

# 基于位姿状态的全向运行型 AGV 路径跟踪优化控制方法

钱晓明<sup>1,2</sup> 朱立群<sup>1,2</sup> 楼佩煌<sup>1,2</sup> 张沪松<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 自动驾驶车自主移动的关键是精准的路径跟踪, 针对 Mecanum 轮全方位移动 AGV 的路径跟踪, 提出了一种基于位姿状态和有限控制步数的路径跟踪优化控制方法。在系统约束条件下, 通过建立系统的运动学模型, 将连续的系统离散化。在目标函数中只包含速度控制量, 同时通过最小化目标函数, 得到系统控制量的控制序列, 从而避免了最优控制的加权矩阵选择难的问题。此外, 有限步的控制序列也有利于实时嵌入式控制器的滚动控制。仿真和实验表明, 对于不同速度, 该算法均能快速、同步、稳定地消除位姿偏差, 且计算量小、方便。

**关键词:** 路径跟踪; 优化控制; 自动导引车; 离散系统

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0020-07

## Optimal Path Tracking Control Method of Omni-directional Mobile AGV Based on Pose State

QIAN Xiaoming<sup>1,2</sup> ZHU Liqun<sup>1,2</sup> LOU Peihuang<sup>1,2</sup> ZHANG Husong<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China  
2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** An optimal control method based on pose state and limited steps of control sequences was presented for path tracking of an omni-directional mobile automated guided vehicles (AGV), as the key of automated guided vehicle autonomous movement was precise path tracking. Firstly, under the system constraints, the continuous system was discretized by establishing the kinematic model and analyzing the kinematic model of the system. Secondly, by selecting the two order integral function as the objective function of the optimal control, a selection of weighted matrix for optimal control was avoided when an objective function only included one item of speed control and a control sequence of the system control quantity was obtained by minimizing objective function. Meanwhile, the limited steps of control sequences were also beneficial to the rolling control of real time embedded controller. In addition, the control efficiency of the system can be improved by reducing the number of control steps under the condition that the control cycle was determined and the control performance was satisfied. Finally, simulation and experiment results showed that when the system was stable, the angle error of the path tracking was within  $2^\circ$ , the distance error was less than 2 mm, and the control time was 0.8 ~ 1.2 s. Thus the algorithm can eliminate pose error quickly, synchronously and stably for different speeds, and the computation was small and convenient.

**Key words:** path tracking; optimal control; automatically guided vehicle; discrete system

## 0 引言

“中国制造 2025”战略的实施以及近年来数字化、无人化工厂、物流业和仓储业的迅速发展, 使自动驾驶车 (Automated guided vehicles, AGV) 的需求量急剧上升。现代制造系统中, 各个物流的传输时

间占整个生产过程的 80% ~ 90%, 物料传输与存储费用占整个零部件加工费用的 30% ~ 40%<sup>[1-2]</sup>, AGV 在缩短物流传输时间、降低物料传输与存储费用方面起到至关重要的作用。因此, 提高 AGV 路径跟踪的效率和精度对推广 AGV 的应用具有至关重要的作用。

收稿日期: 2017-10-24 修回日期: 2017-12-13

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2016004-3) 和中央高校基本科研业务费专项资金项目 (NS2017028)

作者简介: 钱晓明 (1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事智能制造、柔性制造和机器人研究, E-mail: drqian@nuaa.edu.cn

针对路径跟踪问题<sup>[3-9]</sup>,文献[8]提出了一种最优控制策略,通过状态反馈得到合适的控制律,从而使系统的性能指标函数达到最小值。但随着差速驱动轮中心速度的改变,其鲁棒性也随之变化。文献[9]针对全方位移动机器人的延时问题,引入了广义预测控制法,同时将多输入多输出的线性模型分解成单输入单输出模型。在最优化控制中,加权矩阵 $Q$ 、 $R$ 的选择是一个难以避免的难题,文献[8-9]也没能有效地解决这个难题,而目前主要使用试凑法<sup>[10-12]</sup>,即将加权矩阵 $R$ 固定为一个确定的或特殊的矩阵,通过反复实验与仿真从而找到合适的加权矩阵 $Q$ 。

本文提出一种基于相对位姿状态的优化控制,将连续的状态转换成离散的系统,通过有限的纠偏步骤,使角度偏差和距离偏差同步收敛,同时通过建立 Mecanum 轮 AGV 的运动学模型,将目标函数中的加权矩阵求解转换为求解一个有限的控制序列,并且该控制序列是关于控制量的函数,从而根据该有限的控制序列实现对 AGV 的控制,且控制周期取决于控制步数,同时避开 $Q$ 、 $R$ 选择难的问题。

