第18卷 第2期 2018年1月
1671—1815(2018)002-0111-07

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018
© 2018 Sci. Tech. Engrg.

引用格式:王 毅,毛方东,刘 波,等. 基于圆弧-直线-圆弧理论的移动机器人路径规划[J]. 科学技术与工程,2018,18(2):111—117
Wang Yi,Mao Fangdong,Liu Bo,et al. Path planning of mobile robot based on arc-beeline-arc theory[J]. Science Technology and Engineering,2018,18(2):111—117

基于圆弧-直线-圆弧理论的移动机器人路径规划

王 毅[1,2] 毛方东[1] 刘 波[1] 刘 洒[1] 许洪斌[1,2]*
(重庆理工大学机械工程学院[1],重庆 400054;重庆大学机械工程学院[2],重庆 400044)

摘 要 为实现移动机器人点到点的平滑运动,需要规划出一条平滑路径使移动机器人在到达目标位置时资态符合要求(简称达到目标位姿)。针对传统 Turn-Run-Turn 方法规划的路径不连续,效率低等问题,在双圆弧理论的基础上提出圆弧-直线-圆弧路径规划方法并进行了理论推导。在实验室环境下,采用履带式移动平台对本文提出方法进行了实验验证。实验结果表明,通过该方法可使移动平台达到目标位姿,其横向误差均值为 10.5 cm,纵向误差均值为 3.7 cm,方向误差值均值为 1.5°。

关键词 移动机器人 路径规划 双圆弧理论 圆弧-直线-圆弧
中图法分类号 TP242.6; **文献标志码** A

路径规划是自主移动机器人的研究重点和实现自主导航的关键技术之一[1]。在移动机器人路径规划中常用到 Turn-Run-Turn 方法,其过程为小车先转动一定角度,然后运动到目标点,再调整角度,使其与目标点的位置和方向保持一致。机器人在运动过程中的路径不连续,要经历加速、减速和停止转向,降低了运动效率,因此有学者提出双圆弧理论用于移动机器人路径规划[2]。

双圆弧方法很早就出现在工程设计之中,其具满足任意端点及其斜率要求的特性,具有较高的实用价值。近年来,许多学者将双圆弧方法用于自动泊车、超车和机器人领域并进行了研究。王旭东等[3]使用双圆弧的路径规划算法和预瞄点的改进 PID 路径跟踪算法,实现自动泊车。朴昌浩等[4]基于全局规划结合车辆运动学模型和融合动力学约束条件生成了完整泊车轨迹。张宁等[5]提出了一种运用于智能车超车的双圆弧优化算法,并完成了快速稳定的超车任务仿真测试。郭戈[6]利用双圆弧来处理机器人在给定环境中的路径规划问题,提出了机器人对未知环境的勘测及绘图算法。柳在鑫等[7]采用双圆弧方法解决了机器人小车到达目标点位置和姿态的运动过程中遇到障碍物及保持最佳姿态的路径规划问题。Sabelhaus 等[8]采用连续圆弧曲线路径规划方法生成了一种可使移动平台实现田间地头转向的运动路径。Fraichard 等[9]采用圆弧和连续曲线的方法得到了一种有效的车辆转向路径规划方法。

采用双圆弧方法进行移动机器人路径规划,其求解得到的运动路径路程长,转弯调整幅度较大,使移动机器人行走效率较低。现提出一种圆弧-直线-圆弧路径规划方法,为移动平台规划出一条平滑达到目标位姿的路径并且达到目标位置时其姿态符合要求(简称达到目标位姿),同时缩短了规划路径的长度,使移动平台平顺地达到目标点的位置和方向。

1 圆弧-直线-圆弧路径规划基本理论

双圆弧方法如图1所示,在已知目标点的位置和方向信息条件下规划出由两段圆弧组成的路径;双圆弧方法规划的路径平滑,机器人在运动过程中无需停止后转向,可提高移动机器人运动的平顺性,可避免传统 Turn-Run-Turn[10]方法采用停止转向方式的不足。但采用以双圆弧方法求解的运动路径转弯调整幅度较大,路程较长,在一定程度上降低了移动机器人的运动效率。因此现提出一种圆弧-直线-圆弧的路径规划方法,以缩短移动平台的路程,使移动平台尽可能多地处于直线行走的状态,进而提高移动平台的行走效率,如图2所示。

