

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.006

基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪

白国星¹ 刘丽¹ 孟宇¹ 刘思言² 刘立¹ 罗维东¹

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 吉林省农业机械研究院, 长春 130021)

摘要: 针对移动机器人路径跟踪模型预测控制中, 存在线性化预测模型削弱控制器对参考路径曲率突变和航向突变响应能力的问题, 从非线性模型预测控制出发, 提出了两种实时性优化方案, 即减少控制步数或降低控制频率。仿真与实验结果表明, 采用减少控制步数或降低控制频率方案优化后, 非线性模型预测控制器在每一控制周期内的解算时间小于控制周期; 减少控制步数相比降低控制频率或线性化预测模型具有更小的横向误差和航向误差, 可以更好地保证控制器在跟踪曲率、航向变化较快的参考路径时的控制精度。因此, 相比其他实时性优化方案, 减少控制步数更加适用于农用机器人等对灵活性要求较高的移动装备。

关键词: 移动机器人; 农用机器人; 路径跟踪; 模型预测控制; 实时性

中图分类号: S24; TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)09-0047-06

OSID:



Real-time Path Tracking of Mobile Robot Based on Nonlinear Model Predictive Control

BAI Guoxing¹ LIU Li¹ MENG Yu¹ LIU Siyan² LIU Li¹ LUO Weidong¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Jilin Academy of Agricultural Machinery, Changchun 130021, China)

Abstract: The application of model predictive control in the path tracking control of mobile robots is increasingly widespread, and the real-time performance of controllers is gradually being noticed. At present, the common real-time optimization scheme is a linearizing prediction model scheme, which converts the nonlinear model predictive control into the linear time-varying model predictive control. However, the linearizing prediction model scheme will weaken the ability of the controller to respond to sudden changes in the curvature and heading of the reference path. Therefore, from the nonlinear model predictive control, two real-time optimization schemes were proposed, namely reducing the number of control steps or reducing the control frequency. In the results of simulation and experiment, in each control period, the calculation time of the nonlinear model predictive controller, which was optimized by reducing the number of control steps or reducing the control frequency, was shorter than the control period. At the same time, it can be known from the simulation and experiment that the scheme of reducing the number of control steps had smaller displacement errors and heading errors than the scheme of reducing the control frequency or the linearizing prediction model. That was, adopting the scheme of reducing the number of control steps can better ensure the control accuracy when tracking the reference path which with rapid changes in curvature and heading. Therefore, the scheme of reducing the number of control steps was more suitable than other real-time optimization schemes, for mobile equipment such as agricultural robots that require higher flexibility.

Key words: mobile robot; agriculture robot; path tracking; model predictive control; real-time

0 引言

路径跟踪是车辆、机器人等移动装备自主行驶

控制的一项核心技术, 其任务是减小移动装备与参考路径之间的误差, 从而使移动装备沿参考路径行驶^[1]。路径跟踪控制的本质是一个多约束条件下

收稿日期: 2019-12-22 修回日期: 2020-01-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0604403、2018YFE0192900)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-IC-20-02)

作者简介: 白国星(1992—), 男, 博士生, 主要从事汽车、机器人自动化控制和模型预测控制研究, E-mail: bgxgz@163.com

通信作者: 孟宇(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事汽车电子及自动化、机器视觉和智能车辆研究, E-mail: myu@ustb.edu.cn

的优化问题。模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 能够显式地考虑系统约束条件^[2-3], 因此被广泛应用于路径跟踪控制。目前, 基于 MPC 的路径跟踪控制面临的较为突出的就是实时性问题^[4]。

在一些路径跟踪控制研究^[5-9]中, MPC 的实时性问题尚未受到重视。不过这一问题得到了越来越多的关注, 出现了较多的研究成果。文献[10]使用自动控制和动态优化工具包 (Toolkit for automatic control and dynamic optimization, ACADO Toolkit) 在计算机代码层面对控制器进行了优化。文献[11]则通过连续/广义最小残差 (Continuation/Generalized minimal residual, C/GMRES) 算法提高了控制器的求解效率。这两种优化方法对于提高控制器的实时性具有十分积极的意义, 但与 MPC 本身的实时性能并不相关。

