doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.011

一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法*

李逃昌[1,2]　胡静涛[1,2]　高　雷[1,2]　刘晓光[1,2]　白晓平[1,2]

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对智能农机自主作业中的路径跟踪控制问题,提出了一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法,该方法对农机行驶速度的变化具有鲁棒性。首先建立了空间参数驱动的非线性相对运动学模型,并证明了基于该模型进行控制方法设计的合理性和可行性。然后对此模型进行反馈线性化和最优控制设计,得到了一种与速度无关的农机路径跟踪控制律。最后进行了实车的路径跟踪实验,实验结果表明该方法的直线路径跟踪精度为 4 cm,曲线路径跟踪精度为 7 cm,且跟踪精度不受速度变化的影响,验证了该方法的有效性和对速度变化的鲁棒性。

关键词: 农机　路径跟踪　行驶速度　相对运动学模型　反馈线性化　最优控制

中图分类号: TP273; S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2014)02-0059-07

引言

农机自动导航控制是支持精准农业的关键技术。该技术可提高农机的作业精度和作业效率,使驾驶员摆脱长时间劳累的重复驾驶工作,而有充足的时间去监控和操作农机具,因此农机自动导航控制有着广阔的发展前景。

在农机自动导航控制中处于核心地位的路径跟踪方法主要有基于模型的控制方法和与模型无关的控制方法两大类。在基于模型的控制方法方面,有关学者分别研究了基于农机运动学模型和动力学模型的路径跟踪控制方法[1-9]。然而在这些方法中,基于运动学模型的方法主要是对模型进行小角度线性化逼近,在常速假设条件下进行控制器设计,这样不但引进了线性化误差,而且在速度变化时控制器的鲁棒性也变差;而基于动力学模型的控制方法虽然能够充分考虑农机的动力学特性,但是动力学模型参数很难在线实时获得。在与模型无关的控制方法方面[10-15],纯追踪方法中前视距离的在线自适应确定问题还没有很好的解决;智能方法虽然具有一些传统控制方法无法比拟的仿人智能和非线性映射能力,但是其设计需要一定的经验知识和复杂的学习训练过程。

针对上述现有方法中的基于运动学模型控制方法的小角度线性化和常速假设的缺点,本文提出一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法。

1　空间参数驱动的相对运动学模型

农机路径跟踪的关键是保证横向误差在一定的允许范围之内,因此需要建立一个运动学模型来描述这种横向误差的变化情况。本文定义一个导航坐标系和一个路径上的弗雷内坐标系,然后在这两个坐标系中研究农机与路径间的相对运动学模型。农机与路径之间的相对运动学关系如图 1 所示。

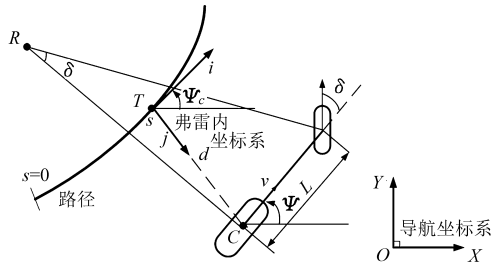

图 1　农机与路径间的相对运动关系

Fig. 1　Relative kinematics relationship between an agricultural machine and a path

图中,v 为农机纵向行驶速度;R 为农机瞬时旋转中心;L 为农机轴距;s 为曲线路径弧长参数,本文称其为空间参数;d 为农机相对于路径的横向位置误差;C 为农机控制点;T 为路径上距离农机控制点最近的点;δ 为农机转向轮偏转角;ψ 为农机相对于惯性系的航向角;ψ_c 为路径上距离农机最近点处的期望航向。

首先对农机相对运动学模型作假设 A1 和 A2。

收稿日期: 2013-03-04　修回日期: 2013-03-28

*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B06)和中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KGCX2-YW-138)

