

基于三次 B 样条曲线的叉车型 AGV 路径规划研究

钱东海, 孙林林, 赵伟

(上海大学 机电工程与自动化学院 上海 200444)

摘要: 针对工厂环境下叉车型 AGV 在沿给定参考路径运行时, 因避障等问题产生的大幅度偏离参考路径的现象, 将 3 次 B 样条曲线用于路径规划; 规划路径在满足 AGV 运动学约束、最大曲率约束、起点和终点位姿等约束的条件下, 使 AGV 以最短距离回到原参考路径; 算法将路径规划问题转化为参数优化问题, 将规划路径距离作为目标函数优化求解参数; 算法最后使用 Matlab 针对直线和圆弧参考路径进行了仿真验证, 结果表明文章算法能够在较大偏差情况下, 规划出一条最短路径, 使 AGV 回到参考路径。

关键词: 叉车型 AGV; 路径规划; 3 次 B 样条曲线; 多约束条件; 最短路径

Study on Forklift AGV Path Planning Based on Cubic B-spline Curve

QIAN Donghai, SUN Linlin, ZHAO Wei

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to solve the problem of path planning when forklift AGV runs along the given reference path in the factory environment and deviates greatly from the reference path due to obstacle avoidance and so on, the method of cubic B-spline curve is used in path planning. The planned path can make the AGV return to the original reference path with the shortest distance and satisfying the constraints of AGV kinematics, maximum curvature, starting and ending position and orientation. The algorithm transforms the path planning problem into parameter optimization problem and takes the planned path distance as the objective function and gets the optimized parameters. Finally, the algorithm is simulated and verified with Matlab taking the linear and circular reference paths as examples. The results show that the algorithm in this paper can plan a shortest path and make the AGV return to the reference path under the condition of large deviation.

Keywords: forklift AGV; path planning; cubic B-spline curve; multi-constraint conditions; the shortest path

0 引言

为提高工厂的运行效率, 叉车型 AGV 得到了越来越广泛的使用。在工厂内, 叉车型 AGV 通常沿规划好的路径行驶, 但当叉车型 AGV 在运行时因避障或人为使用后会偏离规定参考路径, 因此, 研究路径规划技术实现叉车型 AGV 自主回到参考路径, 提高叉车型 AGV 的作业效率具有重要意义。

路径规划技术^[1-5]是移动智能装备的关键技术, 受到国内外学者的大量关注。常见的路径规划算法, 如 A* 算法^[6]、Dijkstra 算法^[7]需要首先绘制栅格地图, 栅格地图的精度决定了规划路径的质量, 且搜索速度慢, 效率低。遗传算法^[8]具有良好的全局优化能力, 但其收敛速度较慢, 效率低, 规划结果因为初始种群的随机性只能找出较优路径。L. Zhang^[9]等提出了一种改进的粒子群算法, 用以提高算法效率, 避免陷入局部最优等问题, 但离实际最优仍有一定差距。快速搜索随机树算法^[10]是一种基于采样的搜索算法, 搜索速度快, 不需要对地图预处理, 但搜索的盲目性较大, 且路径不连续, 不利于 AGV 跟踪。Rastelli J P^[11]

等使用贝塞尔曲线对城市转弯道路进行路径规划, 通过动态调整控制点的位置实现路径平滑, 提高乘坐的舒适性, 但没有实车实验。另外, 参数化曲线也被用来进行路径平滑^[12-14]。

本文针对工厂环境中常用的叉车型 AGV 在偏离参考路径较大距离时, 需重新回到参考路径的问题, 研究相应的路径规划算法。论文以 AGV 的实时位姿为起点, 以最短路径为优化目标, 建立符合最小转弯半径要求的 3 次 B 样条曲线, 并在参考路径上寻找出最优的路径终点。论文将路径规划问题转化为参数优化问题, 并提出一种参数寻优算法, 解决当 AGV 大幅度偏离参考路径时能以最短距离重新回到参考路径。论文安排如下: 第一节给出了规划路径需要满足的约束; 第二节给出了路径规划中 3 次 B 样条曲线的控制点的构造方法; 第三节给出了路径规划算法的具体步骤; 第四节通过 Matlab 仿真, 验证本文算法的有效性。

1 路径描述

如图 1 所示, 本文以大幅度偏离参考路径后的叉车型

收稿日期: 2021-09-28; 修回日期: 2021-10-27。

作者简介: 钱东海(1971-), 男, 安徽芜湖人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事机器人控制、机器人规划及移动机器人导航方向的研究。

引用格式: 钱东海, 孙林林, 赵伟. 基于三次 B 样条曲线的叉车型 AGV 路径规划研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 177-181, 189.

