

文章编号: 1002-0446(2002)03-0209-04

基于视觉导航的轮式移动机器人横向最优控制*

周 俊 姬长英

(南京农业大学农业工程学院 南京 210032)

摘 要: 近年来,基于机器视觉导航的轮式移动机器人在农业领域中被广泛研究. 本文运用最优控制算法对其进行横向控制,但是,农田非结构化自然环境的机器视觉识别耗时导致反馈通道传输延迟明显,最优控制器的性能因之而下降. 因此,本文又根据轮式移动机器人运动学模型预测其行为,修正了滞后的反馈信息. 仿真结果表明,该算法能实现轮式移动机器人精确可靠的横向控制,具有较强的纵向速度自适应能力.

关键词: 轮式移动机器;横向控制;最优控制;机器视觉

中图分类号: TP24

文献标识码: B

LATERAL OPTIMAL CONTROL FOR WHEELED MOBILE ROBOT NAVIGATED BY MACHINE VISION

ZHOU Jun JI Chang-ying

(College of Agricultural Engineering, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210032)

Abstract: In agricultural field, wheeled mobile robot navigated by machine vision is researched widely at present. An optimal lateral control algorithm is presented in this paper, but whose performance can be deteriorated by long delay feedback produced by machine vision recognizing the characteristics of complicated field environment. So based on its kinematical model, behavior of wheeled mobile robot is predicted so as to modify feedback information sampled by machine vision. In the simulation, it is showed that this algorithm can carry out the lateral control of agricultural wheeled mobile robot precisely and reliably, and can adapt different longitudinal velocity excellently.

Keywords: wheeled mobile robot, lateral control, optimal control, machine vision

1 引言(Introduction)

可持续发展的现代化农业,给基于机器视觉导航的轮式移动机器人(自主车辆)在农业上的应用展示了广阔的前景. 比如,出于人员安全原因的果园农药自动喷洒作业^[1],出于环境等原因的农药定点投放^[2]等等. 视觉导航因其巨大的发展潜力受到这个领域研究者的密切关注^[1~4],一般的做法是,首先处理机器视觉采样的机器人前方场景图像,提取场景的有用特征,然后依据这些特征规划出局部行走路径(在农田环境中,往往是曲率很小的农作物行间或垄间),并确定机器人相对于规划路径的横向偏差和方位偏差(位姿),最后由控制模块完成机器人自主导航. 控制模块的重要组成部分就是横向控制,即是指调节机器人前轮转角以取得需要的横向偏差和方位

偏差,实现机器人按预期路径行走.

由于轮式移动机器人本身的复杂性以及土壤等农田环境因素的不确定性,对农田作业的轮式移动机器人进行横向控制时,基于其动力学模型的控制方法,很难取得预期效果. 此外,机器视觉识别农田复杂的自然场景比较困难,耗时较多,使得反馈通道传输延迟明显,进一步增加了控制的难度. 如果千方百计地提高机器视觉算法本身的实时性,其精确可靠性就很难同时得到有效的保证.

在这样的背景下,本文根据轮式移动机器人运动学模型提出了横向最优控制算法,并依据运动学模型预测其行为以改善反馈信号的实时性,从另一角度展示解决这一难题的途径.

2 轮式移动机器人运动学模型 (Kinematical model of wheeled mobile robot)

轮式移动机器人在农田作业过程中,一般纵向速度相对较小,当不考虑轮胎侧偏特性时,可以采用图1所示的运动学模型来分析其具体的平面运动情况.

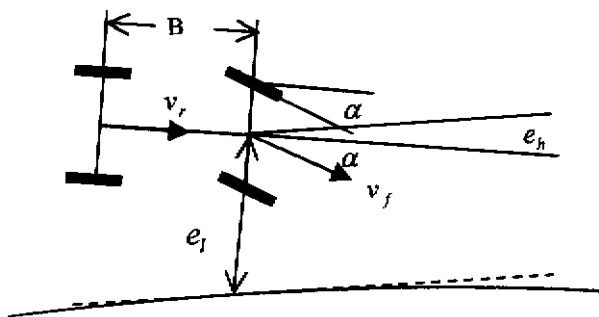


图1 轮式移动机器人运动学模型

Fig. 1 Kinematical model of wheeled mobile robot

其中, v_r 为后轮轴中心点速度(m/s), v_f 为前轮轴中心点速度(m/s), B 为前后轮轴距(m), α 为前轮转角(rad), e_h 为方位偏差(rad), e_l 为横向偏差(m). 这里我们设定所有的角度以逆时针方向为正, 反之则为负, 横向偏差则是左偏为正, 右偏为负.

