王芳,张伟,申珂,等.基于改进鱼群算法的履带式收割机路径跟踪[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(4):109-117.
Wang F, Zhang W, Shen K, et al. Path tracking of crawler harvester based on improved fish swarm algorithm[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(4):109-117.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202402003

基于改进鱼群算法的履带式收割机路径跟踪

王芳[1],张伟[2],申珂[3],刘中峰[1]

(1.山西省农业机械发展中心,山西 太原 030027;2.神农农业机械发展(山西)集团有限公司,山西 太原 030031;
3.神农科技集团有限公司,山西 太原 030045)

摘　要:[目的]农田环境的复杂性对履带式收割机的路径跟踪精度提出了严峻挑战。为了提升收割机在农田作业中的路径跟踪性能,减少跟踪偏差,本研究提出了一种基于改进鱼群算法的履带式收割机全田块路径跟踪方法。[方法]根据履带式收割机的结构特性,将其作业过程简化为二维平面上的运动形式。通过结合全局与局部坐标系的转换,构建了收割机运动轨迹的数学模型,并进一步建立了相邻时刻履带式收割机全田块作业的运动模型。随后,根据不同作业状态,以收割机的前视距离作为关键参数,确定增益系数,从而获取其实时控制变量。为优化路径跟踪效果,引入了粒子滤波算法对鱼群算法进行改进,并以此构建了目标函数。在目标求解过程中,通过算法的不断迭代和优化,实现了收割机路径的精准跟踪。[结果]经过多次试验验证,在设定不同起始偏差点的情况下,本文提出的方法表现出了良好的跟踪性能。应用本文方法后,作业路径跟踪平均响应时间为0.52 s,最小转弯半径为5.0 m,平均偏差0.8 m,最小偏差0.5 m,与设定路线基本一致。这一结果充分证明了本文设计方法的有效性。[结论]综上所述,本文提出的基于改进鱼群算法的履带式收割机全田块路径跟踪方法,能够准确实现收割机在复杂农田环境中的精准跟踪,跟踪效果好,具有广泛的应用价值。

关键词:粒子滤波; 鱼群算法; 履带式收割机; 路径跟踪; 农田作业
中图分类号:TP319;S225.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)04-0109-09

履带式收割机在现代农业生产中发挥着重要作用,其作业效率直接关系到农作物产量和农民的经济收益。随着现代农业技术的成熟发展,履带式收割机的应用也愈发广泛。对履带式收割机作业路径的精确跟踪,是其高效、精准作业的关键。因此,研究有效的履带式收割机全田块路径跟踪方法至关重要。这一研究不仅能推动农业机械化的发展,更能为农业生产提供更优质的技术支持。有国外研究学者利用机器视觉的方法[1],通过图像技术对农田中的障碍物进行识别,根据农田边界不断调整履带式收割机转向和速度,具有较高的控制和路径跟踪精度,但在获取图像时对光照条件要求较高,且需要大量的计算步骤,存在实时性差问题。还有研究学者通过GPS信号定位方式,直接获取履带式收割机的位置和姿态变化趋势[2],以此对收割机运动轨迹进行条件和跟踪,具有较高精度,但GPS信号定位过程中容易受到干扰,存在稳定性差的问题。我国作为农业大国,虽然对履带式收割机路径跟踪方法的研究起步较晚,但较为迅速,国内专家提出了基于数据驱动的气动柔性关节Takagi-Sugeno模糊系统,通过模糊控制的方法,实现对收割机行进路径的跟踪[3],在履带式收割机上安装模糊逻辑控制器,获取履带式收割机的实时位置和姿态,按照其在田块中的目标轨迹生成控制信号,实现对履带式收割机转向和速度的控制,达到跟踪目的,该方法操作简单,应用效果较好,但在控制和跟踪过程中对参数设定情况要求高,不能保证跟踪方法鲁棒性。还有研究专家提出了将DCS技术应用于收割机路径变化跟踪及路径控制优化中[4],采用DCS技术搭

收稿日期:2024-02-02　　**修回日期**:2024-07-02
基金项目:山西省科技重大专项计划"揭榜挂帅"项目(202201140601023)
作者简介:王芳(ORCID:0009-0001-5427-2330),高级工程师,研究方向:农业机械技术与装备

建联合收割机系统,以收割成本控制为目标,对收割路径进行跟踪,并优化路径,调整履带式收割机的运动轨迹,达到全田块路径跟踪的目的,该方法具有处理复杂问题的能力,但需要大量的数据作为训练支撑,一旦训练时间长会陷入局部最优解的问题。

鱼群算法作为一种受鱼类行为启发的优化算法,通过模拟鱼群的觅食、聚群和追尾行为来寻找最优解。通过粒子滤波算法对鱼群算法进行改进,能够使其根据环境变化和收割机的运行状态自适应地调整搜索策略,从而在履带式收割机的路径跟踪中找到全局最优的路径,提高路径跟踪的精度。与传统的模糊控制技术相比,改进的鱼群算法自适应性强,能够在不同环境下自动调整搜索策略,保证跟踪的鲁棒性。与DCS技术相比,改进的鱼群算法通过全局搜索,能够避免陷入局部最优解,确保找到最优路径。因此,本文引入改进鱼群算法来解决现有方法存在的问题,设计履带式收割机的全田块路径跟踪方法。