从 MPC 的角度出发, 常见的实时性优化方案是线性化预测模型。文献[12]将这种方法命名为线性模型预测控制 (Linear model predictive control, LMPC), 并证明 LMPC 相比非线性模型预测控制 (Nonlinear model predictive control, NMPC) 具有更好的实时性。文献[13-14]的研究重点并非实时性, 但是也采用该方案设计了路径跟踪控制器, 并命名为线性时变模型预测控制 (Linear time-varying model predictive control, LTV-MPC)。此外, 文献[15-23]的研究重点各不相同, 但采用的控制方法都是 LTV-MPC。

然而, 线性化后的预测模型无法精确预测机器人的位姿状态, 只能通过当前的误差进行预测, 因此削弱了控制器对路径曲率突变和航向突变的响应能力^[24-26]。对于农用机器人的路径跟踪控制, 参考路径通常由直线和圆弧组成, 其曲率变化很大, 线性化预测模型的实时性优化方案并不十分适用。本文根据 NMPC 的控制周期、控制步数和计算复杂度之间的关系, 提出两种实时性优化方案, 并通过 Matlab/Simulink 中的 Desktop Real Time 实时性仿真框架以及实验验证, 将这两种方案与线性化预测模型方案进行对比研究。

1 NMPC 控制器

在基于 MPC 的路径跟踪控制中, 运动学模型的应用十分广泛^[6,7-9,12-14,18-21]。在这种模型中, 通常假设系统符合非完整约束, 车体无侧向滑动。由于农用机器人速度较低, 在转向时受离心加速度等侧向加速度的影响较小, 所以可以通过机器人的运动

学模型推导控制器的预测模型。

农用机器人的运动学模型十分成熟, 其一般形式为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 x, y ——机器人转动中心的横、纵坐标, m

θ ——机器人航向角, rad

ω ——机器人航向角速度, rad/s

v ——机器人纵向速度, m/s

为了便于表达, 式(1)抽象为

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [x \ y \ \theta]^T \\ \mathbf{U} = [v \ \omega]^T \end{cases} \quad (3)$$

参照文献[12-13], 采用欧拉法 (Euler method) 将式(3)离散化

$$\mathbf{X}(t+1|t) = \mathbf{X}(t|t) + T\dot{\mathbf{X}}(t|t) \quad (4)$$

式中 T ——控制器的控制周期

将式(2)代入式(4)可得

$$\mathbf{X}(t+1|t) = \mathbf{X}(t|t) + Tf(\mathbf{X}(t|t), \mathbf{U}(t|t)) \quad (5)$$

假设预测步数为 N_p , 控制步数为 N_c , 则在预测时域内机器人的位姿状态为

$$\begin{cases} \mathbf{X}(t+1|t) = \mathbf{X}(t|t) + Tf(\mathbf{X}(t|t), \mathbf{U}(t+1|t)) \\ \vdots \\ \mathbf{X}(t+N_c+1|t) = \mathbf{X}(t+N_c|t) + \\ Tf(\mathbf{X}(t+N_c|t), \mathbf{U}(t+N_c|t)) \\ \vdots \\ \mathbf{X}(t+N_p|t) = \mathbf{X}(t+N_p-1|t) + \\ Tf(\mathbf{X}(t+N_p-1|t), \mathbf{U}(t+N_c|t)) \end{cases} \quad (6)$$

设路径规划系统给出的参考路径点序列为 $\mathbf{X}_{\text{ref}}(t+i|t)$ ($i=1, 2, \dots, N_p$)。则优化目标函数可设计为

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{X}(t+i|t) - \mathbf{X}_{\text{ref}}(t+i|t)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\mathbf{U}(t+i+1|t) - \mathbf{U}(t+i|t)\|_{\mathbf{R}}^2 \quad (7)$$

