

3次贝塞尔解析平滑转接

作者：汤凯

分支：dev_parking_bezier_smoothing

对应文件：

modules/planning/parking/common/bezier_local_smoother.h

modules/planning/parking/common/bezier_local_smoother.cpp

注：相关功能在search_based_planner与arc_based_planner中做了测试，可查看对应位置代码。

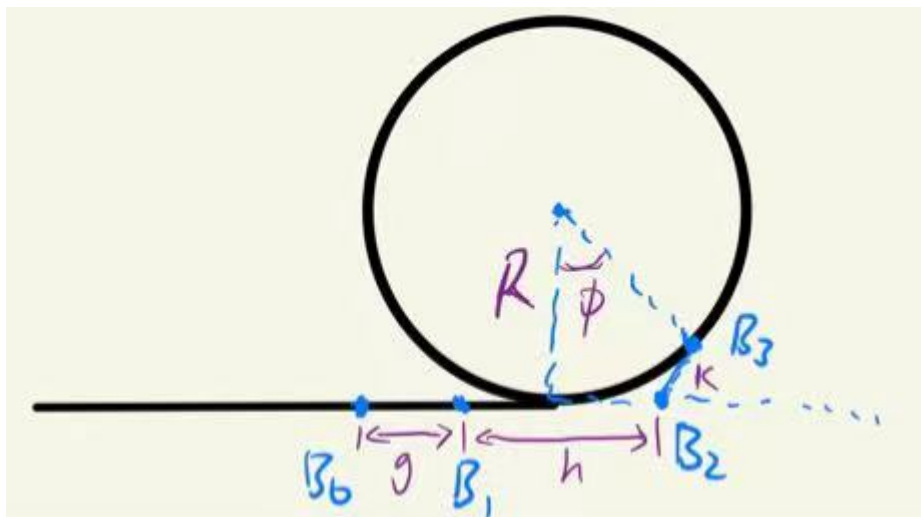
参考文献：

1. Walton, D. J., D. S. Meek, and J. M. Ali. "Planar G2 transition curves composed of cubic Bézier spiral segments." Journal of Computational and Applied Mathematics 157.2 (2003): 453-476.
2. Habib, Zulfiqar, and Manabu Sakai. "Fairing an arc spline and designing with G 2 PH quintic spiral transitions." International Journal of Computer Mathematics 90.5 (2013): 1023-1039.
3. Yang, Kwangjin, and Salah Sukkarieh. "An analytical continuous-curvature path-smoothing algorithm." IEEE Transactions on Robotics 26.3 (2010): 561-568.

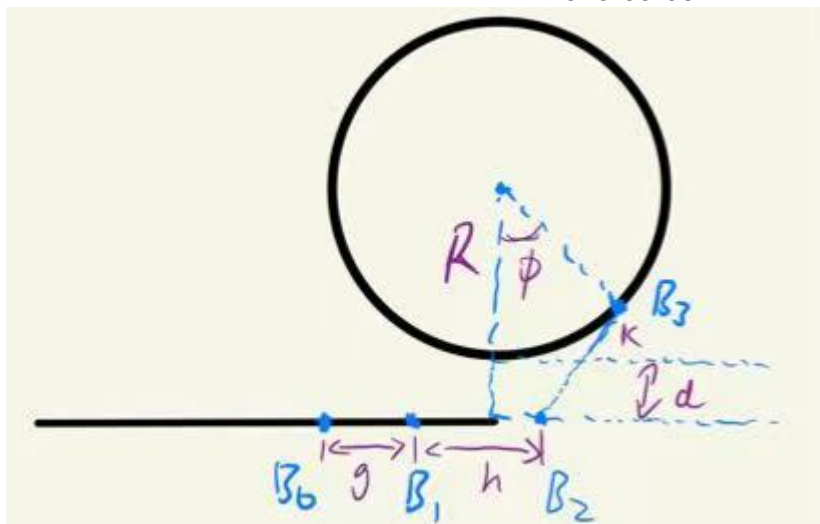
1.方案简要说明

可使用的转接情形：

case-1:



case-2:

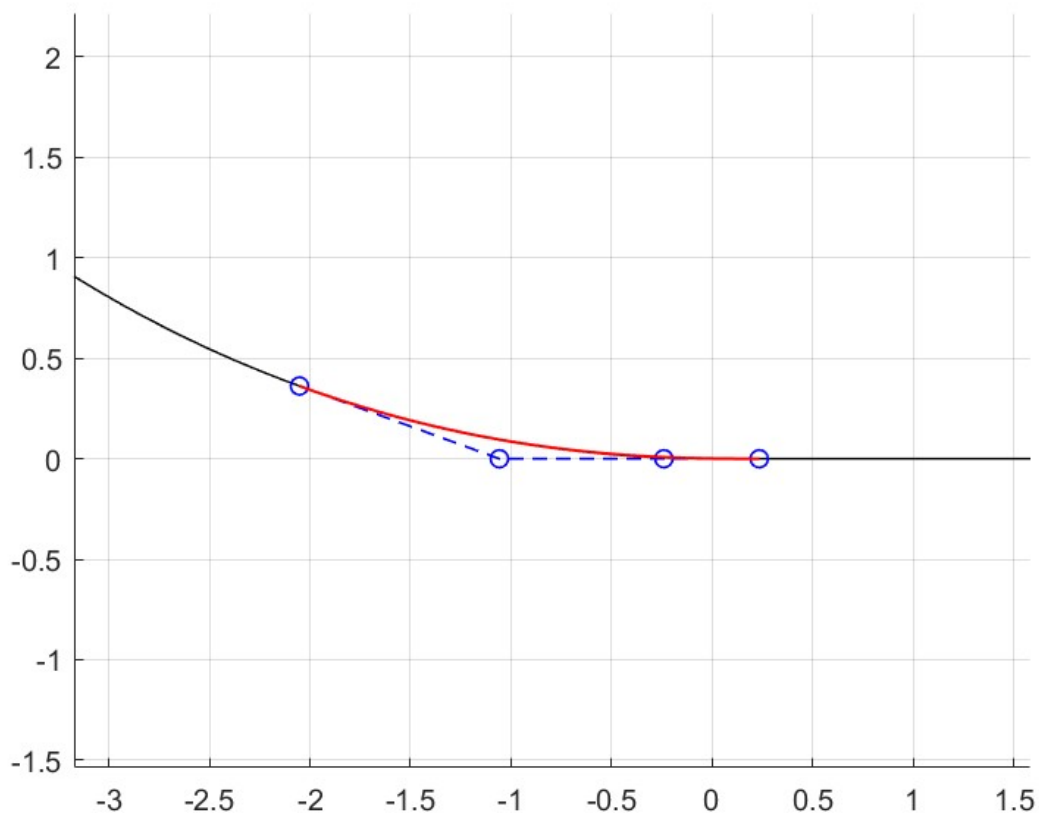


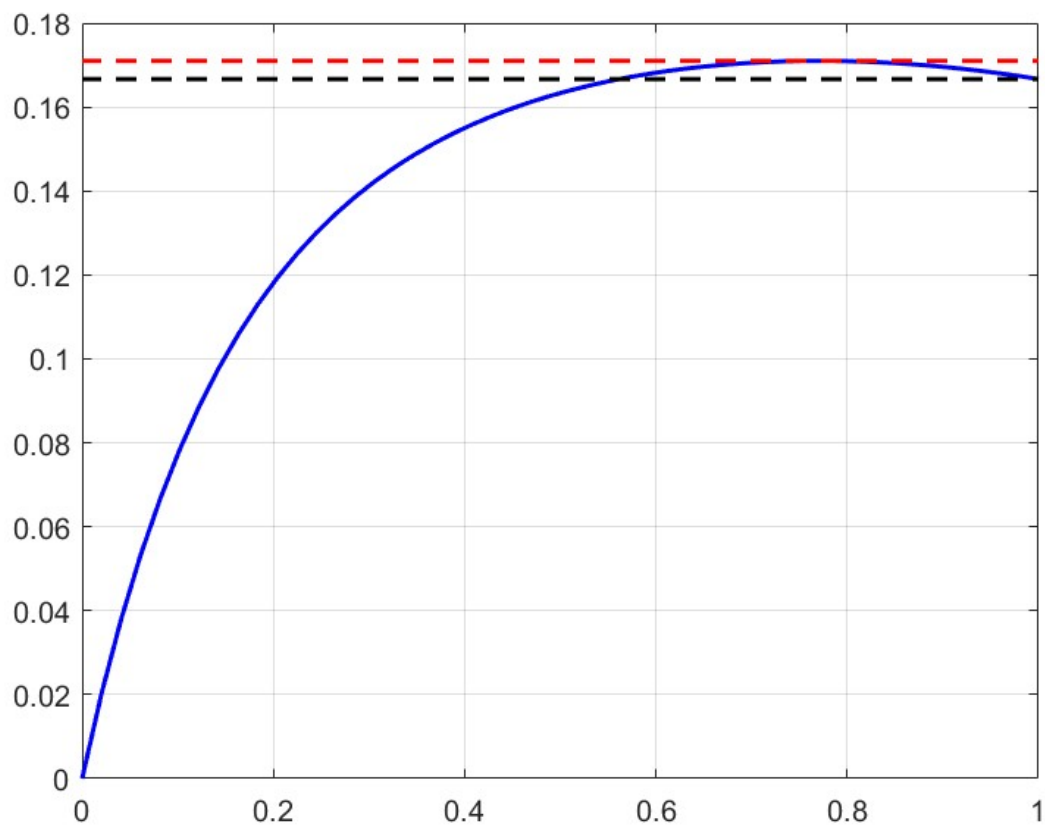
- 定义 $\lambda = g/h$
- 圆弧端曲率: $\kappa = \frac{2h \sin(\phi)}{3k^2}$
- $k = d \sin(\phi) + R \tan(\phi/2)$