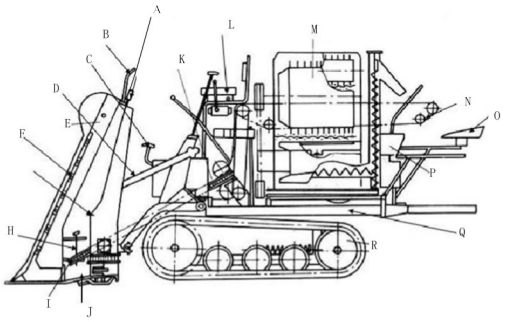
1 建立相邻时刻履带式收割机全田块作业运动模型

履带式收割机是一种广泛应用于农业领域的机械设备,采用履带式设计,因此具有结构紧凑、功能齐全、操作简便等特点,使它在农业生产中发挥着重要作用。同时,它适用于各种农作物的收割作业,特别是那些需要在大面积或复杂地形上进行收割的作物。履带式收割机结构见图1。

履带式收割机在实际全田块环境中作业时,其运动轨迹和行进路径会受到多种因素影响,对其控制操作较为复杂,且在实际作业环境中,机器人的各种运动数据难以保持恒定[5-7]。为实现其在全田块作业时的路径控制与跟踪,以全局坐标系和局部坐标系为基础,建立相邻时刻的作业运行模型(图2)。

图2中XOY、xoy为全局、局部坐标系;x轴代表收割机前进方向,y轴顺时针旋转与x轴垂直;q为履带式收割机中心距;O_2为瞬时转弯圆心位置;w_{left}为左侧履带速度;w_{right}为右侧履带速度;i为转弯时左侧履带多于右侧履带行驶的距离[8]。

当履带式收割机在全田块中作业运动时,在r、$r+1$相邻时刻中,e_1为由r运动至$r+1$的转角;



A:割台离合手柄;B:扶手架;C:脚踏;D:提升上连杆;E:割台;F:拨禾器;G:输送上链;H:拨禾星轮;I:中间输送下链;J:割刀;K:中间输送装置;L:座位;M:脱粒装置;N:脱粒夹持链;O:卸粮座位;P:发动机;Q:机架;R:行走机构

A: Cut table clutch handle; B: Handle; C: Pedal; D: Raise the upper connecting rod; E: Header; F: Rice reel; G: Transport on chain; H: Dishing Star Wheel; I: Intermediate conveyor chain; J: Cutting knife; K: Intermediate conveying device; L: Seat; M: Threshing device; N: Threshing clamping chain; O: Unloading seat; P: Engine; Q: Rack; R: Walking mechanism

图1 履带式收割机结构图

Fig.1 Structural diagram of crawler harvester

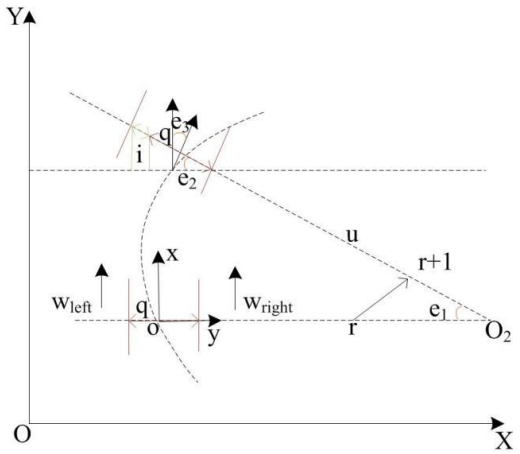


图2 履带式收割机运动模型

Fig. 2 Motion model of crawler harvester

e_2为$r+1$时刻收割机中心位置与O_2所在连线和XOY中X轴夹角;e_3为履带机在作业中的航向角的变化量。

按照图1运动模型给定的几何关系,e_1、e_2、e_3这3个量的数值相等,且在r、$r+1$相邻时刻中,收割机移动距离会非常小,则通过收割机的移动线速度,计算出履带式收割机航向角的变化速度值,实现收割机作业运动的转弯半径推导,过程如下:

$$\begin{cases}\sin(e_1)=\sin(e_2)=\sin(e_3)=\dfrac{1}{q}\\ e_3=\sin(e_3)=\left(\dfrac{w_{left}+w_{right}}{q}\right)\\ i=(w_{left}-w_{right})*\Delta r\\ w=\dfrac{2\pi R(w_{left}+w_{right})}{\Delta r}\end{cases}\tag{1}$$

$$\alpha=\frac{e_3}{\Delta r}=\frac{(w_{left}-w_{right})}{q}\tag{2}$$

$$u=\frac{w}{\alpha}=\frac{i*(w_{left}+w_{right})}{2(w_{left}-w_{right})}\tag{3}$$

式中w为收割机全田块移动作业线速度,m·s^{-1};Δr为移动时间,min;R为收割机移动的路径半径,m;α为收割机绕圆心运动的角速度,rad·s^{-1},即收割机航向角的变化速度值;u为收割机在r至$r+1$时刻中,近似圆弧运动的转弯半径,m,即收割机的运动形式。根据转弯半径u的计算公式可知,w_{left}与w_{right}可以直接影响u的数值,表示为:

$$\begin{cases}w_{left}=w_{right},u\approx\infty\\ w_{left}>w_{right},u>0\\ w_{left}<w_{right},u<0\\ \overleftarrow{w}_{left}=\overrightarrow{w}_{right},u=0\end{cases}\tag{4}$$