式中 \mathbf{Q} ——误差惩罚项权重矩阵

\mathbf{R} ——控制量增量惩罚项权重矩阵

其中控制量增量惩罚项的作用是保证控制器较为平稳地控制机器人跟踪参考路径, 避免机器人在短时间内过于频繁地加减速和转向。

路径跟踪控制即等效于在约束条件下求解

$$\begin{cases} \min_{v_c(t), \delta(t)} J = \sum_{i=1}^{N_p} \| \mathbf{X}(t+i|t) - \mathbf{X}_{\text{ref}}(t+i|t) \|_{\mathcal{Q}}^2 + \\ \sum_{i=0}^{N_c-1} \| \mathbf{U}(t+i+1|t) - \mathbf{U}(t+i|t) \|_{\mathcal{R}}^2 \\ \text{s. t. } \begin{cases} \dot{v} \in (\dot{v}_{\min}, \dot{v}_{\max}) \\ \dot{\omega} \in (\dot{\omega}_{\min}, \dot{\omega}_{\max}) \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\dot{v}_{\max}, \dot{v}_{\min}$ ——加速度上、下限

$\dot{\omega}_{\max}, \dot{\omega}_{\min}$ ——角加速度上、下限

求解后,即可获得路径跟踪控制的输入变量序列

$$\mathbf{U}^* = (\mathbf{U}(1), \mathbf{U}(2), \dots, \mathbf{U}(N_c))^T \quad (9)$$

其中第1个元素 $\mathbf{U}(1)$ 即控制器在下一时刻输出的控制变量。

2 实时性优化方案

由于 NMPC 控制器每经过一个控制周期输出一组控制变量,所以求解式(8)的时间如果大于控制周期长度,则控制器的实时性就无法得到保证。因此较为容易得到的实时性优化方案为减少求解式(8)的计算复杂度。

由式(6)可知,机器人未来的状态,可以通过当前的状态和未来的控制输入预测获得,而对于每一步预测,理论上的最大搜索次数由约束条件决定。

$$n_s = \frac{T^2 (\dot{v}_{\max} - \dot{v}_{\min}) (\dot{\omega}_{\max} - \dot{\omega}_{\min})}{p^2} \quad (10)$$

式中 n_s ——单步预测中的理论最大搜索次数

p ——搜索步长

$\dot{v}_{\max}, \dot{\omega}_{\max}$ ——控制变量约束的上限

$\dot{v}_{\min}, \dot{\omega}_{\min}$ ——控制变量约束的下限

对于 N_c 步之后的预测,因为其控制变量与第 N_c 步相同,所以理论上 NMPC 控制器的预测时域内最大搜索次数为

$$n_t = n_s^{N_c} \quad (11)$$

由式(11)可知,减少控制步数可以大幅减少预测时域内理论最大搜索次数,因此可以提出如下实时性优化方案:

(1)方案1:减少控制步数方案。设置控制步数 N_{c1} 为1,并对与控制步数有关联的预测步数 N_{p1} 进行相应调节,其他参数与 NMPC 控制器一致。

(2)方案2:降低控制频率方案。由于

$$N_c = \frac{T_c}{T} \quad (12)$$

式中 T_c ——控制时域

所以如果控制时域不变,增大控制周期,降低控制频率,尽管会增大单步预测中的理论最大搜索次数,但是可以减少控制步数,从而减少预测时域内理论最大搜索次数。在方案2中,设置控制周期 $T_2 = 5T$, 预测步数 $N_{p2} = N_p/5$, 控制步数 $N_{c2} = N_c/5$, 其他参数与 NMPC 控制器一致。

3 仿真验证

本文提出的 NMPC 路径跟踪控制器实时性优化方案通过 Matlab/Simulink 中的 Desktop Real-Time 平台进行仿真验证,硬件中处理器为 Intel® Core™ i5-8500,内存为8GB。仿真中各控制器的参数如表1所示,这些参数是通过参数调整获得的各控制器性能较佳时的取值。

表1 机器人及 NMPC 控制器的参数

Tab. 1 Parameters of robot and NMPC controller

参数	NMPC	方案1	方案2	LTV-MPC
控制周期 T/s	0.050 0	0.050 0	0.250 0	0.050 0
预测步数 N_p	25	25	5	25
控制步数 N_c	25	1	5	25
误差惩罚项权重矩阵 \mathcal{Q}	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$
控制量增量惩罚项权重矩阵 \mathcal{R}	$\begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
搜索步长 p	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}