作者简介: 李逃昌,博士生,主要从事机器人导航控制研究,E-mail: litc@sia.cn

通讯作者: 胡静涛,研究员,博士生导师,主要从事农业机械智能化研究,E-mail: hujingtao@sia.cn

A1:$1-c(s)d\neq 0$

A2:$\theta_e\neq k\pi+\frac{\pi}{2}\quad(k=0,1,\cdots)$

式中 θ_e——农机相对于路径的航向误差

$c(s)$——路径曲率

在农机实际的田间作业中,假设 A1 的意思是农机与路径之间的位置误差不等于路径曲线的半径,由于农机与所要跟踪的路径之间的误差不会超过 1 m,而田间作业路径的曲线半径普遍很大,即使是地头转向路径其最小值也不会低于 5 m,所以该假设很容易满足;假设 A2 的意思是农机的行驶方向与路径的方向不互相垂直,这在田间作业时也很容易满足。总之,所做的这两个假设并不会使本文研究结果失去一般性。

定理 1:如果满足假设 A1 和 A2,那么空间参数 s 驱动的农机非线性相对运动学模型为

$$\begin{cases} d' = (1-c(s)d)\tan\theta_e \\ \theta_e' = -c(s)+(1-c(s)d)u\sec\theta_e \end{cases} \tag{1}$$

式中 u——农机转弯曲率

d'——横向位置误差相对于空间参数 s 的导数

θ_e'——航向误差相对于空间参数 s 的导数

该模型以农机与路径间的横向位置误差和航向误差为状态变量,农机的转弯曲率为控制量。

证明:

首先,根据农机的非完整性约束条件很容易得到农机在导航坐标系中的运动学模型

$$\begin{cases} \dot{X} = v\cos\psi \\ \dot{Y} = v\sin\psi \\ \dot{\psi} = vu \end{cases} \tag{2}$$

式中 X——农机在导航坐标系中的横坐标

Y——农机在导航坐标系中的纵坐标

然后,分别定义导航坐标系和弗雷内坐标系中向量的时间微分为

$$\frac{{}^N\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}({}^N\boldsymbol{r}) = \dot{X}I+\dot{Y}J+\dot{Z}K$$

$$\frac{{}^F\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}({}^F\boldsymbol{r}) = \dot{x}i+\dot{y}j+\dot{z}k$$

将农机在导航坐标系中的全局速度变换到弗雷内坐标系中表达。由于农机的控制点 C(即质点)在导航坐标系中的坐标(X,Y)与(s,d)是一一对应的关系,令${}^F\boldsymbol{r}={}^F\boldsymbol{T}_C$,根据理论力学可以得到关系式

$$\frac{{}^N\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}{}^F\boldsymbol{T}_C = \frac{{}^F\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}{}^F\boldsymbol{T}_C+\boldsymbol{\omega}_F\times{}^F\boldsymbol{T}_C \tag{3}$$

其中 $${}^F\boldsymbol{T}_C=\begin{bmatrix}0\\d\\0\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{\omega}_F=\begin{bmatrix}0\\0\\\dot{s}c(s)\end{bmatrix}$$

最后根据式(2)和式(3)可以得到模型

$$\begin{cases} \dot{s} = \dfrac{v\cos\theta_e}{1-c(s)d} \\ \dot{d} = v\sin\theta_e \\ \dot{\theta}_e = -\dot{s}c(s)+vu \end{cases} \tag{4}$$

将式(4)对空间参数 s 求导,便可得到空间参数 s 驱动的相对运动学模型式(1)。

证毕。

为了便于控制方法设计过程中的讨论,设 $\boldsymbol{\zeta}=[d\quad\theta_e]^{\mathrm{T}}$,则可将式(1)改写成

$$\begin{cases} \zeta_1' = (1-\zeta_1c(s))\tan\zeta_2 \\ \zeta_2' = -c(s)+(1-\zeta_1c(s))u\sec\zeta_2 \end{cases} \tag{5}$$

其中 $$\boldsymbol{\zeta}'=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\zeta}}{\mathrm{d}s}$$

由于该模型中不存在速度参数,所以速度的变化不会对模型造成影响。而基于此模型进行路径跟踪方法设计不需要对速度做常速假设,并且可以得到一个与农机行驶速度无关的控制律。