式中“←”、“→”表示相反方向,$\overleftarrow{w}_{left}=\overrightarrow{w}_{right}$表示$w_{left}$与$w_{right}$速度大小相同方向相反,此时收割机原地旋转;当$w_{left}>w_{right}$时,收割机向右转;当$w_{left}<w_{right}$时,收割机向左转;当$w_{left}=w_{right}$时,收割机做直线运动[9-11]。

通过公式(1)~公式(4),可以获取w_{left}、w_{right}、α之间的关系,构建不同作业运动形式的履带式收割机运动模型:

$$\begin{bmatrix}w\\ \alpha\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{2} & \frac{1}{2}\\ -\frac{1}{q} & \frac{1}{q}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w_{left}\\ w_{right}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\pi i & \pi i\\ -\frac{2\pi i}{q} & \frac{2\pi i}{q}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_{left}\\ p_{right}\end{bmatrix}\tag{5}$$

$$s=\begin{bmatrix}X\\ Y\\ e\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos e_3 & 0\\ \sin e_3 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w\\ \alpha\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\pi i\cos e_3 & \pi i\cos e_3\\ \pi i\sin e_3 & \pi i\sin e_3\\ -\frac{2\pi i}{q} & \frac{2\pi i}{q}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_{left}\\ p_{right}\end{bmatrix}\tag{6}$$

其中p_{left}、p_{right}为左、右履带驱动轮的转速,rad·min^{-1};s为存在转换向量后的履带式收割机运动模型[12-14]。综合履带式收割机运动模型,在其全田块作业运动时,可以看出航向角与速度对其影响较大,需要根据实际变化量进行收敛和固定操作,计算收割机路径跟踪过程中的影响变量。

2　计算履带式收割机全田块路径作业跟踪影响变量

履带式收割机全田块作业运动时,存在有固定常量和影响变量,其中,固定常量为车轴长度和履带轮轴长度;影响变量航向角偏差和线速度,而线速度又会影响航向角偏差,则航向角为最需要控制的影响变量。为实现对影响变量控制,选择增益系数确定履带式收割机全田块作业运动时的变量[15]。此次选择前视距离作为量化增益系数,表示履带式收割机作业的实时变化情况,见图3。

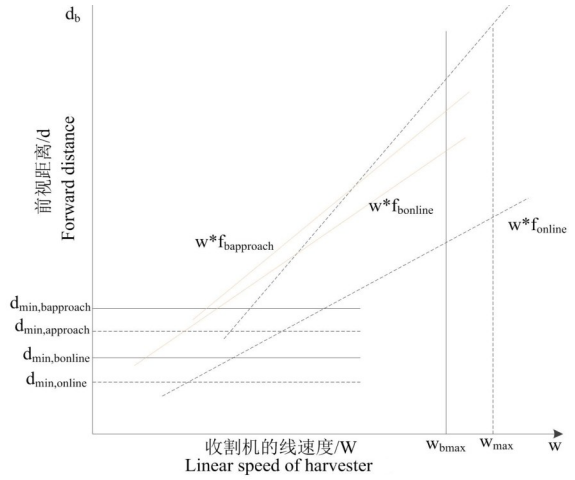


图3　履带式收割机实时航向变量

Fig. 3　Real-time heading variables of the crawler harvesters

图3中d为前视距离,m;$d_{\min}$为目标路径上的一段固定的最小距离,m;f为前视时间,s[16-19]。当收割机的线速度w较低时,其运动距离较小,则可

以通过$d_{\min}$控制收割机行驶;当w较快时,存在*approach*、*bapproach*、*online*、*bonline*这4种状态,分别表示履带机收割机的前行“上线”、倒车“上线”、前行“在线”、倒车“在线”过程[20]。在这4种状态下估算收割机的影响变量:

$$\begin{cases}\left(\left|e_{\beta}\right|\geqslant e_{\beta_{approach|online}}\right),0<w<w_{\max}\\ d_{approach}=\max\left(d_{\min,approach},f_{approach},w\right)\end{cases}\tag{7}$$

$$\begin{cases}\left(\left|e_{\beta}\right|\leqslant e_{\beta_{approach|online}}\right),0<w<w_{\max}\\ d_{online}=\max\left(d_{\min,online},f_{online},w\right)\end{cases}\tag{8}$$

$$\begin{cases}\left(\left|e_{\beta}\right|\geqslant e_{\beta_{approach|online}}\right),0<w<w_{b\max}\\ d_{bonline}=\max\left(d_{\min,bonline},f_{bonline},w\right)\end{cases}\tag{9}$$

$$\begin{cases}\left(\left|e_{\beta}\right|\leqslant e_{\beta_{approach|online}}\right),0<w<w_{b\max}\\ d_{bapproach}=\max\left(d_{\min,bapproach},f_{bapproach},w\right)\end{cases}\tag{10}$$

其中$d_{approach}$、d_{online}、$d_{bapproach}$、$d_{bonline}$分别为*approach*、*online*、*bapproach*、*bonline*状态的前视距离,m;$f_{approach}$、f_{online}、$f_{bapproach}$、$f_{bapproach}$分别为对应状态的前视时间,s;$d_{\min,approach}$、$d_{\min,online}$、$d_{\min,bapproach}$、$d_{\min,bonline}$分别为$d_{approach}$、d_{online}、$d_{bapproach}$、$d_{bonline}$的最小值;$w_{\max}$、$w_{b\max}$为前行、倒车过程中的最大线速度,m/s;e_{β}为航向角偏差,°;$e_{\beta_{approach|online}}$为从*approach*状态变向*online*状态的航向角偏差,°。

