

基于坐标补偿的自动泊车系统无模型自适应控制

侯忠生¹ 董航瑞¹ 金尚泰¹

摘要 针对自动泊车系统, 提出了无模型自适应控制 (Model-free adaptive control, MFAC) 方案. 控制方案的设计仅利用泊车系统的前轮转角输入数据和车身角输出数据, 不包含车辆模型信息. 因此, 针对不同车型的自动泊车系统, 该方案均能实现无模型自适应控制. 为了改善期望轨迹的坐标跟踪误差, 进一步提出基于坐标补偿的无模型自适应控制方案, 该方案由控制算法、参数估计算法、参数重置算法和坐标补偿算法构成. 针对不同车型不同泊车速度的仿真结果表明, 基于坐标补偿的 MFAC 方案和原型 MFAC 方案均能较好地完成自动泊车过程, 且基于坐标补偿的 MFAC 方案相比原型 MFAC 方案和 PID 控制方案, 在轨迹坐标和车身角等方面均具有更小的跟踪误差和更快的响应速度.

关键词 无模型自适应控制, 自动泊车, PID, 坐标补偿

引用格式 侯忠生, 董航瑞, 金尚泰. 基于坐标补偿的自动泊车系统无模型自适应控制. 自动化学报, 2015, 41(4): 823–831

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140026

Model-free Adaptive Control with Coordinates Compensation for Automatic Car Parking Systems

HOU Zhong-Sheng¹ DONG Hang-Rui¹ JIN Shang-Tai¹

Abstract In this paper, a model-free adaptive control (MFAC) scheme is proposed for automatic car parking systems. The design of the proposed scheme only depends on the steering angle and the orientation angle of the car, and it does not involve any model information of the car. Therefore, the MFAC based automatic parking system is applicable to different kinds of cars. In order to further reduce the desired trajectory coordinate tracking error, a modified MFAC scheme with coordinates compensation is also proposed, which consists of a control algorithm, a parameter estimation algorithm, a parameter reset algorithm, and a coordinates compensation algorithm. A simulation comparison among MFAC scheme with coordinates compensation, prototype MFAC scheme, and PID control algorithm is given for different kinds of cars with different parking speeds. It is shown that both the prototype MFAC scheme and the MFAC scheme with coordinates compensation can better finish the automatic parking process, and the MFAC scheme with coordinates compensation has smaller tracking errors and more rapid responses to the orientation angle of the car and the trajectory coordinates than the prototype MFAC and PID schemes.

Key words Model-free adaptive control (MFAC), automatic car parking, PID, coordinates compensation

Citation Hou Zhong-Sheng, Dong Hang-Rui, Jin Shang-Tai. Model-free adaptive control with coordinates compensation for automatic car parking systems. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(4): 823–831

当今汽车保有量越来越多, 公路、街道、停车场、居民小区等拥挤不堪, 可利用的泊车空间越来越少; 另一方面, 驾车新手逐年增多, 由于驾驶技术不熟练导致的各种问题也随之增多. 美国密歇根大学交通

研究所的研究表明^[1], 泊车导致的事故占各类事故的 44%, 其中大约 1/2~3/4 的泊车碰撞是倒车造成的, 而手动泊车是驾驶员容易出问题而导致交通事故的一个重要原因.

自动泊车系统可避免泊车事故, 它利用传感器技术、计算机技术和自动控制技术准确地感知泊车环境, 同时规划出一条可行的最优泊车路径, 然后控制车辆自动完成该路径的跟踪控制, 将车辆安全准确地停入车位^[2]. 泊车的基本类型如图 1 所示, 包括平行泊车、垂直泊车和斜行泊车三种. 平行泊车在日常生活最为常见, 停车时大多无人指导帮助, 泊车空间相对狭小, 因此难度较大, 对新手和多数女性司机是非常困难的事情. 因此, 平行自动泊车系统成

收稿日期 2014-01-17 录用日期 2014-03-14
Manuscript received January 17, 2014; accepted March 14, 2014
国家自然科学基金 (61120106009, 61433002), 中央高校基本科研业务费 (2014JBM005) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61120106009, 61433002) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2014JBM005)
本文责任编辑 高会军
Recommended by Associate Editor GAO Hui-Jun
1. 北京交通大学电子信息工程学院先进控制系统研究所 北京 100044
1. Advanced Control Systems Laboratory, School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044

为当前研究的热点^[3-4], 本文工作仅就平行泊车进行研究.

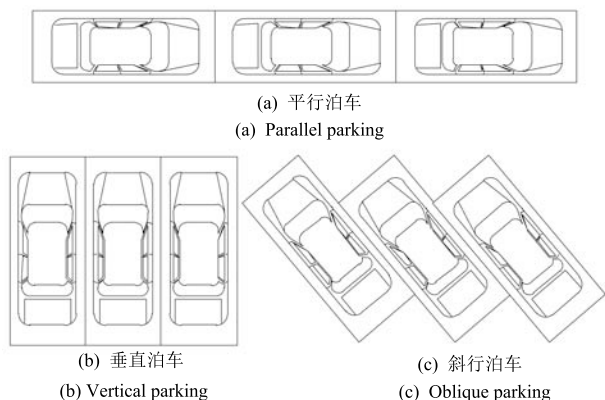


图 1 泊车分类

Fig. 1 Classification of parking

平行泊车过程通常分为探测车位、路径规划和路径跟踪三个步骤^[5]. 当司机准备泊车时, 启动自动泊车系统, 汽车沿路边行进过程中, 系统开始自动搜索可用的泊车位. 如果车位可用, 则泊车控制器规划出一条目标泊车轨迹, 并且控制电子助力转向系统, 引导汽车泊入目标车位, 最后微调前后位置和前轮方向, 即完成自动泊车的过程^[6].