在仿真中,机器人的行驶速度设置为3 m/s,参考路径由直线和圆弧路段组成,其中圆弧路段的半径为10 m。

由图1可知,在较大的尺度范围内,所有基于 MPC 的路径跟踪控制器都可以实现路径跟踪,通过

图2可以看出, NMPC 控制下机器人的行驶轨迹偏离参考路径最少,本文提出的实时性优化后的控制器在精度方面稍逊色于 NMPC 控制器,而常见的 LTV-MPC 控制器则在面临参考路径曲率突变时出现了较大的误差。

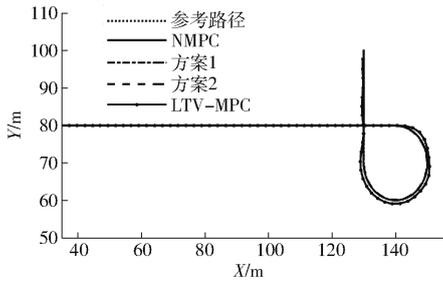


图1 仿真实驶轨迹

Fig. 1 Trajectory of simulation

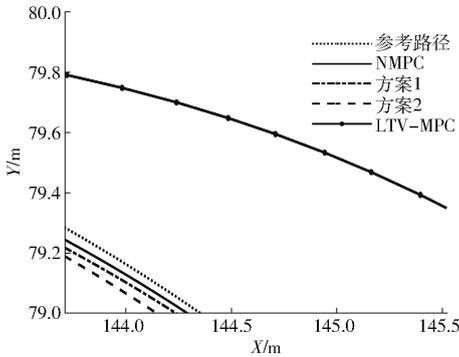


图2 仿真实驶轨迹的局部放大图

Fig. 2 Partial enlarged view of trajectory of simulation

图3中显示的横向误差即机器人距离参考路径的最短直线距离。NMPC、方案1、方案2和LTV-MPC的最大横向误差分别为0.0811、0.0947、0.1074、1.1674 m。由此可知,相比将预测模型线性化,在NMPC控制器的基础上进行实时性优化,可以较大程度地减少控制精度的下降。

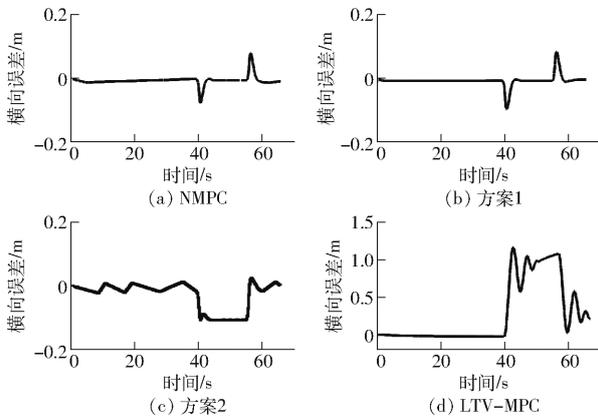


图3 横向误差仿真结果

Fig. 3 Displacement error of simulation

图4中显示的航向误差即机器人行驶方向与参考路径切线方向的偏差。NMPC、方案1、方案2和LTV-MPC的最大航向误差分别为0.0546、0.0608、0.0582、0.2106 rad。在NMPC控制器的基础上进行实时性优化,也可以较大程度地保证机器人的航向与参考路径一致。