## 1 Mecanum 轮 AGV 运动学模型

本文采用的是视觉导航四轮独立驱动的 Mecanum 轮 AGV 小车,其在平面上具有3个自由度,机动性好<sup>[13]</sup>。且该形式 AGV 的加速度性能在各个方向上比较均匀,加速度的大小基本受各个方向的影响<sup>[9]</sup>。全方位运动 AGV 运动学模型如图1

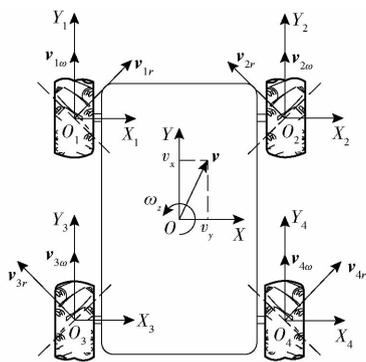


图1 全方位 AGV 运动学模型

Fig.1 Omni-directional AGV kinematic model

所示,AGV 系统运动的逆运动学方程为

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -L_1 - L_2 \\ 1 & -1 & L_1 + L_2 \\ 1 & -1 & -L_1 - L_2 \\ 1 & 1 & L_1 + L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\omega_1$ ——第1个轮子角速度,rad/s  
 $\omega_2$ ——第2个轮子角速度,rad/s

$\omega_3$ ——第3个轮子角速度,rad/s

$\omega_4$ ——第4个轮子角速度,rad/s

$r$ ——轮子半径,mm

$v_x$ ——AGV 沿 X 方向的速度,mm/s

$v_y$ ——AGV 沿 Y 方向的速度,mm/s

$\omega_z$ ——AGV 旋转的角速度,rad/s

$L_1$ ——前后轮距离的一半,mm

$L_2$ ——左右轮中心距离的一半,mm

对式(1)进行变换可得到系统的正运动学方程为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{r}{4} \mathbf{A} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ L_1 + L_2 & L_1 + L_2 & L_1 + L_2 & L_1 + L_2 \end{bmatrix}$$

式(2)、(1)分别为 AGV 系统的正、逆运动学方程。由正逆运动学方程可知,当4个 Mecanum 轮的速度选择恰当时,就可以实现 AGV 在运动平面上的任意运动。由 Rank( $\mathbf{A}$ )为3可知变量 $v_x$ 、 $v_y$ 、 $\omega_z$ 相互独立,从而将原来的4个控制变量转换为3个变量 $v_x$ 、 $v_y$ 、 $\omega_z$ 。其中 $v_x$ 、 $v_y$ 和后续的路径跟踪的距离偏差 $e_d$ 与沿轨迹的切线速度 $v_r$ 相关,而 $\omega_z$ 与路径跟踪的角度偏差 $e_\theta$ 相关。

## 2 基于连续系统离散化的有限步运动预测优化控制

最优控制问题可以简单描述为根据被控对象的数学模型,选择一个容许的控制律,使被控对象按照预定的要求运行,并使给定的性能指标达到最优值。文献[14]通过对控制方程的简化和归一化处理使机器人的控制量 $U_i$ 规整到一个确定的闭区间上,从而得到系统的时间 Bang - Bang 最优控制。

近年来,实时嵌入式控制器<sup>[13-14]</sup>在控制领域中使用越来越多,而一般实时嵌入式控制器都是按步执行的,因此对于控制器而言控制序列即离散系统更能有利于滚动控制<sup>[15-16]</sup>。为了实现对连续的过程实现嵌入式控制,需要把连续的系统离散化。本节首先通过将连续的系统离散化,再选择合适的目标函数,最后求解合适的有限控制序列使系统达到要求的状态。

### 2.1 控制系统性能指标的选取及系统离散化

根据最优控制理论,性能指标是指控制系统在容许的控制律作用下,系统所能达到性能程度,性能

指标的内容和形式取决于最终的目标<sup>[17]</sup>。本文选择积分型性能指标 $J^{[17-18]}$ ,即

$$J = \int L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (3)$$

式中  $\mathbf{x}(t)$ ——系统状态量

$\mathbf{u}(t)$ ——系统控制量

$L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t)$ —— $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{u}(t)$ 和 $t$ 的连续函数

文献[10-12,18]利用LQR优化方法,将目标函数具体化为

$$J = \frac{1}{2} \int (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (4)$$

式中  $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ ——加权矩阵

文献[5]认为 $\mathbf{Q}$ 的选取不宜过大,否则系统控制器的输出会趋向饱和,同时会使系统对噪声比较敏感,系统的抗干扰能力下降。文献[10]认为距离偏差不能过大,否则会产生角度超调,并且前轮的转角会超过机械机构的极限。本节考虑约束条件

$$\begin{cases} |v_x| \leq v_{x\max} \\ |v_y| \leq v_{y\max} \\ |\omega_z| \leq \omega_{z\max} \\ |a| \leq a_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $v_{x\max}$ —— $X$ 方向最大速度