2 农机路径跟踪方法

2.1 基于空间参数驱动的模型进行控制方法设计的合理性

在针对式(5)进行路径跟踪方法设计之前,先给出定理 2,以保证基于空间参数 s 驱动的模型进行控制方法设计的合理性。

定理 2 如果存在一个能够通过某种控制作用使其稳定的时间参数 t 驱动的系统 $\boldsymbol{\Sigma}_t$,并且存在一个时间参数 t 的严格非减函数 q;那么,如果将系统 $\boldsymbol{\Sigma}_t$ 变换为 q 驱动的系统 $\boldsymbol{\Sigma}_q$,同样可以通过某种控制作用使变换后的系统 $\boldsymbol{\Sigma}_q$ 稳定。

证明:

如果存在某一控制作用能使系统 $\boldsymbol{\Sigma}_t$ 稳定,那么根据李雅普诺夫稳定性的逆定理,存在一个李雅普诺夫能量函数 $V(\boldsymbol{x}(t))$,且

$$\dot{V}(\boldsymbol{x}(t))<0$$

对于 q 驱动的系统 $\boldsymbol{\Sigma}_q$,同样也存在一个闭环李雅普诺夫函数 $V(\boldsymbol{x}(q))$,对其求导得

$$\dot{V}(\boldsymbol{x}(q)) = \dot{V}(\boldsymbol{x}(t))\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}q}$$

又由于$\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}>0$,即$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}q}>0$,进而可以推得

$$\dot{V}(\boldsymbol{x}(q))<0$$

所以根据李雅普诺夫稳定性定理可知,系统 $\boldsymbol{\Sigma}_q$ 也稳定。

证毕。

由于在农机路径跟踪问题中，空间参数 s 随着时间参数 t 的增加而增加，即 s 为时间 t 的严格非减函数，所以根据定理 2 可知，基于空间参数驱动的模型进行控制方法设计同样可以得到稳定的闭环系统。

2.2　输入-状态线性化的可行性

关于系统模型（式(5)）能否通过输入-状态线性化转换为一个等价的线性动态系统，本文通过定理 3 进行论证。

定理 3　如果非线性系统（式(5)）满足假设 A1 和 A2，那么该系统可以通过输入-状态线性化等价地转换为线性动态系统。

证明：

将式(5)改写成

$$\boldsymbol{\zeta}' = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\zeta}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\zeta})u \tag{6}$$

其中
$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\zeta}) = \begin{bmatrix} (1-\zeta_1 c(s))\tan\zeta_2 \\ -c(s) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\zeta}) = \begin{bmatrix} 0 \\ (1-\zeta_1 c(s))\sec\zeta_2 \end{bmatrix}$$

该系统的能控性矩阵为

$$\boldsymbol{F}_1 = (\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\zeta}), ad_f\boldsymbol{g}) = \begin{bmatrix} 0 & -(1-\zeta_1 c(s))^2\sec^3\zeta_2 \\ (1-\zeta_1 c(s))\sec\zeta_2 & -2(1-\zeta_1 c(s))c(s)\tan\zeta_2\sec\zeta_2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中　$ad_f\boldsymbol{g}$——$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\zeta})$ 和 $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\zeta})$ 的李括号

如果式(5)满足假设条件 A1 和 A2，即

$$1-\zeta_1 c(s) \neq 0 \quad \zeta_2 \neq k\pi + \frac{\pi}{2}$$

那么
$$\det(\boldsymbol{F}_1) \neq 0$$

所以很容易验证如下结论：① 向量场集合 $\{\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\zeta}), ad_f\boldsymbol{g}\}$ 为线性无关。② 单向量场集合 $\{\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\zeta})\}$ 对合。

在满足上述两个结论时，根据反馈线性化理论可知，非线性系统（式(5)）可以通过状态变换和输入变换等价地转换为线性动态系统。

证毕。

通过模型部分的讨论，显然可知式(5)满足定理 3 中给出的条件，所以式(5)可以进行反馈线性化设计。

2.3　路径跟踪控制器设计

采用反馈线性化方法将空间参数驱动的农机非线性相对运动学模型等价地转换为一个线性模型。然后采用线性二次型调节器（LQR）镇定变换后的线性动态系统（图 2）。

根据反馈线性化理论，通过状态变换

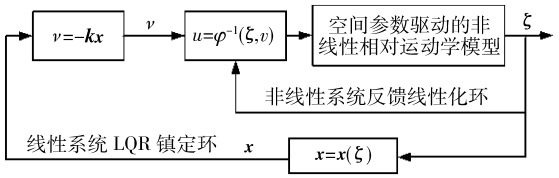

图 2　路径跟踪控制器设计框图

Fig. 2　Design diagram of path tracking controller

$$\begin{cases} x_1 = \zeta_1 \\ x_2 = \nabla x_1 \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\zeta}) = (1-\zeta_1 c(s))\tan\zeta_2 \end{cases} \tag{8}$$