整体构造流程:

1. 给定 ϕ (通过误差约束、实际圆弧段的最大圆心角来确定)
2. 由 ϕ 计算切线段 k
3. 由圆弧段曲率 κ , ϕ , k 计算出 h
4. 选取合适的 λ
5. 最后计算 $g = \lambda h$, 构造完毕

按照以上文献中螺线的构造方法没法满足case-1的需要 (曲率超限较大, 无法再曲率单调): (如以下例子, 取 $\lambda = 0.58$, **曲率超限 2.60%**)



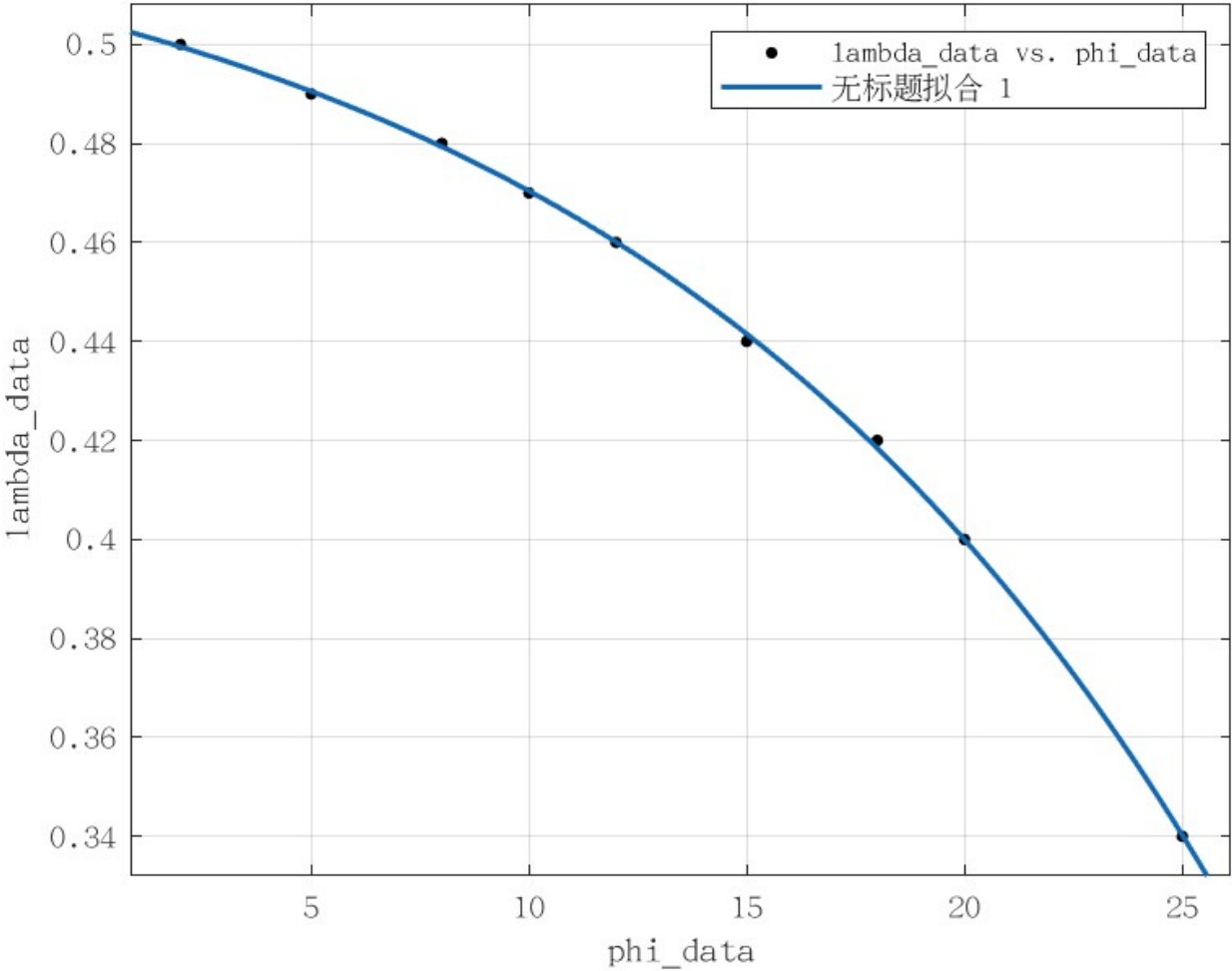