通过上述公式对收割机的运行过程中,产生的e_{β}、$e_{\beta_{approach|online}}$进行分析,得出收割机前进和倒车过程中,线速度的变化对航向角偏差的影响程度,为此,想要跟踪不同行驶状态下收割机的路径变化,需要将偏差作为收割机作业路径的跟踪控制目标,采用改进鱼群算法设定目标函数,对应路径控制目标完成全田块的路径跟踪。

3 改进鱼群算法控制变量目标跟踪收割机作业路径

鱼群算法可以实现全局范围内的搜索,将其应用在收割机全田块路径跟踪目标控制中,可以通过鱼群的步长和视野规划路径搜索范围和移动范围。将鱼群的视野对应为全田块的作业范围,步长作为收割机的作业运动距离,鱼群作为收割机路径作业运动点,鱼群算法的计算过程如下:

$$h_j=\begin{cases}\left\|k_j-k_{j+1}\right\|,j\neq l\\ \dfrac{1}{l}\sum\limits_{j=1}^{l-1}\left\|k_j-k_{j+1}\right\|,j=l\end{cases}\tag{11}$$

$$c_j=\delta*h_j\tag{12}$$

式中k_j为第j条鱼;k_{j+1}为第$j+1$条鱼;h为鱼群视野;c为鱼群步长;h_j为第j条鱼的视野;c_j为第j条鱼的步长;l为鱼群规模;δ为动态系数,可表示鱼群的迭代过程,即收割机作业目标点的变化过程。

当h_j和c_j极大时,鱼群会快速移动到全局极值附近,可能会越过全局极值,即全田块的作业边界,而h_j和c_j极小时,鱼群只能在局部范围内搜索,不能够发现全局极值,为此,采用粒子滤波算法改进鱼群算法,定义控制目标:

$$v=\frac{1}{\sqrt{2\pi\left(e_{\beta}+e_{\beta_{approach|online}}\right)}}\exp\left(-\frac{1}{2\left(e_{\beta}+e_{\beta_{approach|online}}\right)}\left[\left(b_r^j-b_{r+1}^j\right)^2\right]\right)\tag{13}$$

其中:v为目标函数;b_r^j、b_{r+1}^j为r、$r+1$时刻收割机作业点的量测值;$b_{r|r-1}^j$为r时刻第j条粒子鱼所对应的量测值。以粒子算法改进鱼群算法,将粒子当作鱼群,执行优化融合后,可以驱动粒子鱼向最优值附近聚集,以此控制航向偏差。具体操作步骤为:

步骤1:初始化l个粒子鱼,给定对应权值;

步骤2:根据权重优化粒子鱼群搜索过程,确定粒子鱼群跟踪收割机运动点的覆盖情况;

步骤3:通过粒子鱼群的随机变化,确定收割机作业点的变化情况;

步骤4:以鱼群自身行为过程,给出不同状态下的目标函数;

步骤5:通过目标函数计算最优求解函数值,并将其与航向偏差进行对照,是否达到控制量。

按照目标函数求解过程以及改进鱼群算法的计算过程,定义履带式收割机全田块路径跟踪目

标函数:

$$\lambda_r^j=\frac{\lambda_r^j}{\sum_{j=1}^{l}\lambda_r^j} \tag{14}$$

$$v_{j_n}\begin{cases}=v_{j_n}+\eta^*c_j^*\lambda_r^j, b_r^j<\left(e_\beta+e_{\beta_{approach|online}}\right)b_r^j\\=v_{j_{n+1}}+\eta^*c_j^*\lambda_r^j, \dfrac{b_r^j}{l}\geqslant\left(e_\beta+e_{\beta_{approach|online}}\right)b_r^j\end{cases} \tag{15}$$

其中λ_r^j为在r时刻时第j条粒子鱼的权重;v_{j_n}、$v_{j_{n-1}}$为进行次n、$n-1$次优化后的求解结果;η为随机数,取值区间为$\eta=[0,1]$。根据粒子鱼的在搜索范围内的运动聚集行为,可以不断地获取目标点的跟踪值,实现鱼群视野范围内的收割机路径跟踪。至此,基于改进粒子群算法实现履带式收割机全田块路径跟踪方法控制。

4　试验测试分析

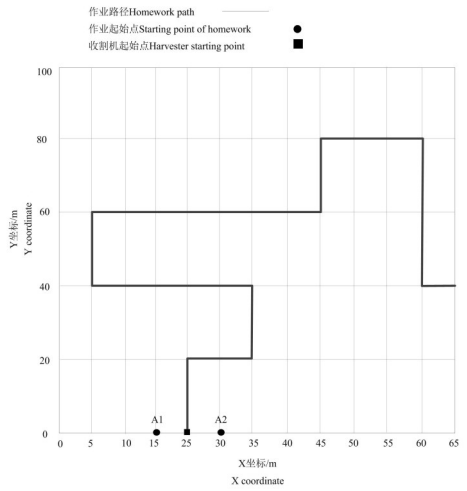
为验证基于改进鱼群算法实现履带式收割机在全田块作业中路径的跟踪效果,选择与陈诚等[3]、黄海峰[4]的跟踪方法作对比测试。在LABVIEW v8.6软件中搭建测试模型,结合某试验田中履带式收割机的作业数据,设置跟踪测试内容。

