

刘宇峰, 姬长英, 田光兆, 等. 自主导航农业机械避障路径规划 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(2): 117-125.
LIU Yufeng, JI Changying, TIAN Guangzhao, et al. Obstacle avoidance path planning for autonomous navigation agricultural machinery[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(2): 117-125.

自主导航农业机械避障路径规划

刘宇峰¹, 姬长英¹, 田光兆¹, 顾宝兴¹, 魏建胜², 陈 凯¹

(1 南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031; 2 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:【目的】实现自主导航农业机械作业时静态障碍物避障功能。【方法】在已知工作环境条件下提出 2 种避障路径规划算法。以农机运动规律为基础, 依据障碍物位置和尺寸信息提出单障碍物避障算法。在单障碍物避障算法基础上, 依据安全行驶区域大小, 参考左右双向避障策略提出双/多障碍物避障算法。【结果】单障碍物位于不同位置、农机行驶速度为 0.3 m·s⁻¹ 时, 行驶路径分别比 L 算法减少 35%、26%, 行驶路径累计误差减少 53%、82%, 方差减少 64%、66%; 行驶速度为 0.5 m·s⁻¹ 时, 行驶路径减少 38%、22%, 行驶路径累计误差减少 66%、62%, 方差减少 41%、71%。多障碍物路况, 农机行驶速度为 0.3、0.5 m·s⁻¹ 时, 行驶路径累积误差分别为 9.99、4.13 m, 方差分别为 0.022 1、0.027 0 m²。【结论】本文算法在行驶路径、行驶路径累计误差、规划路径跟踪稳定性和路况适应性上均体现出一定优势。

关键词: 自主导航农业机械; 多障碍物; 路径规划; 累计误差; 行驶路径
中图分类号: S232 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)02-0117-09

Obstacle avoidance path planning for autonomous navigation agricultural machinery

LIU Yufeng¹, JI Changying¹, TIAN Guangzhao¹, GU Baoxing¹, WEI Jiansheng², CHEN Kai¹

(1 College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;

2 College of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: 【Objective】To realize static obstacle avoidance of autonomous navigation agricultural machinery when it operates in the field. 【Method】Two path planning algorithms of obstacle avoidance were proposed under known working environment. The single obstacle avoidance algorithm was proposed based on the movement rule of agricultural machinery and according to the position and the size of the obstacle. On the basis of the single obstacle avoidance algorithm, according to the size of safe driving area, the double/multiple obstacles avoidance algorithm was proposed according to left and right obstacle avoiding strategies. 【Result】When the single obstacle was located in different locations and the speed of agricultural machinery was 0.3 m·s⁻¹, compared with L algorithm, driving path reduced by 35%, 26%; Accumulative error of driving path reduced by 53%, 82%; Variance reduced by 64%, 66%. When the driving speed was 0.5 m·s⁻¹, driving path reduced by 38%, 22%; Accumulative error reduced by 66%, 26%; Variance reduced by 41%, 71%. When the speed of agricultural machinery was 0.3

and $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ under the condition of multiple obstacles, accumulative tracking errors of driving path was 9.99, 4.13 m, and variances were 0.022 1, 0.027 0 m^2 , respectively. 【Conclusion】 The proposed algorithm has some advantages in driving path, accumulative error of driving path, stability of theoretical path tracking and adaptability to road condition.

Key words: autonomous navigation agricultural machinery; multiple obstacles; path planning; accumulative error; driving path

科学技术的进步正推动现代农业生产向自动化、规模化、精确化方向快速发展,具备自主导航功能的农业机械越来越多地应用到农业生产中^[1]。自主导航拖拉机作为牵引机械能够高效完成田间播种、施肥和耕地^[2-7],自主导航联合收割机能够在无人干预的情况下收获小麦、水稻和玉米^[8-13]。当农机工作环境中出现少量障碍物时,障碍物可能会阻碍农机正常工作,因此规划一条建立在农机工作平台上的避障路径、帮助农机在存在障碍物的环境中正常完成作业任务必不可少。

现阶段国内外关于农机平台避障路径规划的研究较少,国内研究更多建立在无障碍物环境中,刘刚等^[14]提出一种基于 GNSS 的农田平整自动导航路径规划方法,实现拖拉机的高效平地作业;孟志军等^[15]提出一种面向农田作业机械的地块全区域覆盖路径优化方法,以生成转弯数最少、作业消耗最小、总作业路径最短或有效作业路径比最大的最优作业路径。国外学者针对有障碍物环境展开了相应的研究,Taix 等^[16]针对农田中小型静态障碍物提出一种折线避障方法,虽能实现避障功能,但避障代价过大,且未充分考虑农机的运动特性;圆弧避障方法是现阶段应用较为广泛的一种避障路径规划方法,但避障策略较为简单,当障碍物间距离较近时会出现算法失效的情况。现阶段成熟的路径规划算法如 A-star 算法^[17-18]、SA 算法^[19]和人工势场法^[20-21]等大多运用在农业机器人和 AGV 小车^[22-26]等小型精准控制平台上,这些算法倾向于将控制物体等效于一个运动点,但运用在农机平台(如东方红 SG250 拖拉机)上时,将农机等效为单个运动点会丢失大量的农机自身运动模型信息。算法提供的控制策略也未充分考虑应用在农机平台的可行性,使得现阶段传统路径规划算法或其改进版无法适用于农机工作平台。

为了自主导航农业机械能够顺利避障,建立在农机自身运动模型以及农机工作环境基础上的避障路径规划必不可少。规划的路径指导自主导航农业机械在工作过程中以尽量小的避障代价实现障