AGV 的实时位姿作为全局路径规划的起点, 将 AGV 从起点位置出发回到参考路径的过程中形成的一系列离散点序列 $p = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_{n-2}, P_{n-1}, P_n\}$ 称为规划路径, 其中 $P_i(x_i, y_i, \varphi_i)$ 为规划路径上一个点的全局位姿, (x_i, y_i) 为全局坐标, φ_i 为 AGV 的航向角。

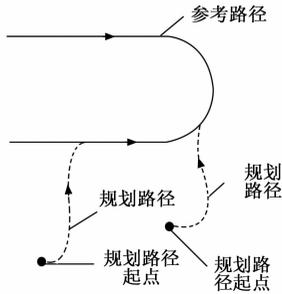


图 1 叉车型 AGV 规划路径示意图

本文将在满足多约束条件下形成的路径簇中选择最短路径作为规划的最优目标路径引导叉车型 AGV 回到参考路径。目标函数为:

$$p_{\text{optimal}} = \operatorname{argmin} \sum_{p_i} \text{Dis} \quad (1)$$

其中: p_{optimal} 为最优目标路径序列点; $\sum_{p_i} \text{Dis}$ 为路径簇中第 i 条路径的距离, p_i 为第 i 条路径序列点。

1.1 规划路径中的约束

对于单舵轮驱动的叉车型 AGV, 要使规划路径能被跟踪, 规划的路径曲线需要符合 AGV 运动学、结构参数约束, 路径最大曲率约束、路径起点和终点位姿约束。

1.1.1 叉车型 AGV 运动学模型

叉车型 AGV 运动时速度较低且不易发生侧滑现象, 所以路径规划时仅考虑 AGV 的运动学模型。假设车体为刚体且车轮不变形, 车辆在平面上运动、不打滑, 即车轮和地面之间为纯滚动。

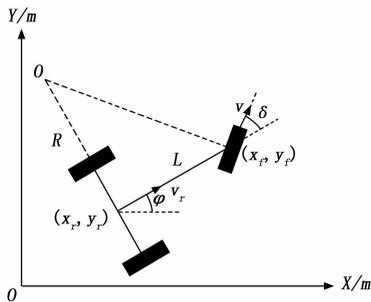


图 2 叉车型 AGV 运动学模型示意图

叉车型 AGV 的运动学模型如图 2 所示, 在世界坐标系 XOY 下, (x_f, y_f) 代表小车前轮坐标, (x_r, y_r) 代表后轮中心坐标, o 为 AGV 小车的瞬时转动中心, L 表示 AGV 的前后轮轴距, v 表示舵轮线速度, δ 和 φ 分别代表舵轮转角和小车航向角, R 为车体的转弯半径。

由图 2 可知, 叉车型 AGV 的转弯半径为:

$$R = \frac{L}{\tan \delta} \quad (2)$$

当舵轮转角最大时有最小转弯半径 R_{\min} , 即:

$$R_{\min} = \frac{L}{\tan \delta_{\max}} \quad (3)$$

叉车型 AGV 工作时, 需始终确保舵轮转角小于最大舵轮转角:

$$\delta \leq \delta_{\max} = \arctan \frac{L}{R_{\min}} \quad (4)$$

1.1.2 路径最大曲率约束

规划路径若曲率过大, 会导致其转弯半径小于叉车的最小转弯半径, 使得叉车型 AGV 无法准确跟踪, 从而造成再次偏离规划路径。所以规划路径曲率 κ 要满足最大曲率约束。