2017年5月19日收到 重庆市重点产业共性关键技术创新专项(cstc2015zdcy-ztzx70003)和重庆市基础科学与前沿技术研究一般项目(cstc2016jcyjA0444)资助
第一作者简介:王 毅(1981—),男,博士研究生,副教授。研究方向:智能山地农业机械。E-mail:wangyi@cqut.edu.cn。
*通信作者简介:许洪斌(1967—),男,教授。研究方向:智能山地农业机械。E-mail:Xuhb@cqut.edu.cn。

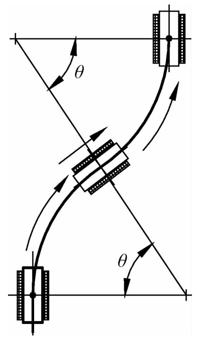


图 1 双圆弧路径规划方法

Fig. 1 Bi-arc path planning method

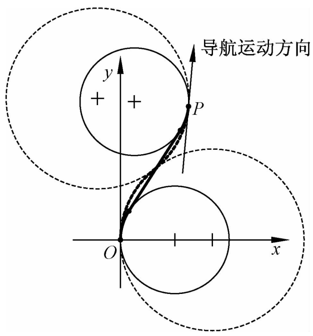


图 2 双圆弧方法改进示意图

Fig. 2 Improvement of bi-arc method

1.1 初始条件设定

规划移动平台的圆弧-直线-圆弧路径，在求解过程中若没有对一些条件进行限制，将求得无数组解，这不仅求解速度慢，而且如何选取最佳的运动路径十分复杂。因此就移动平台的运动特性和实际环境对圆弧-直线-圆弧路径规划进行一些条件限制：①设定移动平台转弯半径为固定值 r；②为便于移动平台的控制和求出唯一解，设定路径中两段圆弧转弯半径相同 $r_l = r_r = r$；③导航目标点距离 $L \geqslant 3r$，以保证在计算过程中不至于出现无解情况（当 $L < 3r$ 时，可采用传统 Turn-Run-Turn 方法）。

1.2 路径中圆弧段的确定

首先以移动平台为参考建立平面坐标系，以移动平台几何中心为坐标原点 O，正前方为 y 轴正方向，水平向右为 x 轴。如图 3 所示，移动平台从原点出发到达目标点，存在以下 4 种情况，如图 3 所示。根据导航目标点位姿的不同，规划的分类情况较多，分析比较复杂，因此首先对临界情况进行分析，然后再推广到一般情况下。

1.2.1 临界情况

如图 4 所示，当圆弧 2 弧度 $\theta_2 = 0$ 时，导航线与公切线重合，目标点处导航线同时与目标点处左右两圆同时相切（以下，分别简称其为目标左切圆和目标右切圆），导航线角度 θ、导航目标点位置

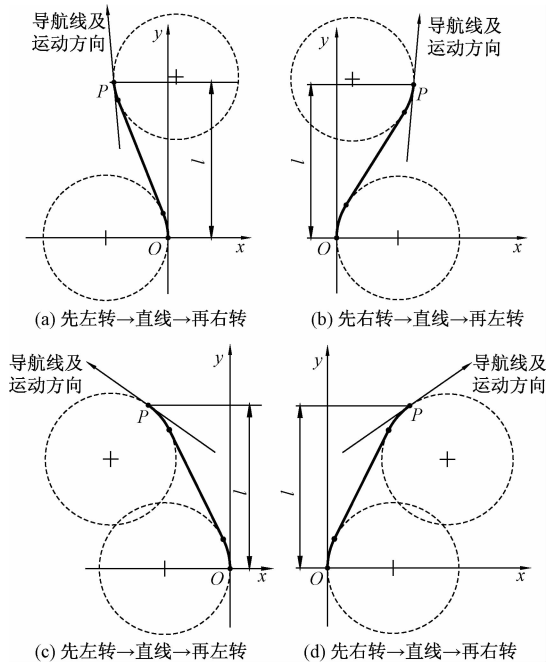


图 3 路径规划的 4 种情况

Fig. 3 4 cases of path planning

$P(x_t, y_t)$ 已知，假设公切线为

$$y = kx + \varphi \tag{1}$$

式(1)中，$k = \tan\theta$，其中 θ 为导航线角度。

(1) 当 $0 < \theta \leqslant \frac{\pi}{2}$ 时，Q 点为 $(r - r\sin\theta, r\cos\theta)$，代入切线 $y = kx + \varphi$ 得