自动泊车过程需要控制方向盘转角和车速, 保证车身角与运行轨迹切线方向一致, 才可能保证汽车沿着规划好的路径泊车. 常见汽车为四轮车, 其动力学模型可以转化为非完整链式系统^[7], 基于非完整链式系统可以设计相应的控制算法. 但自动泊车过程具有非线性、时变、多变量等特点, 很难建立起非完整链式系统的准确模型, 即使模型建立起来, 相应的控制算法也非常复杂, 计算量很大, 因此这种方法很难推广应用. 文献 [8] 以前轮转角为控制器输出, 以速度误差为控制器输入, 设计了 Fuzzy-PID 控制器. 文献 [9] 采用模糊控制算法, 以汽车坐标位置误差和车身角误差为输出, 以前轮转角为输入, 设计了基于模糊控制器的自动泊车系统. 文献 [10] 针对不同的泊车情形, 分别设计了四种模糊逻辑控制器, 并在基于现场可编程门阵列 (Field programmable gate array, FPGA) 的小车机器人上做了实验验证. 文献 [11] 中提出的模糊控制器设计采用汽车位置坐标、车身方向、车速和轨迹曲率作为输入, 以行进方向、车速和目标曲率大小为输出, 并在试验车上做了尝试. 文献 [12] 提出的基于神经网络的控制方法以车身位置坐标、车身角等作为人工神经网络的输入, 以车速、前轮转角等作为人工神经网络的输出, 并在仿真软件中实现自动泊车虚拟过程. 但目前市面上

车型繁多、尺寸各异, 性能也各不相同. 对每种新车型, PID 控制器参数要重新整定, 模糊控制规则要重新制定, 神经网络控制要重新训练, 且计算量大. 因此, 上述算法建立的自动泊车系统可移植性较差.

目前, 数据驱动方法已应用到控制、决策、调度、故障诊断等多个领域^[13-14]. 文献 [15-16] 中提出了系统的无模型自适应控制 (Model free adaptive control, MFAC) 理论与方法, 它仅依赖受控系统的 I/O 数据, 不包括任何受控系统的模型信息, 能够实现未知受控系统的参数自适应控制和结构自适应控制. 目前, MFAC 方法已经在智能电网、化工、焊接过程、风力发电、城市快速路、人工心脏心率调节等领域中得到成功的应用^[17-22]. 理论分析、仿真研究和实际应用均表明, MFAC 方法简单实用、计算负担小、易于实现且鲁棒性强, 能够处理未知非线性时变系统的控制问题^[23].

本文针对泊车系统提出了基于车身角的原型无模型自适应控制和基于坐标补偿的无模型自适应控制方案, 前者由控制算法、参数估计算法和参数重置算法构成, 后者在前者基础上加入了坐标补偿算法. 两种控制方案的设计仅利用自动泊车系统的 I/O 数据, 不包括车辆模型信息, 因此, 针对不同车型的自动泊车系统均能实现无模型自适应控制, 并且基于坐标补偿的无模型自适应控制方案通过引入坐标补偿算法得到了更好的控制效果. 基于坐标补偿的 MFAC、原型 MFAC 和 PID 控制算法在不同车型、不同车速下的仿真比较表明, 与原型 MFAC 方案和 PID 控制算法相比, 带坐标补偿的 MFAC 方案在车身角、 x 轴方向和 y 轴方向上的跟踪误差均较小, 具有明显的优越性.

1 自动泊车过程问题描述

1.1 车位探测

车位探测示意图如图 2 所示. 在汽车前方、后方和两侧布设超声波探头, 前后方的超声波探头用于确保泊车安全, 两侧的超声波探头用于检测车位. 汽车准备靠边停车时, 启动自动泊车系统, 该系统通过汽车侧面的超声波探头检测距离信息, 若路边有停靠车辆, 则汽车右侧探头检测距离为 d_1 (m), 否则检测距离为 d_2 (m). 若有车位, 可得到图中点划线脉冲, 根据车速和脉冲持续时间即可获得车位的长度 L_p , 若大于最小可用车位长度 $L_{P_{min}}$, 则标识为可用车位. 若车位不可用, 则继续前进, 直到找到可用车位. 找到可用车位后, 系统进入路径规划阶段.