4.1　作业路径设置

由于收割机在进入农田时,其收到的作业路径起始目标点与其存在一定距离,因此,在进行作业路径跟踪时存在一个追寻过程。将这一距离差距设定为起始偏差,设定此次试验测试的作业路径(图4)。

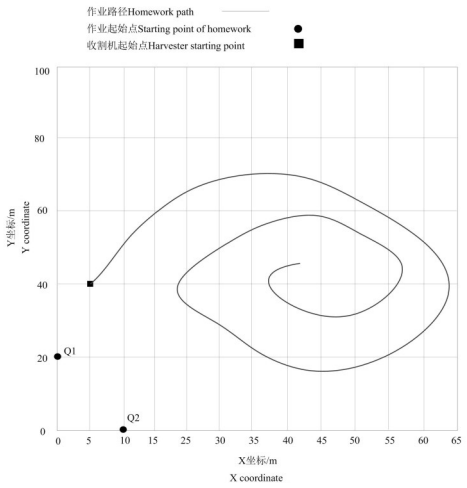
在实际作业过程中,收割机不仅需要按照直线路径作业,还需要完成转弯等动作,因此,设定了直线和曲线2种形式。除此之外,在每一组目标路径中,根据测试要求对收割机初始起点的位置进行了变量设定,即将收割机起始点与目标起始点形成偏差值,可以验证3种跟踪方法追寻目标路径的过程。在直线路径中,A1起始点与A2起始点距目标起始点距离均为5 m;在曲线路径中,Q1起始点与Q2起始点距目标起始点距离分别为20.6 m与40.3 m。

通过路径设置情况,将3种跟踪方法连接在测试模型中,分别验证直线路径和曲线路径的跟踪情况。



(a)　**直线路径**

(a)　Straight path



(b)　**曲线路径**

(b)　Curve path

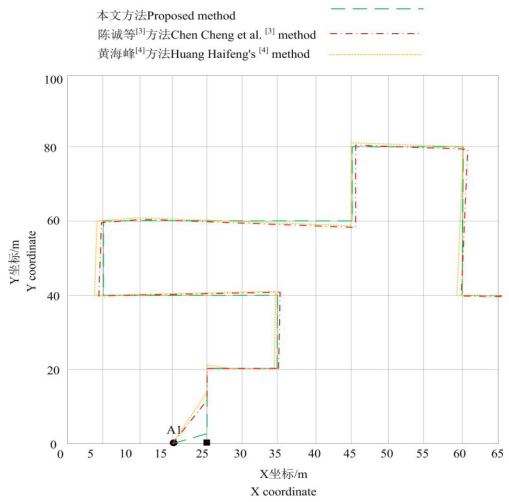
图4　测试路径设定情况

Fig.4　Test path setting situation

4.2　直线路径跟踪对比

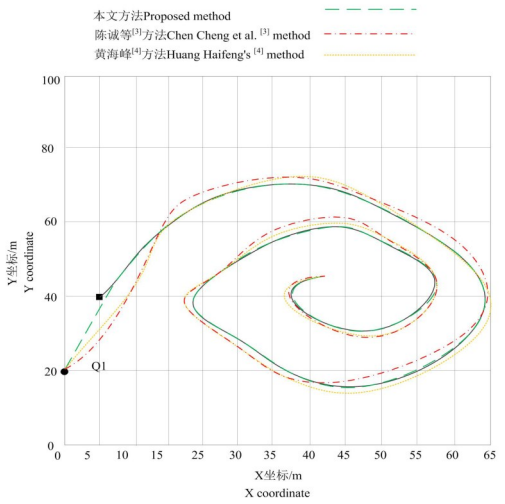
分别采用3种不同方法对收割机作业路径进行跟踪,直线路径的跟踪结果如图5所示。

对直线路径跟踪,结果见图5所示,在设定的3种起始偏差指标中,2种传统跟踪方法的追寻效果较差,需要经过一段距离后才能实现目标路径追寻,尤其在起始偏差为5 m时,其追寻效果最差,作业路径跟踪存在偏离,与此同时,受其追寻效果差的影响,也不能在第一时间实现设定路径的回归。