路径的曲率为:

$$\kappa = \frac{1}{R} \quad (5)$$

所以曲率约束为:

$$\kappa \leq \kappa_{\max} = \frac{1}{R_{\min}} \quad (6)$$

结合式 (3)、(6) 可得:

$$\kappa \leq \frac{\tan \delta_{\max}}{L} \quad (7)$$

1.1.3 曲率连续约束

为了避免规划路径的曲率不连续而造成跟踪失败, 故路径要满足曲率连续, 即规划的路径要满足 C2 连续。

B 样条曲线是受控制点影响, 并由多段连续曲线构成, 且可以通过改变控制点的位置而局部修改整条曲线。所以本文选择满足曲率约束条件的 3 次 B 样条曲线进行路径规划。

1.1.4 起点和终点位姿约束

为避免 AGV 在起点和终点出现就地转向现象, 需要对规划路径的起点和终点进行位姿约束。路径的起点为该时刻 AGV 在全局坐标系下的位姿, 即 $p_1(x_1, y_1, \varphi_1)$; 路径的终点是 AGV 进入参考路径的点, 记为 $p_n(x_n, y_n, \varphi_n)$ 。3 次 B 样条曲线在其起点及终点需满足:

$$\begin{cases} y(x_1) = y_1 \\ y'(x_1) = \arctan(\varphi_1) \\ y(x_n) = y_n \\ y'(x_n) = \arctan(\varphi_n) \end{cases} \quad (8)$$

2 3 次 B 样条曲线

3 次 B 样条曲线^[15]的表达式为:

$$P_i(s) = \sum_{j=0}^3 B_{j,3}(s)C_{i+j} \quad (9)$$

式中, s 为参数, $s \in [0, 1]$, $B_{j,3}(s)$ 为 3 次 B 样条基函数; C_{i+j} 为第 i 段中的第 j 个控制点。

3 次 B 样条的基函数的矩阵形式为:

$$B_{j,3}(s) = \frac{1}{6} [s^3 \quad s^2 \quad s \quad 1] G \quad (10)$$

其中:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

将式 (9) 代入式 (8) 可得 3 次 B 样条曲线上的点为:

$$[x \ y] = \frac{1}{6}[s^3 \ s^2 \ s \ 1]GC \quad (11)$$

相应的一阶导数和二阶导数为:

$$[\dot{x} \ \dot{y}] = \frac{1}{6}[3s^2 \ 2s \ 1 \ 0]GC \quad (12)$$

$$[\ddot{x} \ \ddot{y}] = \frac{1}{6}[6s \ 2 \ 0 \ 0]GC \quad (13)$$

式中,

$$C = \begin{bmatrix} C_i \\ C_{i+1} \\ C_{i+2} \\ C_{i+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{i,x} & C_{i,y} \\ C_{i+1,x} & C_{i+1,y} \\ C_{i+2,x} & C_{i+2,y} \\ C_{i+3,x} & C_{i+3,y} \end{bmatrix}$$

由上式可得 3 次 B 样条曲线的曲率为:

$$\kappa = \frac{|\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}|}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \quad (14)$$

由于 B 样条曲线本身不通过首末控制点, 为了使 B 样条曲线通过规划路径的起点和终点并满足起点和终点的航向角约束, 以起点和终点为中点, 在其两端各增加一个控制点。

在图 3 中, $p_1(x_1, y_1, \varphi_1)$ 、 $p_4(x_4, y_4, \varphi_4)$ 分别为 B 样条曲线起点和终点的位姿, p_0, p_2, p_3, p_5 为增加的 B 样条曲线的控制点, 同时还需满足 $\overrightarrow{p_0p_2}, \overrightarrow{p_3p_5}$ 的斜率分别与 p_1, p_4 点的斜率相同, 这样就能保证 B 样条曲线满足规划路径起点及终点的航向角要求。