碍物的避障,并在避障完成后合理地回归原始工作路径,因此,自主导航农业机械避障路径规划的研究具有很强的实际意义。

1 避障路径规划算法

1.1 单障碍物避障路径规划算法

1.1.1 判断障碍物的威胁性 确定障碍物位置后,需判断障碍物是否会对拖拉机正常工作产生影响,具体工作流程如下:

1) 以一矩形示意表达拖拉机模型,以矩形中心 O 为原点建立平面坐标系, x 轴正方向为水平向右, y 轴正方向与拖拉机航向重合。

2) 以障碍物几何中心 $Z(X_Z, Y_Z)$ 为圆点, Z 到障碍物边界的最长距离 R_Z 为半径作圆,构建防碰撞区域。

3) 计算 Z 到 y 轴距离 d , 设 d 和 R_Z 的差值为 c , 比较 c 与半车宽 $L/2$ 的大小。若 $c>L/2$, 为无威胁障碍物;反之则为有威胁障碍物。

4) 当障碍物为无威胁障碍物时,拖拉机可沿原有导航路线继续自主导航;当障碍物为有威胁障碍物时,拖拉机需根据障碍物位置以及自身运动模型更新避障路径。如图 1 所示,障碍物 Z 为有威胁障碍物。

1.1.2 避障安全距离的计算 若障碍物为有威胁障碍物,需计算避障安全距离 (D),如果在自主导航过程中拖拉机与障碍物的距离小于 D ,即使以最大偏转角避障,拖拉机仍然会与障碍物碰撞。图 1 中,当拖拉机采用最大偏转角避障时,拖拉机转弯半径为最小转弯半径。具体的计算方法如下:

1) 设拖拉机最小转弯半径为 r_L , 则拖拉机转向中心 X_1 位置为 $(-r_L, 0)$, 连接 X_1 与矩形右上角点 $F(X_F, Y_F)$, 以 X_1 为圆心, X_1 到 F 距离为半径作圆, 则圆 X_1 为拖拉机右侧边界角点行驶轨迹图。

2) 拖拉机向前行驶时,圆 X_1 在坐标轴上会随之沿 y 轴方向平移,若平移后的圆 X_1' 与防碰撞区域圆 Z 相切,设此时的圆心坐标 X_1' 为 $(-r_L, y)$, 则变

量 y 满足方程:

$$\sqrt{(-r_L - X_Z)^2 + (y - Y_Z)^2} - R_Z = \sqrt{(X_F + r_L)^2 + (Y_F - 0)^2}$$

解得 y 值, 计算 Y_Z 与 y 的差值 D , D 为避障安全距离。

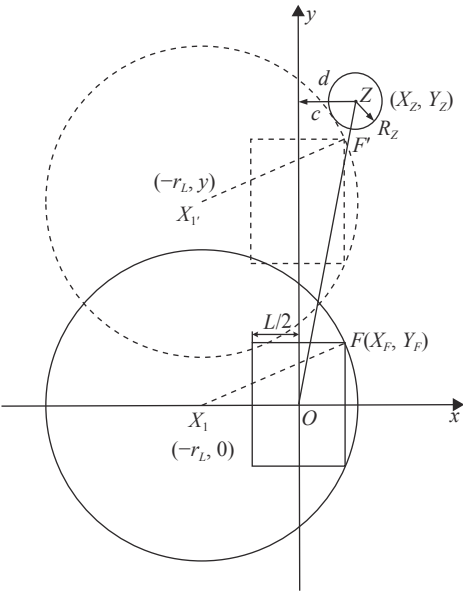


图 1 避障安全距离的计算

Fig. 1 Calculation of safety distance for obstacle avoidance

3) 设拖拉机当前所在位置 y_O 与 Y_Z 的差值为 d_{OZ} , 若 d_{OZ} 小于 D , 则拖拉机无法成功避障, 应立即停止工作, 防止与障碍物产生碰撞。

4) 由步骤 2) 确定拖拉机可向前行驶的安全距离区间为 $[0, Y_Z - D]$, 为使拖拉机尽可能地跟踪初始路径, 尽量贴近障碍物后再执行避障动作, 可将该区间分成若干段 $[0, d_1]$ 、 $(d_1, d_2]$ 、 $(d_2, d_3]$ 、 $\dots$ 、 $(d_{n-1}, d_n]$, 拖拉机在行进一段安全距离 d_n ($n=1, 2, 3, 4, \dots$) 后再进行避障路径规划并计算避障总代价, 筛选出一条代价最小的避障路径作为最终的避障路径, n 的大小根据实际避障时具体 D 值决定。

1.1.3 避障最大转弯半径的确定

1) 如图 2 所示, 当拖拉机向前行驶由 1.1.2 确定的一段避障安全距离后, 便可以计算拖拉机的避障代价, 但在此之前需根据障碍物的位置先确定拖拉机避障最大转弯半径, 设拖拉机能够避障的最大转弯半径为 $r_{\max}$, 则可确定拖拉机的初始转向中心 X_1 的位置为 $(-r_{\max}, 0)$ 。

2) 根据拖拉机避障过程中临界碰撞条件 “拖拉机右边界运动轨迹与圆 Z 相切”, 列出方程:

$$\sqrt{(X_Z + r_{\max})^2 + (Y_Z - 0)^2} - R_Z = \sqrt{(X_F + r_{\max})^2 + (Y_F - 0)^2}$$