$$\varphi = r\cos\theta - r\tan\theta(1 - \sin\theta) \tag{2}$$

式(2)中，r 为转弯半径。

又根据点坐标为 (s, l)，代入式(1)得到 s 与 θ 的关系为

$$s = \frac{l - r\cos\theta}{\tan\theta} + r(1 - \sin\theta) \tag{3}$$

式(3)中，s 为目标点横坐标；l 为目标点纵坐标。

(2) 当 $\frac{\pi}{2} < \theta \leqslant \pi$ 时，P 点为 $(r\sin\theta - r, -r\cos\theta)$，代入切线 $y = kx + \varphi$ 得

$$\varphi = -r\cos\theta + r\tan\theta(1 - \sin\theta) \tag{4}$$

同样将 Q 点坐标为 (s, l)，代入式(1)得到 s 与 θ 的关系为

$$s = \frac{l + r\cos\theta}{\tan\theta} - r(1 - \sin\theta) \tag{5}$$

综上有：

$$s = \begin{cases} \dfrac{l - r\cos\theta}{\tan\theta} + r(1 - \sin\theta), & 0 < \theta < \dfrac{\pi}{2} \\ \dfrac{l + r\cos\theta}{\tan\theta} - r(1 - \sin\theta), & \dfrac{\pi}{2} < \theta < \pi \end{cases} \tag{6}$$

1.2.2 一般情况讨论

在一般情况下，如图 5 所示，当导航线角度 θ 和

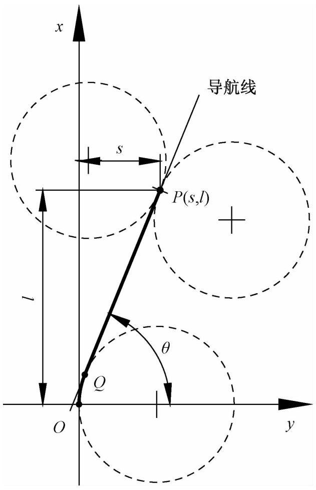


图 4　路径规划临界情况
Fig. 4　Critical condition of path planning

导航目标距离 l 确定后,可计算出当前情况下的临界情况 s 值,只需要对目标点横坐标与 s 进行比较,即可判定出目标点处切圆[以下记为目标切圆 $O_t(x_t, y_t)$]处于导航线左侧还是右侧。再进一步比较目标切圆的圆心横坐标与切圆半径比较即可判定出起始点处切圆[以下记为起始切圆 $O_s(x_s, y_s)$]应当处于 y 轴左侧还是右侧。以下记目标左切圆圆心为 $O_{t1}(x_{t1}, y_{t1})$,目标右切圆圆心为 $O_{t2}(x_{t2}, y_{t2})$;起始左侧切圆圆心为 $O_{s1}(x_{s1}, y_{s1})$,起始右侧切圆圆心为 $O_{s2}(x_{s2}, y_{s2})$。

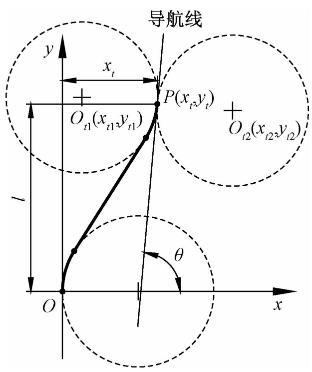


图 5　路径规划一般情况
Fig. 5　Normal condition of path planning

1.2.3　当导航线角度为 $0 < \theta \leqslant \dfrac{\pi}{2}$ 时

(1)当 $x_s < \dfrac{l - r\cos\theta}{\tan\theta} + r(1 - \sin\theta)$ 时,切线与目标点右侧切圆相切。

①$x_{t2} < r$ 时,切线与原点左侧圆相切;

②$x_{t2} \geqslant r$ 时,切线与原点右侧圆相切。

(2)当 $x_t > \dfrac{l - r\cos\theta}{\tan\theta} + r(1 - \sin\theta)$ 时,切线与目标点左侧切圆相切, 切线与原点右侧圆相切。