由轮式移动机器人运动学模型可知:

$$R = \frac{B}{\alpha} \quad (1)$$

在横向控制中, 轮式移动机器人的方位偏差 e_h 的微分方程可以表示为

$$\dot{e}_h = \frac{v_r}{R} \pm \delta_h = \frac{v_r}{B} \alpha \pm \delta_h \quad (2)$$

其中, δ_h 为行走路径曲率变化对方位偏差的影响, 当行走路径为直线时其值为零.

当不考虑轮式移动机器人侧滑时, 其前轮轴中心点速度 v_f 为

$$v_f = \frac{v_r}{\cos \alpha} \quad (3)$$

则机器人横向偏差的微分方程可以表示为

$$\dot{e}_l = v_f \cos \alpha \tan e_h + v_f \sin \alpha \pm \delta_l \quad (4)$$

当 α 和 e_h 较小时可以认为

$$\dot{e}_l = v_r e_h + v_r \alpha \pm \delta_l \quad (5)$$

其中, δ_l 为行走路径曲率变化对横向偏差的影响, 当行走路径为直线时其值为零.

轮式移动机器人转向机构可以看成为惯性环节

$$\tau \dot{\alpha} + \alpha = \alpha_d \quad (6)$$

其中, τ 为惯性时间常数, α_d 为期望前轮转角.

综合上述各式即可建立轮式移动机器人运动学状态方程

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{e}_h \\ \dot{e}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/\tau & 0 & 0 \\ v_r/B & 0 & 0 \\ v_r & v_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ e_h \\ e_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/\tau \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \alpha_d + \Delta \quad (7)$$

其中, Δ 为路径引起的干扰.

方程(7)有如下一般形式

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + \Delta \quad (8)$$

其中, X 为系统状态变量, U 为控制器输出量, 在这里取为期望前轮转角 α_d .

从以上系统状态方程可知系统有两个开环零极点, 是开环不稳定的, 但系统是能控的, 故可通过状态反馈来任意配置闭环极点而使系统稳定.

3 横向最优控制算法 (Lateral optimal control algorithm)

基于机器视觉导航的轮式移动机器人横向最优控制算法的目标就是, 根据机器视觉测量的横向偏差和方位偏差以及角度传感器输出的前轮转角, 确定适合的前轮转角期望值, 使得横向偏差和方位偏差以及前轮转角等三个状态分量趋于最小. 由于受轮式机器人转向机构的物理结构限制, 以及考虑到实际驾驶员的经验, 控制器输出的期望前轮转角也应该尽可能小. 因此, 取如下二次型性能指标

$$J = \int_0^{\infty} [X^T(t)QX(t) + U^T(t)RU(t)]dt \quad (9)$$

则由线性二次型最优控制理论可知, 使上述性能指标取极小值的反馈最优控制为

$$U(t) = -R^{-1}B^TPX(t) \quad (10)$$

其中 P 为满足如下 Riccati 矩阵代数方程的对称正定矩阵

$$PA + A^TP - PBR^{-1}B^TP + Q = 0 \quad (11)$$

则系统的状态反馈增益矩阵为

$$K = R^{-1}B^TP \quad (12)$$

但是横向控制时, 分析处理机器视觉采样的农田复杂的自然场景图像, 计算机人相对于目标路径的横向偏差和方位偏差比较困难, 耗时较长, 使得系统状态反馈延迟非常明显. 因此, 如果简单运用上述最优控制, 根据机器视觉在某个时刻采样到的横向偏差和方位偏差计算控制量, 当转向机构执行这一控制量时, 已有了一个较长时间的滞后. 此时轮式机器人的实际横向偏差和方位偏差早已改变, 这将

