**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，该优化方法利用欧氏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运动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 自主感知 避障

介绍

近年来，无人机在工业检测、搜救、包裹投递等领域得到广泛应用。为了实现这些场景中的完全自主，运动规划模块在生成安全和平滑的运动方面起着至关重要的作用。

尽管已经提出了大量关于四旋翼无人机轨迹生成的工作，但仍存在两个关键的未解决问题。首先，由于时间和机载计算资源有限，没有现有的工作能够保证以高成功率生成安全和运动学可行的轨迹。然而，轨迹生成的效率和鲁棒性至关重要。在许多情况下，比如四旋翼在未知环境中高速飞行时，需要在极短的时间内不断重新生成轨迹，以避免突发威胁。其次，为了确保生成的运动学可行性，通常会保守地强制执行速度和加速度的约束。因此，生成的轨迹的攻击性往往很难调整以满足需要较高飞行速度的应用。

本文提出了一种完整且鲁棒的在线轨迹生成方法，以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学路径搜索。它在离散化控制空间中高效地搜索安全、可行和最小时间的初始路径。然后，在经过精心设计的B样条优化中对初始路径进行优化，利用B样条的凸包性质来融合梯度信息和动态约束。它改进了初始路径并快速收敛到平稳、安全和动态可行的轨迹。最后，将轨迹表示为非均匀B样条，我们研究了导数的控制点和时间分配之间的关系。基于这些关系，采用迭代时间调整方法来挤出轮廓中不可行的速度和加速度。

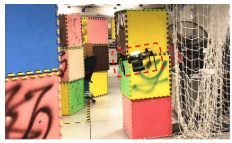
与现有的工作相比，我们提出的方法能够以更高的成功率在杂乱环境中更短的时间内生成高质量的轨迹。它可以在运动学可行性的前提下生成具有攻击性的运动。我们在许多模拟复杂环境中展示了我们的方法的效率和鲁棒性。我们还通过真实世界的实验表明，我们的方法即使在需要在极短的时间内不断重新生成轨迹的挑战性快速飞行时也是有能力的。我们的贡献总结如下：

1) 我们提出了一种鲁棒且高效的系统化方法，将运动学路径搜索、B样条优化和时间调整结合起来，从底层构建安全性、动态可行性和攻击性。

2) 我们提出了一种基于B样条的凸包性质的优化公式，精细地融合了梯度信息和动态约束，快速收敛以生成平稳、安全和动态可行的轨迹。

3) 我们研究了非均匀B样条的导数控制点和时间分配之间的关系。基于这些关系，采用时间调整方法来确保可行且非保守的运动。

4) 我们对提出的方法进行了广泛的模拟和实际世界的评估。源代码已发布为ROS包。



(a) 在未知环境中进行快速自主飞行

房间的摆设布局

中度可信度描述已自动生成

(b) 具有攻击性的运动学重新规划

图1. 我们提出的方法在（a）中的完全自主四旋翼上进行了测试，并且在（b）中在具有室内外部反馈的极其具有挑战性的快速重新规划上进行了测试。实验细节在第7节中给出。视频请访问https://www.youtube.com/watch?v=GIYGAjOeeI8&feature= youtu.be.

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。

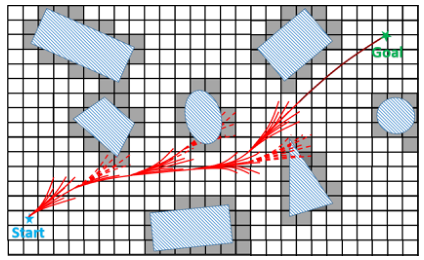


图2. 运动学路径搜索机制。红色曲线表示由公式3生成的运动基元。紫色曲线是第节中解释的解析展开

图片包含 表格

描述已自动生成

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运动学可行的轨迹，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。使用考虑到四旋翼运动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。

图表, 折线图

描述已自动生成

图3. (a)轨迹由B样条（pb =3）表示。每个分段由控制点的对应船体界定（示例凸包和分段以绿色和橙子示出）。(b)一阶导数（速度）也是B样条，因此它具有相同的性质。导数的控制点可以通过等式7计算。

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:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

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]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

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：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

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，其中是规定越障阈值：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