图5显示的是每一控制周期内控制器的解算时间,由图5a可知,当路径的航向发生较大程度的变

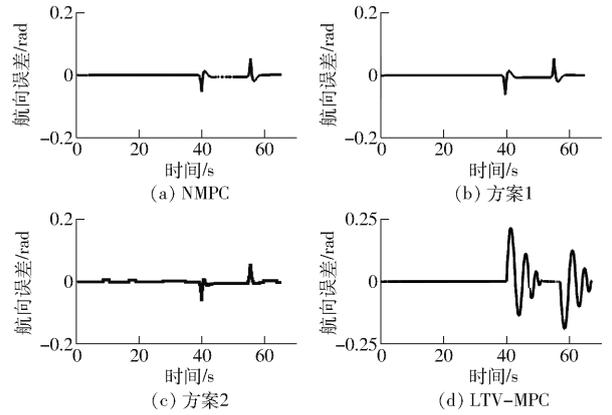


图4 航向误差仿真结果

Fig. 4 Heading error of simulation

化时,NMPC控制器的解算时间显著增大,其最大值为0.0870 s,是控制周期的1.74倍,而且解算时间超过控制周期的时段是连续的,由此可知此时NMPC无法满足路径跟踪控制的实时性要求。由图5b、5d可知,本文提出的优化方案1和LTV-MPC控制器的解算时间较短,其最大值分别为0.0360、0.0100 s,均远小于控制周期。本文提出的优化方案2则没有大幅度减少解算时间,其最大值为0.0450 s,但是由于控制频率降低,在该仿真系统中控制周期为0.2500 s,所以解算时间远小于控制周期,可以满足实时性需求。

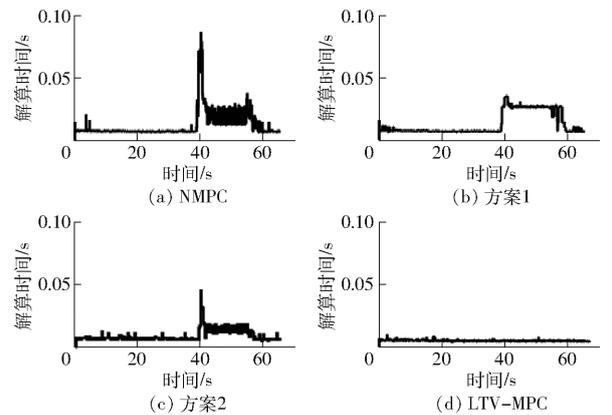


图5 仿真解算时间

Fig. 5 Computation time of simulation

4 实验验证

采用图6所示的国兴智能履带式机器人作为实验平台。实验系统的主控制器为研华ARK-3500型工控机,其处理器型号为Intel Core i5-3610ME,频率为2.7 GHz。执行控制器采用的是样机自带的线控驱动系统,用于实现行驶速度和航向角速度的控制。定位系统采用的是较为可靠的多传感器联合定位系统Inertial Labs INS-D,在RTK(Real time kinematic)模式下,该系统的坐标误差为0.01 m以内,航向误差为0.03°以内。图7所示为导航系统

的回环检测结果。回环检测即人工操作机器人，使其移动一定距离后再返回原点，然后将其初始定位结果与最终定位结果之间的偏差作为定位是否可靠的判断标准。如图7所示，移动距离较短时，定位系统的累积误差较小，基本可以忽略不计。



图6 农用机器人模型样机

Fig. 6 Model prototype of agricultural robots

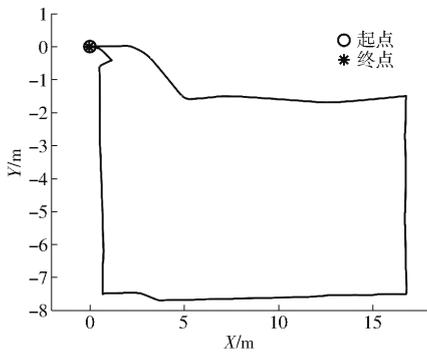


图7 定位系统回环检测结果

Fig. 7 Loop detection of positioning system

由于未经优化的 NMPC 控制器无法在控制周期内完成优化求解，所以不能用于实验验证。实验中对比了方案1、方案2和LTV-MPC，各控制器的参数与仿真中控制器的参数相同。由于实验场地面积有限，参考路径的弯道半径设置为5m。为了在此情况下保证实验的安全性，机器人的行驶速度设置为1m/s。