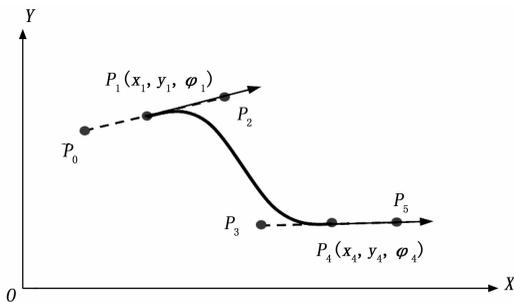


图 3 B 样条曲线与控制点的关系

设 $|p_0p_2| = 2L_1, |p_3p_5| = 2L_2, L_1, L_2$ 称为起点和终点处的构造距离, 所以增加的控制点坐标为:

$$p_0 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} - L_1 \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 \\ \sin\varphi_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$p_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + L_1 \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 \\ \sin\varphi_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$p_3 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} - L_2 \begin{bmatrix} \cos\varphi_4 \\ \sin\varphi_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$p_5 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} + L_2 \begin{bmatrix} \cos\varphi_4 \\ \sin\varphi_4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3 路径规划算法

要规划出满足约束条件的最短路径, 不仅跟 B 样条曲线的控制点的位置有关, 还和选择的终点位置有关。假设该时刻参考路径上距离 AGV 的最近点为 $p_N(x_N, y_N, \theta_N)$, p_N 点为最近点, 但并不满足曲率要求, 所以终点需以 p_N 点为起点, 沿参考路径方向寻找。令 l_1 为自 p_N 点出发, 沿参考路径行进的距离。在本算法中, 再令构造距离 $L_1 = L_2 = l_2$, 这样只需要优化求解 l_1 和 l_2 , 即可确定 3 次 B 样条曲线, 从而寻找出最短路径。

3.1 路径规划过程

路径规划过程如图 4 所示。传感器检测到此刻叉车型 AGV 的位姿 $p_1(x_1, y_1, \varphi_1)$, 并通过计算得知已偏离参考路径; 然后找到参考路径上距离 AGV 最近的坐标点 $p_N(x_N, y_N, \varphi_N)$; 在最大曲率约束、起点和终点位姿约束的条件下, 对于给定的初始构造距离 l_2 (通常取一个很小的值), 找到此时最短路径对应的沿参考路径的行进距离 l_1 ; 然后以此 l_1 为基础, 优化构造距离 l_2 , 同时优化行进距离 l_1 , 循环往复, 最终寻找到符合多约束条件的最优目标路径, 从而完成路径规划目标。上述优化求解本质上由两个一维搜索构成, 其中行进距离 l_1 的一维搜索内嵌在构造距离 l_2 一维搜索的内部, 即 l_2 每移动一个步长, 都将通过一维搜索求得最优的行进距离 l_1 。

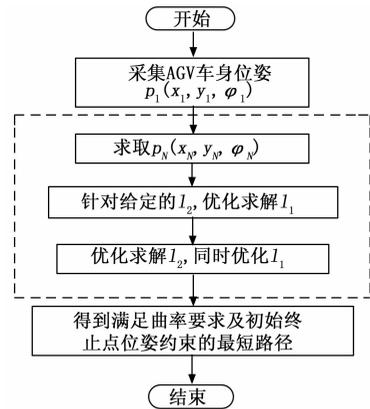


图 4 路径规划过程

3.2 验证搜索区间内的收敛性

利用枚举法分别求取直线和圆弧参考路径在不同的行进距离 l_1 和构造距离 l_2 时 3 次 B 样条曲线的路径长度。图 5 和图 6 中下方的线条代表不考虑规划路径曲率约束时, 不同构造距离 l_2 形成的 B 样条曲线中, 路径长度为最短时对应的终点位置; 上方的线条代表同时考虑规划路径曲率约束时各 B 样条曲线中, 路径取长度最短时对应的终点位置。

从图中可以看出以 l_1, l_2 为设计变量, 构造设计空间, 求得的 3 次 B 样条曲线路径长度函数的曲面为凸的, 在考虑规划路径曲率约束时, 形成的约束边界也是凸的, 故可用优化设计的方法求得满足约束条件的全局最优解。