如第4.2节所示，必须满足公式8，使得轨迹是无碰撞的。由于碰撞成本使控制点远离障碍物，所以需要。此外，是可调节的参数，它完全取决于B样条函数的参数化方式。实际上，只要我们选择足够小(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，如环境非常混乱的情况下。即使如此，我们可以重新参数化B样条以选择较小的，在之后仍然满足公式8。

我们对沿轨迹的速度或加速度超过最大允许值和的情况进行惩罚，惩罚成本与公式12类似。对于一维速度，惩罚公式为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

其中，，加速惩罚具有相同的形式。应用凸包属性（图3）定义和，使不可行的速度和加速度控制点受到惩罚。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |

图表, 折线图

描述已自动生成

图4. 确保B样条（pb =3）的船体无碰撞的图示

时间调整

尽管在路径搜索和优化过程中增加了运动学可行性的约束，但有时仍会得到不可行的轨迹。基本原因是梯度信息倾向于拉长整个轨迹并将其推离障碍物。因此，四旋翼飞行器必须更加激进地飞行，以便在同一时间内飞行更长的距离，这将不可避免地导致过度激进的动作，特别是在原始动作已经接近物理极限的情况下。

为了保证动态可行性，我们采用了一种基于导数控制点和非均匀B样条时间分配（结节跨度）关系的时间调整方法。通过这些关系，我们可以通过调整相关的时间分配来改变飞行的激进性，从而确保动态可行性，避免过度保守的限制。

首先，我们介绍时间调整的数学基础。接下来，我们提出Alg. 2来解决过于激进的轨迹问题。

非均匀B样条

非均匀B样条是B样条的一般的形式，非均匀B样条与均匀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：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (15) |

利用凸包性质（图3），为了加强由非均匀B样条表示的轨迹的动态可行性，在可行域内强制一阶导数和二阶导数的所有控制点就足够了。我们证明了这可以通过改变5.2节中不可行控制点的相应结点跨度来实现。

节点跨度调整

设是速度的不可行控制点，让为最大不可行部分且，由公式15可知，受持续时间的影响，如果我们将该持续时间改为，则变为

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |

所以，如果我们设置，那么速度就是可行的。这是因为.

加速可行性的实施是类似的。我们知道实际上受到的影响，因为它与和耦合。我们将改为，其中，我们得到：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (17) |

迭代时间调整

基于5.2节，Alg.2是用来增加动态的可行性，它迭代地找到轨迹的不可行的速度和加速度控制点和，并调整相应的节点跨度。由于节点跨度影响一些控制点，反之亦然，所以用两个略大于1的常数和限制和可以防止任何时间间隔过度扩展。

图示

描述已自动生成

图5.基于使用梯度数值优化变形轨迹。红色和绿色曲线初始路径和优化后的b样条。黄点b样条的控制点。最初的路径接近障碍因为距离信息将被忽略,而基于b样条的推开梯度优化。

文本, 信件

描述已自动生成

实施细节

实验设置

本文中提出的运动规划方法在C++ 11实现的，并且使用了一个通用的非线性优化求解器NLopt。在所有的实验中，我们设置用于路径搜索，,,用于优化，用于时间调整。

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）。我们使用配备了Velodyne VLP-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。为了获得高速状态估计以进行反馈控制，我们使用扩展卡尔曼滤波器（EKF）将基于激光雷达的估计与IMU和声纳测量相结合。所有模块，包括运动规划、状态估计、地图构建和控制，均在双核 3.00 GHz Intel i7-5500U 处理器上运行，该处理器拥有 8 GB RAM 和 256 GB SSD。

在第7.3节中，我们重点测试了我们提出的方法在激进飞行中的快速重新规划能力，为此我们使用了一个更轻便、更灵活的四旋翼平台（图6(b)）。为了消除机载传感器引入的不确定性，我们使用OptiTrack5运动捕捉系统提供准确的位姿反馈，并预先构建了环境地图。运动规划和控制模块在Nvidia TX2计算机上运行。