和输入变换

$$\begin{aligned} \nu = \varphi(\boldsymbol{\zeta}, u) &= uL_gL_f x_1 + L_fL_f x_1 = \\ &\sec^3\zeta_2(1-\zeta_1 c(s))^2 u + \\ &(\zeta_1 c(s) - 1)c(s)(\tan^2\zeta_2 + \sec^2\zeta_2) \end{aligned} \tag{9}$$

可以得到线性定常系统为

$$\begin{cases} x_1' = x_2 \\ x_2' = \nu \end{cases} \tag{10}$$

将式(10)进一步写成紧缩的矩阵表达形式

$$\boldsymbol{x}' = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\nu = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}\nu \tag{11}$$

根据线性系统理论可知，式(11)为能控标准型，显然是可控的。根据 LQR 理论，该系统存在一个唯一的最优控制律。

通过选择系统性能泛函

$$\boldsymbol{J} = \frac{1}{2}\int_0^\infty \left(\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \boldsymbol{Q} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + r\nu^2 \right) \mathrm{d}t \tag{12}$$

其中
$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \geqslant \boldsymbol{0}$$

式中　$\boldsymbol{Q}$——状态变量的加权阵

r——控制量的加权阵

可得到唯一的最优控制律

$$\begin{aligned} \nu &= -\frac{1}{r}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \\ &-\begin{bmatrix} \frac{p_{21}}{r} & \frac{p_{22}}{r} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \end{aligned} \tag{13}$$

其中
$$r > 0$$

式中　$\boldsymbol{P}$——代数 Riccati 方程(14)的对称正定解

$$\boldsymbol{P}\boldsymbol{A} + \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} - \boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\frac{1}{r}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{0} \tag{14}$$

通过求解式(14)可得

$$\begin{cases} p_{12} = \sqrt{ar} \\ p_{22} = \sqrt{2r\sqrt{ar} + br} \end{cases} \tag{15}$$

将式(15)代入式(13)中，得到控制律为

$$\begin{aligned} \nu &= -\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{ar}}{r} & \sqrt{\frac{2\sqrt{ar}+b}{r}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \\ &-\begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \end{aligned} \tag{16}$$

结合反馈线性化控制律（式(9)）得到农机的转弯曲率为

$$u=\varphi^{-1}(\zeta,\nu) \tag{17}$$

假设农机能够达到运动学容许的跟踪能力,进而可以求得农机跟踪路径所需要的转向轮偏转角度为

$$\delta=\arctan(Lu) \tag{18}$$

本文推导的控制律有如下优点:其一,本文方法不像传统方法对非线性模型进行小角度线性逼近和常速假设,而是采用反馈线性化技术将非线性系统等价地转换为线性系统,这样更符合农机的实际运行情况;其二,本文采用 LQR 镇定线性系统,这样可以得到针对某一性能指标最优的镇定效果;最后,由于本文控制律是基于空间参数驱动的模型设计的,所以推导的控制律中不含有速度参量,具有速度无关性,即该控制律对速度的变化具有鲁棒性。

3 实验验证

3.1 实验系统

定位传感器采用 RTK GPS 接收机,定位精度为 2 cm;航向传感器采用 MTi;农机转向轮偏转角采用 KTC 拉杆式直线位移传感器(电子尺)进行间接测量;田间计算机、导航控制器和智能 CAN 节点都是基于 ARM 研发的设备;转向执行器采用自行研发的自动转向执行装置。通过这些装置构建了一套具有较好通用性的、符合 ISO 11783 总线标准的农机自动导航分布式控制平台(图 3),并将其装备到 4LZ-6N 型的雷沃谷神稻麦联合收获机上(图 4)。联合收获机的几何和惯性参数如表 1 所示。