3.3 路径规划算法

本文采用加速步长法和二分法对行进距离 l_1 和构造距

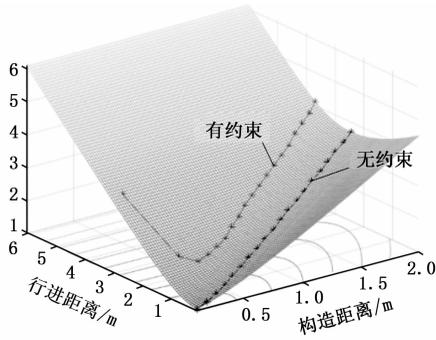


图 5 直线路径中各因素对路径长度的影响

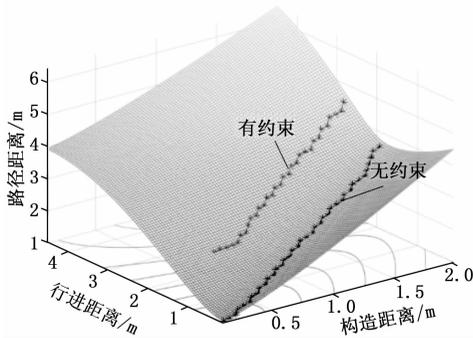


图 6 圆弧路径中各因素对路径长度的影响

离 l_2 进行优化, 具体步骤如下:

1) 找到参考路径上距离 AGV 的几何最近点 p_N , 并求其位置信息;

2) 给定初始构造距离 l_2 ;

3) 在给定构造距离 l_2 下, 寻找最优路径对应的行进距离 l_1 : 用一个试探步长 t_0 沿参考路径的行进方向移动一步, 若不满足约束条件, 则取上一次步长的 β 倍来递增步长, 即 $t_j = \beta t_{j-1}$, 所以 $l_{1,j} = l_{1,j-1} + \beta \cdot t_{j-1}$. 通过加速步长的方法快速求得搜索区间, 以最后一次不满足约束的位置和第一次满足约束的位置为搜索区间进行二分法搜索, 直至 l_1 的变化已小于给定计算精度 ϵ_1 , 从而求得该构造距离下满足约束条件的最短路径和对应的行进距离 l_1 ;

4) 以上一步骤求得的行进距离 l_1 为基础, 优化构造距离 l_2 : 在初始构造距离 l_2 的基础上加上试探步长 t_0 , 按步骤 3) 中同样的方法, 求取最短路径; 若本次所得到的最优路径长度小于上一次, 则取上一次步长的 β 倍作为递增步长, 即 $t_i = \beta t_{i-1}$, 所以 $l_{2,j} = l_{2,j-1} + \beta \cdot t_{i-1}$; 若该次所得到的最优路径长度大于上一次, 以该次最优路径对应的构造距离 l_2 和上一次最优路径对应的构造距离 l_2 为区间进行二分法搜索, 直至 l_2 的变化已小于给定计算精度 ϵ_2 。

至此, 得到最优参数 l_1 和 l_2 , 从而得到满足多约束条件的最短 3 次 B 样条曲线路径。

4 仿真实验与分析

为了验证提出的路径规划算法, 本文利用 Matlab 建立了仿真验证程序。AGV 的前后轴距为 1.44, 舵轮最大转角

限定为, 所以最大曲率为 2.592 m^{-1} , l_1 和 l_2 精度 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.02$ 。由图 5 和图 6 可知, 当优化参数过小时, 找不到符合约束条件的路径, 经多次仿真实验, 选取直线段构造距离 l_1 最小值为 0.5 m, 圆弧段构造距离 l_1 最小值为 0.3 m, 在此约束条件下能够较快地找到符合约束条件的最优目标路径。

4.1 偏离直线路径

以不同的初始位姿规划到直线的最短路径, AGV 在 y 轴初始偏差分别为 1 m、2 m、3 m 的情况下, 航向角分别为 -45° 、 0° 、 45° , 仿真结果如表 1 所示。

选取表中第 1、5、7 三种情况进行分析, 结果如图 7 所示。在图 7 (a) 中, 叉车型 AGV 在 3 种大偏差下都能满足多约束条件, 规划出一条最短路径; 在图 7 (b) 中, AGV 在不同起始位姿时, 规划路径的最大路径曲率均在最大曲率要求范围内、曲率连续, 且起点和终点位置的曲率趋近于 0, 使规划路径具有良好的跟踪性能, 曲率的正负表示路径的凹凸性; 在图 7 (c) 反映了行进距离 l_1 迭代次数随构造距离 l_2 迭代步数 (迭代的推进) 的变化, 可以看出通过十多次构造距离 l_2 的迭代, 每次 l_2 迭代中嵌套的十多次的行进距离 l_1 迭代, 可快速求得最优路径。