由图8可知，3种经过实时性优化的MPC控制器均可以控制机器人跟踪参考路径。图9显示了方案1、方案2和LTV-MPC的最大横向误差分别为0.0199、0.0756、0.2381m。图10显示了方案1、方案2和LTV-MPC的最大航向误差分别为0.0323、0.0713、0.1189rad。

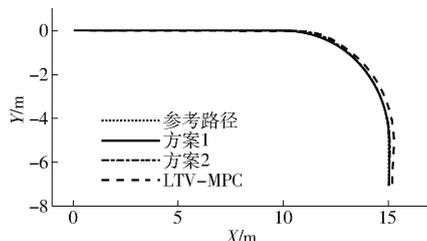


图8 实验行驶轨迹

Fig. 8 Trajectory of experiment

图11显示了每一控制周期内控制器的解算时间，方案1、方案2和LTV-MPC的最大解算时间分别为0.0470、0.1870、0.0100s。

整体而言，实验结果与仿真结果具有一致的规律，采用减少控制步数或者降低控制频率的方案，可以实现对NMPC控制器的实时性优化。从控制精度来看，减少控制步数的效果相对较好。

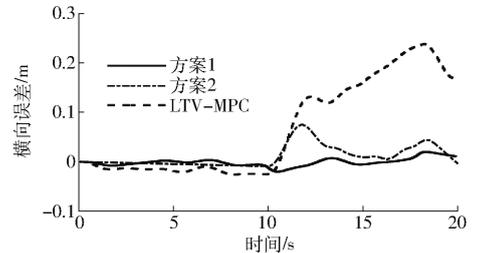


图9 实验横向误差

Fig. 9 Displacement error of experiment

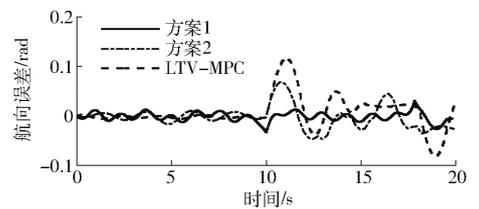


图10 实验航向误差

Fig. 10 Heading error of experiment

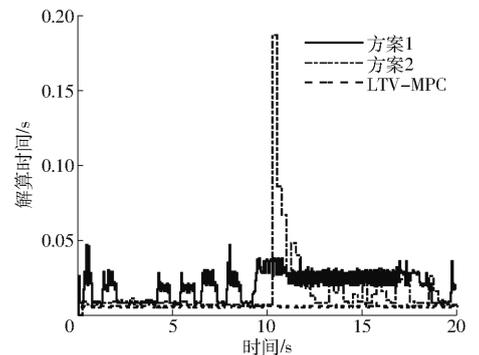


图11 实验解算时间

Fig. 11 Computation time of experiment

5 结论

(1) 针对基于NMPC的机器人路径跟踪控制的实时性问题，基于模型预测控制算法提出了两种实时性优化方案，即减少控制步数方案和降低控制频率方案。对经过实时性优化的NMPC控制器与未经优化的控制器以及经过预测模型线性化的控制器进行了对比。

(2) 仿真与实验结果表明，未经优化的NMPC控制器在实时性方面表现不佳，仿真中NMPC控制器在控制周期内的最大解算时间大于控制周期，无法满足实时性需求；采用减少控制步数方案对NMPC控制器进行优化后，仿真和实验中的最大解

算时间均小于控制周期,能够满足实时性需求,路径跟踪的控制精度较高;采用降低控制频率方案对NMPC控制器进行优化后,仿真和实验中的最大解算时间均小于控制周期,能够满足实时性需求,但控制系统的误差稍大于采用减少控制步数方案时的误差;采用线性化预测模型方案,即将NMPC控制器转变为LTV-MPC控制器后,控制器实时性大幅度提高,但在跟踪曲率变化较快的参考路径时,LTV-

MPC控制器的精度较差。

(3)考虑到农用机器人的工作场景,控制器除了要保证实时性,还需保证机器人的灵活性,即机器人跟踪曲率变化较快的参考路径的能力,因此,减少控制步数是较佳的实时性优化方案。在实际工程应用中,也可以将减少控制步数方案与降低控制频率方案组合使用,进一步保证NMPC路径跟踪控制器的实时性。