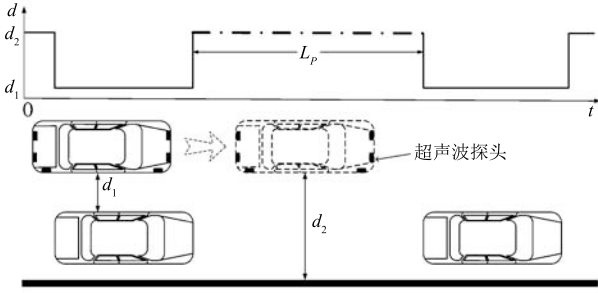


图2 车位探测示意图

Fig. 2 Diagram of parking space detection

1.2 路径规划

平行泊车过程按照司机的驾驶经验, 通常分为四个阶段, 即直线倒车、右打轮倒车、轮回正直线倒车和左打轮倒车至终点. 据此泊车经验并借鉴文献 [5, 24] 中的三段式路径规划方法, 给出本文的路径规划示意图 (如图 3 所示). 三块矩形分别为三个停车位, 其中两边的停车位已被占用, 中间停车位可用. W_c 为汽车宽度, L_c 为汽车长度, L_p 为泊车位长度, L 为前后轮轴距, ΔS 为两车之间的安全距离, d 为车身中线与路边车辆的距离. 按照图 3 所示建立直角坐标系, 其中停车位径向中轴线为 x 轴, 距后方车头 ΔS 为 y 轴. 由于后轮轨迹在车体运动过程中能够完全体现车体的运动轨迹^[24], 本文将后轮轴线中心坐标作为车体运动坐标, 泊车路径即为后轮轴线中点的运动路径. 自动泊车始点为 P_5 , 终点为坐标原点 O , 四个阶段的泊车路径分别为 P_5P_4 直线段、 P_4P_2 圆弧、 P_2P_0 直线段和 P_0O 圆弧. P_0O 圆弧与 x 轴相切于原点 O , 圆弧半径 R_1 需大于等于汽车最小转弯半径. 为保证不与前车相撞, 以前车的左后方为圆心做半径为 $R_2 = 0.5W_c + \Delta S$ 的圆弧, 泊车轨迹与前车距离设计为等于 R_2 即可. 做两个圆弧的公切线, 与两个圆弧的切点分别为 P_0 和 P_1 , 公切线与 P_5P_4 直线段的延长线交于 P_3 . 直线段 P_1P_0 与 P_5P_4 之间通常用圆弧 P_4P_2 过渡, 该圆弧与 P_3P_0 相切于 P_2 , 与 P_5P_3 相切于 P_4 , 半径大小由线段 P_4P_3 的长度决定, 原则上只需满足 $R_3 > R_1$ 即可.

根据上述路径规划方法, 若以点 O 为坐标原点, 由几何关系, 可分别给出点 P_0 , P_2 , P_4 的坐标如下:

$$P_0 : (R_1 \sin \alpha, R_1(1 - \cos \alpha)) \quad (1)$$

$$P_2 : (X_{p4} - L_{34}(1 + \cos \alpha), Y_{p4} - L_{34} \sin \alpha) \quad (2)$$

$$P_4 : (X_{p4}, Y_{p4}) \quad (3)$$

其中, $X_{p4} = (R_1/\cos \alpha - R_1 + d + 0.5W_c)/\tan \alpha$,

$Y_{p4} = d + 0.5W_c$, L_{34} 为线段 P_3P_4 的长度, α 为直线 P_3P_0 与 x 轴正向的夹角, 可通过以下方程求得:

$$\tan \alpha = \frac{\frac{W_c}{2} + R_2 \cos \alpha - R_1(1 - \cos \alpha)}{L_p - R_1 \sin \alpha - R_2 \sin \alpha - \Delta S} \quad (4)$$

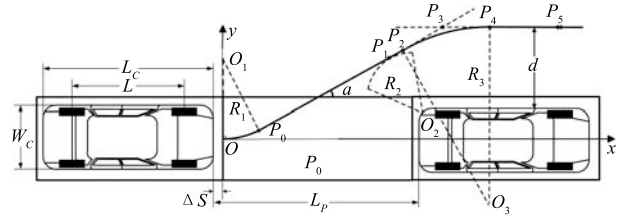


图3 自动泊车路径规划

Fig. 3 Path planning of automatic parking

根据路径规划可知, 当线段 P_0P_1 长度等于车长 L_c 时, 得到最短可用泊车位 $L_{P\min}$:

$$L_{P\min} = (R_1 + R_2) \sin \alpha_0 + L_c \cos \alpha_0 \quad (5)$$

其中, α_0 通过以下方程求得:

$$L_c \sin \alpha_0 = (R_1 + R_2) \cos \alpha_0 + 0.5W_c - R_1 \quad (6)$$

1.3 路径跟踪

1.3.1 四轮车动力学模型

考虑泊车过程速度较低, 车轮无侧滑现象, 本文采用国内外公认的四轮车动力学模型^[3, 24-25] 如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{v \tan \beta}{L} \end{cases} \quad (7)$$

其中, x 和 y 分别是后车轴中点的横坐标和纵坐标, v 为车速, L 为前后轮轴距, θ 为车体径向轴与 x 轴正向间的夹角 (车身角), β 为前轮转角. 示意图如图 4 所示.

因实际应用中, 微处理器处理信号都是数字信号, 因此模型 (7) 通常离散化为

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + Tv \cos(\theta(k)) \\ y(k+1) = y(k) + Tv \sin(\theta(k)) \\ \theta(k+1) = \theta(k) + \frac{Tv \tan(\beta(k))}{L} \end{cases} \quad (8)$$

其中, T 为采样时间.

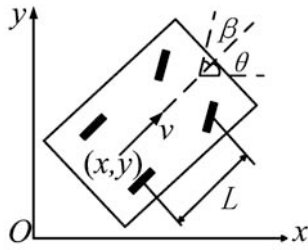


图4 车辆模型

Fig. 4 Vehicle model

除此之外, 汽车前轮受最大转向角 β_{\max} 限制, 即 $|\beta(k)| \leq \beta_{\max}$.

1.3.2 控制目标

从动力学模型看出, 在泊车速度变化不大的情况下, 汽车的实时位置坐标 (x, y) 由车身角 θ 完全确定. 即若汽车车身角时刻都与此刻的目标曲线斜率一致, 就可以保证汽车时刻沿着目标轨迹行进. 由此可见, 减小汽车车身角的跟踪误差对于提高自动泊车精度至关重要. 因此, 自动泊车系统的控制目标为保持车速恒定, 通过控制前轮转角 β (与方向盘转角成正比) 来控制车身角 θ , 使之与目标车身角 θ^* 相等, 以此确保汽车实时坐标落在目标轨迹上. 以车身角为控制目标的另一个原因是, 如果在倒车过程中单纯跟踪目标轨迹坐标, 而忽视车身角误差, 那么极易与周边车辆发生碰撞.