严重影响横向最优控制效果。

在确保机器视觉精度和可靠性的前提下,为了克服机器视觉计算耗时引起的系统状态反馈延迟,我们利用轮式机器人运动学模型预测其行为以修正反馈信息。其基本思想是:由于前轮转角是通过角度传感器采集的,采集频率可以很高,延迟很小。因此,在机器视觉的反馈信号没有到来之前,可以依据前轮转角信号结合其运动学模型预测出轮式机器人横向偏差和方位偏差两者的变化量,以修正机器视觉在前一时刻采样实测的横向偏差和方位偏差,并与此刻的前轮转角一起作为当前横向最优控制器的输入量。实践中,可以通过双处理器技术,使用一个处理器分析处理采集到的场景图像并把处理结果通知给另一负责控制运算的处理器,这样可以较好地消除反馈信息滞后导致的负面影响。

轮式移动机器人在 ΔT 时间内,可以认为其跟踪的路径曲率为零,也即局部路径近似为直线。所以由(2)式可知,机器人在 ΔT 时间内的方位偏差变化量 $\Delta e_h(\text{rad})$ 为

$$\Delta e_h = \frac{v_r}{B} \alpha \Delta T \quad (13)$$

由(5)式可知,机器人在 ΔT 时间内的横向偏差变化量 $\Delta e_l(\text{m})$ 则近似为

$$\Delta e_l = (v_r e_h + v_r \alpha) \Delta T \quad (14)$$

有了 Δe_h 和 Δe_l ,就可以把它们与前一时刻采样测量的横向偏差和方位偏差相加,来修正滞后的反馈状态信息,以便克服因机器视觉实时性差而造成的反馈信息延迟。

4 仿真研究(Simulation)

仿真研究是运用 MATLAB 软件进行的。实际系统研究中,我们将清江拖拉机厂生产的 12 马力小四轮拖拉机改装成农田作业轮式移动机器人。其前后轮轴距 B 为 1.5m,前轮最大转角为 0.52rad。纵向速度分别取为 2m/s 和 8m/s 两种水平,以便既能反映轮式机器人农田作业的实际状况,又能研究控制系统对纵向速度的适应能力。 R 为正定实对称阵,这里选为单位阵。 Q 为非负定实对称阵或正定实对称阵, Q 阵各元素的大小表示相应状态分量在性能指标中所占的比重,这里取为 $Q = \text{diag}[q_1 \ q_2 \ q_3]$ 。通过对系统仿真曲线的观察以及对系统的分析可知,横向控制中,横向偏差的比重不能过大,因为过大的比重

将会迫使系统过分地追求快速消除横向偏差,结果会造成方位偏差过大,系统超调严重,以及前轮转角超过转向机构的物理极限。反馈增益也会随着 q_1 、 q_2 和 q_3 的增大而增加,造成系统控制器输出超过物理限制。此外,系统的极点因 q_1 、 q_2 和 q_3 过大而远离虚轴,使得系统抗干扰能力下降,对噪声敏感。因此,本文中取 $Q = \text{diag}[0.2 \ 1 \ 0.1]$,也即更注重横向偏差的变化趋势,而不是横向偏差大小。将初始横向偏差设定为 1m,初始方位偏差设定为 0,初始前轮转角设定为 0,进行仿真实验,也即是模拟轮式移动机器人消除横向偏差沿目标路径行走的过程。

考虑到农田非结构化自然环境的场景图像比较复杂,设定机器视觉耗时为 0.1s,即横向偏差和方位偏差两状态反馈延迟为 0.1s,前轮转角的采样周期为 0.01s。这时速度为 2m/s 和 8m/s 的仿真结果分别如图 2 和图 4 所示。利用预测结果修正反馈状态变量后的仿真结果分别如图 3 和图 5 所示。所有图中, f_1 、 f_2 和 f_3 分别表示横向偏差、前轮转角和方位偏差的变化曲线。从仿真结果可以看出,预测修正后的控制系统的超调量和过渡时间等各项性能指标都比较理想。纵向速度 2m/s 时,由于速度较小,延迟时间内轮式移动机器人的行为状态变化不大,预测量修正的作用也就不明显,两者的仿真曲线基本一致,但是无预测时,各项控制性能指标还是略微有所降低。纵向速度 8m/s 时,随着纵向速度的增大,延迟时间内轮式机器人的行为状态变化也就增大,预测量修正的作用得到了显著发挥,修正后系统的各项控制性能指标有了明显改善。最后,无论速度是 2m/s 还是 8m/s,机器人的方位偏差绝对值都能够做到先缓慢增加,然后逐渐减小为零达到目标状态,这也是和实际经验比较吻合的。

5 结论(Conclusion)