参 考 文 献

- [1] 孟宇, 汪钰, 顾青, 等. 基于预见位姿信息的铰接式车辆LQR-GA路径跟踪控制[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 375-384.
MENG Yu, WANG Yu, GU Qing, et al. LQR-GA path tracking control of articulated vehicle based on predictive information [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 375-384. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180645&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.045. (in Chinese)
- [2] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
XI Yugeng, LI Dewei, LIN Shu. Model predictive control—status and challenges[J]. ACTA Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236. (in Chinese)
- [3] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] 陈虹, 刘志远, 解小华. 非线性模型预测控制的现状与问题[J]. 控制与决策, 2001, 16(4): 385-391.
CHEN Hong, LIU Zhiyuan, XIE Xiaohua. Nonlinear model predictive control: the state and open problems [J]. Control and Decision, 2001, 16(4): 385-391. (in Chinese)
- [5] YOON Y, SHIN J, KIM H J, et al. Model-predictive active steering and obstacle avoidance for autonomous ground vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(7): 741-750.
- [6] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Navigation system for agricultural machines: nonlinear model predictive path tracking [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 82: 32-43.
- [7] 白国星, 刘立, 孟宇, 等. 基于非线性模型预测控制的农用拖拉机避障控制器研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 356-362.
BAI Guoxing, LIU Li, MENG Yu, et al. Study of obstacle avoidance controller of agricultural tractor-trailers based on predictive control of nonlinear model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 356-362. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190441&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.041. (in Chinese)
- [8] 顾青, 白国星, 孟宇, 等. 基于非线性模型预测控制的自动泊车路径跟踪[J]. 工程科学学报, 2019, 41(7): 947-954.
GU Qing, BAI Guoxing, MENG Yu, et al. Path tracking of automatic parking based on nonlinear model predictive control[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(7): 947-954. (in Chinese)
- [9] 白国星, 孟宇, 刘立, 等. 基于可变预测时域及速度的车辆路径跟踪控制[J]. 中国机械工程, 2020, 31(11): 1277-1284.
BAI Guoxing, MENG Yu, LIU Li, et al. Path tracking control of vehicles based on variable prediction horizon and velocity[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(11): 1277-1284. (in Chinese)
- [10] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Learning in centralized nonlinear model predictive control: application to an autonomous tractor-trailer system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 23(1): 197-205.
- [11] SHEN C, BUCKHAM B, SHI Y. Modified C/GMRES algorithm for fast nonlinear model predictive tracking control of AUVs [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(5): 1896-1904.
- [12] OYELERE S S. The application of model predictive control (MPC) to fast systems such as autonomous ground vehicles (AGV) [J]. IOSR Journal of Computer Engineering, 2014, 3(3): 27-37.
- [13] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [14] GONG Jianwei, XU Wei, JIANG Yan, et al. Multi-constrained model predictive control for autonomous ground vehicle trajectory tracking[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015, 24(4): 441-443.
- [15] 柯吉, 王伟, 李爱军, 等. 快速模型预测控制用于微型直升机航迹跟踪[J]. 航空工程进展, 2015, 6(3): 366-371.
KE Ji, WANG Wei, LI Aijun, et al. A fast model predictive control approach to trajectory tracking of miniature coaxial helicopter [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(3): 366-371. (in Chinese)
- [16] 张亮修, 吴光强, 郭晓晓. 自主车辆线性时变模型预测路径跟踪控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1595-1603.
ZHANG Liangxiu, WU Guangqiang, GUO Xiaoxiao. Path tracking using linear time-varying model predictive control for autonomous vehicle [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(10): 1595-1603. (in Chinese)
- [17] 王艺, 蔡英凤, 陈龙, 等. 基于模型预测控制的智能车辆路径跟踪控制器设计[J]. 汽车技术, 2017(10): 44-48.
WANG Yi, CAI Yingfeng, CHEN Long, et al. Design of intelligent vehicle path tracking controller based on model predictive control [J]. Automobile Technology, 2017(10): 44-48. (in Chinese)