2 原型 MFAC 方案

自动泊车系统的基本控制框图如图 5 所示. 在该系统中, 汽车以恒定速度 v_0 泊车, MFAC 控制器通过控制前轮转角 β 来控制 θ 跟踪 θ^* .

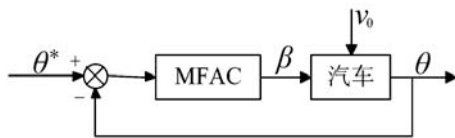


图5 自动泊车控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of automatic parking control system

由于 MFAC 方案仅需要利用受控系统的 I/O 数据, 而不需要对车辆建模. 路径规划部分已给出了目标车身角, 因此以下直接给出针对自动泊车系统的 MFAC 方案. 首先, 将汽车自动泊车非线性系统转化为如下的动态线性化数据模型:

$$\Delta\theta(k+1) = \phi_1(k)\Delta\theta(k) + \phi_2(k)\Delta\beta(k) \quad (9)$$

其中, θ 和 β 分别为车身角和前轮转角, $\phi_1(k)$ 和 $\phi_2(k)$ 为系统的伪偏导数. $\Delta\theta(k+1) = \theta(k+1) - \theta(k)$, $\Delta\beta(k) = \beta(k) - \beta(k-1)$. 考虑如下控制输入准则函数:

$$J(\beta(k)) = (\theta^*(k+1) - \theta(k+1))^2 + \lambda(\Delta\beta(k))^2 \quad (10)$$

其中, $\lambda > 0$ 是权重因子.

将式 (9) 代入式 (10), 对 $\beta(k)$ 求导并令其值等于零, 得控制律如下:

$$\beta(k) = \beta(k-1) + \frac{\rho\phi_2(k)(\theta^*(k+1) - \theta(k) - \phi_1(k)\Delta\theta(k))}{\lambda + \phi_2^2(k)} \quad (11)$$

由于参数 $\phi_1(k)$ 和 $\phi_2(k)$ 未知, 根据如下参数估计准则函数:

$$J\left(\begin{bmatrix} \phi_1(k) \\ \phi_2(k) \end{bmatrix}\right) = \mu \left\| \begin{bmatrix} \phi_1(k) \\ \phi_2(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k-1) \\ \hat{\phi}_2(k-1) \end{bmatrix} \right\|^2 + \left| \Delta\theta(k) - [\Delta\theta(k-1), \Delta\beta(k-1)] \begin{bmatrix} \phi_1(k) \\ \phi_2(k) \end{bmatrix} \right|^2 \quad (12)$$

其中, μ 是权重因子.

根据最优条件, 利用矩阵求逆引理, 可给出 $\phi_1(k)$ 和 $\phi_2(k)$ 的估计算法如下:

$$\begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k) \\ \hat{\phi}_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k-1) \\ \hat{\phi}_2(k-1) \end{bmatrix} + \eta \begin{bmatrix} \Delta\theta(k-1) \\ \Delta\beta(k-1) \end{bmatrix} \times \frac{\Delta\theta(k) - [\hat{\phi}_1(k-1), \hat{\phi}_2(k-1)] \begin{bmatrix} \Delta\theta(k-1) \\ \Delta\beta(k-1) \end{bmatrix}}{\mu + [\Delta\theta(k-1), \Delta\beta(k-1)] \begin{bmatrix} \Delta\theta(k-1) \\ \Delta\beta(k-1) \end{bmatrix}} \quad (13)$$

其中, $\hat{\phi}_1(k)$ 和 $\hat{\phi}_2(k)$ 分别为 $\phi_1(k)$ 和 $\phi_2(k)$ 的估计值. 加入步长因子 $\eta \in (0, 2]$ 是为了使控制算法设计具有更大的灵活性.

为了使参数估计算法具有良好的跟踪时变参数的能力, 给出如下参数重置算法:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k) \\ \hat{\phi}_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(1) \\ \hat{\phi}_2(1) \end{bmatrix}, \\ \text{若 } \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k), \hat{\phi}_2(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k) \\ \hat{\phi}_2(k) \end{bmatrix} \leq \varepsilon \\ \text{或 } [\Delta\theta(k-1), \Delta\beta(k-1)] \begin{bmatrix} \Delta\theta(k-1) \\ \Delta\beta(k-1) \end{bmatrix} \leq \varepsilon \\ \text{或 } \operatorname{sgn}(\hat{\phi}_2(k)) \neq \operatorname{sgn}(\hat{\phi}_2(1)) \end{cases} \quad (14)$$

其中, ε 为给定的小正数.

至此, 得出自动泊车系统的原型 MFAC 方案由式 (11)、(13) 和 (14) 构成.

3 基于坐标补偿的 MFAC 方案

3.1 目标车身角补偿算法

在实际控制过程中, 实际车身角往往与目标车身角存在跟踪误差, 那么即使在此后的倒车过程中车身角能够完全跟踪目标车身角, 实际泊车轨迹也将与目标轨迹存在稳态误差.