3) 解方程, 得避障最大转弯半径 $r_{\max}$ 。

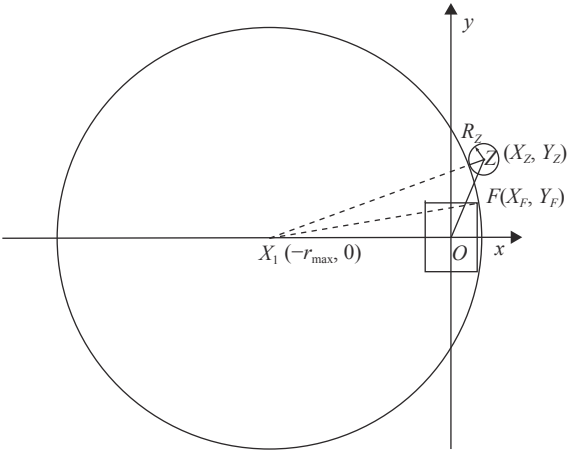


图 2 确定避障最大转弯半径

Fig. 2 Determination of the maximum turning radius of obstacle avoidance

1.1.4 4 段路径规划

1) 设车辆实际转向半径为 r ($r \leq r_{\max}$), 则实际转向中心 X_2 为 $(-r, 0)$ 。以 X_2 为圆心, r 为半径作圆 X_2 , 如图 3 所示:

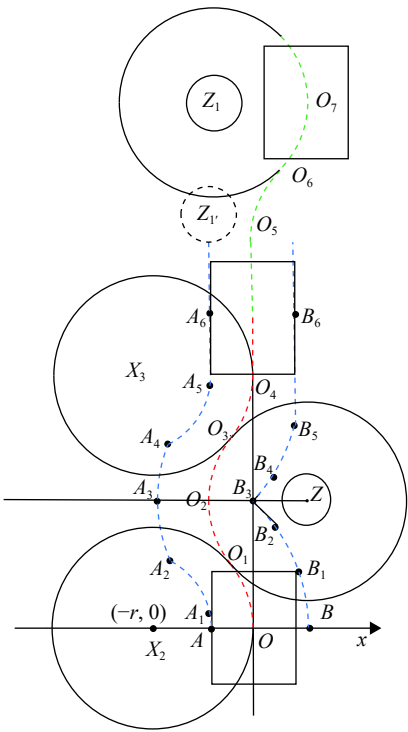


图 3 单/双障碍物避障算法

Fig. 3 Single obstacle/double obstacles avoidance algorithm

2) 连接圆心 X_2 与 Z 点, 与圆 X_2 相交于 O_1 点, 则 $\widehat{OO_1}$ 为第 1 段避障路径。

3) 以 Z 为圆心, 以 ZO_1 距离为半径作圆, 与直线 $y=Y_Z$ 交于 O_2 点, 则 $\widehat{O_1O_2}$ 为第 2 段避障路径。

4) 作 O_1 点关于直线 $y=Y_Z$ 的对称点 O_3 , 则 $\widehat{O_2O_3}$ 为第 3 段避障路径。

5) 作 X_2 关于直线 $y=Y_Z$ 的对称点 X_3 , 以 X_3 为

圆心, X_3 到 O_3 点的距离为半径作圆 X_3 , 与 y 轴相切于 O_4 点, 则 $\widehat{O_3O_4}$ 为第 4 段避障路径。

考虑到自主导航拖拉机在偏转角控制上存在一定的滞后与误差, 因此在避障路径的规划过程中应尽量减少偏转角变化的次数。4 段圆弧避障路径仅在 O_1 与 O_3 点要求拖拉机偏转角发生改变, 以帮助拖拉机实现最基本的避障与回归原始路径功能。若是 3 段圆弧路径则只能实现避障功能, 拖拉机在完成避障后无法回归原始航线。若是 5 段圆弧路径, 则每段圆弧长度被压缩得相对较短, 且会发生 3 次偏转角变化, 实际操作时会放大拖拉机偏转角控制存在误差与滞后的问题, 使得拖拉机难以跟踪规划路径。因此, 对于拖拉机控制平台 4 段圆弧路径规划更稳定, 实际操作时更易实现。

1.1.5 避障代价的计算

1) 以 4 段避障路径总长度 S 为避障代价, S 由 $\widehat{OO_1}$ 、 $\widehat{O_1O_2}$ 、 $\widehat{O_2O_3}$ 、 $\widehat{O_3O_4}$ 构成。

2) 设 O_1X_2 与 x 轴的夹角为 θ , 则 θ 的大小为:

$$\theta = \arctan \frac{Y_Z}{X_Z + r}.$$
$$S_1 = \frac{\pi r}{180} \arctan \frac{Y_Z}{X_Z + r},$$
$$S_2 = \frac{\pi \left(\sqrt{(X_Z + r)^2 + Y_Z^2} - r \right)}{180} \arctan \frac{Y_Z}{X_Z + r},$$
$$S_3 = \frac{\pi \left(\sqrt{(X_Z + r)^2 + Y_Z^2} - r \right)}{180} \arctan \frac{Y_Z}{X_Z + r},$$
$$S_4 = \frac{\pi r}{180} \arctan \frac{Y_Z}{X_Z + r},$$

3) 设 $\widehat{OO_1}$ 、 $\widehat{O_1O_2}$ 、 $\widehat{O_2O_3}$ 、 $\widehat{O_3O_4}$ 长度为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 , 具体计算方法如下:

则 S 关于转向半径 r 的函数为:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 =$$
$$\frac{\pi \left(\sqrt{(X_Z + r)^2 + Y_Z^2} \right)}{90} \arctan \frac{Y_Z}{X_Z + r}.$$

4) 在 $r \in [r_L, r_{\max}]$ 区间内, 计算可得 S 最小时的 r 取值。其中 r_L 为车辆最小转弯半径, 可从车辆说明书中获得, $r_{\max}$ 为 1.1.3 确定的车辆避障最大转弯半径。

1.1.6 避障总行驶路径的计算 自主导航拖拉机执行避障动作时, 需确定避障起始点, 由 1.1.2 可确定允许拖拉机向前行驶的距离为 d_1 、 d_2 、 d_3 、 $d_4 \cdots d_n$, 以 1.1.4、1.1.5 方法计算相对应的 n 个避障代价 S_1 、 S_2 、 $S_3 \cdots S_n$, 最终拖拉机完成避障动作所需的总路径