$v_{y\max}$ —— $Y$ 方向最大速度

$\omega_{z\max}$ ——AGV最大旋转角速度

$a_{\max}$ ——系统的最大加速度

$a$ ——系数的加速度

将当前的状态偏差分为有限步进行消除,在最优控制中通过求解控制量的一个有限最优序列,将 $\mathbf{Q}$ 的试凑难题转换为求解控制量序列,此时将连续的系统转换为一个离散的系统,不仅避免了 $\mathbf{Q}$ 的求解,也有利于嵌入式控制器实时滚动控制。

由上述可知, $v_x$ 、 $v_y$ 、 $\omega_z$ 相互独立,其中 $v_x$ 、 $v_y$ 和路径跟踪的距离偏差 $e_d$ 与沿轨迹的切线速度 $v_\tau$ 相关, $\omega_z$ 与路径跟踪的角度偏差 $e_\theta$ 相关。因此,在系统性能满足的前提下,在确定的控制步数内,总可以选择合适的角度控制量 $\Delta\omega$ 使角度偏差同步于距离偏差收敛于零。又当AGV进行路径跟踪时,希望AGV沿路径的切线速度 $v_\tau$ 是一定的,可知 $v_x$ 、 $v_y$ 之间存在一定的关系,所以式(4)可以简化为只包含控制量 $u$ 的形式,且控制量中只包含一个控制量 $v_x$ 。所以,可以将系统的目标函数离散为

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} v_x^2(k) \quad (6)$$

式中  $k$ ——系统控制步数

## 2.2 基于位姿状态的控制模型的建立

本文研究的是基于位姿状态的视觉导引四轮独立驱动的Mecanum轮路径跟踪问题<sup>[19-21]</sup>,其结构简图如图2所示。AGV在路径跟踪过程中,相对于路径有一定的位姿状态,在某一具体时刻该位姿状态主要表现为CCD摄像机实时采集到的角度偏差和距离偏差,而路径跟踪的实质是在产生角度偏差和距离偏差时,如何快速、平稳的消除偏差。本文通过控制 $v_x$ 和 $\omega_z$ 来消除这两种偏差,调整位姿状态。

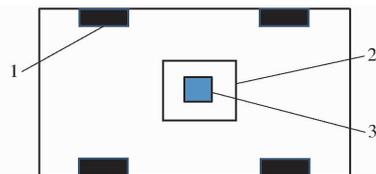


图2 Mecanum轮AGV结构简图

Fig. 2 Structure diagram of Mecanum wheel AGV

1. Mecanum轮 2. 视野范围 3. CCD摄像机

假设AGV的控制周期为 $T_s$ ,当前位姿状态为 $k$ 时的角度偏差 $e_\theta(k)$ ,经过一个周期的控制后,到达下一个状态 $k+1$ 时,由前面的分析可知 $v_x$ 、 $v_y$ 、 $\omega_z$ 相互独立,所以在AGV的角度偏差变化中可以单独控制 $\omega_z$ 使角度偏差均匀且同步于距离偏差收敛于零,则 $k+1$ 时的角度偏差为

$$e_\theta(k+1) = e_\theta(k) + \Delta\omega_z T_s \quad (7)$$

如图3所示, $k$ 时刻距离偏差为 $l_{OA}$ ,经过 $T_s$ 到 $k+1$ 时距离偏差的减少量为 $l_{BC}$ ,并且此时的偏差为 $l_{CE}$ ,则

$$l_{CE} = l_{OA} + l_{DE} - l_{BC} \quad (8)$$

当控制周期很短且AGV的速度值为有限值时,圆弧 $OC$ 可近似地看成直线,可视AGV移动的距离为 $vT_s$ ,即 $l_{OC} = vT_s$ 。由图4可知 $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_\tau$ 和 $v$ 存在关系

$$\begin{cases} v \cos \theta = v_y \\ v \sin \theta = v_x \\ v_\tau = v \cos(\theta - e_\theta) \end{cases} \quad (9)$$