为了消除稳态误差, 本文设计了基于坐标补偿的无模型自适应控制方案. 修正后的控制方案如图 6 所示. 汽车实时位置可利用陀螺仪和光电编码器采集的数据通过惯性导航方法得出. 目标车身角修正补偿算法则根据当前位置、下一时刻目标位置和下一时刻目标车身角, 给出下一时刻修正后的目标车身角. MFAC 控制器则根据修正后的目标车身角和当前车身角的差值, 修正前轮转角.

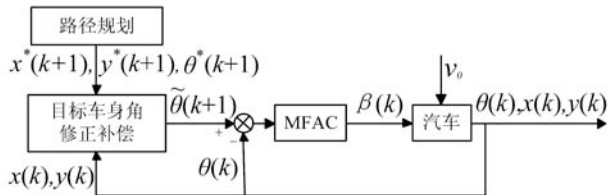


图 6 基于坐标补偿的自动泊车控制系统框图

Fig. 6 Block diagram of automatic parking control system with coordinates compensation

目标车身角修正补偿原理如图 7 所示. 汽车从 E 点向 F 点倒车泊车, 实弧线 EF 表示目标轨迹, 点划线 $EP(k)$ 表示实际泊车轨迹. 点 $P(k)$ 和 $P^*(k+1)$ 分别表示汽车当前位置和下一时刻目标位置. $\theta^*(k+1)$ 和 $\gamma(k)$ 分别表示下一时刻的目标车身角和点 $P^*(k+1) \rightarrow P(k)$ 的方向角. 由图 7 可知, 汽车当前实际位置 $P(k)$ 已脱离目标轨迹, 位于目标轨

迹的上方.

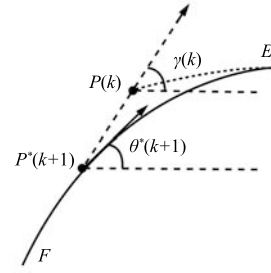


图 7 目标车身角补偿原理

Fig. 7 The compensation theory of the target orientation angle of the car

在泊车过程中, 如果轨迹出现了以上偏差, 则目标车身角 $\theta^*(k+1)$ 需做修正补偿, 使补偿后的目标车身角包含轨迹误差信息, 以期在跟踪目标车身角的同时, 消除轨迹误差. 目标车身角修正补偿算法设计如下:

$$\tilde{\theta}(k+1) = \theta^*(k+1) + \alpha(\gamma(k) - \theta^*(k+1)) \quad (15)$$

其中, $\alpha > 0$ 为可调参数, 用以调节补偿力度, $\tilde{\theta}(k+1)$ 为补偿后的目标车身角. $\gamma(k)$ 可由汽车的当前坐标 $(x(k), y(k))$ 以及下一时刻的目标坐标 $(x^*(k+1), y^*(k+1))$ 求得:

$$\gamma(k) = \arctan\left(\frac{y(k) - y^*(k+1)}{x(k) - x^*(k+1)}\right) \quad (16)$$

3.2 基于坐标补偿的 MFAC 算法

结合目标车身角补偿算法和原型 MFAC 算法, 可给出基于坐标补偿的 MFAC 算法 (17)~(21). 该算法在线调整参数少、计算量小、易于实现, 针对不同类型均可实现自动泊车系统的自适应控制.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k) \\ \hat{\phi}_2(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k-1) \\ \hat{\phi}_2(k-1) \end{bmatrix} + \eta \begin{bmatrix} \Delta\theta(k-1) \\ \Delta\beta(k-1) \end{bmatrix} \times \\ &\frac{\Delta\theta(k) - \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k-1), \hat{\phi}_2(k-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta(k-1) \\ \Delta\beta(k-1) \end{bmatrix}}{\mu + \begin{bmatrix} \Delta\theta(k-1), \Delta\beta(k-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta(k-1) \\ \Delta\beta(k-1) \end{bmatrix}} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k) \\ \hat{\phi}_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(1) \\ \hat{\phi}_2(1) \end{bmatrix}, \\ \text{若 } \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k), \hat{\phi}_2(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\phi}_1(k) \\ \hat{\phi}_2(k) \end{bmatrix} \leq \varepsilon \\ \text{或 } [\Delta\theta(k-1), \Delta\beta(k-1)] \begin{bmatrix} \Delta\theta(k-1) \\ \Delta\beta(k-1) \end{bmatrix} \leq \varepsilon \\ \text{或 } \operatorname{sgn}(\hat{\phi}_2(k)) \neq \operatorname{sgn}(\hat{\phi}_2(1)) \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\gamma(k) = \arctan\left(\frac{y(k) - y^*(k+1)}{x(k) - x^*(k+1)}\right) \quad (19)$$

$$\tilde{\theta}(k+1) = \theta^*(k+1) + \alpha(\gamma(k) - \theta^*(k+1)) \quad (20)$$

$$\beta(k) = \beta(k-1) + \frac{\rho\hat{\phi}_2(k) (\tilde{\theta}(k+1) - \theta(k) - \hat{\phi}_1(k) \Delta\theta(k))}{\lambda + \hat{\phi}_2^2(k)} \quad (21)$$

4 仿真结果

为验证基于坐标补偿的 MFAC 方案的优越性, 针对两种车型, 分别给出基于坐标补偿的 MFAC 方案 (17)~(21)、原型 MFAC 方案 (11)、(13)、(14) 和 PID 控制方案在不同泊车速度 ($v = 1.44 \text{ km/h}$ 和 $v = 2.88 \text{ km/h}$) 下的仿真对比试验. PID 控制器采用如下位置式控制算法:

$$\beta(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=1}^k e(j) + K_d (e(k) - e(k-1)) \quad (22)$$

其中, $e(k) = \theta^*(k) - \theta(k)$ 为车身角误差, K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例、积分和微分参数.