长度为 $C_n = S_n + d_n$, 当 C_n 为最小时, 设此时规划的避障路径为最优避障路径, 此时确定的拖拉机转弯半径 r 为最优转弯半径。

1.2 双/多障碍物避障路径规划算法

单障碍物避障算法适用于路径上出现单一障碍物的情况, 当拖拉机自主导航行驶路径上出现 2 个障碍物时, 可使用双障碍物避障算法予以解决。

1.2.1 障碍物 Z 避障路径规划 首先根据障碍物 Z 的位置, 由单障碍物避障算法进行初始避障路径规划。

1.2.2 构建安全行驶区域 如图 3 所示, 完成路径规划后, 构建障碍物 Z 的安全行驶区域, 该部分覆盖拖拉机避障经过的所有区域, 在图中由 A 、 $A_1 \cdots A_6$ 、 B 、 $B_1 \cdots B_6$ 以及拖拉机两侧边界延长线构成。

1.2.3 判断障碍物是否存在威胁 首先为障碍物 Z_1 构建防碰撞安全区域, 并判断是否会与 1.2.2 建立的安全行驶区域产生交集。若产生交集, 说明 Z_1 存在威胁; 若无交集, 则 Z_1 无威胁, 原有路径无需做出修改, 拖拉机可正常行驶通过。

1.2.4 判断障碍物远近属性 若障碍物 Z_1 存在威胁, 则需对障碍物远近属性进行判断。如图 3 所示, 当拖拉机沿着 $O_1 \cdots O_4$ 完成障碍物 Z 的避障后回归原始航线, 中心 O 点随之运动到 O_4 , 以 O_4 点为原点重新建立避障坐标系, 拖拉机可利用单障碍物避障算法沿着 O_5 、 O_6 、 O_7 3 个点再次实现 Z_1 的避障, 此时称 Z_1 为远障碍物。当拖拉机完成 Z 的避障后回归原始航线, 若 Z_1 和拖拉机距离已小于避障安全距离 D , 拖拉机无法完成 Z_1 的避障, 此时称障碍物 Z_1 为近障碍物, 如图 3 所示, Z_1 为近障碍物, Z_1 为远障碍物。

1.2.5 近障碍物避障 若障碍物 Z_1 为近障碍物, 则要求拖拉机在障碍物 Z 的避障过程中, 利用单障碍物避障算法对 Z_1 进行实时避障路径规划, 帮助拖拉机完成 Z_1 的避障。

在 Z 避障过程中, 根据 Z_1 位置, 单障碍物避障算法会采取左、右避障 2 种不同的避障策略:

1) 左避障策略。如图 4 所示, 若拖拉机在障碍物 Z 的避障过程中行进到 O_2 点时, 障碍物 Z_1 处在拖拉机航向右侧, 此时应采取左避障策略, 沿 $O_2 \cdots O_5$ 完成避障后, 拖拉机距离初始路径较远, 此时拖拉机应尽快回归初始路径, 为保持拖拉机运动连贯性, 以 Z_1 为圆心, Z_1O_5 为半径作圆 X_4 。作圆 X_5 与 Y 轴、圆 X_4 相切于 O_6 、 O_7 2 个点, 圆 X_5 半径与圆 X_3 半径相同, 圆 X_3 提供 Z_1 左避障时的第 1 段避障

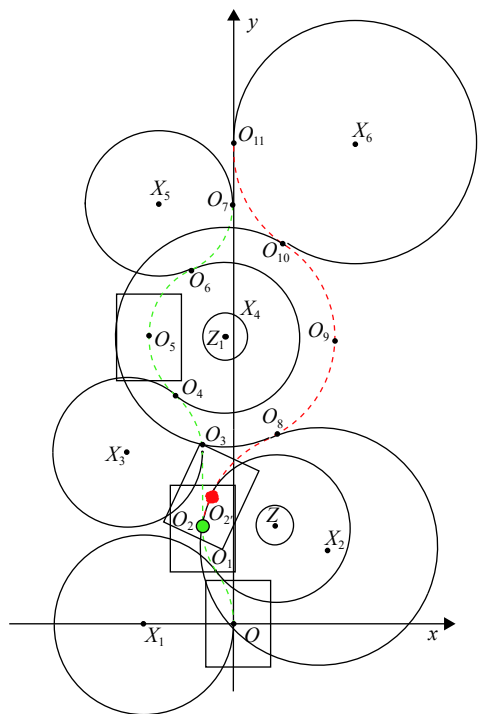


图 4 左避障与右避障策略

Fig. 4 Strategies of left and right obstacle avoidance

圆弧 $\widehat{O_3O_4}$ 。当拖拉机沿 $O_2\cdots O_5$ 完成 Z_1 避障后,可继续跟踪由 O_5 、 O_6 、 O_7 组成的 2 段圆弧回归初始路径。

2) 右避障策略。如图 4 所示,若拖拉机在障碍物 Z 的避障过程中行驶经过 O_2 点而继续行进到 O_2 点时, Z_1 处在拖拉机航向左侧,此时应采取右避障策略,完成避障后,与 1) 存在相同的问题,同样以圆 X_2 半径作圆 X_6 ,圆 X_6 与圆 X_4 、 Y 轴相切于 O_{10} 、 O_{11} 2 个点,圆 X_2 提供 Z_1 右避障时的第 1 段避障圆弧 $\widehat{O_2O_8}$,当拖拉机沿着 O_2 、 O_8 、 O_9 完成 Z_1 的避障后,可继续跟踪由 O_9 、 O_{10} 、 O_{11} 组成的 2 段圆弧回归初始路径。