1.2.4　当导航线角度为 $\dfrac{\pi}{2} < \theta < \pi$ 时

(1)当 $x_t < \dfrac{l + r\cos\theta}{\tan\theta} - r(1 - \sin\theta)$ 时,切线与目标点右侧切圆相切, 切线与原点左侧圆相切;

(2)当 $x_t > \dfrac{l + r\cos\theta}{\tan\theta} - r(1 - \sin\theta)$ 时,切线与目标点左侧切圆相切。

① $x_{t1} < -r$ 时,切线与原点左侧圆相切;

② $x_{t1} \geqslant -r$ 时,切线与原点右侧圆相切。

1.3　公切线的确定

根据节 1.2 节的分析可以确定出目标切圆和起始切圆,而两切圆间公切线共有 4 条,分别为 2 条外切公切线和 2 条内切公切线,如图 6 所示。首先将 4 条公切线方程求出,再根据每条公切线与 x 轴正方向的夹角不同判定每条公切线与目标切圆和起始切圆的相切位置,即可确定应当选取哪一条公切线作为直线段路径。

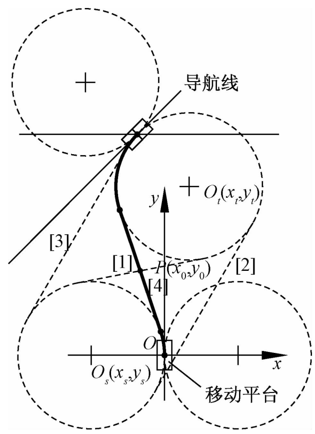


图 6　公切线选取
Fig. 6　Tangent selection

1.3.1　求取外公切线

如图 6 示,图 6 中[2]和[3]两条公切线与目标切圆圆心和起始切圆圆心连线 $\overline{O_sO_t}$ 平行,所以两条外公切线斜率为

$$k_1 = \frac{y_t - y_s}{x_t - x_s} \tag{7}$$

假设切线方程为 $y = kx + b$,则有点 O_s 到切线的距离 $d = r$,即:

$$\left|\frac{kx_s - y_s + b}{\sqrt{k^2 + 1}}\right| = r \tag{8}$$

(1)当 $kx_s - y_s + b \geqslant 0$ 时:

$$b = -kx_s + y_s + r\sqrt{k^2 + 1} \tag{9}$$

则外切线[2]表示为

$$y = \frac{y_t - y_s}{x_t - x_s}x - kx_s + y_s + r\sqrt{k^2 + 1} \tag{10}$$

表 1 分段路径选取条件

Table 1 Selection condition of subsection path

切圆选取条件			起始切圆→目标切圆	公切线选取
$0<\theta\leqslant\frac{\pi}{2}$	$x_t<\frac{l-r\cos\theta}{\tan\theta}+r(1-\sin\theta)$	$x_{t2}<r$	起始左切圆→目标右切圆	切线[4]
		$x_{t2}\geqslant r$	起始右切圆→目标右切圆	切线[3]
	$x_t>\frac{l-r\cos\theta}{\tan\theta}+r(1-\sin\theta)$		起始右切圆→目标左切圆	切线[1]
$\frac{\pi}{2}<\theta<\pi$	$x_t<\frac{l+r\cos\theta}{\tan\theta}-r(1-\sin\theta)$		起始左切圆→目标右切圆	切线[4]
	$x_t>\frac{l+r\cos\theta}{\tan\theta}-r(1-\sin\theta)$	$x_{t1}<-r$	起始左切圆→目标左切圆	切线[2]
		$x_{t1}\geqslant-r$	起始右切圆→目标左切圆	切线[1]

（2）当 $kx_s-y_s+b<0$ 时：

$$b=kx_s-y_s+r\sqrt{k^2+1} \tag{11}$$

则外切线[3]表示为

$$y=\frac{y_t-y_s}{x_t-x_s}x+kx_s-y_s+r\sqrt{k^2+1} \tag{12}$$

1.3.2 求取内公切线

图6中[1]和[4]两条内公切线的交点为 $P(x_0,y_0)$ 为线段 $\overline{O_sO_t}$ 的中点，即 $P\left(\frac{x_s+x_t}{2},\frac{y_s+y_t}{2}\right)$，假设外公切线为 $y-y_0=k(x-x_0)$，则有点 O_s 到切线的距离为 $d=r$，即