PID 参数的选取是兼顾两种车型, 经过多次仿真试凑比较, 综合考虑快速性和超调小的原则, 得出的一组较优参数. MFAC 方法具有较强的鲁棒性, 其性能受参数变化影响较小, $\phi_1(k)$ 和 $\phi_2(k)$ 为慢时变参数, 对系统的结构、阶数和参数的变化不敏感, 试验发现在一定范围内选取不同的参数值, 均能得到较好的控制效果, 参数设置相比 PID 更容易. 三种算法的参数设置见表 1.

仿真包括两部分: 1) 一汽-大众 CC (2012 款) 的自动泊车仿真; 2) 奥迪 A6L 的自动泊车仿真.

表 1 算法参数
Table 1 Algorithm parameters

原型 MFAC	基于坐标补偿的 MFAC	PID
$\hat{\phi}_1(1) = 2.6$	$\hat{\phi}_1(1) = 2.6$	$K_p = 21.5$
$\hat{\phi}_2(1) = 0.4$	$\hat{\phi}_2(1) = 0.4$	$K_i = 0.18$
$\rho = 7.6$	$\rho = 7.6$	$K_d = 0.08$
$\varepsilon = 10^{-4}$	$\varepsilon = 10^{-4}$	
$\mu = 0.01$	$\mu = 0.01$	
$\eta = 0.01$	$\eta = 0.01$	
$\lambda = 0.06$	$\lambda = 0.06$	
	$\alpha = 0.1$	

4.1 一汽-大众 CC (2012 款) 自动泊车仿真结果

一汽-大众 CC (2012 款) 的基本尺寸和停车位等信息见表 2. 为了保护汽车性能, 应尽量避免汽车方向盘处于最大转角, 此处半径取值为

$$R_1 = \frac{L}{\tan\left(\frac{\beta_{\max}}{1.1}\right)} \quad (23)$$

表 2 一汽-大众 CC 基本参数
Table 2 Basic parameters of FAW-VW CC

参数	数值
L_c	4.799 m
W_c	1.855 m
L	2.712 m
L_p	5.600 m
β_{\max}	42.00°
L_{34}	1.000 m
ΔS	0.500 m

一汽-大众 CC 在不同车速下的自动泊车仿真结果如图 8 和图 9, 其中, 图 8 为在速度 $v = 1.44 \text{ km/h}$ 下的泊车误差曲线, 图 9 为在速度 $v = 2.88 \text{ km/h}$ 下的泊车误差曲线. 从图 8 可以看出, 基于坐标补偿的 MFAC 方案与原型 MFAC 方案的控制效果均优于 PID 控制方案. 值得指出的是, 由于加入了坐标补偿算法, 使得基于坐标补偿的 MFAC 方案在跟踪目标车身角的同时消除了轨迹坐标的跟踪误差, 因此得到了最好的跟踪效果. 从图 9 可以看出, 泊车速度提高后, 基于坐标补偿的 MFAC 方案的跟踪误差仍小于原型 MFAC 和 PID 控制方案.

因此, 对于一汽-大众 CC, 基于坐标补偿的 MFAC 方案能够相对较好地完成不同车速下的自动泊车过程。

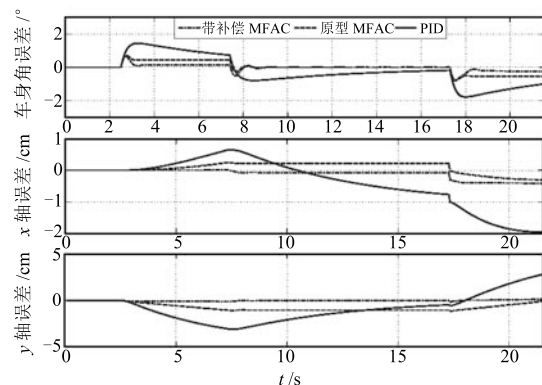


图 8 一汽-大众泊车误差对比 ($v = 1.44 \text{ km/h}$)

Fig. 8 Parking error comparisons of FAW-VW ($v = 1.44 \text{ km/h}$)

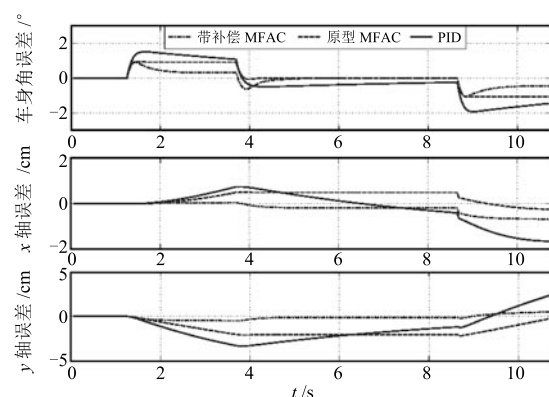


图 9 一汽-大众泊车误差对比 ($v = 2.88 \text{ km/h}$)

Fig. 9 Parking error comparisons of FAW-VW ($v = 2.88 \text{ km/h}$)