1.2.6 多障碍物避障算法 多障碍物避障算法建立在双障碍物避障算法之上,当拖拉机采用单障碍物避障算法实现第 1 个障碍物的避障动作后,利用双障碍物避障算法可实现第 2 个障碍物的避障。若存在第 3 个障碍物,则可在拖拉机完成第 2 个障碍物的避障后再次调用双障碍物避障算法。以此类推,实现第 $n-1$ 个障碍物 Z_{n-1} 的避障后,可调用双障碍物避障算法实现障碍物 Z_n 的避障。

2 避障路径规划试验及结果分析

2.1 试验设计

以具备调速和自主导航功能的东方红 SG250 拖拉机作为试验平台,为使 GPS 系统正常工作,选

择在光线条件良好的晴天的上午开展试验。GPS 采用载波相位实时差分技术,定位精度达 cm 级,将拖拉机跟踪避障路径时的 GPS 定位数据作为参考标准,以此验证算法的可行性,试验在南京农业大学工学院车库场地进行,如图 5 所示。



图 5 试验平台和试验场地

Fig. 5 Experiment platform and field

现阶段针对静态障碍物避障路径规划的研究较少,文献 [27] 提出的避障路径规划算法是现阶段使用较为广泛的方法,与本文所提算法相比,在面对障碍物时均采用 4 段圆弧避障的形式,具有一定的参考对比价值。下文以 L 算法指代,利用 L 算法规划避障路径可通过图 6 复现。算法由 3 段圆弧组成,圆弧半径均为拖拉机最小转弯半径,避障路径由 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{BC}$ 和 $\widehat{CD}$ 3 段圆弧组成,L 算法未涉及避障安全距离。

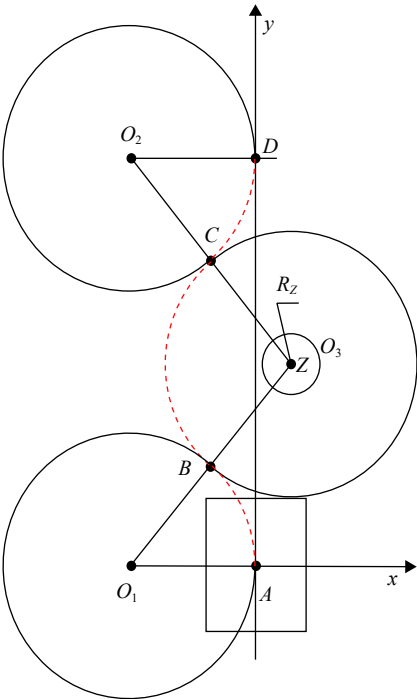


图 6 L 算法规划避障路径

Fig. 6 L algorithm planning obstacle avoidance path

试验分为单障碍物避障试验与双障碍物避障试验,障碍物为随机设置,试验前由 Bumblebee2 双目相机完成障碍物的识别与定位。第 1 次单障碍物避障试验障碍物位置为 $(-0.125, 4.820)$,第 2 次单障碍物避障试验障碍物位置为 $(-0.125, 6.820)$, R_Z 均为 0.45。双障碍物避障试验障碍物位置分别为 $(0.800, 2.500)$ 、 $(-0.200, 5.800)$, $R_Z=0.50$ 。

2.2 结果与分析

拖拉机分别以 $0.3、0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的恒定速度进行试验。单障碍物避障试验结果如图 7、图 8 所示,

双障碍物避障试验结果如图 9 所示。图 7 表示单个障碍物在不同位置,拖拉机以不同速度跟踪 L 算法规划的路径时,行驶路径与规划路径的偏差。图 8 表示在与图 7 相同条件下,拖拉机以不同速度跟踪单障碍物避障算法规划的路径时,行驶路径与规划路径的偏差。试验中采用 0.5 m 作为间隔对安全距离区间进行分段,不同速度下 2 组单障碍物避障试验规划的第 1 段路径均为行驶的安全距离,仅在距离长短上存在差异。当障碍物位置为 $(-0.125, 4.820)$ 时,拖拉机行驶的安

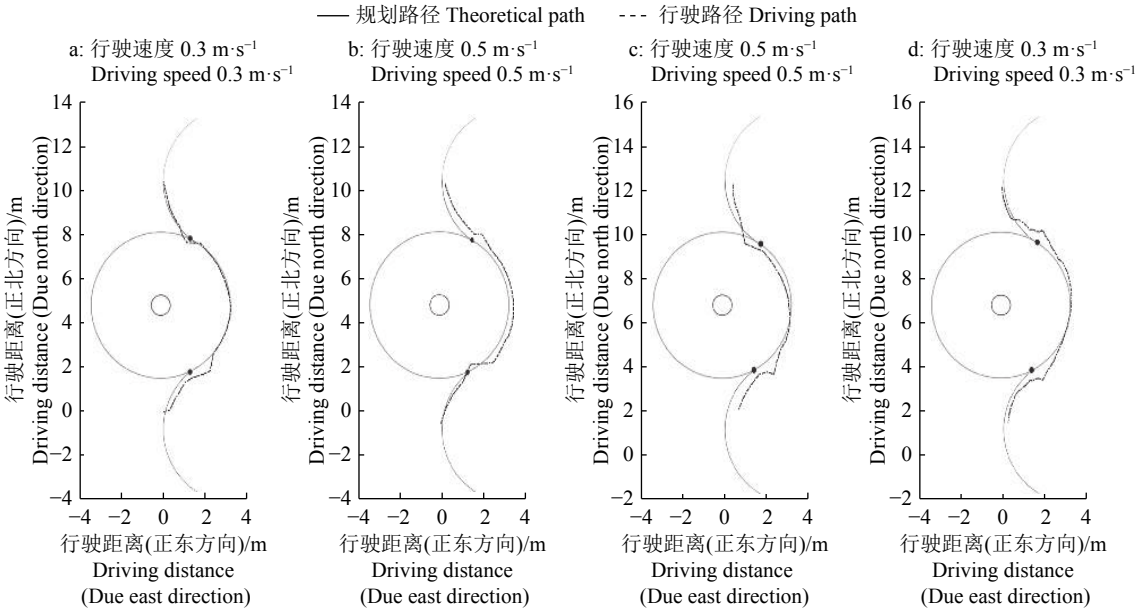


图 7 单障碍物和不同行驶速度条件下 L 算法避障试验

Fig. 7 Obstacle avoidance experiments of L algorithm at single obstacle and different driving speeds conditions

