ART**路径平滑插值算法介绍**

1. 路径平滑算法

实车采集的初始路径通常存在不平滑、曲率不连续的问题，对此，本项目采用梯度下降法对路径进行优化，得到一条更加平滑、曲率更连续的全局路径。为了使用梯度下降法进行路径优化，设定的具体目标函数如下[1]：

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



图1 离散路径点示意图

其中，，其初始值即为实车采集的一系列路径点；如图1所示，为各路径点之间的位移矢量；为初始路径点坐标；，，为各项权重系数；为各路径点之间切向角的变化量，其具体表达式如下：

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

目标函数第一项是为了限制保证优化后的路径与原路径的偏离；第二项使路径尽量平滑；第三项在每个节点处对轨迹的瞬时曲率施加一个上限，并保证车辆的非完整约束要求。

本项目中采用梯度下降法进行求解，各项梯度的具体表达式如下。

第一项：

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

第二项[2]：

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

第三项：

各路径点之间切向角的变化量表示转换为下式

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

曲率的表达式为：

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

分别对三个的点的偏导数为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (7) |
|  |  | (8) |
|  |  | (9) |

其中：

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

为了更加方便的求对三个点的偏导数，我们需要用到正交补这个概念，与的正交补定义为：

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

引入以下两个标准正交补：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (12) |
|  |  | (13) |

我们能够得到以下表达式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (14) |
|  |  | (15) |
|  |  | (16) |

本方法优化效果实例如图2和图3所示，图2(a)为优化之前的路径，图2(b)为优化后路径。图3为优化前后曲率对比。可以看到，优化后路径具备更好的平滑性和曲率连续性。

 

（a） 优化前路径 （b）优化后路径

图2 优化前后路径对比



图3 优化前后曲率对比

1. 路径插值算法

由于优化处理后的路径点之间间隔仍然过大，不符合实际车辆控制需求，为此，需要对路点进行插值处理。首先合理计算出每个路点的航向角，再采用提出的改进三次样条曲线进行两两路点之间的插值处理。

* 1. 路点航向角计算

实车采集得到的路点是具有航向角信息的，但由于路径优化过程并未考虑路点航向角信息，导致路点航向角信息丢失。因此，需要重新计算各路点航向角。如图4所示，我们的计算方法为：保持起点、终点的角度不变，中间点则是以每点前后两点连线方向与x轴正向的夹角作为该点的航向角。



图4 路径航向角计算示意

* 1. 三次样条曲线插值

本项目采用改进三次样条曲线插值方法对任意两路径点之间进行均匀插值处理，具体计算方法如下：

以输入的插值起始点作为坐标原点建立坐标系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (17) |
|  |  | (18) |

然后，以起始点的航向角方向作为当前坐标系x轴的正方向，即对当前坐标系进行旋转：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (19) |
|  |  | (20) |

接着，根据新坐标系下起点和终点位置坐标和和航向角角度进行插值计算，其中delta\_s为插值点之间间隔距离。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (21) |
|  |  | (22) |
|  |  | (23) |
|  |  | (24) |
|  |  | (25) |

最后，将插值得到的路径点进行反坐标变换，得到原坐标系下各插值路径点坐标和对应横摆角。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (26) |
|  |  | (27) |
|  |  | (28) |
|  |  | (29) |
|  |  | (30) |
|  |  | (31) |

如图5所示为使用本方法进行路径插值的效果，可以看到，插值后的路径保留了原路径的形状，且路径点之间变得更加稠密且均匀。

 

(a) 插值前 (b) 插值后

图5 路径插值前后对比

参考文献

1. Dolgov D, Thrun S, Montemerlo M, et al. Path planning for autonomous vehicles in unknown semi-structured environments[J]. The International Journal of Robotics Research, 2010, 29(5): 485-501.

1. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/118666410?utm_source=wechat_session&utm_medium=social&utm_oi=900047492064907264&utm_campaign=shareopn>。