4.2 奥迪 A6L 自动泊车仿真结果

奥迪 A6L 的基本尺寸和停车位等信息如表 3 所示, 半径 R_1 的计算方法与式 (23) 相同, 算法参数与表 1 相同。

奥迪 A6L 在不同车速下的自动泊车仿真结果如图 10 和图 11 所示, 其中, 图 10 为在速度 $v = 1.44 \text{ km/h}$ 下的泊车误差曲线, 图 11 为在速度 $v = 2.88 \text{ km/h}$ 下的泊车误差曲线。仿真结果表明, 在算法参数保持不变的前提下, 基于坐标补偿的 MFAC 方案和原型 MFAC 方案相对于 PID 控制方案均具有较高的控制精度, 并且基于坐标补偿的 MFAC 方案的 x 、 y 坐标跟踪误差明显小于原型 MFAC 方案, 验证了所提补偿算法的有效性。当泊车速度提高后, 基于坐标补偿的 MFAC 方案和原型 MFAC 方案的跟踪误差无明显增大, 且前者的跟踪误差仍最小。

表 3 奥迪 A6L 基本参数
Table 3 Basic parameters of Audi A6L

参数	数值
L_c	5.015 m
W_c	1.874 m
L	3.012 m
L_p	5.600 m
β_{\max}	42.00°
L_{34}	1.000 m
ΔS	0.500 m

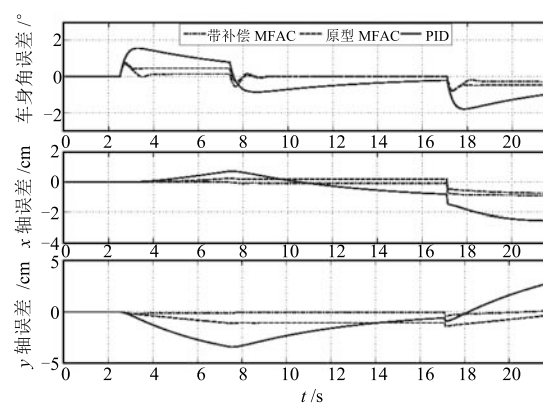


图 10 奥迪 A6L 泊车误差对比 ($v = 1.44 \text{ km/h}$)

Fig. 10 Parking error comparisons of Audi A6L ($v = 1.44 \text{ km/h}$)

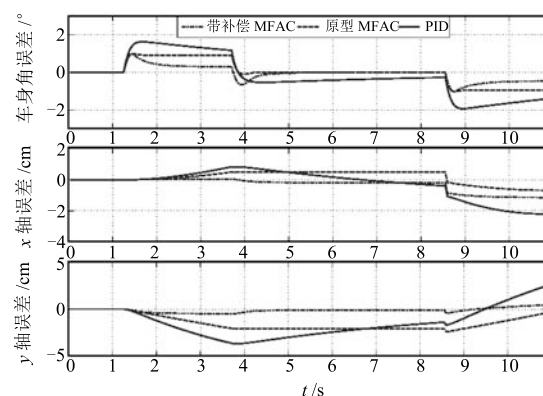


图 11 奥迪 A6L 泊车误差对比 ($v = 2.88 \text{ km/h}$)

Fig. 11 Parking error comparisons of Audi A6L ($v = 2.88 \text{ km/h}$)

通过两种车型在不同车速下的自动泊车仿真可知: 基于坐标补偿的 MFAC 方案和原型 MFAC 方案均能较好地完成不同车型不同车速下的自动泊车过程。相比原型 MFAC 方案和 PID 控制方案, 基于坐标补偿的 MFAC 方案的跟踪误差最小, 响应速度

最快.

5 结论

针对自动泊车系统, 提出了原型 MFAC 方案和基于坐标补偿的 MFAC 方案, 所提方案仅用自动泊车系统的 I/O 数据, 不包含任何模型信息. 提出的基于坐标的补偿算法, 通过在线修正目标车身角, 进一步减小了原型 MFAC 方案的稳态跟踪误差. 给出了两种不同车型在不同车速下的自动泊车仿真, 结果表明, 基于坐标补偿的 MFAC 方案比原型 MFAC 方案和 PID 控制方案在车身角以及 x 、 y 坐标的跟踪方面, 均具有较高的跟踪精度和快速响应能力, 且能够适应不同车速下的自动泊车过程.

