方法的效率为代价增加控制成本和较低的成功率更高。这一趋势预计因为修剪原语与粗网格体素导致较低的搜索复杂度,而更为可行(也许优越)路径丢失。
2. 优化比较：对于后端轨迹优化，我们与以前的工作进行了比较[13]。我们以前的方法和所提出的方法都利用EDF进行非线性优化。为了公平起见，我们使用路径搜索给出的相同路径作为初始值。首先，我们比较了两种方法的目标函数相对于时间的成本（图8（a））。显然，所提出的方法的成本在最初的几毫秒内迅速下降，而另一个下降得慢得多。其次，如图8（B）和表II所示，进行平滑度（加加速度平方的积分）的比较。即使所提出的方法给出更少的时间，所得到的轨迹更平滑。

机载自主飞行

我们在具有挑战性的未知环境中进行了完全自主的快速飞行实验（图9（a））。为了进一步挑战我们的方法，我们使用以四旋翼为中心的半径为5 m的球体来修剪全局地图，并且仅使用该球体内的地图来生成轨迹（图9（b）-9（d）），这比我们的真实的感知范围小得多。非结构化的环境、有限的感知范围以及高飞行速度对运动规划模块提出了挑战，因为它需要在突然出现新威胁时持续快速地重新生成轨迹。我们请读者参考视频附件以获得更详细的信息.

侵略性飞行

在图10所示的环境中进行了攻击性飞行试验。在实验中，四旋翼的目标不断地和任意地由人改变。一旦设定了新的目标，就会立即重新规划和执行新的轨迹。最大速度和加速度分别设定为2.5m/s和1.5m/s2。这项任务在几个方面具有挑战性。由于飞行具有攻击性，目标变化具有突变性，因此运动规划模块需要在相当短的时间内生成新的轨迹，以便快速地对变化做出反应，从而使四旋翼飞行器的运动连续且平滑。此外，由于环境是有限的和杂乱的，很难在很短的时间内生成平滑，安全和动态可行的轨迹。实验验证了该方法在可行性的前提下能够生成攻击性运动。它也表明，我们的方法可以快速生成一个新的轨迹，在复杂的环境中，即使目标是突然改变在侵略性的飞行。视频中还包含更多细节。

结论

本文提出了一种新的四旋翼自主导航在线运动规划方法。我们解耦的在线快速运动规划问题的前端kinodynamic路径搜索和后端的非线性轨迹优化。我们采用了kinodynamic路径搜索，找到一个安全，kinodynamic可行的和最短的时间的初始路径，这是进一步改善的平滑度和间隙的梯度为基础的优化。通过利用B样条的船体性质，我们显着提高了效率和收敛速度的优化相比，以前的基于梯度的规划方法。最后，通过将航迹表示为非均匀B样条曲线，根据给定的期望攻击性来调整时间分配，并在各种复杂环境下进行了仿真验证。该方法的能力也验证了在具有挑战性的现实世界的任务。未来，我们计划在极端情况下挑战我们的四旋翼系统，例如大规模或动态环境。此外，我们将我们的轨迹优化方法扩展到群体问题。