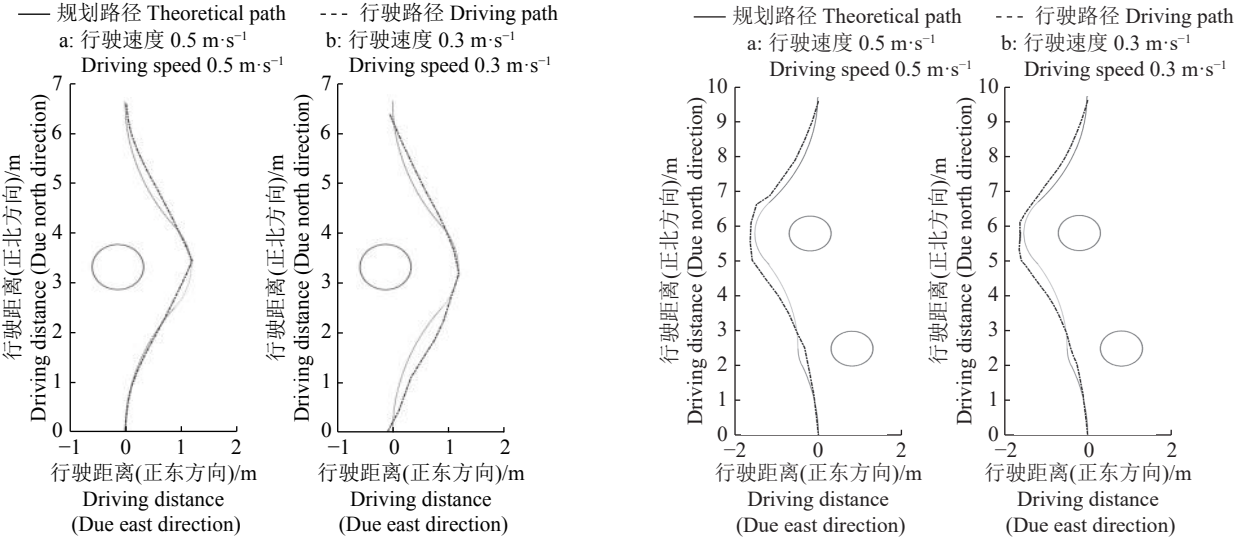


图 8 单障碍物和不同行驶速度条件下单障碍物避障算法避障试验

Fig. 8 Obstacle avoidance experiments of single obstacle avoidance algorithm at single obstacle and different driving speeds conditions

图 9 双障碍物和不同行驶速度条件下双/多障碍物避障算法避障试验

Fig. 9 Obstacle avoidance experiments of double/multiple obstacles avoidance algorithm at double obstacles and different driving speeds conditions

全距离为 1.5 m, 当障碍物位置为 (-0.125, 6.820) 时, 拖拉机行驶的安全距离为 3.5 m。因此最终试验结果以行驶 d_n 后的起始避障点作为原点, 更新障碍物坐标后, 2 组试验障碍物的位置坐标相对拖拉机当前位置均为 (-0.125, 3.320)。根据障碍物位置 2 组试验采用相同的 4 段圆弧避障策略, 最终不同速度下 2 组避障试验中拖拉机行驶路径与规划路径差异很小 (图 8)。图 9 表示在双

障碍物条件下拖拉机以不同速度跟踪双/多障碍物避障算法规划路径时, 行驶路径与规划路径的偏差。

表 1 定量分析了在单障碍物和不同行驶速度条件下, 单障碍物避障算法与 L 算法规划路径和行驶路径的差别。通过行驶路径累计误差与方差的对比, 反映 2 个算法在实际应用时稳定性与实用性的差别。

表 1 单障碍物和不同行驶速度条件下单障碍物避障算法与 L 算法对比

Table 1 Contrast of single obstacle avoidance algorithm and L algorithm at single obstacle and different driving speeds conditoins

障碍物位置 Obstacle location	行驶速度/ (m·s ⁻¹) Driving speed	行驶路径/m Driving path		规划路径/m Theoretical path		累积误差/m Accumulative error		方差/m ² Variance	
		SOAA	L	SOAA	L	SOAA	L	SOAA	L
		SOAA	L	SOAA	L	SOAA	L	SOAA	L
(-0.125, 4.820)	0.3	8.55	13.15	9.17	13.49	3.57	7.76	0.015 0	0.042 6
	0.5	8.38	13.62	9.17	13.49	4.07	12.11	0.027 3	0.046 3
(-0.125, 6.820)	0.3	10.55	14.28	11.17	15.23	3.57	20.55	0.015 0	0.044 3
	0.5	10.38	13.36	11.17	15.23	4.07	10.77	0.027 3	0.095 2

1) SOAA: 单障碍物避障算法; L: L 算法
1) SOAA: Single obstacle avoidance algorithm; L: L algorithm

当障碍物位于 (-0.125, 4.820) 时, 单障碍物避障算法规划路径比 L 算法减少 32%。试验中当拖拉机行驶速度以 0.3、0.5 m·s⁻¹ 时跟踪单障碍物避障算法规划路径时行驶路径比 L 算法分别减少 35%、38%, 行驶路径累计误差分别减少 53%、66%。