Kappa Overshoot: % 2.60

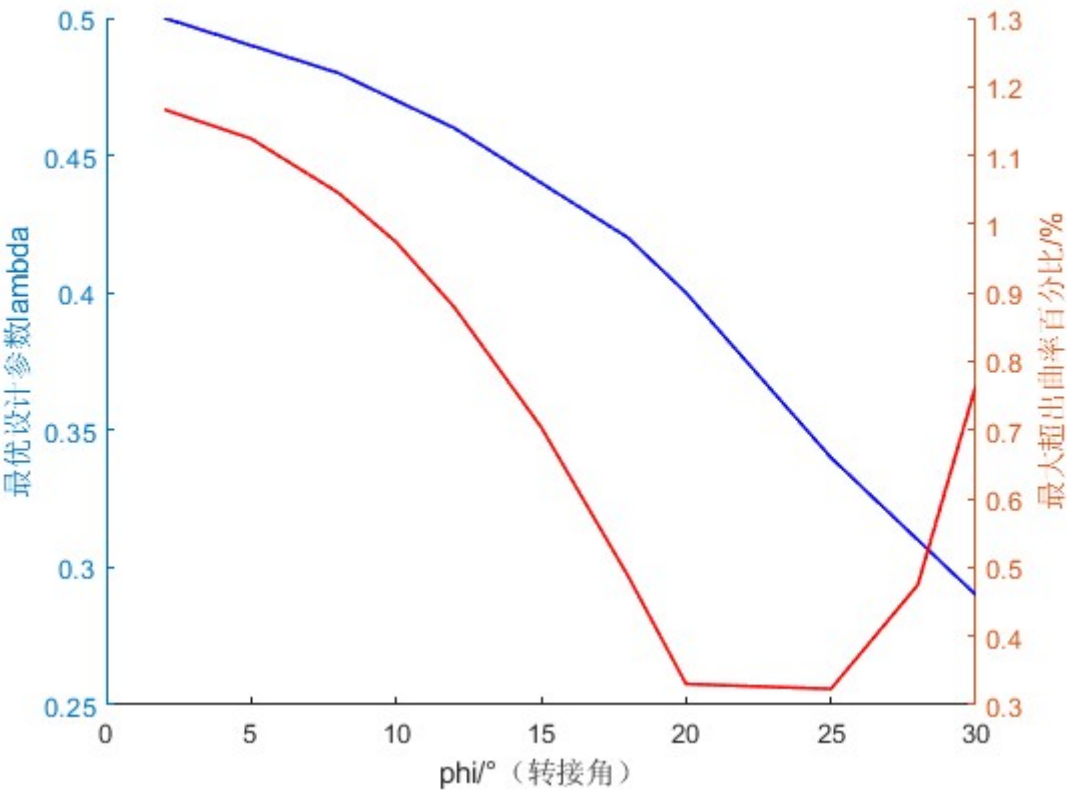
针对该问题，本人采用以下参数构造方法：

- 通过优化方法找到不同 ϕ 下最优的（曲率超限百分比最小） λ ，做函数拟合，拟合结果： $\lambda(\phi) = -0.03205 \exp(0.0725\phi) + 0.5366$
- 之后可通过单参数 ϕ 确定整条曲线

拟合结果:



设计参数与误差限关系:



最后只要将转接角 ϕ 设定在0~30度内即可 (误差限最多1%左右)