$$\left|\frac{k(x_s-x_0)-(y_s-y_0)}{\sqrt{k^2+1}}\right|=r \tag{13}$$

等式左右两边经平方整理得

$$Ak^2+Bk+C=0 \tag{14}$$

式(14)中，$A=(x_s-x_0)^2-r^2$；$B=-2(x_s-x_0)(y_s-y_0)$；$C=(y_s-y_0)^2-r^2$。

当 $B^2-4AC\geqslant0$ 时，方程有解，即：

$$k_2=\frac{-B+\sqrt{B^2-4AC}}{2A} \tag{15}$$

$$k_3=\frac{-B-\sqrt{B^2-4AC}}{2A} \tag{16}$$

切线[1]和切线[4]可分别表示为（其中，$\arctan k_2$、$\arctan k_3$ 中值小者对应切线[1]，值大者对应切线[4]）：

$$y=k_2(x-x_0)+y_0 \tag{17}$$

$$y=k_3(x-x_0)+y_0 \tag{18}$$

综上，根据导航夹角 θ 和设定的一些限制条件，根据数学几何关系可以确定切圆的选取条件，根据条件可判定运动路径中移动平台的圆弧路径方向，根据选取的切圆可确定规划路径中直线段路径为四条公切线的某一条。圆弧及切线选取条件见表1。

1.4 规划路径的表示

选取的移动平台当前点所在切圆圆心和目标点处切圆圆心记为 $O_s(x_s,y_s)$ 和 $O_t(x_t,y_t)$。图7中目标切圆、起始切圆和公切线方程分别在1.2节和1.3节中被推导，图中直线段路径 $\overline{T_1T_2}$ 端点可分别联立起始切圆和目标切圆与公切线方程进行求解。

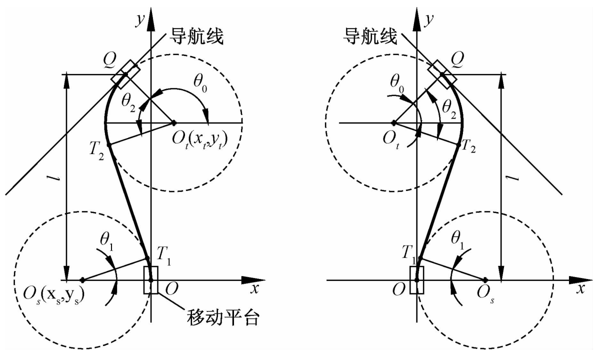


图7 路径分段表示

Fig. 7 Path segment representation

联立公切线方程和起始切圆方程

$$\begin{cases}(x-x_s)^2+(y-y_s)^2=r^2\\ y=k_tx+b\end{cases} \tag{19}$$

可解得原点处切圆上切点 $T_1(X_1,Y_1)$。

联立公切线方程和目标切圆方程

$$\begin{cases}(x-x_t)^2+(y-y_t)^2=r^2\\ y=k_tx+b\end{cases} \tag{20}$$

可解得目标点处切圆上切点 $T_2(X_2,Y_2)$。

所以路径可以确定为 $O\rightarrow T_1\rightarrow T_2\rightarrow Q$（其中 $O\rightarrow T_1$ 为起始圆弧，$T_1\rightarrow T_2$ 为直线段，$T_2\rightarrow Q$ 为目标圆弧），由此可确定移动平台的运动路径可有以下三部分组成。

1.4.1 起始圆弧表达式

当起始切圆在 y 轴左侧时：

$$\begin{cases}(x-x_s)^2+(y-y_s)^2=r^2\\ x=r\sin\alpha\\ y=r\cos\alpha\\ 0\leqslant\alpha\leqslant\theta_1\end{cases} \tag{21}$$

当起始切圆在 y 轴右侧时：

$$\begin{cases}(x-x_s)^2+(y-y_s)^2=r^2\\ x=r\sin\alpha\\ y=r\cos\alpha\\ \pi-\theta_1\leqslant\alpha\leqslant\pi\end{cases}\tag{22}$$