当障碍物位置位于 (-0.125, 6.820) 时, 单障碍物避障算法规划路径比 L 算法减少 26%。试验中当拖拉机行驶速度以 0.3、0.5 m·s⁻¹ 时跟踪单障碍物避障算法规划路径时, 行驶路径比 L 算法分别减少 26%、22%, 行驶路径累计误差分别减少 82%、62%。

由表 2 可知, 双/多障碍物避障算法规划路径为 10.29 m, 试验中当拖拉机行驶速度为 0.3、0.5 m·s⁻¹ 时, 跟踪双/多障碍物避障算法行驶路径为 10.30、10.36 m, 与规划路径相比仅分别增加

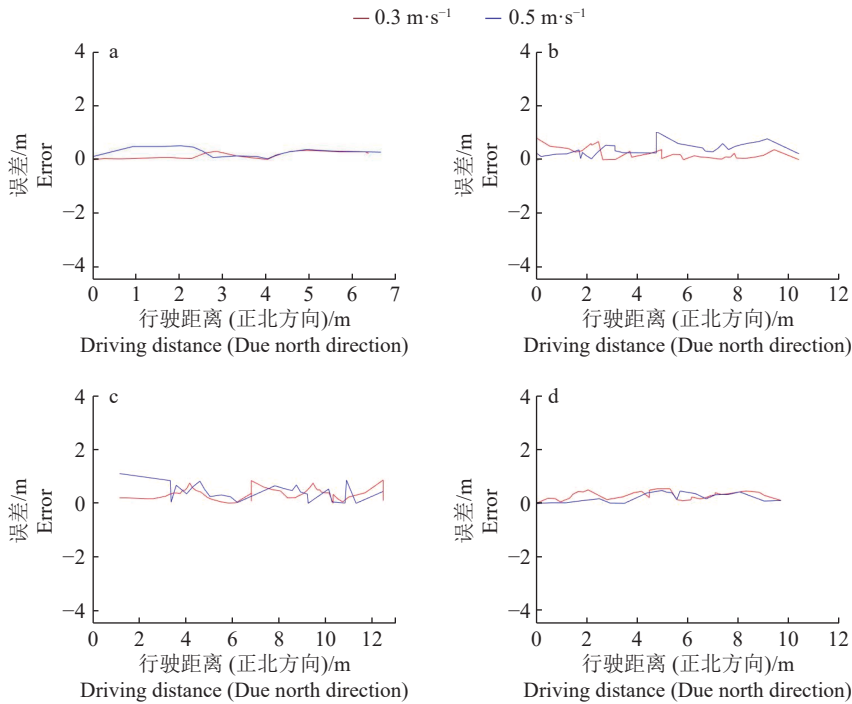
0.09%、0.6%, 跟踪双/多障碍物避障算法规划路径的行驶路径累计误差为 9.99、4.13 m。

图 10 表示 4 组试验中由 GPS 定位数据计算得到的多点误差值, 图 10a 表示当障碍物位置为 (-0.125, 4.820)、(-0.125, 6.820) 时在单障碍物避障算法下行驶路径与规划路径的误差; 图 10b 表示当障碍物位置为 (-0.125, 4.820) 时在 L 算法下行驶路径与规划路径的误差; 图 10c 表示当障碍物位置为 (-0.125, 6.820) 时在 L 算法下行驶路径与规划路径的误差; 图 10d 表示当道路上存在 2 个障碍物, 位置为 (-0.200, 5.800)、(0.800, 2.500) 时在双/多障碍物避障算法下行驶路径与规划路径的误差。对应的方差值可参照表 1、表 2, 在相同行驶条件下, 跟踪单障碍物避障算法规划路径获得的方差值均小于 L 算法。

表 2 双/多障碍物避障算法试验数据分析

Table 2 Data analyses of double/multiple obstacles avoidance algorithm experiments at double obstacles and different driving speeds conditions

行驶速度/(m·s ⁻¹) Driving speed	行驶路径/m Driving path	规划路径/m Theoretical path	累积误差/m Accumulative error	方差/m ² Variance
0.3	10.30	10.29	9.99	0.022 1
0.5	10.36	10.29	4.13	0.027 0



a: 单障碍物避障算法, 障碍物位置为 (-0.125, 4.820)、(-0.125, 6.820); b: L 算法, 障碍物位置为 (-0.125, 4.820); c: L 算法, 障碍物位置为 (-0.125, 6.820); d: 双/多障碍物算法, 2 个障碍物位置为 (-0.200, 5.800)、(0.800, 2.500)

a: Single obstacle avoidance algorithm, the locations of the obstacle were (-0.125, 4.820) and (-0.125, 6.820); b: L algorithm, the location of the obstacle was (-0.125, 4.820); c: L algorithm, the location of the obstacle was (-0.125, 6.820); d: Double/multiple obstacles avoidance algorithm, the locations of two obstacles were (-0.200, 5.800) and (0.800, 2.500)

图 10 不同障碍物条件下以不同行驶速度跟踪不同算法避障路径时行驶路径与规划路径的误差

Fig. 10 Errors between driving path and theoretical path caused by tracking obstacle avoidance paths of different algorithms at the different obstacle conditions and driving speeds

3 结论

1) 单障碍物避障算法的规划路径与 L 算法相比大幅减少, 障碍物在不同位置下减幅达 32%、26%。

2) 算法投入实际应用中, 由单障碍物避障试验 4 组数据可得, 行驶路径平均减少 30%, 行驶路径累计误差平均减少 65%。

3) L 算法在试验过程中出现了算法起始避障点超过拖拉机当前位置点的情况, 导致拖拉机无法完整跟踪避障路径。本文算法很好地规避了这个问题, 首先利用避障安全距离尽可能地贴近障碍物, 再采用避障策略完成避障动作。若拖拉机当前位置过于贴近障碍物, 算法会提示拖拉机停止工作, 否则会有与障碍物碰撞的风险。

4) 由统计误差的方差可知, 无论拖拉机行驶速度快或慢, 跟踪本文算法避障路径的稳定性更好, 基于拖拉机运动模型建立的避障策略更圆滑, 很少出现 L 算法中拖拉机大幅偏离行驶路径的情况。除此之外, 本文算法解决了现阶段 2 个障碍物相隔距离较短时拖拉机无法完成避障的问题。

参考文献:

[1] 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44-54.