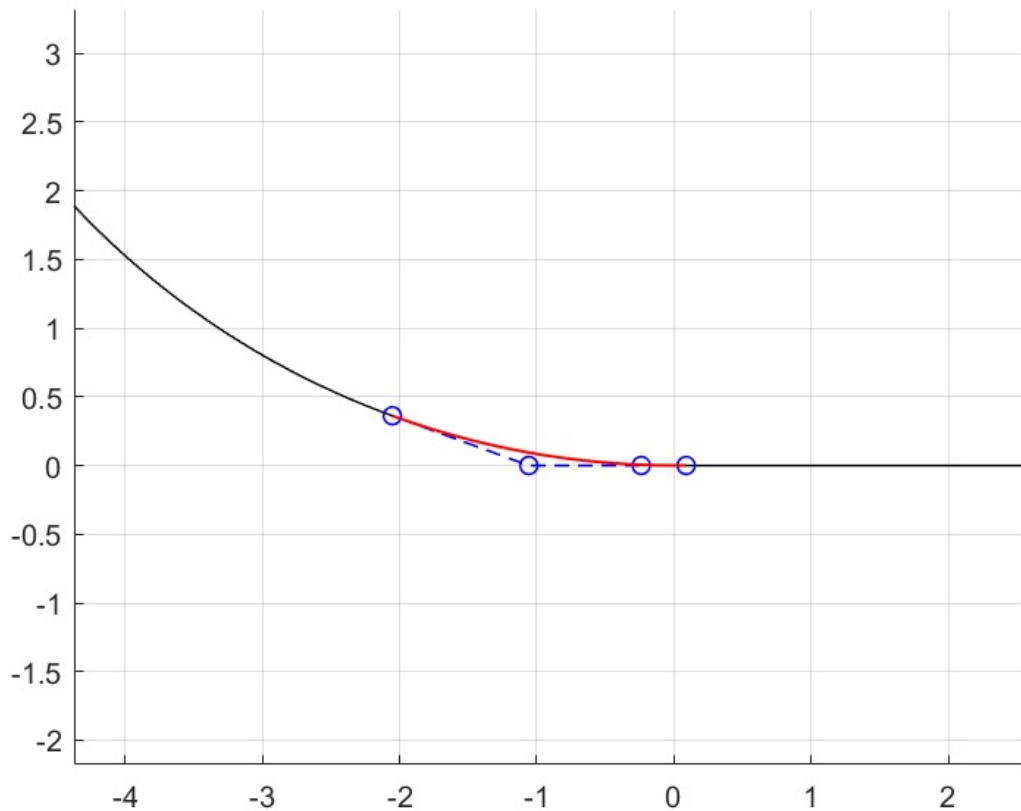
性质:

几何相似性: 对于case-1 (相切情形) 而言, 对于任意半径圆弧, 贝塞尔曲线参数随半径 R 缩放, 该方法构造转接曲线的 ϵ (最大曲率超出百分比) 都是一致的。