在 $Rt\triangle AED$ 中,距离的增量 $l_{DE}$ 为

$$l_{DE} = l_{DA} \tan e_\theta = l_{OC} \cos \theta \tan e_\theta \quad (10)$$

当角度偏差很小时,由式(8)~(10)可得距离

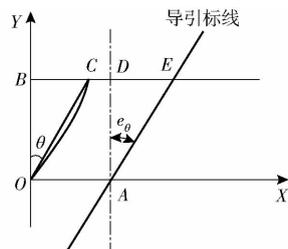


图3 AGV偏差几何解析

Fig. 3 Geometric analysis of AGV

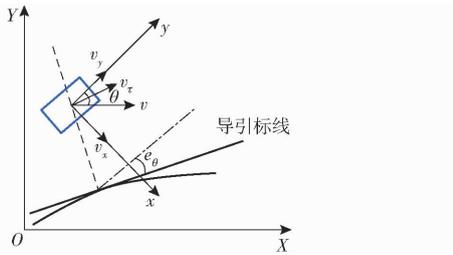


图4 AGV运行轨迹模型

Fig. 4 AGV running trajectory model

偏差  $e_d(k+1)$  近似为

$$e_d(k+1) = e_d(k) + T_s v_\tau e_\theta(k) - T_s v_x e_\theta^2(k) - T_s v_x \quad (11)$$

从而得到系统的运动学模型即状态方程为

$$\begin{cases} e_\theta(k+1) = e_\theta(k) - \Delta\omega T_s \\ e_d(k+1) = e_d(k) - T_s v_x + T_s v_\tau e_\theta(k) - T_s v_x e_\theta^2(k) \end{cases} \quad (12)$$

引入拉格朗日乘子函数

$$\boldsymbol{\lambda}(k+1) = [\lambda_1(k+1) \quad \lambda_2(k+1)]^T$$

构造系统的广义离散泛函

$$H(k) = \frac{1}{2} v_x^2(k) + \boldsymbol{\lambda}(k+1)^T \cdot \begin{bmatrix} e_\theta(k) - \Delta\omega T_s \\ e_d(k) + T_s v_\tau e_\theta(k) - T_s v_x e_\theta^2(k) - T_s v_x \end{bmatrix} \quad (13)$$

又离散泛函取得极小值的条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial H(k)}{\partial u(k)} = 0 \\ \lambda_1(k) = \frac{\partial H(k)}{\partial e_\theta} \\ \lambda_2(k) = \frac{\partial H(k)}{\partial e_d} \end{cases} \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可得

$$\begin{cases} \lambda_2(k) = \lambda_2(k+1) = c \\ \lambda_1(k+1) = \lambda_1(k) + \lambda_2(k+1) (2T_s v_x e_\theta(k) - T_s v_\tau) \\ v_x = \lambda_2(k+1) T_s (e_\theta^2(k) + 1) \end{cases} \quad (15)$$

式中  $c$ ——常数

又当控制步数  $N$  确定时,有

$$e_\theta(k) = \frac{N-k}{N} e_\theta(0) \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可得

$$\begin{aligned} \lambda_1(k) &= \lambda_1(0) + \\ & 2c^2 T_s^2 \left( e_\theta^3(0) \frac{N^3 + \dots + (N-k)^3}{N^3} + \right. \\ & \left. \frac{N + \dots + (N-k)}{N} e_\theta(0) \right) - kc T_s v_\tau \end{aligned} \quad (17)$$

将式(15)~(17)代入状态方程(12)中可得

$$\begin{cases} e_\theta(k) = \frac{N-k}{N} e_\theta(0) \\ e_d(k) = e_d(0) + T_s v_\tau \sum_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N} e_\theta(0) - \\ c T_s^2 \sum_{i=0}^{k-1} \left[ \frac{(N-i)^2}{N^2} e_\theta^2(0) + 1 \right]^2 \end{cases} \quad (18)$$

又系统应满足纠偏目标

$$\begin{cases} e_\theta(N) = 0 \\ e_d(N) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

即经过  $N$  步控制后,偏差同步收敛于零。

由式(18)和式(19)可得

$$c = \frac{e_d(0) + T_s v_\tau \frac{N+1}{2} e_\theta(0)}{T_s^2 \left[ C_1 + N + \frac{(N+1)(2N+1)}{3N} e_\theta^2(0) \right]} \quad (20)$$

其中  $C_1 = \frac{(N+1)(2N+1)(3N+3N^2-1)}{30N^3} e_\theta^4(0)$

显然,  $c$  是一个只与初始偏差状态控制步数以及控制周期有关的常数。因此可得到最终速度和角速度控制量的解析表达式为

$$\begin{cases} \omega_z(k) = \frac{N-k}{N T_s} e_\theta(0) \\ v_x(k) = c T_s \left[ \frac{(N-k)^2}{N^2} e_\theta^2(0) + 1 \right] \end{cases} \quad (21)$$