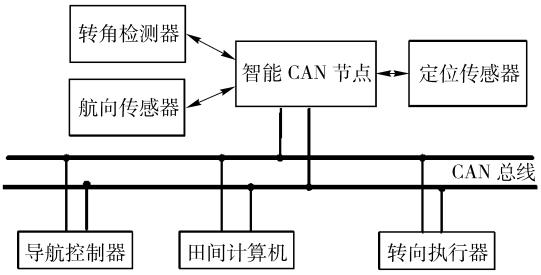

图 3 基于 CAN 总线的分布式导航系统

Fig. 3 Distributed navigation system based on CAN bus



图 4 装备自动导航系统的稻麦联合收获机

Fig. 4 Rice and wheat combine equipped with automatic navigation system

表 1 联合收获机参数

Tab. 1 Combine's parameters

参数	质量/kg	轴距/mm	转弯半径/mm	前轴长度/mm	后轴长度/mm
数值	9 910	3 750	8 000	2 445	2 230

自动转向装置主要由转向轴延长部件、减速齿轮(减速比为 10:1)、外壳及固定部件和两相混合式步进电动机 BS110HB115 组成。电子尺选用日本 Seiko 公司的 KTC-0350,其本质上是一个精密电位器,可以通过它测量农机转向油缸的直线位移,然后间接计算出农机转向轮的偏转角度,其计算过程为[16]:

将雷沃谷神 4LZ-6N 型联合收获机的液压转向结构建模成如图 5 所示的四边形模型 $ABCO$。其中,AO、AB 为固定边,转向油缸所在的边 BC 为变长边,边 OC 为定长,但在 BC 边伸缩拉动下可以围绕 O 点旋转,图中 $ABCO$ 和 ABC_1O 即为转向油缸伸缩长度不同时的两种状态。角 $\theta=\angle DOC$ 即为车轮转向角,定义 $\angle DOC$ 逆时针为正值,顺时针为负值。从图 5 所示模型中可以推导出车轮转角 θ 和 l_{AO}、l_{AB}、l_{OC}、l_{BC}之间满足

$$l_{BC}^2=(l_{OC}\sin\theta+l_{AO})^2+(l_{OC}\cos\theta-l_{AB})^2 \tag{19}$$

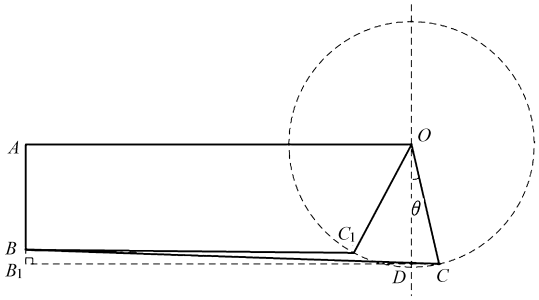

图 5 联合收获机转向结构模型

Fig. 5 Steering structure model of combine

由于转向油缸的行程限制,l_{BC}需要满足

$$l_{BC\min}\leqslant l_{BC}\leqslant l_{BC\max} \tag{20}$$

式中 l_{OC}、l_{AO}、l_{AB}均为常值,l_{BC}可以通过电子尺电压数据计算得到,仅有 θ 为未知量。结合式(20),可求得车轮转角 θ。

采用上述描述的实验系统,通过收获机的路径跟踪实验,对本文提出的方法进行实验验证。另外,本实验系统还配备一套高精度(定位精度 2 cm)的数据采集系统,用于实时采集农机的当前位置信息,并计算该实时位置与预定义路径之间的误差,将该误差作为路径跟踪实验的跟踪误差。

3.2 路径跟踪实验

3.2.1 控制器参数选择

路径跟踪控制器参数的选择就是 LQR 性能指标函数中加权阵的选择,一旦加权阵确定,那么控制

器参数也就唯一地确定下来。由于控制量加权 r 为大于零的标量，在这里不妨设定 $r=1$。那么控制器参数的选择就相当于仅选择状态加权阵中的横向位置误差加权系数 a 和航向误差加权系数 b。