1.4.2　直线段表达式

$$\begin{cases}y=k_tx+b\\ X_1\leqslant x\leqslant X_2\end{cases}\tag{23}$$

1.4.3　目标圆弧表达式

当目标切切圆在导航线左侧时：

$$\begin{cases}(x-x_t)^2+(y-y_t)^2=r^2\\ x=r\sin\alpha\\ y=r\cos\alpha\\ \theta_0-\theta_2\leqslant\alpha\leqslant\theta_0\end{cases}\tag{24}$$

当目标切圆在导航线右侧时：

$$\begin{cases}(x-x_t)^2+(y-y_t)^2=r^2\\ x=r\sin\alpha\\ y=r\cos\alpha\\ \theta_0\leqslant\alpha\leqslant\theta_0+\theta_2\end{cases}\tag{25}$$

2　移动平台硬件平台

移动机器人作业时，需要移动平台准确的运动到达目标位置。履带移动平台通过两侧履带差速运动来实现转向调节[11]，使移动平台根据规划的路径到达目标点。

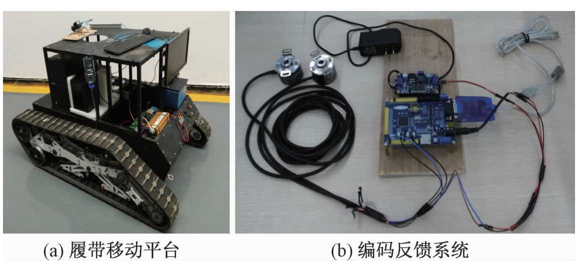


图 8　硬件系统

Fig. 8　Hardware system

移动平台工作时，由上位机（PC）直接通过串口发送控制命令给下位机进行速度控制。由于移动平台在路径跟踪控制过程中需要知道当前在路径上的所处位置以进行下一个动作的执行，所以需要将系统设计为闭环系统。因此，采用编码器计数方式记录移动平台行走距离。当移动平台完成当前动作，则反馈“完成”信号给上位机，上位机再发送下一动作指令给控制器使电机执行下一动作。

3　路径规划实验与分析

3.1　实验方案

移动平台正前方为 y 轴，水平向右为 x 轴，选取 5 个目标点进行实验，目标点 y 轴坐标均为 500，x 轴坐标分别取 −200、−100、0、100、200，单位为 cm，每个目标点分别设定 60°、90° 和 120° 三个方向，共 15 次实验，如图 10 所示，移动平台行进速度为 0.24 m/s。

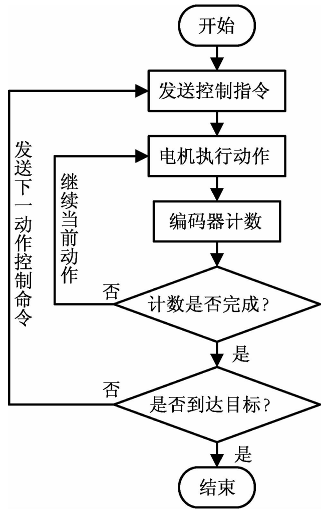


图 9　移动平台控制流程

Fig. 9　Control process of mobile platform

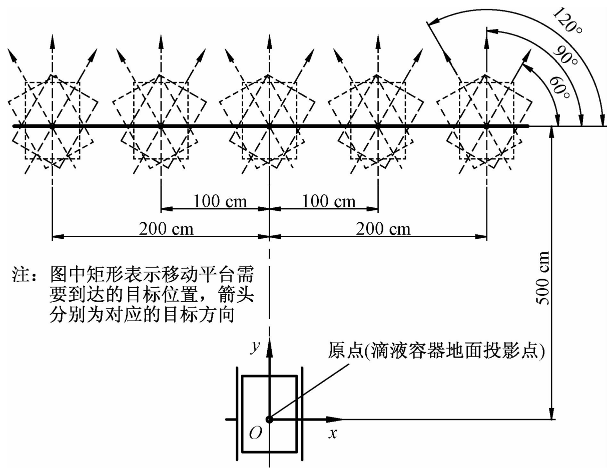


图 10　路径规划实验平面示意图

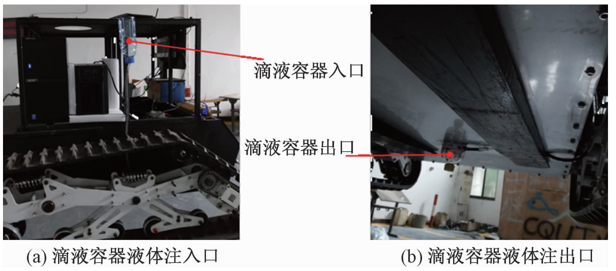
Fig. 10　Sketch map of route planning experiment

