doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.039

基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法*

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: 为了提高农业机械自动导航控制系统的精度,提出了一种基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法。该方法基于纯追踪模型进行农业机械路径跟踪控制,结合农业机械运动学模型来确定车轮期望转向角;采用模糊自适应控制在线自适应地确定纯追踪模型中的前视距离,提高了路径跟踪的精度。农业机械的路径跟踪实验结果表明,路径跟踪的最大误差不超过10 cm,平均误差小于5 cm,完全满足农业机械的作业要求,验证了提出方法的可行性和有效性。

关键词: 农业机械　导航　路径跟踪　纯追踪模型　模糊自适应控制

中图分类号: TP273;S24　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2013)01-0205-06

Agricultural Machine Path Tracking Method Based on Fuzzy Adaptive Pure Pursuit Model

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: In order to improve the precision of a navigation control system for agricultural machines, the research on the path tracking method that is the core of an agricultural machine navigation system was carried out. An agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model was proposed. The method utilized pure pursuit method to conduct the path tracking control and determined the desired steering angle by combining with the agricultural machine kinematic model. The method made use of fuzzy adaptive control to find out the look-ahead distance online and adaptively, thus the path tracking precision gets enhanced. The results of the path tracking experiment for the agricultural machine show that the max tracking error is within 10 cm and the mean error is no more than 5 cm, so the proposed method can completely satisfy the operation requirement of agricultural machines and the feasibility and effectiveness of the method was verified.

Key words: Agricultural machine　Navigation　Path tracking　Pure pursuit model　Fuzzy adaptive control

引言

随着农业装备智能化进程的加快,农业机械(以下简称农机)自动导航控制技术受到了广泛的重视,国内外许多学者对处于农机自动导航控制系统中核心地位的农机路径跟踪方法进行了大量的研究,提出了基于误差量反馈思想的PID控制方法[1~3]、线性二次型最优控制的现代控制方法[4~6]、具有预见性的纯追踪模型方法[7~8]以及诸如模糊控制、神经网络控制等智能控制方法[9~12]。

在已有的路径跟踪方法中,PID控制是基于误差来生成消除误差的控制策略,应用广泛,但是控制

收稿日期:2012-08-21　修回日期:2012-09-12

*"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,主要从事农机导航控制研究,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

参数整定困难,需要一定的经验和大量的参数整定实验;线性二次型最优控制能够获得在某一性能指标下的最优控制策略,但是它需要基于线性模型来设计,因此需要对非线性农机模型进行常速假设和小角度线性近似,导致该方法只能在线性区域得到很好的效果;纯追踪模型方法是一种几何方法,控制参数少,算法设计模拟人的驾驶行为,具有预见性,但是前视距离的自适应确定很困难;模糊控制不依赖农机模型,具有智能性,但是需要专家的经验制定模糊控制规则,跟踪误差大,难以快速修正;神经网络控制对农机运动的非线性特性具有很好的适应性,但是需要大量的高质量训练样本,实现起来较困难并且泛化能力较弱。

本文针对纯追踪模型方法中的前视距离自适应确定问题,提出一种基于模糊自适应纯追踪模型的农机路径跟踪方法。该方法具有控制参数在线自适应的特点,它通过纯追踪模型确定农机路径跟踪所期望的转向角,对纯追踪模型中的前视距离参数通过模糊自适应控制进行在线自适应调整。

1 路径跟踪方法

1.1 纯追踪模型

纯追踪模型路径跟踪方法是一种几何方法,它根据农机的当前位置和目标位置确定农机到达目标位置所需要行驶的圆弧。如图 1 所示,建立导航坐标系($^{UTM}X-O-^{UTM}Y$)和车体坐标系($^{V}X-P-^{V}Y$)。并且定义:$^{V}X_g$ 为目标点在车体坐标系中的横坐标;$^{V}Y_g$ 为目标点在车体坐标系中的纵坐标;γ 为农机转弯曲率,为有符号数,本文规定农机逆时针行驶时的转弯曲率为正($\gamma>0$),顺时针行驶时的转弯曲率为负($\gamma<0$);R 为农机的瞬时转弯半径;d 为农机相对于路径的横向位置误差,为有符号数,本文规定农机在期望路径沿前进方向右侧时的横向位置误差为正($d>0$),农机在期望路径左侧时的横向位置误差为负($d<0$);L_d 为前视距离;Ψ_e 为农机当前航向和目标点处路径航向之间的误差;Φ 为农机沿着转向弧线到达目标点时的航向变化角度。