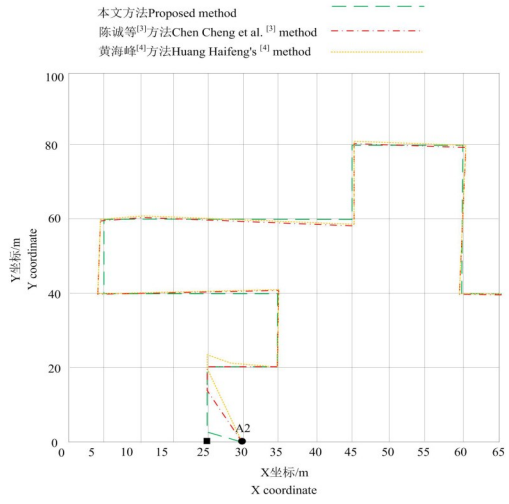
(a) 起始点为A1时

(a) When the starting point is A1



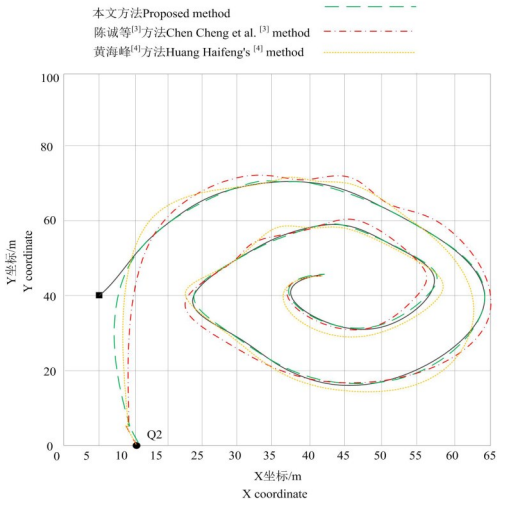
(a) 起始点为Q1时

(a) When starting from Q1



(b) 起始点为A2时

(b) When the starting point is A2



(b) 起始点为Q2时

(b) When the starting point is Q2

图5 直线路径跟踪结果

Fig. 5 Linear path tracking results

图6 曲线路径跟踪结果

Fig.6 Curve path tracking results

本研究方法均可以实现快速的目标追寻,且路径跟踪效果基本与设定情况相一致,具有精准跟踪效果。

4.3 曲线路径跟踪对比

分别采用3种不同方法对收割机作业路径进行跟踪,曲线路径的跟踪结果如图6所示。

在进行曲线跟踪时,主要是作业路径会存在转弯情况,因此更需要较快的追寻速度,2种传统方法在曲线中的追寻效果更差,甚至不如直线路径中的追寻效果,当存在转弯情况时,需要在一段距离后才能回归到设定路径中。所研究方法在曲线路径中仍具有较好的追寻效果,可以实现不同起始偏差下的路径目标点追寻,且在转弯时能够快速回归至作业路径中,具有应用价值。

4.4 作业路径统计结果

统计不同方法的作业路径跟踪数据(表1)。可见,应用本文所提方法进行作业路径跟踪的过程中,平均响应时间为0.52 s,均低于陈诚等[3]和

表1　不同方法的作业路径跟踪数据

Table 1　Tracking data of operational paths using different methods

方法 Method	平均响应时间/s Average response time		单个田块的直线行进路程/m Straight-line travel distance of a single field		完成单个田块作业所需时间/min Time required to complete individual field assignments		可追踪最小转弯半径/m Trackable minimum turning radius		路径跟踪的平均偏差/m The average deviation of path tracking		最小偏差(理想情况下)/m Minimum deviation (ideal scenario)	
	直线路径 Straight path	曲线路径 Curve path	直线路径 Straight path	曲线路径 Curve path	直线路径 Straight path	曲线路径 Curve path	直线路径 Straight path	曲线路径 Curve path	直线路径 Straight path	曲线路径 Curve path	直线路径 Straight path	曲线路径 Curve path
新方法	0.50	0.52	255	305	12.5	12.8	5.0	5.0	±0.8	±0.8	±0.5	±0.5
陈诚等[3]方法	0.95	1.20	268	321	13.8	14.2	5.5	5.6	±2.8	±3.0	±1.8	±2.2
黄海峰[4]方法	0.90	1.55	270	325	14.2	15.0	5.8	5.9	±3.0	±3.2	±2.8	±2.9

黄海峰[4]方法,响应时间较快;应用陈诚等[3]方法跟踪直线与曲线的最小转弯半径为5.5和5.6 m,应用黄海峰[4]方法跟踪直线与曲线的最小转弯半径为5.8和5.9 m,而应用本文方法跟踪直线与曲线的最小转弯半径均为5.0 m,可跟踪的转弯半径更精准;应用陈诚等[3]方法跟踪直线与曲线的平均偏差为2.8和3.0 m,最小偏差为1.8和2.2 m,应用黄海峰[4]方法跟踪直线与曲线的平均偏差为3.0和3.2 m,最小偏差为2.8和2.9 m,而应用本文方法跟踪直线与曲线的平均偏差均为0.8 m,最小偏差为0.5 m,偏差较小,与设定路线基本一致。由此可以说明应用本文方法对履带式收割机全田块路径的跟踪更为准确,偏差较小,跟踪效果较好。