References

- Green P. Parking crashes and parking assistance system design: evidence from crash databases, the literature and insurance agent interviews. In: Proceedings of the 2006 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2006. 1685–1700
- Song Jin-Ze. Research on the Key Technology for Auto-Parking System [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, China, 2009.
(宋金泽. 自主泊车系统关键技术研究 [博士学位论文], 国防科学技术大学, 中国, 2009.)
- Demirli K, Khoshnejad M. Autonomous parallel parking of a car-like mobile robot by a neuro-fuzzy sensor-based controller. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, **160**(19): 2876–2891
- Song Jin-Ze, Dai Bin, Shan En-Zhong, Sun Zhen-Ping, He Han-Gen. Trajectory planning approach of autonomous parallel parking with kinodynamic constraints. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2009, **40**(1): 135–141
(宋金泽, 戴斌, 单恩忠, 孙振平, 贺汉根. 融合动力学约束的自动平行泊车轨迹生成方法. 中南大学学报 (自然科学版), 2009, **40**(1): 135–141)
- Jung H G, Lee Y H, Kim J H. Uniform user interface for semiautomatic parking slot marking recognition. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, **59**(2): 616–626
- Kim D, Chung W, Park S. Practical motion planning for car-parking control in narrow environment. *IET Control Theory and Applications*, 2010, **4**(1): 129–139
- Liu K Z, Horii M. An experimental comparison of nonholonomic control methods: automatic parking benchmark. In: Proceedings of the 2007 International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology, and System Integration. Kagawa University, Japan: IEEE, 2007. 1712–1717
- Chen C H, Hsu C W, Yao C C. A novel design for full automatic parking system. In: Proceedings of the 12th International Conference on ITS Telecommunications. Taipei, China: IEEE, 2012. 175–179
- Liang Z, Zheng G Q, Li J S. Application of fuzzy control strategy in automatic parking path planning. In: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Nanchang, China: IEEE, 2012. 132–135
- Li T H, Chang S J, Chen Y X. Implementation of human-like driving skills by autonomous fuzzy behavior control on an FPGA-based car-like mobile robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, **50**(5): 867–880
- Baturone I, Moreno-Velo F J, Sánchez-Solano S, Ollero A. Automatic design of fuzzy controllers for car-like autonomous robots. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2004, **12**(4): 447–465
- Heinen M R, Osorio F S, Heinen F J, Kelber C. SEVA3D: Using artificial neural networks to autonomous vehicle parking control. In: Proceedings of the 2006 International Joint Conference on Neural Networks. Vancouver, Canada: IEEE, 2006. 4704–4711
- Xu Jian-Xin, Hou Zhong-Sheng. Notes on data-driven system approaches. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 668–675
- Wang Hong, Chai Tian-You, Ding Jin-Liang, Martin B. Data driven fault diagnosis and fault tolerant control: some advances and possible new directions. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 739–747
(王宏, 柴天佑, 丁进良, 布朗·马丁. 数据驱动的故障诊断与容错控制: 进展与可能的方向. 自动化学报, 2009, **35**(6): 739–747)
- Hou Zhong-Sheng, Jin Shang-Tai. *Model Free Adaptive Control-Theory and Applications*. Beijing: Science Press, 2013.
(侯忠生, 金尚泰. 无模型自适应控制理论与应用. 北京: 科学出版社, 2013.)
- Hou Zhong-Sheng. The Parameter Identification, Adaptive Control and Model Free Learning Adaptive Control for Non-linear Systems [Ph.D. dissertation], Northeastern University, China, 1994.
(侯忠生. 非线性系统参数辨识、自适应控制及无模型学习自适应控制 [博士学位论文], 东北大学, 中国, 1994.)
- Zhao Yi, Lu Chao, Han Ying-Duo. MIMO model free adaptive wide area power system stabilizer design. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, **53**(4): 453–458, 464
(赵艺, 陆超, 韩英铎. 多输入多输出无模型自适应广域阻尼控制器设计. 清华大学学报 (自然科学版), 2013, **53**(4): 453–458, 464)
- Xu D Z, Jiang B, Shi P. A novel model free adaptive control design for multivariable industrial processes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, DOI: 10.1109/TIE.2014.2308161, 2014.
- Lv F L, Chen H B, Fan C J, Chen S B. A novel control algorithm for weld pool control. *Industrial Robot*, 2010, **37**(1): 89–96
- Lu Xiao-Ping, Li Wei, Lin Yong-Gang. Load control of wind turbine based on model-free adaptive controller. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, **42**(2): 109–114, 129
(鲁效平, 李伟, 林勇刚. 基于无模型自适应控制器的风力发电机载荷控制. 农业机械学报, 2011, **42**(2): 109–114, 129)

- 21 Chi Rong-Hu, Hou Zhong-Sheng. A model-free periodic adaptive control for freeway traffic density via ramp metering. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(7): 1029–1032
(池荣虎, 侯忠生. 基于匝道调节的快速路交通密度的无模型周期自适应控制方法. *自动化学报*, 2010, **36**(7): 1029–1032)
- 22 Gao Bin, Gu Kai-Yun, Zeng Yi, Chang Yu. An anti-suction control for an intra-aorta pump using blood assistant index: a numerical simulation. *Artificial Organs*, 2012, **36**(3): 275–285
- 23 Hou Zhong-Sheng, Xu Jian-Xin. On data-driven control theory: the state of the art and perspective. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 650–667
(侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 650–667)
- 24 Liu K Z, Minh Q D, Inoue T. An exponentially ε -convergent control algorithm for chained systems and its application to automatic parking systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, **14**(6): 1113–1126
- 25 Muller B, Deutscher J, Grodde S. Continuous curvature trajectory design and feedforward control for parking a car. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, **15**(3): 541–553



侯忠生 北京交通大学电子信息工程学院先进控制研究所教授. 主要研究方向为无模型自适应控制理论, 数据驱动控制, 学习控制, 智能交通系统和数据挖掘在医学和交通领域中的应用. 本文通信作者. E-mail: zhshhou@bjtu.edu.cn

(HOU Zhong-Sheng Professor at the Advanced Control Systems Laboratory, School of Elec-

tronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University. His research interest covers model free adaptive control, data-driven control, learning control, intelligent transportation system, and application of data mining in medical and traffic field. Corresponding author of this paper.)



董航瑞 北京交通大学电子信息工程学院先进控制系统研究所硕士研究生. 主要研究方向为无模型自适应控制, 智能交通系统.

E-mail: 11120255@bjtu.edu.cn

(DONG Hang-Rui Master student at the Advanced Control Systems Laboratory, School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University. His research interest covers model free adaptive control and intelligent transportation system.)



金尚泰 北京交通大学电子信息工程学院先进控制研究所讲师. 主要研究方向为无模型自适应控制, 数据驱动控制, 学习控制和智能交通系统.

E-mail: shtjin@bjtu.edu.cn

(JIN Shang-Tai Lecturer at the Advanced Control Systems Laboratory, School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University. His research interest covers model free adaptive control, data driven control, learning control, and intelligent transportation systems.)