图片包含 自行车

描述已自动生成

(a)自主飞行实验中使用的四旋翼平台

图片包含 游戏机, 电路, 生日

描述已自动生成

(b)四旋翼平台用于激进的重新规划实验

图6. 四旋翼平台用于（a）完全自主飞行和（B）积极的运动学重规划。

重新规划策略

(1) 后向视野的地方规划：在未知的环境中飞行时，四旋翼无人机由于传感范围有限，需要频繁重新规划轨迹。为提高效率，我们采用了后沿规划策略，在已知空间内仅生成轨迹（见图7）。当运动基元结束超出此范围时，路径搜索将终止，并进行优化和时间调整。在未知空间中规划往往是无用的，因此可以节省这些工作。

(2) 重新规划的触发机制：重规划分两种情况触发。首先，如果当前路径与新出现的障碍物相撞，则会触发重规划，以确保一旦检测到任何碰撞，就会提供一个新的安全路径。其次，规划器会在固定时间间隔内调用，它使用最新的环境信息定期更新轨迹。

欧氏距离场

我们使用一个高效的算法[21]来维护体素格网图的欧式距离场，其中是更新的体素网格数。为了弥补由于体素网格地图引入的离散化误差并改善数值优化，我们使用三线性插值来提高距离和梯度信息的准确性[14]。全局更新欧式距离场非常耗费资源，可能会阻塞重要的快速自主飞行规划模块。为了解决这个问题，我们使用增量更新策略[22]，只更新感知范围内的体素网格。

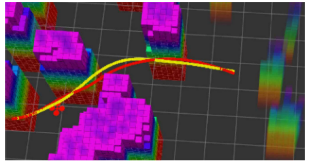
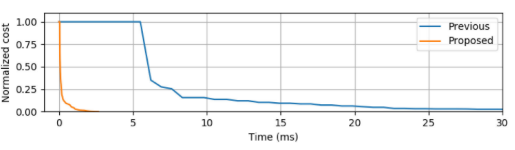


图7. 有限感测范围的局部规划策略。红色曲线和黄色曲线是优化前后的轨迹。不透明障碍和透明障碍是已知障碍和未知障碍



1. 通过目标函数的代价曲线比较了算法的收敛性能。该方法的成本在3ms内迅速下降到零，而另一种方法需要更长的时间。两种方法的成本都归一化为[0，1]以进行比较。两者的计算时间限制为30ms。

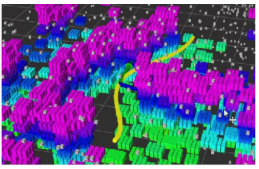
卡通人物

低可信度描述已自动生成

图8. 将我们提出的优化方法与随机杂波环境中基于梯度的优化方法[13]进行比较。



1. 自主飞行实验的环境设置



1. 飞行一，绕过垂直墙

游戏机里面的人物

低可信度描述已自动生成

1. 飞行二，避开垂直障碍物

卡通人物

中度可信度描述已自动生成

(d) 飞行三，穿过一个狭窄的洞

图9.在未知的杂乱环境中完全自主飞行。运动规划模块仅知道彩色图。在这种受限环境中，飞行1-3的最大和平均速度分别达到1.7 m/s和1.3 m/s2。

结果

分析与比较

(1)路径搜索的比较: 我们将我们的路径搜索方法与文献[23]中使用的方法进行了比较，两种方法都使用最优时间控制表达式来生成基本动作。在一个米的地图上，随机部署了100个障碍物，并且将最大速度和加速度限制分别设为和。由于体素网格的分辨率是我们所提出的方法性能的一个关键因素，因此我们使用不同的分辨率进行全面评估（表I的第1列，第3-5行）。为了公平比较，我们使用了[23]的开源实现。结果列在表I中。

据数据显示，两种方法都能生成运动学可行的轨迹。我们的方法速度快一倍，往往生成耗时更短的路径。然而，其控制成本略高。当体素网格变得更粗糙时，我们的方法效率会提高，但代价是更高的控制成本和更低的成功率。这个趋势是可以预期的，因为用更粗糙的体素网格剪枝基元会导致更低的搜索复杂度，同时也会失去更多可行（甚至更好）的路径。