- YIN Yanxin, WANG Cheng, MENG Zhijun, et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 68 - 74. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180408&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.008. (in Chinese)
- [18] KIANI S, KAMGAR S, RAOUFAT M. Automatic on-line depth control of seeding units using a non-contacting ultrasonic sensor[J]. International Journal of Natural and Engineering Sciences, 2012, 6(2): 39 - 42.
- [19] 谢斌,李皓,朱忠祥,等. 基于倾角传感器的拖拉机悬挂机组耕深自动测量方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4):15 - 21.
XIE Bin, LI Hao, ZHU Zhongxiang, et al. Measuring tillage depth for tractor implement automatic using inclinometer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 15 - 21. (in Chinese)
- [20] 刘立波. 基于 DSP 的激光三角测距传感器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
LIU Libo. Research of laser triangulation measurement sensor based on DSP[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [21] 普晋亚. PSD 激光三角测距系统设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
PU Jinya. Design of PSD laser triangulation measurement system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [22] AUGER F, HILAIRET M, GUERRERO J M, et al. Industrial applications of the Kalman filter: a review[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5458 - 5471.
- [23] SUN Xiaojun, YAN Guangming, ZHANG Bo. Kalman smoother and weighted fusion algorithm for fractional systems[C]// Proceedings of 2nd International Conference on Measurement, Information and Control, 2013: 151 - 158.
- [24] 刘庆华, 仲海啸, 陶峰, 等. 卡尔曼滤波融合新算法及其船舶高精度液位测量的应用[J]. 中国造船, 2016, 57(2): 192 - 200.
LIU Qinghua, ZHONG Haixiao, TAO Feng, et al. Kalman filter fusion algorithm and its application in highly precise measurement of liquid level in ship tank[J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(2):192 - 200. (in Chinese)
- [25] MARELLI D, ZAMANI M, FU M, et al. Distributed Kalman filter in a network of linear systems[J]. Systems & Control Letters, 2018, 116: 71 - 77.
- [26] WU Z, FU M, XU Y, et al. A distributed Kalman filtering algorithm with fast finite-time convergence for sensor networks[J]. Automatica, 2018, 95: 63 - 72.
- [27] NY/T 741—2003 深松、耙耨的机械作业质量[S]. 2003.

~~~~~

(上接第 52 页)

- [18] 张万枝, 白文静, 吕钊钦, 等. 线性时变模型预测控制器提高农业车辆导航路径自动跟踪精度[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13):104 - 111.  
ZHANG Wanzhi, BAI Wenjing, LÜ Zhaoqin, et al. Linear time-varying model predictive controller improving precision of navigation path automatic tracking for agricultural vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13):104 - 111. (in Chinese)
- [19] GUTJAHR B, GRÖLL L, WERLING M. Lateral vehicle trajectory optimization using constrained linear time-varying MPC[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(6):1586 - 1595.
- [20] KANG C M, LEE S H, CHUNG C C. On-road path generation and control for waypoints tracking[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(3):36 - 45.
- [21] GRAF PLESSEN M M, BEMPORAD A. Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines[J]. Biosystems Engineering, 2017, 153:28 - 41.
- [22] JI J, KHAJEPOUR A, MELEK W W, et al. Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multiconstraints[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2):952 - 964.
- [23] 冀杰, 唐志荣, 吴明阳, 等. 面向车道变换的路径规划及模型预测轨迹跟踪[J]. 中国公路学报, 2018, 31(4):172 - 179.  
JI Jie, TANG Zhirong, WU Mingyang, et al. Path planning and tracking for lane changing based on model predictive control [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 172 - 179. (in Chinese)
- [24] BAI G, LIU L, MENG Y, et al. Path tracking of mining vehicles based on nonlinear model predictive control[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1372.
- [25] BAI G, MENG Y, LIU L, et al. A new path tracking method based on multilayer model predictive control[J]. Applied Sciences, 2019, 9(13): 2649.
- [26] BAI G, MENG Y, LIU L, et al. Review and comparison of path tracking based on model predictive control[J]. Electronics, 2019, 8(10): 1077.