表 1 直线段不同位姿下得到的参数 l_1 、 l_2

	初始位姿	l_1/m	l_2/m	路径长度/m
1	$(0,1,-45^\circ)$	1.050 0	0.365 0	1.516 3
2	$(0,1,0)$	1.280 3	0.449 5	1.758 6
3	$(0,1,45^\circ)$	2.767 6	0.748 6	3.235 7
4	$(0,2,-45^\circ)$	1.281 4	0.559 4	2.540 7
5	$(0,2,0)$	1.580 6	0.559 4	2.793 5
6	$(0,2,45^\circ)$	3.503 3	0.948 1	4.502 2
7	$(0,3,-45^\circ)$	1.316 0	0.702 2	3.540 4
8	$(0,3,0)$	1.623 3	1.623 3	3.803 2
9	$(0,3,45^\circ)$	4.039 8	1.129 1	5.673 3

对比表 1 和图 7 (a)、图 7 (b) 可以看出, 当 AGV 位于直线参考路径上方时, 此时若 AGV 初始航向与参考路径方向之间夹角为负值, 如图中的 -45° , AGV 能以更短的路径距离回到参考路径; 相反, AGV 初始航向与参考路径方向之间夹角为正值, 如图中的 45° , AGV 规划路径长度较长, 但曲率变化较为平缓, 这有利于 AGV 的路径跟踪。

4.2 偏离圆弧路径

以不同的初始位姿规划重回圆弧的最短路径, 圆弧路径的半径为 1.44 m, 假设圆弧路径起点为 $(0,0)$, 圆心为 $(0,1.44)$ 。AGV 在圆弧路径外部时, 假设全局坐标为 $(0,-1)$ 和 $(1,-1)$, 航向角分别为 -15° 、 0° 、 45° , 当 AGV 再圆弧路径内部时, 全局坐标为 $(0,0.5)$, 航向角分别为 -45° 、 0° 、 15° , 仿真结果如表 2 所示。

选取表中第 1、6、8 三种情况进行分析, 结果如图 8 所示。在图 8 (a)、图 8 (b) 中可以看出, 叉车型 AGV 在圆弧路径内外都能在多约束条件下规划出一条曲率连续、具有良好的跟踪性能规划路径; 在图 8 (c) 中, 可以看出通过