### 2.3 有限步数 $N$ 的确定

速度控制量  $v_x(k)$  的大小及变化率必须满足速度和加速度的约束条件,即式(5)的约束,由式(21)可知

$$v_x(k) = e_\theta^2(0) (N-k)^2 c T_s / N^2 + c T_s$$

显然  $v_x(k)$  是  $(N-k)^2$  的线性函数,分析可知,当  $k=0$  时,  $v_x(k)$  得最大值且

$$v_x(k)_{\max} = c T_s e_\theta^2(0) + c T_s$$

控制周期  $T_s$  一定,当  $|v_x(k+1) - v_x(k)|$  得最大值时,则加速度也最大,而

$$|v_x(k+1) - v_x(k)| = e_\theta^2(0) (2N-2k-1) c T_s / N^2$$

显然加速度  $|a(k)|$  是  $(2N-2k-1)$  的线性函数,所以加速度的最大值  $|a(k)|_{\max}$  也是在  $k=0$  时得到,且

$$|a(k)|_{\max} = (2N-1) c e_\theta^2(0) / N^2$$

故控制步数  $N$  确定公式为

$$\begin{cases} v_x(k)_{\max} = c T_s e_\theta^2(0) + c T_s \leq v_{x\max} \\ |a(k)|_{\max} = \frac{c e_\theta^2(0)}{N^2} (2N-1) \leq a_{\max} \end{cases} \quad (22)$$

根据式(22)即可确定2个  $N$  值,取大者为最优控制有限步数的最小值,则只要控制步数大于该最小值即可,一般控制步数不宜过大,过大会造成系统的延时严重。同时控制步数反映了路径跟踪过程中

两种偏差消除的快慢程度,即纠偏的效率,显然步数越小系统的纠偏效率也就越高,实时性也就越好。

## 2.4 基于连续系统离散化的有限步数运动预测的路径跟踪优化控制

文献[9-11,17]通过试凑加权矩阵  $Q$ 、 $R$  来获得系统的增益系数,而求得的增益系数是在某一特定速度下获得的,当 AGV 运行速度改变时,系统的鲁棒性就会变差,并且增益系数的获得是通过反复迭代求解 Raccati 方程,计算难度大且不利于实时控制器的控制。

本文将系统及目标函数离散化,在系统的约束条件(式(5))下,通过寻求有限步的速度控制序列和角速度控制序列,从而得到系统的最优控制。且该控制序列能保证角度偏差和距离偏差同步快速的收敛。同时通过离散化的控制序列更加有利于实时控制器的滚动控制。由式(21)可知,该控制序列只与偏差初始值、控制步数、控制周期、运行速度  $v_r$  有关。一般情况下,系统的控制周期是不变的,在初始偏差一定的情况下,控制步数只取决于运行速度,且角度的控制量与  $k$  正相关, $v_x(k)$  是  $(N-k)^2$  的线性函数,其计算量小,控制方便。

## 3 系统仿真与实验分析

本文的第1节推导出来了 AGV 小车的运动学模型,第2节在第1节的基础上推导了离散系统的最优控制模型,得到了状态方程的有限步控制序列式(18)以及速度和角速度控制量解析表达式式(21)。为了验证该控制方法的有效性和可行性,本节在前面模型的基础上对该模型进行数字仿真和实验分析。

由于在式(11)的推导过程中,作了近似代替,而此处近似代替的前提条件是角度偏差较小,故本文讨论的角度偏差的范围为  $|e_\theta(k)| \leq 8^\circ$ 。这里将对不同的角度和距离偏差以及速度进行数字仿真,其参数选择如表1所示,为了满足系统的运动约束,给定了系统的最大容许速度和加速度。

表1 低速初始位姿状态

Tab.1 Initial pose state of low-velocity

参数	$v_r /$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$e_\theta(0) /$ ( $^\circ$ )	$e_d(0) /$ m	$v_{xmax} /$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$a_{max} /$ ( $m \cdot s^{-2}$ )
数值	0.3	5	0.01	0.5	0.05

表1是低速下各个参数的取值,表2是高速下各个参数的取值。

图5是  $v_r = 0.3 m/s$  时,初始偏差  $e_\theta(0) = 5^\circ$ ,  $e_d(0) = 0.01 m$  下的 Matlab 仿真结果。

表2 高速初始位姿状态

Tab.2 Initial pose state of high-velocity

参数	$v_r /$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$e_\theta(0) /$ ( $^\circ$ )	$e_d(0) /$ m	$v_{xmax} /$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$a_{max} /$ ( $m \cdot s^{-2}$ )
数值	0.5	5	0.01	0.5	0.05