3.2　实验结果与分析

在移动平台底部中心位置安装滴液容器，便于实验时记录下移动平台的运动轨迹，滴液容器安装如图 11 所示，移动平台运动轨迹如图 12 所示，移动平台到达点的位置和方向误差测量如图 13 所示。

经试验，统计实验结果见表 2，表中目标点横坐标 X，目标点纵向坐标 Y，目标角度 θ；到达点与目标点间横向误差 Δx，纵向误差 Δy，角度误差 $\Delta\theta$。根据式(26)可计算移动平台到达点的位置方向平均误差值，经计算其横向误差均值为 10.5 cm，纵向误差均值为 3.7 cm，方向误差值均值为 1.5°。

$$\begin{cases} \overline{\Delta x} = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N} |\Delta X_i|}{N} \\ \overline{\Delta y} = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N} |\Delta Y_i|}{N} \\ \overline{\Delta \theta} = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N} |\Delta \theta_i|}{N} \end{cases} \tag{26}$$



(a) 滴液容器液体注入口 (b) 滴液容器液体注出口

图 11 滴液容器安装

Fig. 11 The installation of the dropping vessel

(a) 移动平台通过规划的路径到达目标点 (b) 移动平台到达目标点后停止留下的标记 (c) 移动平台继续直线行走一段距离

图 12 移动平台行驶过程

Fig. 12 Mobile platform driving process

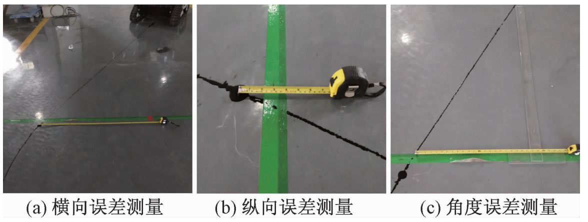

(a) 横向误差测量 (b) 纵向误差测量 (c) 角度误差测量

图 13 误差测量方法

Fig. 13 Method of error measurement

根据误差结果可以看出,移动平台可根据规划的路径到达目标点附近,因此可证明本文提出的路径规划方法理论正确,但最大误差值较大,横向最大误差为 28.0 cm,纵向最大误差为 7.0 cm,方向最大误差为 2.9°。可能是由于移动平台系统误差、理论方法不够完善、实验的坐标系建立不够准确和测量存在误差等原因造成。

4 结论

本文在双圆弧理论基础上提出了圆弧-直线-圆弧路径规划方法并进行了理论推导。在实验室环境下搭建了履带式移动平台对本文提出路径规划方法进行实验验证,实验结果表明本文提出方法可实现移动平台按规划的路径到达目标点的位置和方向,其横向平均误差为 10.5 cm,纵向平均误差为 3.7 cm,方向平均误差为 1.5°;横向最大误差为 28.0 cm,纵向最大误差为 7.0 cm,方向最大误差为 2.9°。验证了本文提出的路径规划方法理论正确和方法可行,为移动机器人路径规划提供了一种新的思路。

表 2 到达点位置和方向误差

Table 2 Location and direction of arrival error

序号	目标点位置和方向			到达点位置和方向误差		
	X/cm	Y/cm	θ/(°)	Δx/cm	Δy/cm	$\Delta\theta$/(°)
1	-200	500	60	-15	-5	2.5
2	-100	500	60	-1	-1	0.3
3	0	500	60	-7	-4	2.9
4	100	500	60	-28	6	2.2
5	200	500	60	-17	3	-0.3
6	-200	500	90	-9	-7	-2.0
7	-100	500	90	-3	-5	-1.2
8	0	500	90	-3	6	-0.3
9	100	500	90	-17	3	1.3
10	200	500	90	-3	-2	0.6
11	-200	500	120	16	0	0.3
12	-100	500	120	22	5	-2.9
13	0	500	120	1	5	-1.8
14	100	500	120	-1	3	-1.6
15	200	500	120	15	1	-2.1