[2] GAN-MOR S, CLARK R L, UPCHURCH B L. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance[J]. Comput Electron Agric, 2007, 59(1/2): 31-38.

[3] TIMO O, JUHA B. Guidance system for agricultural tractor with four wheel steering[J]. IFAC Proceed Vol, 2013, 46(4): 124-129.

[4] KARIMI D, HENRY J, MANN D D. Effect of using GPS autosteer guidance systems on the eye-glance behavior and posture of tractor operators[J]. J Agric Saf Health, 2012, 18(4): 309-318.

[5] 刘柯楠, 吴普特, 朱德兰, 等. 太阳能渠道式喷灌机自主导航研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 141-146.

[6] CORDESSES L, CARIOU C, BERDUCAT M. Combine harvester control using real time kinematic GPS[J]. Precis Agric, 2000, 2(2): 147-161.

[7] CHOI J, YIN X, YANG L, et al. Development of a laser scanner-based navigation system for a combine harvester[J]. E A Environment F, 2014, 7(1): 7-13.

[8] 张美娜, 吕晓兰, 陶建平, 等. 农用车辆自主导航控制系

统设计与试验[J]. [农业机械学报](#), 2016, 47(7): 42-47.

[9] 张漫, 项明, 魏爽, 等. 玉米中耕除草复合导航系统设计与试验[J]. [农业机械学报](#), 2015, 46(S1): 8-14.

[10] 谢斌, 李静静, 鲁倩倩, 等. 联合收割机制动系统虚拟样机仿真及试验[J]. [农业工程学报](#), 2014, 30(4): 18-24.

[11] 任述光, 谢方平, 王修善, 等. 4LZ-0.8 型水稻联合收割机清选装置气固两相分离作业机理[J]. [农业工程学报](#), 2015, 31(12): 16-22.

[12] 焦有宙, 田超超, 贺超, 等. 不同工质对大型联合收割机余热回收的热力学性能[J]. [农业工程学报](#), 2018, 34(5): 32-38.

[13] 伟利国, 张小超, 汪凤珠, 等. 联合收割机稻麦收获边界激光在线识别系统设计与试验[J]. [农业工程学报](#), 2017, 33(S1): 30-35.

[14] 刘刚, 李笑, 康熙, 等. 基于 GNSS 的农田平整自动导航路径规划方法[J]. [农业机械学报](#), 2016, 47(S1): 21-29.

[15] 孟志军, 刘卉, 王华, 等. 农田作业机械路径优化方法[J]. [农业机械学报](#), 2012, 43(6): 147-152.

[16] TAÏX M, SOUÈRES P, FRAYSSINET H, et al. Path planning for complete coverage with agricultural machines[M]//Springer-verlag Berlin. Springer tracts in advanced robotics. Berlin: Springer-verlag, 2006.

[17] KANG N K, SON H J, LEE S H. Modified A-star algorithm for modular plant land transportation[J]. [J Mech Sci Technol](#), 2018, 32(12): 5563-5571.

[18] LE A V, PRABAKARANV, SIVANANTHAMV, et al. Modified A-star algorithm for efficient coverage path planning in tetris inspired self-reconfigurable robot with integrated laser sensor[J]. [Sensors](#), 2018, 18(8). doi: 10.3390/s18082585.

[19] 吴麟麟, 杨俊辉, 汪若尘, 等. 基于混合 SA 算法的智能汽车全局路径规划[J]. [江苏大学学报\(自然科学版\)](#), 2019, 40(3): 249-254.

[20] 刘建华, 杨建国, 刘华平, 等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J]. [农业机械学报](#), 2015, 46(9): 18-27.

[21] 陈余庆, 李桐训, 于双, 等. 基于势场蚁群算法的机器人全局路径规划[J]. [大连理工大学学报](#), 2019, 59(3): 316-322.

[22] 谢永良, 尹建军, 余承超, 等. 轮式 AGV 沿葡萄园垄道行驶避障导航算法与模拟试验[J]. [农业机械学报](#), 2018, 49(7): 13-22.

[23] 殷建军, 董文龙, 梁利华, 等. 复杂环境下农业机器人路径规划优化方法[J]. [农业机械学报](#), 2019, 50(5): 17-22.

[24] TIAN L F, COLLINS C. An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm[J]. [Mechatronics](#), 2003, 14(5): 455-470.

[25] KIM H, KIM B K. Online minimum-energy trajectory planning and control on a straight-line path for three-wheeled omnidirectional mobile robots[J]. [IEEE T Ind Electron](#), 2014, 61(9): 4771-4779.

[26] GREGORY J, OLIVARES A, STAFFETTI E. Energy-optimal trajectory planning for robot manipulators with holonomic constraints[J]. [Syst Control Lett](#), 2012, 61(2): 279-291.

[27] LIU C, ZHAO X, DU Y. Research on the static path planning method of small obstacles for automatic navigation of agricultural machinery[C]. IFAC-Papers. Beijing. 2018: 673-677.

【责任编辑 李庆玲】