表1. 路径搜索的比较

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | 攀爬时间(s) | 轨迹时间(s) | 控制成本() | 成功率(%) |
| 之前工作[23] | 平均值 | 0.0592 | 8.439 | 11.42 | 100.0 |
| 最大值 | 0.8740 | 20.000 | 28.00 |
| 方差 | 0.1060 | 2.970 | 4.07 |
| 当前工作(0.04m) | 平均值 | 0.0047 | 7.719 | 14.42 | 100.0 |
| 最大值 | 0.1837 | 10.500 | 24.50 |
| 方差 | 0.0113 | 0.909 | 3.60 |
| 当前工作(0.2m) | 平均值 | 0.0018 | 7.696 | 15.08 | 100.0 |
| 最大值 | 0.0287 | 10.500 | 27.50 |
| 方差 | 0.0017 | 0.917 | 3.78 |
| 当前工作(1.0 m) | 平均值 | 0.0017 | 7.645 | 16.20 | 77.8 |
| 最大值 | 0.0059 | 15.500 | 56.00 |
| 方差 | 0.0007 | 1.295 | 6.21 |

(2) 优化比较: 针对后端轨迹优化，我们与之前的工作[13]进行了比较。我们之前的方法和新方法都使用欧氏距离场进行非线性优化。为了公平起见，我们使用路径搜索得到的相同路径作为初始值。首先，我们比较了两种方法在时间方面的目标函数成本（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，而另一种方法下降得更慢。其次，在图8(b)和表II中展示了平滑度的比较（即平方加速度积分）。尽管为所提出的方法分配的时间更少了，但生成的轨迹更加平滑。

表2. 轨道优化方法的比较

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Jerk2的积分 | | | 时间(s) |
| 平均值 | 最大值 | 方差 |
| 之前工作[13] | 43.913 | 181.495 | 18.394 | 0.010 |
| 目前工作 | 35.932 | 131.913 | 13.118 | 0.001 |

机载自主飞行

我们进行了一项自主快速飞行实验，这项实验在如图9中具有挑战性的未知环境中进行。为了进一步测试我们的方法，我们使用了一个以四旋翼为中心的半径为5米的球体来限制全局地图，并且只使用该球体内的地图来生成轨迹，如图9.a-9.d所示。由于非结构化的环境、有限的感知范围和高速飞行对运动规划模块提出了挑战，因此它需要在突然出现新威胁时快速重新生成轨迹。建议读者参考视频附件以获得更详细的信息。

激进性飞行

在图10所示的环境中进行了激进性飞行试验。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和。

这项任务在几个方面具有挑战性。由于飞行具有激进性且目标变化突然，因此运动规划模块应该在相当短的时间内生成新的轨迹，以快速响应变化，从而使四旋翼的运动连续而平滑。此外，由于环境受限且杂乱无序，很难在很短的时间内生成平稳、安全和动态可行的轨迹。这次实验验证了我们的方法在可行性前提下可以生成侵略性运动。同时也表明，我们的方法可以在复杂环境中快速生成新的轨迹，即使在侵略性飞行过程中目标突然改变，更多详细信息请参见视频。

图片包含 游戏机, 文具, 工具

描述已自动生成

图10. 激进的飞行测试。在攻击性飞行中，目标被任意改变，新的轨迹被重新规划。

结论

在这封信中，我们提出了一种新颖的四旋翼自主导航在线运动规划方法。我们将在线快速运动规划问题分解为前端运动学路径搜索和后端非线性轨迹优化两个部分。我们采用运动学路径搜索来寻找一个安全、运动学可行且最小时间的初始路径，进而通过基于梯度的优化方法改善这条路径的平滑度和通行能力。我们通过利用B样条曲线的凸包属性，显著提高了优化的效率和收敛速度，相较于之前基于梯度的规划方法。最后，我们将轨迹表示为非均匀B样条曲线，根据给定的期望飞行攻击性调整时间分配。我们在各种复杂环境和模拟中验证了我们提出的方法，并验证了该方法在具有挑战性的实际任务中的能力。