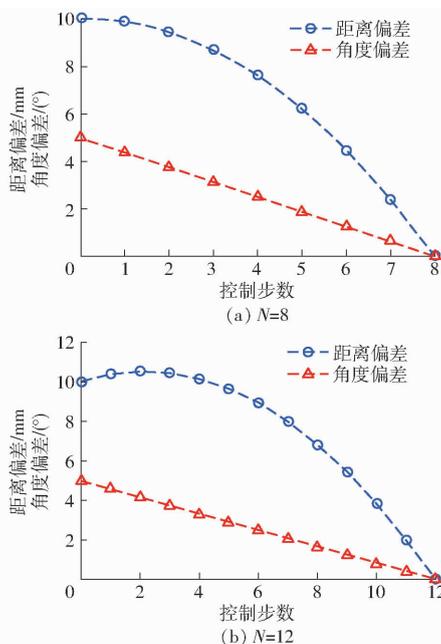


图5 低速纠偏仿真结果

Fig.5 Simulation process of rectifying deviation with low-velocity

图6是  $v_r = 0.5 m/s$  时,初始偏差  $e_\theta(0) = 5^\circ$ ,  $e_d(0) = 0.01 m$  下的仿真结果。由图5和图6可知,在满足约束条件的前提下,控制步数越大,距离偏差在开始控制的前几步内越容易产生超调,因此不宜选择过大的控制步数。由图5a、6a或图5b、6b可知,在控制步数等其他条件相同的条件下,过大的线速度会造成一定距离偏差的超调,但经过几步后,距离偏差很快收敛。由图知,无论何种情况下,距离偏差和角度偏差均同步的收敛于目标值,且通过有限的步数,均能将偏差降低至零,控制过程比较平稳、快速、协调。

为验证本算法的有效性和可行性以及在全向运动型 AGV 路径跟踪中的实际效果,在仿真的基础上,采用如图7所示自主研发的视觉导引全向运动型 AGV 进行了路径跟踪实验。运动控制器是基于 ARM 并移植了 uC/OSII 的实时操作控制系统,系统的控制框图如图8所示。

实验时将位姿状态以周期  $T_s = 0.1 s$  通过串口不断地反馈给计算机,根据计算机实时采集到的距离偏差和角度偏差可得到全方位运动 AGV 的实际路径跟踪过程,如图9所示,图中从第10步到第20步为本算法的纠偏过程,同步快速地消除了角度偏

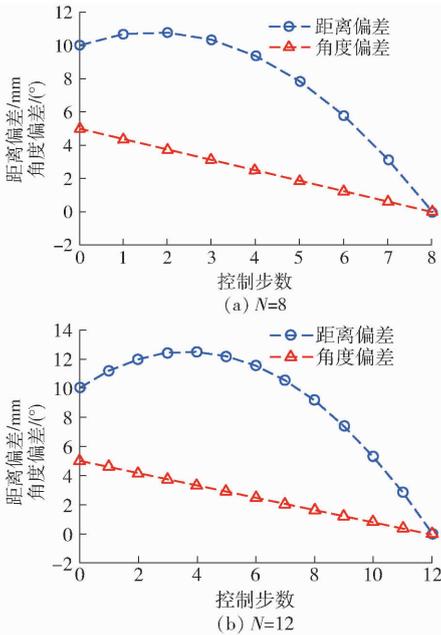


图 6 高速纠偏仿真结果

Fig. 6 Simulation process of rectifying deviation with high-velocity

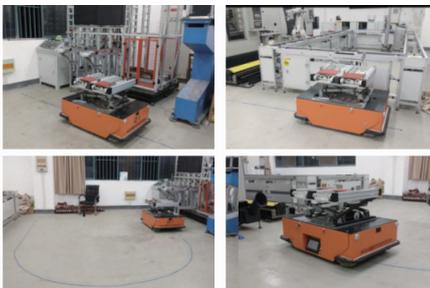


图 7 全向运动型 AGV 路径跟踪实验

Fig. 7 Experiment of omni-directional motion

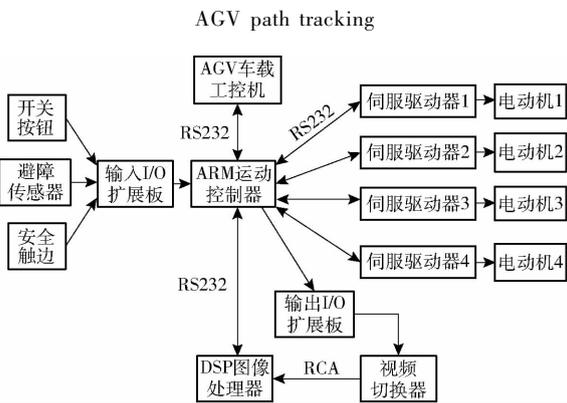


图 8 系统控制框图

Fig. 8 System control block diagram

差和距离偏差,第 20 步到第 30 步为 AGV 稳定运行阶段,该阶段角度偏差和距离偏差有一定的小波动,但距离偏差控制在 2 mm 以内,角度偏差在 2°以内。实验表明了该优化算法在全方位运动型 AGV 路径跟踪的有效性和可行性。