根据图 1 中的几何关系,可以求得目标点在车体坐标系中的横、纵坐标为

$$^{V}X_g=-\frac{1}{\gamma}+\frac{1}{\gamma}\cos\Phi=\frac{\cos\Phi-1}{\gamma} \tag{1}$$

$$^{V}Y_g=-\frac{1}{\gamma}\sin\Phi \tag{2}$$

在直角三角形 $\triangle PNG$ 中,由勾股定理得

$$^{V}X_g^2+{}^{V}Y_g^2=L_d^2 \tag{3}$$

由式(1)、(2)和(3)可得

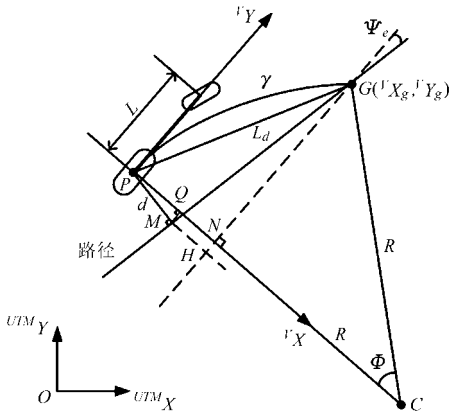

图 1 纯追踪模型的几何表达示意图

Fig. 1 Geometric expression of pure pursuit model

$$\gamma=-2\frac{^{V}X_g}{L_d^2} \tag{4}$$

由图 1 直接可知

$$^{V}X_g=-d\cos\Psi_e+\sqrt{L_d^2-d^2}\sin\Psi_e \tag{5}$$

结合式(4)和式(5)可得纯追踪模型

$$\gamma=-2\frac{^{V}X_g}{L_d^2}=\frac{2(d\cos\Psi_e-\sqrt{L_d^2-d^2}\sin\Psi_e)}{L_d^2} \tag{6}$$

1.2 影响纯追踪模型控制效果的因素分析

在纯追踪模型式(6)中,仅有一个未知参数,即前视距离 L_d,而这个参数的大小直接影响到农机路径跟踪的控制效果。从纯追踪模型的表达式可以得知,当前视距离选择较大时,农机会沿着较小曲率的行驶路径驶向期望路径,不会产生大的控制振荡,但是控制的响应时间会很长,这相当于二阶系统的过阻尼阶跃响应;反之当前视距离选择较小时,农机会沿着较大曲率的行驶路径驶向期望路径,控制响应时间很短,但是会产生较大的控制振荡,这相当于二阶系统的欠阻尼阶跃响应。

通过上述分析可知,采用较大或者较小的前视距离都不能得到满意的跟踪效果,另外纵使可以通过仿真或者实验的手段获得一个合适的前视距离,但是固定的前视距离并不能实时根据农机的当前误差状态调整,这种固定的前视距离也并不是最优的选择。因此,在农机的路径跟踪过程中,如何在线实时自适应地获取一个合适的前视距离,是保证纯追踪模型路径跟踪精度的关键问题。

纯追踪模型中的前视距离与农机横向位置误差、航向误差以及农机的速度等因素有关系。由于农机在田间工作时速度较低且速度的变化不是很大,一般认为是恒速,所以速度变化对前视距离的影响本文不予考虑。一般情况下,动态确定前视距离

的基本思想是：当误差较大时，减小前视距离，以尽快消除误差，提高响应速度；当误差小时，增大前视距离，避免系统响应超调。这个前视距离的确定思想与驾驶员驾驶时的经验是一致的，因此本文采用模糊控制策略进行前视距离的确定。

1.3　前视距离确定方法

选择模糊控制的输入为横向位置误差和航向误差，输出为前视距离。在模糊控制系统中，模糊控制规则的选择对模糊控制器的性能具有很大的影响。不同的误差状态对于模糊控制规则的设计也不尽相同，因此采用自调整函数来自适应地调整模糊控制规则，提出一种模糊控制规则可在线调整的模糊控制器，进而采用这种模糊控制器来自适应地确定前视距离。为了方便计算机实现，本文对模糊自适应控制器采用解析的形式进行描述。