仿真效果示例**(1) 用于case-1的效果示例**

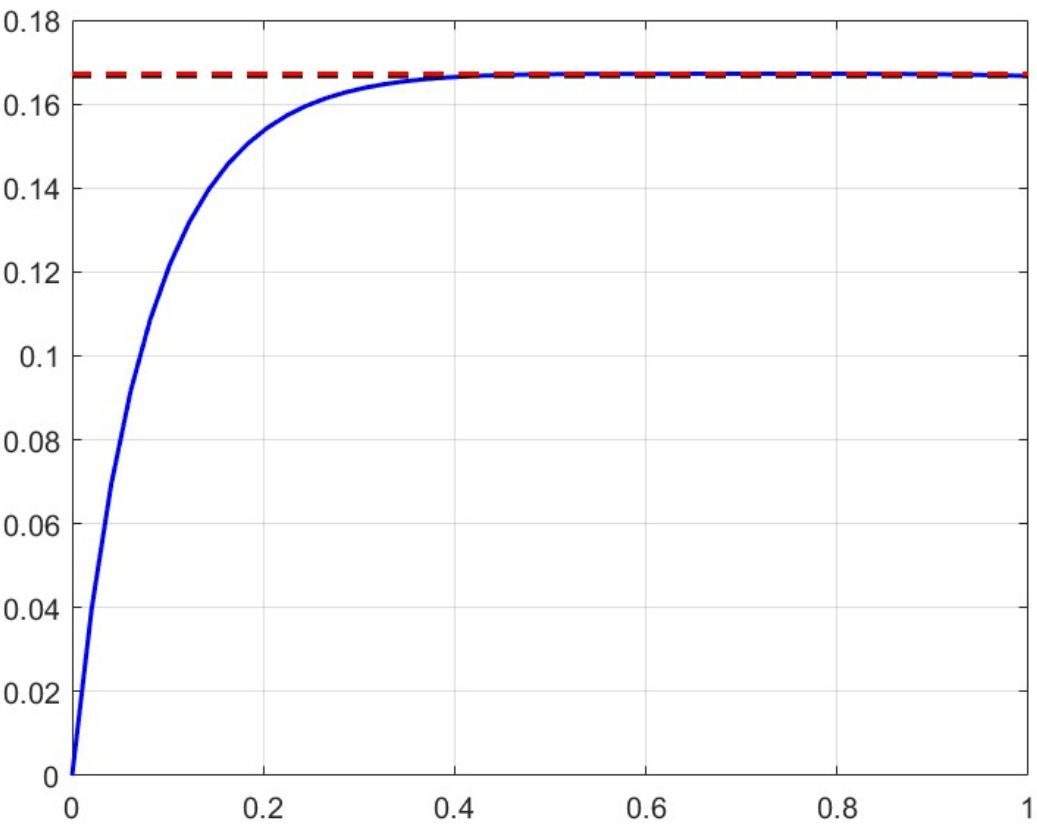
圆弧半径 $R = 6m$, 选取 $\phi = 20^\circ$

转接效果:



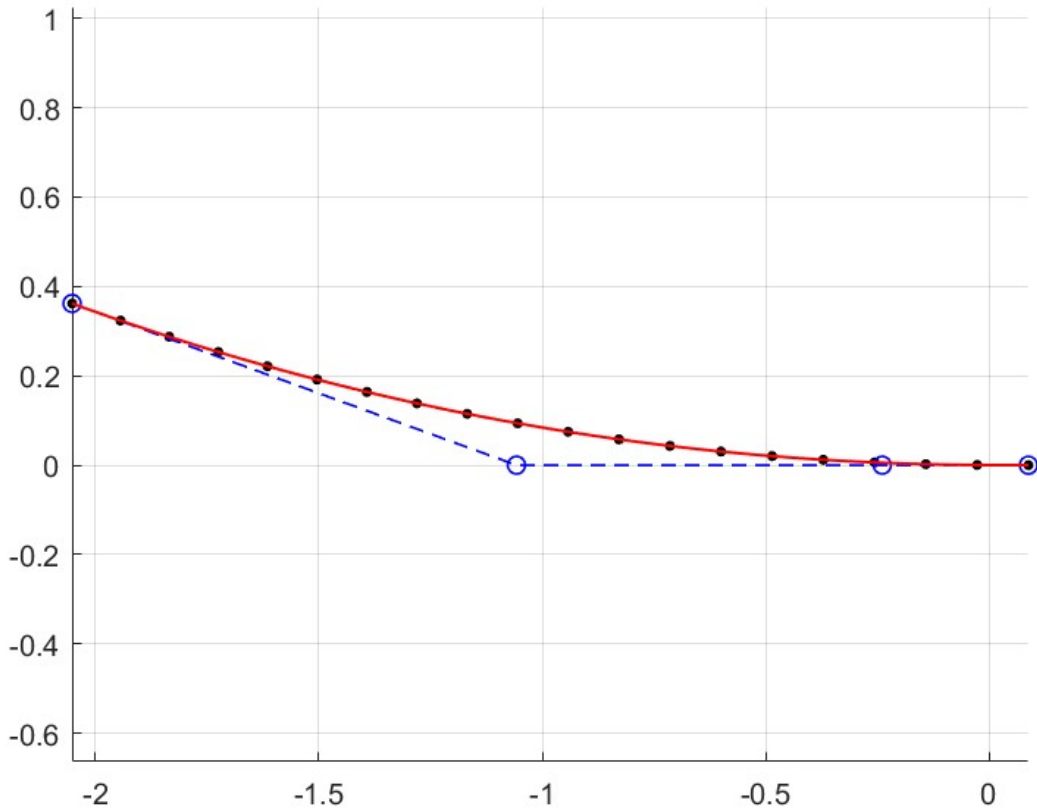
smoothing length: 2.1817 m

曲率变化:



Kappa Overshoot: % 0.33

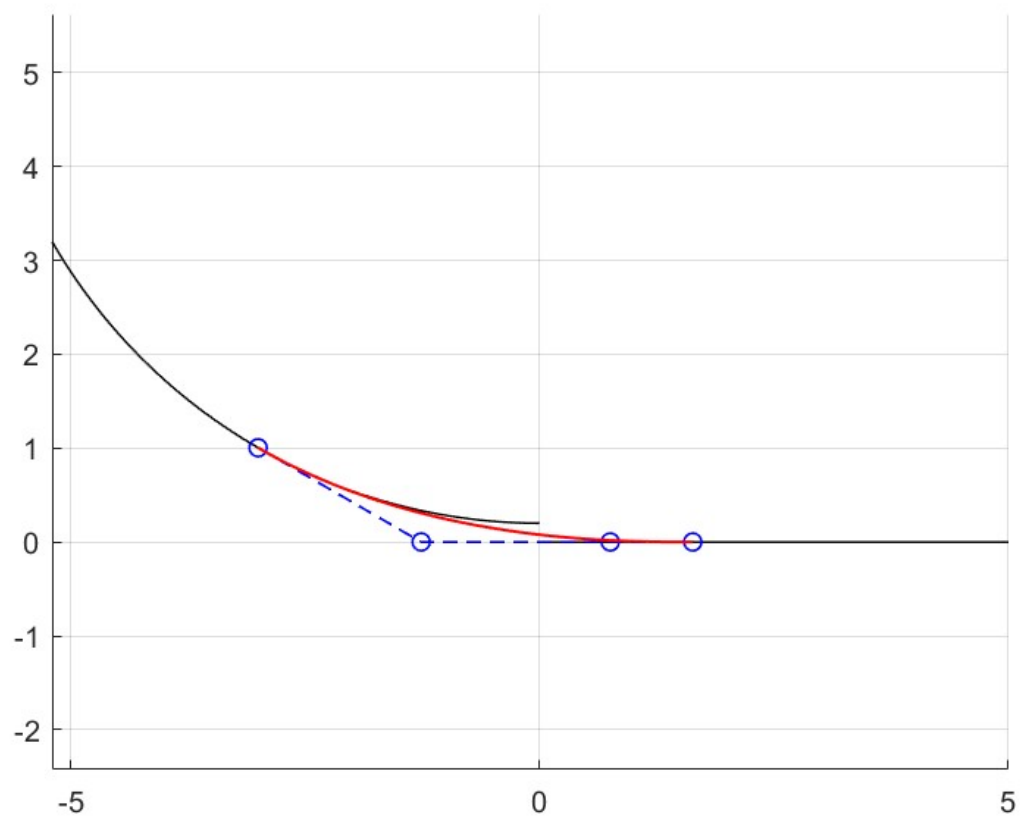
弧长等距重采样:



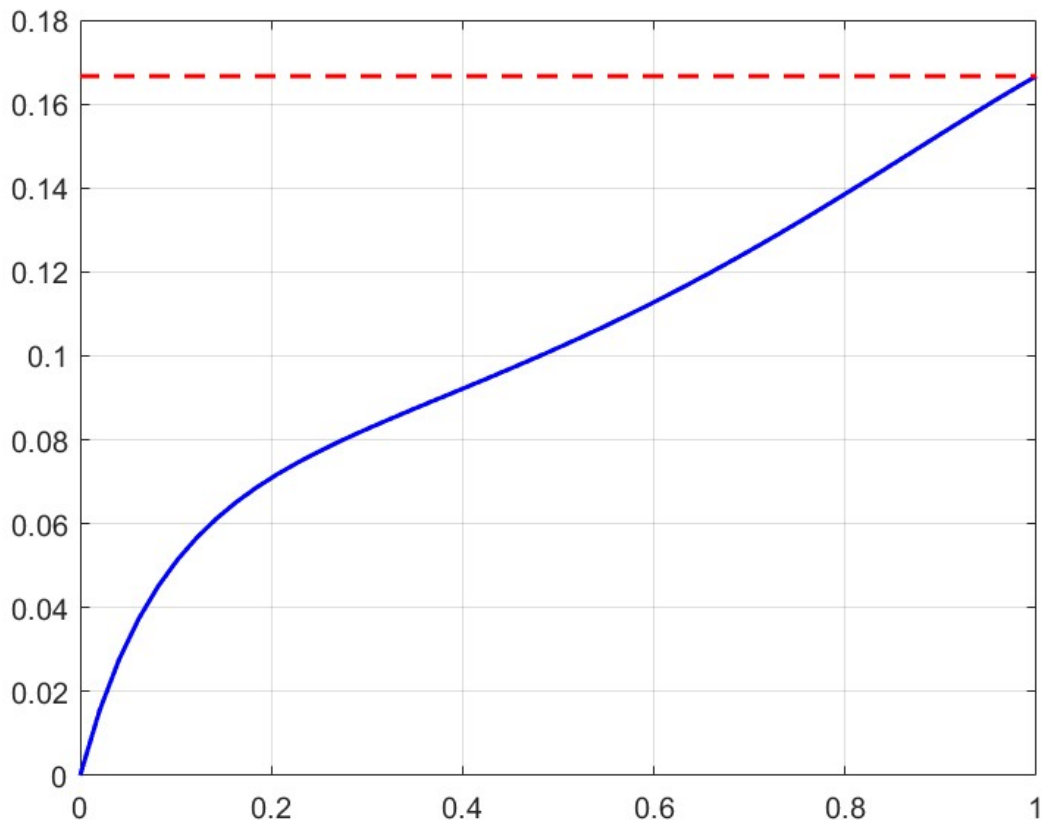
(2) 用于case-2的效果示例 (螺线)