对比前面的仿真结果可知,实际实验的位姿状态的纠偏趋势和仿真结果是相同的,但实际的过程

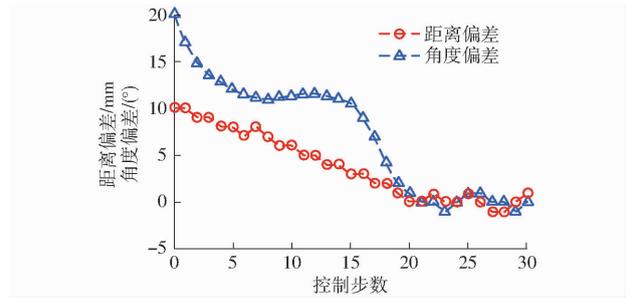


图 9 路径跟踪实验结果

Fig. 9 Experimental results of path tracking

中存在一些小的波动,造成这些波动的可能原因是系统存在一定的滞后,这些滞后包括 DSP 图像的采集以及处理的滞后,同时伺服电机驱动器的响应也具有一定的滞后性,另外,运动控制器的任务调度和管理是通过每个任务调用延时函数自动实现的,此时延时函数的延时时间不合理也会造成整个系统的滞后。

表 3 列举了不同控制方法的路径跟踪精度和达到稳定的时间,全方位运动 AGV 的路径跟踪误差为: $e_d \leq 2 \text{ mm}$ ,  $e_\theta \leq 2^\circ$ ,达到稳定的时间为 0.8 ~ 1.2 s,显然,本文提出的路径跟踪算法具有较高的路径跟踪精度,且由仿真和实验结果可知,两种偏差的消除具有同步性和平稳性。

表 3 不同控制方法的精度与效率

Tab. 3 Accuracy and efficiency of different control methods

控制方式	路径跟踪精度	达到稳定的时间/s
状态反馈控制 <sup>[8]</sup>	-130 ~ 130 mm	
变结构控制 <sup>[6]</sup>		4 ~ 5
模糊-最优控制 <sup>[11]</sup>		10
PID 控制 <sup>[7]</sup>	-5.5 ~ 5.5 mm	6.9 ~ 7.8
标准 PSO 控制 <sup>[7]</sup>	-3 ~ 3 mm	4.0 ~ 6.2
改进 PSO 控制 <sup>[7]</sup>	-2 ~ 2 mm	2.7 ~ 4.3
本文控制方法	$ e_d  \leq 2 \text{ mm}$ , $ e_\theta  \leq 2^\circ$	0.8 ~ 1.2

## 4 结束语

基于以上的应用背景,本文首先对四轮独立驱动的 Mecanum 轮建立运动学模型,推导出四轮独立驱动的 Mecanum 轮 AGV 的正、逆学运动方程。基于 AGV 运动轨迹的分析,建立了 AGV 运动学模型,在最优控制理论的基础上,对目标函数进行简化,为了避免传统加权矩阵  $Q$ 、 $R$  的选择难题,本文将系统离散化,通过有限的控制步数,在纠偏目标和运动约束的条件下,寻求最优的速度和角速度控制序列,将角度偏差和距离偏差同步消除,经过理论的推导,得到最终的角速度和速度的解析表达式,该算法计算量较小,且有限的控制序列有利于实时控制系统的实时滚动控制。通过以上仿真和实验可以看出,不

同的速度和偏差下,该控制算法均有很好的控制效果,且速度偏差和角度偏差均能同步消除,当系统稳定时角度偏差 $|e_\theta| \leq 2^\circ$ ,距离偏差 $|e_d| \leq 2 \text{ mm}$ ,系统