1.3.1　模糊控制的解析表达式

根据上述前视距离的确定思想和模糊控制规则的设计方法，提出带有自调整函数的模糊控制的解析表达式

$$L_D = \langle \alpha(S - |E|) + (1-\alpha)(S - |E_\Psi|) \rangle \quad (\alpha \in [0,1]) \tag{7}$$

式中　$\langle \cdot \rangle$——取整运算函数

L_D——前视距离的模糊变量

E——横向位置误差的模糊变量

E_Ψ——航向误差的模糊变量

S——模糊控制系统论域调整设定值

α——模糊控制规则自调整函数

这种解析式的模糊自适应控制器具有自调整性，避免了常规模糊控制规则繁琐、推理复杂的缺点，提高了控制的精度。

1.3.2　自调整函数的确定

在纯追踪模型中，希望当横向位置误差较大时，在前视距离的决策中增大位置误差的权重以保证农机快速地跟踪到路径；当位置误差较小时，减小位置误差的权重，增大航向误差的权重，以保证农机稳定地跟踪路径。因此将自调整函数选为

$$\alpha = k_1 \left| \frac{d}{M} \right|^p \tag{8}$$

式中　k_1——比例参数，为了保证 $1-\alpha \geqslant 0$，取 $k_1 \leqslant \left(\frac{M}{d_{\max}}\right)^p$

M——误差最大设定值，一个大于 $|d_{\max}|$ 的数

p——自调整函数的幂次

根据 p 的取值不同，自调整函数具有图 2 所示的 3 种形态。当 $p<1$ 时，自调整函数的值随横向位置误差递增较快，横向位置误差在控制决策中所占的比重较大；反之，当 $p>1$ 时，横向位置误差所占的比重较小。

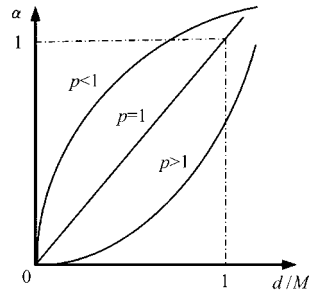

图 2　自调整函数曲线

Fig. 2　Self-adjustment function curves

由于农机路径跟踪的主要目的是使农机与期望路径之间的距离达到一定的容许范围内，因此无论什么时候横向误差的权重都应重视。

综上所述，选择自调整函数的幂次为 $p<1$。

1.3.3　量化因子和比例因子的选择

模糊自适应控制的输入为横向位置误差和航向误差。横向位置误差和航向误差的基本论域分别为 [−90 cm, 90 cm] 和 [−90°, 90°]，其论域为 [−6, −5, −4, −3, −2, −1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]，量化因子选为 1/15。

模糊自适应控制的输出为前视距离，输出量的论域根据上述解析模糊控制的结果确定，模糊自适应控制的结果乘以比例因子即为需要的前视距离。控制量的比例因子选为 1/4。

1.4　路径跟踪控制器设计

将纯追踪模型和模糊自适应控制结合起来，提出一种基于模糊自适应纯追踪模型的农机路径跟踪方法。

由农机的运动学模型可知

$$\dot{\Psi} = \gamma v = v\frac{\tan\delta}{L} \tag{9}$$

式中　L——农机轴距

$\dot{\Psi}$——农机航向变化率

v——农机速度

δ——农机期望转向角

结合纯追踪模型式(6)和式(9)可得控制律，即期望的转向角为

$$\delta = \arctan\frac{2L(d\cos\Psi_e - \sqrt{L_d^2 - d^2}\sin\Psi_e)}{L_d^2} \tag{10}$$