本文选择 $a=0.01$、$b=0.2$，那么可确定控制器参数 $k_1=0.1$、$k_2=0.6$。此时闭环线性系统的阻尼比大致为 1。

3.2.2　方法性能验证

（1）基于本文方法的直线路径跟踪实验

在较平坦的地上通过高精度的 GPS 定位两点，分别记为点 A 和点 B，将由其确定的直线作为农机跟踪的目标路径。然后在路径 AB 的一端开动农机，并启动导航控制系统，进行自动路径跟踪控制，当农机接近路径 AB 的另一端时，通过人机界面发送停止导航命令，结束一次直线路径跟踪实验，其路径跟踪效果如图 6 所示。重复上述步骤，进行 0.6、0.8、1.0 和 1.2 m/s 4 种速度的直线路径跟踪实验各 3 次。实验数据统计结果如表 2 所示。

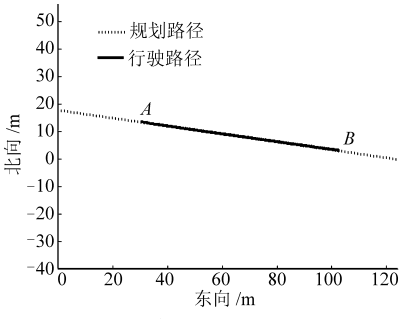

图 6　直线路径跟踪效果图

Fig. 6　Tracking effect diagram of straight-line path

表 2　直线路径跟踪误差数据统计

Tab. 2　Data statistics of lateral deviation of straight-line path tracking

实验序号	速度/(m·s^{-1})	初始偏差/m	最大误差/m	绝对值平均误差/m
1	0.6	0.23	0.11	0.04
	0.8	0.17	0.11	0.04
	1.0	0.26	0.11	0.04
	1.2	0.30	0.10	0.04
2	0.6	0.11	0.10	0.04
	0.8	0.19	0.10	0.03
	1.0	0.20	0.10	0.03
	1.2	0.17	0.11	0.04
3	0.6	0.24	0.11	0.04
	0.8	0.08	0.10	0.04
	1.0	0.26	0.10	0.04
	1.2	0.08	0.11	0.04
平均			0.11	0.04

（2）基于本文方法的曲线路径跟踪实验

为了满足农机地头转向的需要，设计了直线-圆弧-直线的曲线路径跟踪实验。在较平坦的地上设置基本上相互垂直的 2 条直线路径，然后确定农机从一条直线路径行驶到另外一条直线路径所需要行走的圆弧的曲线圆心和曲线半径，将这种由直线-圆弧-直线组成的路径作为农机曲线跟踪路径。在路径的一端（设为点 A）开动农机，并启动导航控制系统，进行自动路径跟踪控制，当农机接近路径的另一端（设为点 B）时，通过人机界面发送停止导航命令，结束一次曲线路径跟踪实验，其路径跟踪效果如图 7 所示。重复上述步骤，进行 0.6 和 0.8 m/s 2 种速度的曲线路径跟踪实验各 3 次。由于本文实验时选用的曲线路径是预先由上位机规划好的圆弧曲线和直线组成的，其曲率和圆心是已知的，所以根据农机当前的位置点到曲线圆心的距离与曲线的半径之间的差值就可以知道当前农机的位置与曲线路径之间的偏差，即跟踪误差。实验数据统计结果如表 3 所示。

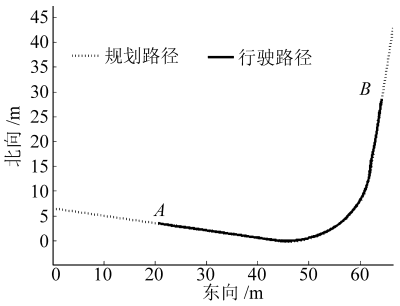

图 7　曲线路径跟踪效果图

Fig. 7　Tracking effect diagram of curve path

表 3　曲线路径跟踪误差数据统计

Tab. 3　Data statistics of lateral deviation of curve path tracking

实验序号	速度/(m·s^{-1})	初始偏差/m	最大误差/m	绝对值平均误差/m
1	0.6	0.03	0.18	0.07
	0.8	0.12	0.16	0.08
2	0.6	0.12	0.16	0.07
	0.8	0.17	0.17	0.07
3	0.6	0.20	0.18	0.08
	0.8	0.06	0.15	0.06
平均			0.17	0.07