圆弧半径 $R = 6m$, 与直线间隔 $d = 0.2m$ 选取 $\phi = 30^\circ$

转接效果:



smoothing length: 4.7989 m



Kappa Overshoot: % 0.0, 单调递增, 呈螺线性质

2.函数模块说明

(1) SmootherMathUtils:

功能函数与贝塞尔平滑转接采样函数接口

SmootherMathUtils::BezierLocalSmootherSample

- 贝塞尔平滑转接采样函数接口
- 输入: **PathSegments**, 规划好的直线圆弧组合 (目前只支持连续gear的单对直线-圆弧或圆弧-直线组合)
- 输出: **vector<PathPoint>**, 经平滑后由弧长分辨率决定的均匀弧长点采样 (包含曲率等信息)

SmootherMathUtils::linspace

- 与matlab中linspace函数一致

SmootherMathUtils::SimpsonIntegrator

- 辛普森积分器, 用于构造完贝塞尔曲线后的弧长重参数化

(2) BezierCurve2d:

2维贝塞尔曲线模块

BezierCurve2d::Eval

- 输入参数 $u(0\sim 1)$ ，输出对应的点

BezierCurve2d::GetDiffOnceBezier

- 返回对参数 u 求一阶导后的贝塞尔曲线类 **BezierCurve2d**

BezierCurve2d::EvalDerivative

- 输入参数 $u(0\sim 1)$ ，输出对应的一阶导向量

BezierCurve2d::GetTau

- 输入参数 $u(0\sim 1)$ ，输出对应点的切向量

BezierCurve2d::GetKappa

- 输入参数 $u(0\sim 1)$ ，输出对应点的曲率（带符号）

BezierCurve2d::SampleByIncrement

- 给定弧长分辨率，按均匀弧长采样，返回三元组 $\langle \text{points_samples}, \text{u_samples}, \text{s_samples} \rangle$

BezierCurve2d::reparam_samples_静态成员

- 弧长重参数化积分时的采样数，默认100

(3) CubicBezierLineArcSmoother

构造局部3次贝塞尔转接曲线的类

CubicBezierLineArcSmoother::CubicBezierLineArcSmoother构造函数

- 输入：
 - `pair<PathSegment ,PathSegment> line_arc_pair`，gear连续的直线-圆弧/圆弧-直线对
 - `bool isSingleTransOnArc`，圆弧是否只与单个直线做转接
 - `bool isSingleTransOnLine`，直线是否只与单个圆弧做转接
 - `init_guess_angle`，初设转接角（越大越好），默认 25° ，允许范围 $0\sim 25^\circ$

CubicBezierLineArcSmoother::GetLineOccupation

- 计算转接贝塞尔在直线段上占用的长度

CubicBezierLineArcSmoother::GetRemainSegments

- 返回经贝塞尔转接后两边剩余的直线段与圆弧段pair（按照输入时的顺序）

CubicBezierLineArcSmoother::SamplePathPoints

- 返回贝塞尔转接曲线上的均匀弧长采样点（按分辨率 `FLAGS_apa_output_trajectory_length_resolution`）

CubicBezierLineArcSmoother::GetTransitionAngle

- 返回转接角 ϕ (rad)

CubicBezierLineArcSmoother::SetTransAngle

- 输入：贝塞尔转接曲线可占用的最大直线段长度
- 输出：满足要求的最大转接角（按本方法，占用直线段长度在0~20度内递减，用二分法查找）

CubicBezierLineArcSmoother::lookup_table_静态成员

- 上文所说的最优参数表 $\phi - \lambda$

CubicBezierLineArcSmoother::lookup_curve_静态成员

- 由最优参数表拟合的最优参数查找曲线 $\phi - \lambda$