其中前视距离参数采用模糊自适应控制进行在线自适应地确定。至此，可以得到基于模糊自适应纯追踪模型的农机路径跟踪控制系统如图 3 所示。

路径跟踪控制器由纯追踪模型单元和模糊自适应控制单元组成，它通过位姿传感器获得农机的当

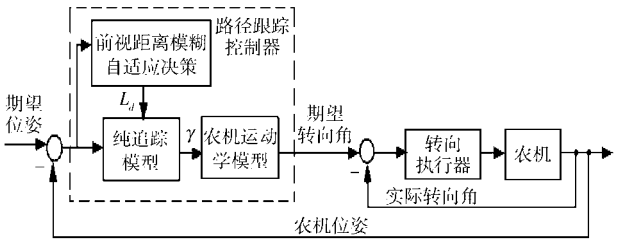

图 3 农机路径跟踪控制框图

Fig. 3 Block diagram of agricultural machine path tracking control

前位姿,然后与期望的位姿相比较得到农机与期望路径之间的相对位姿。模糊自适应控制单元利用相对位姿在线实时地确定纯追踪模型中的前视距离参数,纯追踪模型根据该前视距离和当前的相对位姿信息并结合农机的运动学模型决策出农机的期望转向角。最后将期望转向角发送给转向执行器,控制农机转向轮的偏转角度。

2 实验验证

2.1 实验平台

为了对提出的方法进行实车验证,以洋马 VP6 型高速插秧机作为实验农机,如图 4 所示,并在其上面安装自主研发的基于 CAN 总线的农机自动导航控制平台,该平台由田间计算机、导航控制器、转向执行装置、转角检测装置和位姿传感器构成。

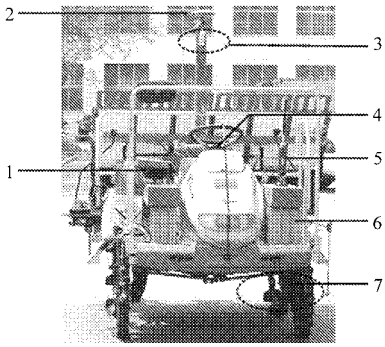

图 4 插秧机自动导航控制实验平台

Fig. 4 Experiment platform of rice transplanter automatic navigation control

1. 田间计算机 2. GPS 天线 3. MTi 4. 转向执行装置 5. 数传电台 6. 自动导航控制箱 7. 转角编码器

2.2 方法验证及结果讨论

2.2.1 相同初始误差的路径跟踪实验

在相同初始误差条件下,本文对固定前视距离的纯追踪模型方法和本文提出的方法进行对比实验。实验中初始误差设定为 30 cm 左右,固定的前视距离分别设定为 1 m、1.8 m 和 3 m。实验的结果如图 5 所示。

采用较小的前视距离(1 m)进行实验时,路径跟踪误差的变化曲线如图 5a 所示,从图中可以看出,当前视距离选择较小时,虽然可以使系统的响应加快,但是路径跟踪过程中明显发生了振荡,最大跟踪误差绝对值超出了 15 cm。采用较大的前视距离(3 m)进行路径跟踪实验时,其跟踪过程的误差曲线如图 5b 所示,从图中可以看出此时的路径跟踪响应很慢,农机跟踪到路径需要行驶近 30 m,而且即使跟踪到路径上也不能取得很好的稳态性能。通过反复调参实验得知,采用 1.8 m 的前视距离进行实验时,能够获得很好的路径跟踪效果,其路径跟踪误差曲线如图 5c 所示。

在同样的误差条件下,采用本文提出的方法进行农机路径跟踪实验,路径跟踪误差的变化曲线如图 5d 所示。通过实验测定结果得知,农机行驶小于 5 m 的距离就可以跟踪到路径上,具有很好的跟踪响应速度;当跟踪到期望路径后,路径跟踪误差平均值小于 5 cm,最大跟踪误差的绝对值小于 8 cm,方差小于 0.000 6,完全满足插秧机作业的要求。