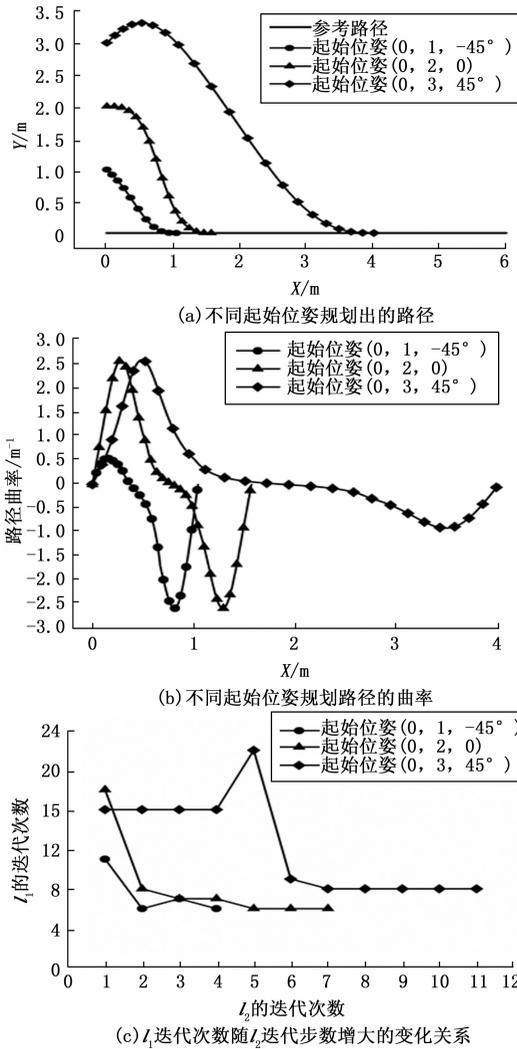


图 7 直线段不同位姿下规划路径结果

十多次构造距离 l_2 迭代, 每次 l_2 迭代中嵌套的十多次的行进距离 l_1 迭代, 可快速求得最优路径。

表 2 直线段不同位姿下得到的参数 l_1 、 l_2

	初始位姿	l_1/m	l_2/m	路径长度/m
1	(0, -1, -15°)	0.702 2	1.816 2	2.742 0
2	(0, -1, 0)	0.449 5	1.409 6	2.097 9
3	(0, -1, 45°)	0.300 0	0.668 0	1.361 0
4	(1, -1, -15°)	1.442 9	2.820 3	4.856 0
5	(1, -1, 0)	0.887 8	2.152 5	3.439 4
6	(1, -1, 45°)	0.300 0	1.036 0	1.705 9
7	(0, 0.5, -45°)	0.300 0	1.153 7	1.148 2
8	(0, 0.5, 0)	0.449 5	1.816 2	1.598 6
9	(0, 0.5, 15°)	0.559 4	2.260 2	19.142

5 结束语

本文针对工厂环境下叉车型 AGV 因避障或人为使用后大幅度偏离参考路径后需重新自动回到参考路径时的路径

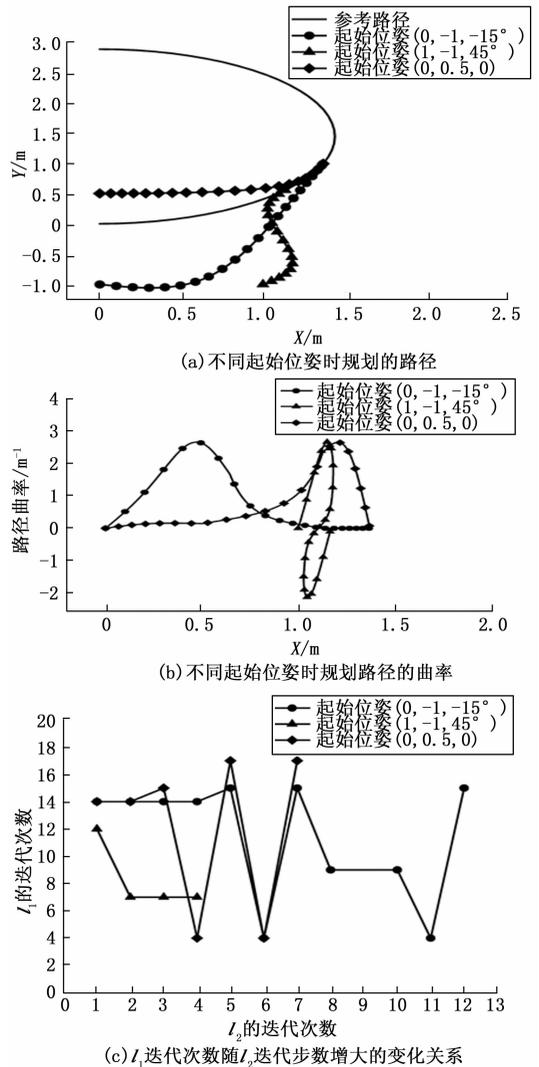


图 8 圆弧段不同位姿下规划路径结果

规划问题进行了研究, 设计了基于 3 次 B 样条曲线的路径规划算法, 从而实现了 AGV 在多约束条件下, 规划出回到参考路径的最短路径。最后通过 Matlab 对直线和圆弧参考路段进行了仿真实验, 实验表明本文提出的轨迹规划算法能够快速、高质量地规划出具有良好跟踪效果的最短路径。

参考文献:

[1] 曲道奎, 杜振军, 徐殿国, 等. 移动机器人路径规划方法研究 [J]. 机器人, 2008 (2): 97-101, 106.

[2] UPADHYAY S, RATNOO A. Continuous - curvature path planning with obstacle avoidance using four parameter logistic curves [J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2016, 1 (2): 609-616.

[3] FAREH R, BAZIYAD M, RABIE T, et al. Enhancing path quality of real - time path planning algorithms for mobile robots: a sequential linear paths approach [J]. IEEE Access, 2020, 8: 167090-167104.

(下转第 189 页)