参 考 文 献

1 杨 兴, 张 亚, 杨 巍, 等. 室内移动机器人路径规划研究. 科学技术与工程, 2016; 16(15): 234—238
Yang Xing, Zhang Ya, Yang Wei, *et al*. Research on path planning of indoor mobile robots. Science Technology and Engineering, 2016; 16(15): 234—238

2 柳在鑫, 李建防, 王 强. 基于双圆弧算法的足球机器人路径规划. 西华大学学报(自然科学版), 2005; 24(6): 46—48
Liu Zaixin, Li Jianfang, Wang Qiang. Soccer robot path planning based on bi-arc algorithm. Journal of Xihua University Natural Science, 2005; 24(6): 46—48

3 王旭东, 王春香, 杨 明, 等. 一种基于环视相机的自动泊车方法. 上海交通大学学报, 2013; 47(7): 1077—1081
Wang Xudong, Wang Chunxiang, Yang Ming, *et al*. Automatic paking based on bird's eye view cameras. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013; 47(7):1077—1081

4 朴昌浩, 张 乐, 张 艳, 等. 非平行初始状态自动泊车轨迹生成方法. 北京理工大学学报, 2014; 34(5): 506—511
Piao Changhao, Zhang Le, Zhang Yan, *et al*. Research on non-parallel initial state trajectory generation method for automatic parking system. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014; 34(5): 506—511

5 张 宁, 朱丽丽, 潘峥嵘, 等. 智能车超车双圆弧优化算法. 工

业仪表与自动化装置, 2012; (5): 102—105
Zhang Ning, Zhu Lili, Pan Zhengrong, *et al*. Smart car overtaking based on modified bi-arc algorithm. Industrial Instrumentation & Automation, 2012; (5): 102—105
6 郭　戈. 移动机器人路径规划与环境绘图. 机器人, 2003; 25 (4): 304—307
Guo Ge. Path planning and mapping with mobile robot. Robot, 2003; 25(4): 304—307
7 柳在鑫, 王进戈, 朱维兵, 等. 双圆弧优化算法的足球机器人路径规划. 华侨大学学报(自然版), 2008; 29(2): 190—193
Liu Zaixin, Wang Jinge, Zhu Weibing, *et al*. Soccer robot path planning based on modified bi-arc algorithm. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2008; 29(2): 190—193
8 Sabelhaus D, Röben F, Helligen L P M Z, *et al*. Using continuous-curvature paths to generate feasible headland turn manoeuvres. Biosystems Engineering, 2013; 116(4): 399—409
9 Fraichard T, Scheuer A. From reeds and shepp's to continuous-curvature paths. IEEE Transactions on Robotics, 2004; 20 (6): 1025—1035
10 韩学东, 洪炳镕, 孟　伟. 机器人足球射门算法研究. 哈尔滨工业大学学报, 2003; 35(9): 1064—1066
Han Xuedong, Hong Bingrong, Meng Wei. Shooting algorithm in robot soccer. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003; 35 (9): 1064—1066
11 李雨潭, 朱　华, 高志军, 等. 履带机器人通用地面力学模型分析与底盘设计. 哈尔滨工程大学学报(英文版), 2015; (8): 1126—1130
Li Yutan, Zhu Hua, Gao Zhijun, *et al*. A universal terra mechanics model and the chassis design of a tracked robot. Journal of Harbin Engineering University, 2015; (8): 1126—1130

Path Planning of Mobile Robot Based on Arc-beeline-arc Theory

WANG Yi[1,2], MAO Fang-dong[1], LIU Bo[1], LIU Sa[1], XU Hong-bin[1,2]*
(College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology[1], Chongqing 400054, China;
College of Mechanical Engineering, Chongqing University[2], Chongqing 400044, China)

[**Abstract**] In order to achieve the smooth motion of the mobile robot point-to-point, it is necessary to plan a smooth path to make the mobile robot reach the target position and target direction. Aiming at the problems of traditional Turn-Run-Turn method such as discontinuous and inefficient path, the arc-beeline-arc path planning method was proposed and then the theoretical derivation was put forward on the basis of bi-arc theory. The method of the proposed method was verified by using the crawler mobile platform in the laboratory. The experimental results showed that the mobile platform could reach the target position and direction, in which the mean value of the lateral error was 10.5 cm, the mean of the longitudinal error was 3.7 cm and the mean value of the direction error was 1.5°.

[**Key words**] mobile robot　path planning　bi-arc　arc-beeline-arc