通过对比实验可以得知:在相同的初始误差条

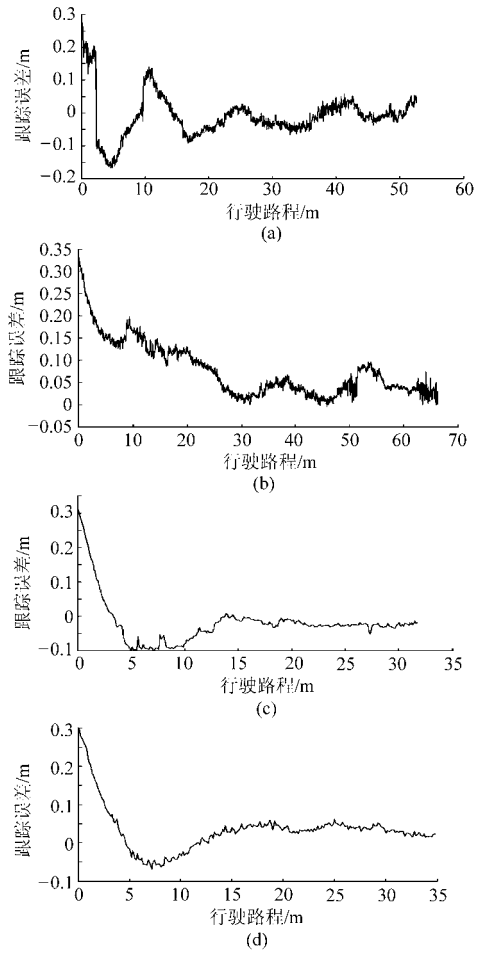

图 5 不同前视距离时的跟踪误差变化曲线

Fig. 5 Tracking error curves of different look-ahead distances

(a) 1 m 前视距离 (b) 3 m 前视距离 (c) 1.8 m 前视距离 (d) 前视距离自适应

件下，较大或者较小的前视距离都不能获得满意的路径跟踪效果，只有选择一个适中的前视距离才能取得满意的效果。而本文提出的方法，可以在线自适应地调节前视距离参数，进而获得满意的路径跟踪效果。

2.2.2　不同初始误差的路径跟踪实验

在不同的初始误差条件下，对固定前视距离的纯追踪模型方法和本文提出方法进行对比实验。实验中初始误差分别设定为 30 cm 和 60 cm。

采用上述实验确定的较优的 1.8 m 前视距离的纯追踪模型方法分别进行初始误差为 30 cm 左右和 60 cm 左右的路径跟踪实验，其路径跟踪误差变化曲线如图 6 所示。结果表明：当初始误差为 30 cm 左右时，1.8 m 前视距离的纯追踪模型方法可以得到满意的效果。然而当初始误差为 60 cm 左右时，农机跟踪到路径需要行驶大于 5 m 的距离，跟踪误差平均值达到 7 cm，最大跟踪误差绝对值大于 10 cm，方差为 0.000 8，此时的控制效果明显变差。

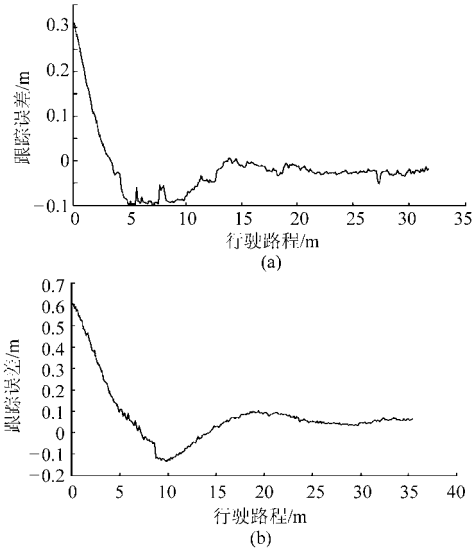

图 6　固定前视距离时的跟踪误差变化曲线

Fig. 6　Tracking error curves of fixed look-ahead distance

（a）初始误差为 30 cm　（b）初始误差为 60 cm

采用本文方法分别进行初始误差为 30 cm 和 60 cm 的路径跟踪实验，其路径跟踪误差变化曲线如图 7 所示。实验结果表明：即使初始误差大于 30 cm，本文方法也能得到小于 5 cm 的平均误差，小于 0.000 6 的方差，农机行驶小于 5 m 的距离就可以跟踪到路径上，具有很好的跟踪响应速度，而且最大跟踪误差绝对值也能控制在 10 cm 之内。

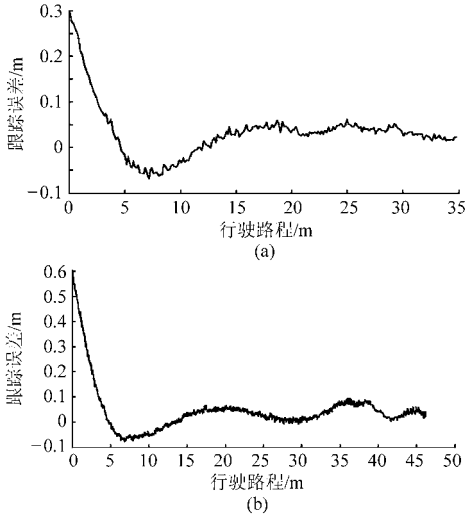

图 7　前视距离自适应时的跟踪误差变化曲线

Fig. 7　Tracking error curves of adaptive look-ahead distance

（a）初始误差为 30 cm　（b）初始误差为 60 cm

通过对比实验可以得知：在不同的初始误差条件下，采用相同的前视距离不能使农机在任何初始误差条件下都取得好的路径跟踪效果。而本文方法对不同的初始误差具有一定的鲁棒性和适应性，可以得到满意的路径跟踪效果。