本文提出了一种基于机器视觉导航的农田作业轮式移动机器人横向最优控制算法。根据轮式移动机器人运动学状态方程,运用线性二次型最优控制理论设计最优控制器,并结合运动学模型预测其行为状态变化,修正了延迟的反馈状态,克服了机器视觉实时性差的负面影响。仿真结果表明,该算法具有比较理想的横向控制性能,控制系统的纵向速度适应能力强,鲁棒性好。

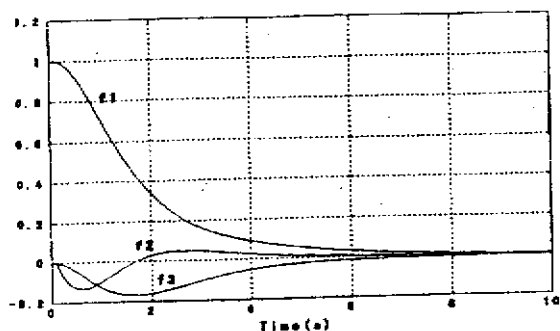


图 2 无修正的仿真曲线($v=2\text{m/s}$)
Fig. 2 Non-modified simulation result

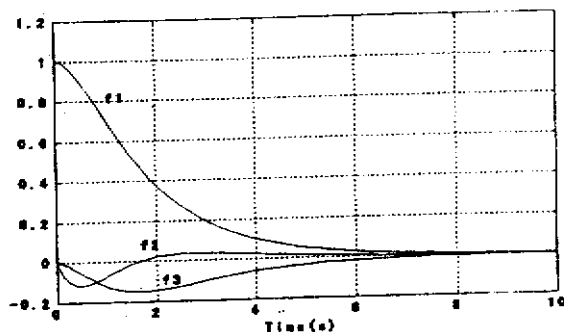


图 3 修正后的仿真曲线($v=2\text{m/s}$)
Fig. 3 Modified simulation result

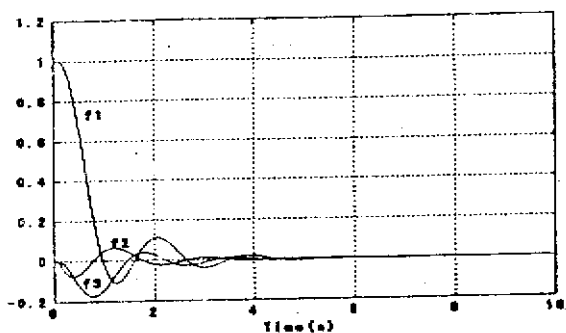


图 4 无修正的仿真曲线($v=8\text{m/s}$)
Fig. 4 Non-modified simulation result

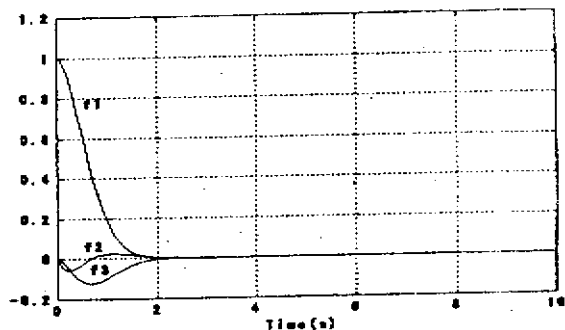


图 5 修正后的仿真曲线($v=8\text{m/s}$)
Fig. 5 Modified simulation result

参考文献 (References)

- 1 S I Cho, N H Ki. Autoums Speed Sprayer Guidance using Machine Vision and Fuzzy Logic. ASAE, 1999, 42(4): 1137—1143
- 2 14 N D Tillett, T Hague, J A Marchant. A Robotic System for Plant-Scale Husbandry. J Agric Eng Res, 1998, 69: 169—178
- 3 王荣本等. 基于机器视觉的玉米施肥智能机器系统设计概述. 农业工程学报, 2001, 17(2): 151—153
- 4 Torii T, Kitade S and Teshima T. Crop Row Tracking by an

Autonomous Vehicle Using Machine Vision. JSAM, 2000, 62 (2): 41—48

- 5 欧阳黎明. MATLAB 控制系统设计. 北京: 国防工业出版社. 2001

作者简介:

周 俊 (1974-), 男, 博士研究生. 研究领域: 机电一体化、农业机器人.

姬长英 (1955-), 男, 博士生导师. 研究领域: 农业机器人.