5　讨论

经过试验可以得出结论:在设定不同起始偏差点的前提下,应用本文提出的基于改进鱼群算法的履带式收割机全田块路径跟踪方法,跟踪直线与曲线的最小转弯半径均为5.0 m,跟踪最小偏差为0.5 m。说明本文设计方法准确实现履带式收割机全田块路径的精准跟踪,具有较好的跟踪效果。随着农业自动化和智能化的发展,提高收割效率、减少作物损失、降低劳动强度成为迫切需求。然而,田间环境复杂多变,包括不同地形、作物分布不均等因素,对收割机的自主导航和路径跟踪能力提出了更高要求。这是本文结合全局与局部坐标系转换收割机运动轨迹,构建了履带式收割机运动模型,在构建运动模型时,全局坐标系用于描述收割机在整个田块中的绝对位置和方向,而局部坐标系则更侧重于收割机在局部区域内的精确控制和调整。通过高精度的GPS定位系统、惯性导航单元以及激光雷达或视觉传感器等设备的融合,实现全局与局部坐标系的实时转换。依据模型分析出航向角与速度对履带式收割机全田块路径跟踪的影响较大,在高速状态下,微小的航向角偏差可能导致较大的路径偏离;而在低速时,虽然路径偏离较小,但作业效率会受到影响。因此,通过模型分析,可以优化控制策略,实现速度与航向角的动态调整,以达到最佳的路径跟踪效果和作业效率;然后按照收割机的不同作业状态,以收割机前视距离作为增益系数,获取其实时控制变量,前视距离能够反映收割机前方的作业环境信息,如地形变化、作物密度等,从而动态调整控制参数,使收割机更加智能地适应不同作业状态;根据权重优化粒子鱼群搜索过程,通过鱼群的步长和视野规划路径搜索范围和移动范围,将鱼群的视野对应为全田块的作业范围,步长作为收割机的作业运动距离,鱼群作为收割机路径作业运动点,实现履带式收割机全田块路径跟踪方法控制。无论在直线还是曲线跟踪的条件下,均具有较好的跟踪效果,偏差较小,证明本文方法具有一定的适应性,应用效果较好。

6　结论

综上所述,本研究通过粒子算法对鱼群算法的改进,实现履带式收割机全田块路径的跟踪方

法设计,试验验证结果表明:

在进行直线跟踪时,2组传统跟踪方法的追寻偏差较大,需要经过一段距离后才能实现目标路径追寻,表明其追寻效果最差;研究方法均可以实现快速的目标追寻,且路径跟踪效果基本与设定情况相一致,偏差小,跟踪效果好。

在进行曲线跟踪时,2组传统方法在曲线中的追寻偏差更大,尤其是当存在转弯情况时,需要在跟踪一段距离后才能回归到设定路径;所研究方法在曲线路径中仍具有较好的追寻效果,在转弯时也能够快速回归至设定路径中,未出现较大的偏差,跟踪效果好。

本研究为收割机跟踪与识别领域提供了新的识别技术参考,有助于提高农田作业效率和作业质量。如实际应用中还需考虑更多动态因素和约束条件,是否对算法的稳定性造成影响,未来会进一步将继续改进算法,提高其应用在收割机路径跟踪中的鲁棒性和稳定性。

参 考 文 献

[1]Li J G, Zhang R, Yang P H, et al. Optical investigations on lean combustion improvement of natural gas engines via turbulence enhancement[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(7): 2225-2238.

[2]Habibie T J, Yasirandi R, Oktaria D. The analysis of Pangandaran fisherman's actual usage level of GPS based on TAM model [J]. Procedia Computer Science, 2022, 197: 34-41.

[3]陈诚,黄剑,刘磊,等. 基于数据驱动的气动柔性关节Takagi-Sugeno模糊系统建模与预测控制[J]. 控制理论与应用,2022,39(4):633-642.
Chen C, Huang J, Liu L, et al. Data-driven Takagi-Sugeno fuzzy system modeling and predictive control of a pneumatic flexible joint[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(4): 633-642.

[4]黄海峰. 基于DCS技术的联合收割机作业路径控制研究[J]. 农机化研究,2023,45(8):29-31,239.
Huang H F. Research on combine operation path control based on DCS technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(8): 29-31, 239.

[5]武涛,任甲辉,刘庆庭,等. 4GDZ-132型切段式甘蔗联合收割机研制[J]. 农业工程学报,2022,38(10):30-38.
Wu T, Ren J H, Liu Q T, et al. Development of the 4GDZ-132 sugarcane chopper combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(10): 30-38.

[6]刘婷婷,杨云. 电涡流传感器在收割机寻迹导航上的应用[J]. 农机化研究,2022,44(10):185-188.
Liu T T, Yang Y. Application of eddy current sensor in tracking and navigation of harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(10): 185-188.

[7]李艳慧. 音乐舞蹈机器人在收割机智能控制系统中的应用[J]. 农机化研究,2022,44(2):224-227,232.
Li Y H. Application of music and dance robot in intelligent control system of harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(2): 224-227, 232.

[8]陈远玲,陈承宗,彭卓,等. 甘蔗联合收割机切段辊液压系统的节能设计[J]. 液压与气动,2022,46(7):54-63.
Chen Y L, Chen C Z, Peng Z, et al. Energy saving design of hydraulic system for cutting roller of sugarcane combine harvester[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(7): 54-63.

[9]轩康乐,江宏亮,张新文,等. CB890QL钢履带式起重机臂架用热轧管坯控轧工艺分析[J]. 特殊钢,2022,43(4):36-40.
Xuan K L, Jiang H L, Zhang X W, et al. Controlled rolling process of hot rolled tube bloom of CB890QL steel for crawler crane[J]. Special Steel, 2022, 43(4): 36-40.

[10]张军豪,陈英龙,杨双喜,等. 蛇形机器人:仿生机理、结构驱动和建模控制[J]. 机械工程学报,2022,58(7):75-92.
Zhang J H, Chen Y L, Yang S X, et al. Snake robotics: bionic mechanism, structure, actuation, modeling and control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 75-92.

[11]徐高伟,宋裕民,邱绪云,等. 果园电动自走式履带底盘动力系统匹配设计与试验[J]. 农机化研究,2022,44(4):251-255.
Xu G W, Song Y M, Qiu X Y, et al. Matching design and test of power system for electric self-propelled crawler chassis of orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(4): 251-255.