综上可知，本文提出的基于模糊自适应纯追踪模型的路径跟踪方法优于前视距离固定的纯追踪模型路径跟踪方法，具有很好的控制精度，而且针对农机的不同初始误差状态具有很好的适应性和鲁棒性，进而验证了本文提出方法的可行性和有效性。

3　结束语

针对纯追踪模型中前视距离对路径跟踪控制性能的影响问题，提出了基于模糊自适应纯追踪模型的农机路径跟踪方法。首先从几何的角度推导了纯追踪模型，然后在此模型的基础上采用模糊自适应控制对模型中的前视距离进行在线实时整定，考虑到不同误差条件对模糊控制规则的要求不同，以及控制算法实现上的方便，采用带有自调整函数的解析式模糊控制器对前视距离的大小进行在线自适应调整。本文提出的方法对于不同的初始误差具有一定的鲁棒性和适应性，提高了农机路径跟踪的控制精度。插秧机的路面实验结果表明本文提出的方法能够使农机的路径跟踪平均误差控制在 5 cm 以下，验证了方法的可行性和有效性。

参　考　文　献

1　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)

2 Nagasaka Y, Saito H, Tamaki K, et al. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6 ~ 7): 537 ~ 548.

3 李进,陈无畏. 基于自适应导航参数的智能车辆视觉导航[J]. 农业机械学报,2012,43(6):19 ~ 24.
Li Jin, Chen Wuwei. Navigation of vision-guided intelligent vehicle based on adaptive navigation parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6):19 ~ 24. (in Chinese)

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

5 陈军, 鸟巢谅, 朱忠祥. 拖拉机在牧草地上自动引导行走的控制[J]. 农业机械学报, 2005, 36 (7): 104 ~ 107.
Chen Jun, Torisu R, Zhu Zhongxiang. Study on automatic guidance for tractor on grassland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 104 ~ 107. (in Chinese)

6 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 R, et al. On-tracking control of tractor running along curved paths [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 108 – 111. (in Chinese)

7 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)

8 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)

9 Torii T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1 ~ 2): 133 ~ 153.

10 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)

11 周建军,郑文刚,李素,等. 基于 ISO 11783 的拖拉机导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(6):184 ~ 188.
Zhou Jianjun, Zheng Wen'gang, Li Su, et al. Automatic navigation control system for tractor based on ISO 11783 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6):184 ~ 188. (in Chinese)

12 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, 32(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, 32(4):75 ~ 77. (in Chinese)

(上接第 199 页)

8 Hannan M, Burks T, Bulanon D M. A machine vision algorithm combining adaptive segmentation and shape analysis for orange fruit detection [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2009,11:1 281 ~ 1 296.

9 Linker R, Cohen O, Naor A. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 81: 45 ~ 57.

10 耿楠,于伟,宁纪锋. 基于水平集和先验信息的农业图像分割方法[J]. 农业机械学报,2011,42(9):167 ~ 172.
Geng Nan, Yu Wei, Ning Jifeng. Segmentation of agricultural images using level set and prior information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):167 ~ 172. (in Chinese)

11 彭辉,吴鹏飞,翟瑞芳,等. 基于视差图像的重叠果实图像分割算法[J]. 农业机械学报,2012,43(6):167 ~ 173.
Peng Hui, Wu Pengfei, Zhai Ruifang, et al. Image segmentation algorithm for overlapping fruits based on disparity map[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6):167 ~ 173. (in Chinese)

12 桂江生. 二维水果形状检测与分类算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
Gui Jiangsheng. Algotithms of 2-D fruit shape detection and classification [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)

13 庞江伟. 基于计算机视觉的脐橙表面常见缺陷种类识别的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Pang Jiangwei. Study on external defects classification of navel orange based on machine vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)