（3）本文方法的实验结果分析

根据表 2、3 可知，本文提出的方法在不同的初始位置偏差（农机开始自动路径跟踪前偏离目标路径的距离）下，都能够得到较好的直线和曲线路径跟踪精度，验证了本文方法的有效性。而且在不同的速度条件下，路径跟踪的各种误差指标基本上没有变化，因此本文方法的精度与农机行驶速度无关，验证了本文方法对速度变化具有很好的鲁棒性。

曲线路径的跟踪精度相对于直线路径跟踪精度变差,这是因为农机跟踪曲率较大的路径时,相应的车轮角度变化率也变大,转向执行装置的反应速度不能达到这种变化的要求所引起的。另外当路径曲率变得很大时,由于农机本身的转弯半径的限制也会产生这样的结果。

此外,本文提出的路径跟踪方法的实施需要知道所要跟踪的曲线路径的曲率参数,而没有考虑路径曲率未知时的情况。关于这种情况,需要采用离散的路径点来描述任意形状的曲线路径,然后采用路径点搜索和曲线拟合的方法来求取当前曲率。

(4)与 PID 方法的性能比较

为了进一步验证本文提出的方法,将本文方法与常用的 PID 控制方法进行比较。进行 0.6、0.8 和 1.0 m/s 3 种速度的直线路径跟踪实验,每个速度进行 3 次实验,实验过程如上述描述,每种速度的误差统计数据为该速度下 3 次实验数据的平均值。具体的误差统计数据对比结果如表 4 所示。

表 4 本文方法与 PID 方法的误差数据统计对比

Tab. 4 Deviation data statistics comparisons between the proposed method and PID method

速度 /(m·s^{-1})	本文方法最大误差 /m	PID 方法最大误差 /m	本文方法绝对值平均误差/m	PID 方法绝对值平均误差/m
0.6	0.11	0.15	0.04	0.07
0.8	0.10	0.20	0.04	0.09
1.0	0.10	0.26	0.04	0.12

根据表 4 所示,PID 方法的路径跟踪性能与本文方法的性能相比明显变差,而且当速度增加时,各项误差统计指标也随之变差,这是因为在某一速度下调整的 PID 控制参数,当速度变化(即传统的模型参数发生变化)时便不再适用,表明 PID 方法对于速度的变化不具有鲁棒性。通过对比实验进一步验证了本文方法对速度变化具有很好的鲁棒性,并且具有较高的控制精度。

4 结论

(1) 针对已有农机路径跟踪控制方法的一些缺点,提出了一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法。首先研究了空间参数驱动的农机非线性相对运动学模型,该模型中不存在速度参数,所以速度的变化不会对模型造成影响;然后论证了基于该模型进行控制方法设计的合理性和可行性;最后对该模型进行输入-状态线性化和 LQR 镇定设计,得到了一种与速度无关的最优农机路径跟踪控制律。

(2) 本文方法的路径跟踪性能与农机的行驶速度无关,对速度的变化具有一定的鲁棒性;而且在方法的设计过程中没有对非线性模型进行小角度线性逼近,另外由于本文推导的空间参数驱动的模型中不含有速度参数,所以在设计过程中也没有要求农机速度恒定,因此本文的路径跟踪方法更加符合实际情况。

(3) 为了验证本文提出的方法,进行了实车的路径跟踪实验和方法对比实验。实验结果表明,本文方法直线路径跟踪的平均误差为 4 cm,曲线路径跟踪的平均误差为 7 cm,而且路径跟踪的性能指标与速度的大小无关,对速度的变化具有很好的鲁棒性;另外,通过与 PID 方法的对比实验可知,本文方法的性能优于常用的 PID 控制方法的路径跟踪性能,验证了本文方法的优越性。

参 考 文 献

1 O'Connor M L. Carrier-phase differential GPS for automatic control of land vehicles [D]. Stanford: Stanford University, 1997.

2 陈军,朱忠祥,鸟巢谅,等. 拖拉机沿曲线路径的跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 108 - 111.
Chen Jun, Zhu Zhongxiang, Torisu Ryo, et al. On-tracking control of tractor running along curved paths [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 108 - 111. (in Chinese)

3 Zhu Zhongxiang, Chen Jun, Yoshida Toyofumi, et al. Path tracking control of autonomous agricultural mobile robots [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2007, 8(10): 1 596 - 1 603.