[12]张守武,李擎,王恒,等. 非匹配不确定性影响下的无人车路径跟踪控制[J]. 控制与决策,2022,37(1):160-166.
Zhang S W, Li Q, Wang H, et al. Path following control for autonomous vehicles with mismatched uncertainties [J]. Control and Decision, 2022, 37(1): 160-166.

[13]马喜平,杨燕静,沈渭程,等. 基于改进量子粒子群算法的微能源网优化运行[J]. 电网与清洁能源,2022,38(7):47-53.
Ma X P, Yang Y J, Shen W C, et al. Optimized operation of micro energy grid based on improved quantum particle swarm optimization (IQPSO) algorithm [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 47-53.

[14]郭建祎,樊友平. 基于改进粒子群算法的VSG参数自适应控制策略[J]. 电机与控制学报,2022,26(6):72-82.
Guo J Y, Fan Y P. Adaptive VSG parameter control strategy based on improved particle swarm optimization [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(6): 72-82.

[15]曾山,曾力,刘伟健,等. 再生稻收割机刚柔耦合杆齿脱粒装置的设计与试验[J]. 华南农业大学学报,2022,43(5):61-69.
Zeng S, Zeng L, Liu W J, et al. Design and experiment of rigid-flexible coupling rod tooth threshing device of harvester for ratooning rice [J]. Journal of South China Agricultural

University,2022,43(5):61-69.
[16]张军,张新慧,高震,等. 基于改进二进制粒子群算法的孤岛划分方法[J]. 电网与清洁能源,2022,38(7):54-62.
Zhang J,Zhang X H,Gao Z,et al. An island division method based on improved binary particle swarm optimization algorithm [J]. Power System and Clean Energy,2022,38(7):54-62.
[17]任思炜,张宇红. 基于视觉感知技术的舰船导航系统交互界面设计[J]. 舰船科学技术,2022,44(12):157-160.
Ren S W,Zhang Y H. Research on interactive interface design of ship navigation system based on visual perception technology [J]. Ship Science and Technology,2022,44(12):157-160.
[18]张守京,慎明俊,杨静雯,等. 改进的共振稀疏分解方法及其在滚动轴承复合故障诊断中的应用[J]. 中国机械工程,2022,33(14):1697-1706.
Zhang S J,Shen M J,Yang J W,et al. Improved RSSD and its applications to composite fault diagnosis of rolling bearings [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(14): 1697-1706.
[19]李思璇,胡志刚,王新征,等. 改进人工鱼群的ORB特征匹配算法[J]. 计算机工程与应用,2022,58(1):292-299.
Li S X,Hu Z G,Wang X Z,et al. Improved AFSA for ORB feature matching algorithm [J]. Computer Engineering and Applications,2022,58(1):292-299.
[20]宋明礼,王冰晓,王元龙,等. 基于人工鱼群算法的燃气轮机负载突变时的PID参数寻优[J]. 热能动力工程,2022,37(3):22-27.
Song M L,Wang B X,Wang Y L,et al. Optimization of PID parameters of gas turbine during load sudden change based on artificial fish swarm algorithm [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(3):22-27.

Path tracking of crawler harvester based on improved fish swarm algorithm

Wang Fang[1], Zhang Wei[2], Shen Ke[3], Liu Zhongfeng[1]

(*1. Shanxi Agricultural Machinery Development Center, Taiyuan 030027, China; 2. Shennong Agricultural Machinery Development (Shanxi) Group Co., Ltd, Taiyuan 030031, China; 3. Shennong Technology Group Co., Ltd., Taiyuan 030045, China*)

Abstract: [Objective] The complexity of farmland environment poses severe challenges to the path tracking accuracy of crawler harvesters. To improve the path tracking performance of harvesters in field operations and reduce tracking deviation, this study proposed a full-field path tracking method for crawler harvesters based on an improved fish swarm algorithm. [Methods] According to the structural characteristics of the crawler harvester, its operation process was simplified into a two-dimensional plane motion form. By combining global and local coordinate transformations, a mathematical model of the harvester′s motion trajectory was constructed, and a motion model of the crawler harvester′s full-field operation at adjacent times was further established. Then, based on different operating states, the harvester′s forward-looking distance was taken as a key parameter to determine the gain coefficient, thereby obtaining its real-time control variables. To optimize the path tracking effect, a particle filter algorithm was introduced to improve the fish swarm algorithm, and a target function was constructed accordingly. During the target solving process, continuous iteration and optimization of the algorithm achieved precise path tracking of the harvester. [Results] After multiple experimental verifications, the proposed method demonstrates good tracking performance under different initial deviation points. Using this method, the average response time for path tracking was 0.52 seconds, the minimum turning radius was 5.0 meters, the average deviation is 0.8 meters, and the minimum deviation was 0.5 meters, which was basically consistent with the set route. This result fully demonstrated the effectiveness of the design method. [Conclusion] In summary, the proposed full-field path tracking for crawler harvester based on an improved fish swarm algorithm can accurately track the harvester in complex farmland environment with good tracking effects and wide application value.

Keywords: Particle filtering, Fish school algorithm, Crawler harvester, Path tracking, Farmland operations

(编辑:韩志强)