达到稳定时的控制时间为 $0.8 \sim 1.2 \text{ s}$ ,因此本文提出的算法具有较高的路径跟踪精确和效率,同时具有较好的协调性和平稳性。

### 参 考 文 献

- 1 WU Xing, YU Jun, LOU Peihuang, et al. Agent-oriented embedded control system design and development of a vision-based automated guided vehicle[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(2): 1-13.
- 2 WU Xing, LOU Peihuang, YU Jun, et al. Intersection recognition and guide-path selection for avision-based AGV in a bidirectional flow network[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(3): 1-17.
- 3 武星, 楼佩煌, 唐敦兵. 自动导引车路径跟踪和伺服控制的混合运动控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(3): 43-48.  
WU Xing, LOU Peihuang, TANG Dunbing. Integrated motion control of path tracking and servo control for an automated guided vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(3): 43-48. (in Chinese)
- 4 WU Xing, LOU Peihuang, SHEN Ke, et al. Precise transshipment control of an automated magnetic-guided vehicle using optics positioning[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2014, 7(1): 48-71.
- 5 喻俊, 楼佩煌, 钱晓明, 等. 自动导引车视觉导引路径的识别及精确测量[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 40(3): 143-149.  
YU Jun, LOU Peihuang, QIAN Xiaoming, et al. Recognition and accurate measurement of vision-guided path of automatic guided vehicle[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(3): 143-149. (in Chinese)
- 6 王皖君, 张为公, 龚宗洋. 自动导引车路径跟踪控制[J]. 测控技术, 2009, 28(9): 49-51.  
WANG Wanjun, ZHANG Weigong, GONG Zongyang. Path tracking control of automatic guided vehicle[J]. Measurement & Control Technology, 2009, 28(9): 49-51. (in Chinese)
- 7 孟文俊, 刘忠强. 视觉导引 AGV 的路径跟踪控制研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 321-325.  
MENG Wenjun, LIU Zhongqiang. Research on the path tracking control for vision-guided AGV[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3): 321-325. (in Chinese)
- 8 陈无畏, 孙海涛, 李碧春, 等. 基于标识线导航的自动导引车跟踪控制[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 164-170.  
CHEN Wuwei, SUN Haitao, LI Bichun, et al. Tracking control of automatic guided vehicle based on lane marker navigation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 164-170. (in Chinese)
- 9 郭旭, 熊蓉, 胡协和. 全方位移动机器人的运动预测控制[J]. 电机与控制, 2007, 11(1): 79-87.  
GUO Xu, XIONG Rong, HU Xiehe. Motion predictive control of omni-directional mobile robot[J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(1): 79-87. (in Chinese)
- 10 王荣本, 李兵, 徐友春, 等. 基于视觉导航的智能车辆自主导航最优控制器设计[J]. 汽车工程, 2001, 21(2): 97-100.  
WANG Rongben, LI Bing, XU Youchun, et al. Optimal controller design for an intelligent vehicle based on vision navigation[J]. Automotive Engineering, 2001, 21(2): 97-100. (in Chinese)
- 11 陈无畏, 李碧春, 孙海涛, 等. 基于视觉导航的 AGV 模糊-最优控制研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(24): 2546-2550.  
CHEN Wuwei, LI Bichun, SUN Haitao, et al. Study on fuzzy-optimal control of vision navigation for an AGV[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(24): 2546-2550. (in Chinese)
- 12 周俊, 姬长英. 基于视觉导航的轮式移动机器人横向最优控制[J]. 机器人, 2002, 24(3): 209-212.  
ZHOU Jun, JI Changying. Lateral optimal control for wheeled mobile robot navigated by machine vision[J]. Robot, 2002, 24(3): 209-212. (in Chinese)
- 13 刘洲, 吴洪涛. Mecanum 四轮全方位移动机构运动分析与仿真[J]. 中国制造业信息化, 2011, 40(5): 43-46.
- 14 熊蓉, 张翮, 褚健, 等. 四轮全方位移动机器人的建模和最优控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 93-98.  
XIONG Rong, ZHANG He, CHU Jian, et al. Modeling and optimal control of omni-directional mobile robots[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(1): 93-98. (in Chinese)
- 15 LOZOVA C, MARTI P, VELASCO M, et al. Simulation study of a remote wireless path tracking control with delay estimation for an autonomous guided vehicle[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(5-8): 751-761.
- 16 SOYSAL B. Real-time control of an automated guided vehicle using a continuous mode of sliding mode control[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2014, 22(5): 1298-1306.
- 17 胡寿松, 王执铨, 胡维礼. 最优控制理论与系统[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2017.
- 18 张锋. 线性二次型最优控制问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- 19 孟庆宽, 张漫, 杨耿煌, 等. 自然光照下基于粒子群算法的农业机械导航路径识别[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 11-20. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160602&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160602&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.002.
- 20 MEMG Qingkuan, ZHANG Man, YANG Genghuang, et al. Guidance line recognition of agricultural machinery based on particle swarm optimization under natural illumination[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 11-20. (in Chinese)
- 21 武星, 沈伟良, 楼佩煌, 等. 视觉导引 AGV 鲁棒特征识别与精确路径跟踪研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 48-56. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160708&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160708&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.008.  
WU Xing, SHEN Weiliang, LOU Peihuang, et al. Robust feature recognition and precise path tracking for vision-guided AGV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 48-56. (in Chinese)
- 22 杨旭, 楼佩煌, 武星, 等. 基于光照约束的 AGV 视觉导引非均匀光照增强方法[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(12): 1752-1757.  
YANG Xu, LOU Peihuang, WU Xing, et al. A method for enhancing non-uniform illumination of vision-guided automatic guided vehicle with illumination constraints[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(12): 1752-1757. (in Chinese)