将来，我们打算在大规模或动态环境等极端情况下挑战我们的四旋翼系统。此外，我们还将把我们的轨迹优化方法扩展到群体问题上。

参考文献

1. D. Mellinger and V. Kumar, “Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Shanghai, China, May 2011, pp. 2520–2525.
2. C. Richter, A. Bry, and N. Roy, “Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor ﬂight in dense indoor environments,” in Proc. Int. Symp. Robot. Res., Dec. 2013, pp. 649–666.
3. J. Chen, K. Su, and S. Shen, “Real-time safe trajectory generation for quadrotor ﬂight in cluttered environments,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, Zhuhai, China, Aug. 2015, pp. 1678–1685.
4. F. Gao and S. Shen, “Online quadrotor trajectory generation and autonomous navigation on point clouds,” in Proc. IEEEInt. Symp. Saf., Secur. Rescue Robot., Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 139–146.
5. S. Liu et al. “Planning dynamically feasible trajectories for quadrotors using safe ﬂight corridors in 3-d complex environments,” IEEE Robot. Autom. Lett., vol. 2, no. 3, pp. 1688–1695, Jul. 2017.
6. W. Ding, W. Gao, K. Wang, and S. Shen, “Trajectory replanning for quadrotors using kinodynamic search and elastic optimization,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2018, pp. 7595–7602.
7. W. Ding,W. Gao, K.Wang, and S. Shen, “An efﬁcient b-spline-based kinodynamic replanning framework for quadrotors,” 2019, arXiv:1906.09785.
8. F. Gao, W. Wu, Y. Lin, and S. Shen, “Online safe trajectory generation for quadrotors using fast marching method and Bernstein basis polynomial,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Brisbane, Australia, May 2018, pp. 344–351.
9. F. Gao, W. Wu, W. Gao, and S. Shen, “Flying on point clouds: Online trajectory generation and autonomous navigation for quadrotors in cluttered environments,” J. Field Robot., 2018. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21842
10. M. Zucker et al. “CHOMP: Covariant hamiltonian optimization for motion planning,” Int. J. Robot. Res., vol. 32, no. 9/10, pp. 1164–1193, 2013.
11. M. Kalakrishnan, S. Chitta, E. Theodorou, P. Pastor, and S. Schaal,“STOMP:Stochastic trajectory optimization for motionplanning,” inProc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2011, pp. 4569–4574.
12. H. Oleynikova, M. Burri, Z. Taylor, J. Nieto, R. Siegwart, and E. Galceran,“Continuous-time trajectory optimization for online UAV replanning,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., Daejeon, South Korea, Oct. 2016, pp. 5332–5339.
13. F. Gao, Y. Lin, and S. Shen, “Gradient-based online safe trajectory generation for quadrotor ﬂight in complex environments,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., Sep. 2017, pp. 3681–3688.
14. V. Usenko, L. von Stumberg, A. Pangercic, and D. Cremers, “Real-time trajectory replanning for MAVs using uniform b-splines and a 3d circular buffer,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., 2017, pp. 215–222.
15. D. Dolgov, S. Thrun, M. Montemerlo, and J. Diebel, “Path planning for autonomous vehicles in unknown semi-structured environments,” Int. J.Robot. Res., vol. 29, no. 5, pp. 485–501, 2010.
16. M. W. Mueller, M. Hehn, and R. D’Andrea, “A computationally efﬁcient motion primitive for quadrocopter trajectory generation,” IEEE Trans. Robot., vol. 31, no. 6, pp. 1294–1310, Dec. 2015.
17. K. Qin, “General matrix representations for b-splines,” Visual Comput., vol. 16, no. 3, pp. 177–186, 2000.
18. S. Quinlan and O. Khatib, “Elastic bands: Connecting path planning and control,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 1993, pp. 802–807.
19. Z. Zhu, E. Schmerling, and M. Pavone, “A convex optimization approach to smooth trajectories for motion planning with car-like robots,” in Proc. 54th IEEE Conf. Decis. Control, 2015, pp. 835–842.
20. J. Zhang and S. Singh,“LOAM:Lidar odometry andmapping in real-time,” in Proc. Robot., Sci. Syst., Jul. 2014, pp. 109–111.
21. P. F. Felzenszwalb andD. P.Huttenlocher, “Distance transforms ofsampled functions,” Theory Comput., vol. 8, no. 1, pp. 415–428, 2012.
22. T. Schouten and E. L. van den Broek, “Incremental distance transforms (IDT),” in Proc. 20th Int. Conf. Pattern Recognit., 2010, pp. 237–240.
23. S. Liu, N. Atanasov, K. Mohta, and V. Kumar, “Search-based motion planning for quadrotors using linear quadratic minimum time control,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., Sep. 2017,pp. 2872–2879