4 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X - 804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报,2009, 25(11): 139 - 145.
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X - 804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139 - 145. (in Chinese)

5 Bevly D M, Gerdes J C, Parkinson B W. A new yaw dynamic model for improved high speed control of a farm tractor [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2002, 124(4):659 - 667.

6 Bevly D M. High speed, dead reckoning, and towed implement control for automatically steered farm tractors using GPS [D]. Stanford: Stanford University, 2001.

7 Zhang Q, Qiu H. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation [J]. Transactions of the ASAE, 2004,47(2): 639 - 646.

8 Qiu H. Navigation control for autonomous tractor guidance [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign,

2002.

9 冯雷. 基于 GPS 和传感技术的农用车辆自动导航系统的研究[D]. 杭州：浙江大学，2004.
Feng Lei. Study on navigation system for off-road vehicle guidance based on GPS and sensor technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)

10 张智刚，罗锡文，赵祚喜，等. 基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制[J]. 农业机械学报，2009,40(增刊)：6－12.
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Trajectory tracking control method based on Kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 6－12. (in Chinese)

11 黄沛琛，罗锡文，张智刚，改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法[J]. 计算机工程与应用，2010，46(21)：216－219.
Huang Peichen, Luo Xiwen, Zhang Zhigang. Control method of headland turning based on improved pure pursuit model for agricultural machine [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(21): 216－219. (in Chinese)

12 连世江，陈军，贾海政，等. 基于模糊控制的拖拉机转向跟踪控制研究[J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版，2009，37(9)：224－228.
Lian Shijiang, Chen Jun, Jia Haizheng, et al. Heading following control of tractor based on fuzzy control [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(9): 224－228. (in Chinese)

13 周建军，张漫，汪懋华，等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报，2009，40(4)：151－156.
Zhou Jianjun, Zhang Man, Wang Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151－156. (in Chinese)

14 陈军，朱忠祥，鸟巢谅，等. 基于神经网络的农用车辆自动跟踪控制[J]. 农业机械学报，2007，38(5)：131－133.
Chen Jun, Zhu Zhongxiang, Torisu Ryo, et al. Automatic on-tracking control of farm vehicle based on neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 131－133. (in Chinese)

15 白晓鸽，陈军，朱磊，等. 基于神经网络的拖拉机自动导航系统[J]. 农机化研究，2010(4)：75－77.
Bai Xiaoge, Chen Jun, Zhu Lei, et al. Automatic navigation control system of tractor based on neural network [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(4): 75－77. (in Chinese)

16 Gao Lei, Hu Jingtao, Bai Xiaoping, et al. Agro-machinery automatic navigation control system study for precision agriculture applications[C] // Proceedings of 2010 International Conference on Broadcast Technology and Multimedia Communication, 2010(2): 315－322.

Agricultural Machine Path Tracking Method Irrelevant to Travel Speeds

Li Taochang[1,2]　Hu Jingtao[1,2]　Gao Lei[1,2]　Liu Xiaoguang[1,2]　Bai Xiaoping[1,2]

(1. *Shenyang Institute of Automation*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenyang* 110016, *China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: An agricultural machine path tracking method irrelevant to travel speeds, aiming at the path tracking control problem in autonomous operations of intelligent agricultural machines, was presented. The method was robust to changes in travel speeds of agricultural machines. Firstly, the space parameter-driven nonlinear relative kinematics model between the agricultural machine and the tracked path was deduced and the rationality and feasibility of designing control method based on the model was proved. Secondly, the paper dealt with the model by input-state linearization and utilized the optimal control method to stabilize the linear model obtained by feedback linearization, and an agricultural machine path tracking control law irrelevant to travel speeds was then obtained. Finally, path tracking experiments of an agricultural machine were carried out. The experimental results showed that the precision of straight path tracking and curve path tracking were 4 cm and 7 cm respectively and not affected by changes in travel speeds. Therefore the effectiveness and robustness of the proposed method were verified.

Key words: Agricultural machine　Path tracking　Travel speeds　Relative kinematics model　Feedback linearization　Optimal control