

文章编号: 1002-0446(2009)-04-0357-08

## 基于视野状态分析的机器人路径跟踪智能预测控制

武 星<sup>1</sup>, 楼佩煌<sup>1</sup>, 杨 雷<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016; 2. 江苏天奇物流系统工程股份有限公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 为视觉导航自动导引车 (AGV) 的路径跟踪提出一种基于视野状态分析的智能预测控制模型. 以最优偏差状态转化策略取代二次型指标函数对预测控制目标的描述, 避免了纯代数优化方法面临的参数选择难题. 提出一种同步控制算法, 用于完全消除理想纠偏状态的两种路径偏差并维持无偏差跟踪状态. 对于其它状态, 则采取假设—预测—调整的迭代算法, 以实现状态转化的协调性. 数值仿真和实验证明, 在不同偏差状态和速度下, 该算法都能产生可实现的速度差控制量, 同步、快速和平稳地消除两种路径偏差, 而且, 该算法计算量小, 可满足嵌入式控制系统实时处理的要求.

**关键词:** 自动导引车 (AGV); 预测控制; 智能控制; 路径跟踪; 移动机器人  
**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

### Intelligent Predictive Control Based on State Analysis of Visual Field for Robot Path Tracking

WU Xing<sup>1</sup>, LOU Pei-huang<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Jiangsu Miracle Logistics System Engineering Company Limited, Wuxi 214000, China)

**Abstract:** An intelligent predictive control model based on state analysis of visual field is presented for path tracking of the automated guided vehicle (AGV) with vision navigation. An optimal conversion strategy of error states is used to replace the quadratic cost function and to describe the objective of predictive control, so difficulties in parameter selection of pure algebra optimizing methods can be avoided. A synchronous control approach is proposed to completely eliminate two path errors of the ideal rectification state and to keep an error-free tracking state eventually. For other states, an iterative algorithm with assumption-prediction-adjustment is used to realize a harmonious state conversion. Numerical simulations and tests demonstrate that a realizable speed difference output can always be generated to eliminate two path errors synchronously, quickly and smoothly at different error states and velocities. Furthermore, with its low computational complexity, the proposed algorithm can satisfy the demand from realtime processing of embedded control systems.

**Keywords:** automated guided vehicle (AGV); predictive control; intelligent control; path tracking; mobile robot

### 1 引言 (Introduction)

自动导引车 (AGV) 是一种移载用轮式移动机器人, 广泛应用于多个行业的物流自动化. 近年来, 基于视觉导航的路径跟踪问题正成为移动机器人领域的一个研究热点<sup>[1~4]</sup>, 其关键是实现机器人沿导航路径的自主移动. 由于 AGV 的车载摄像机视野有限, 一般将导航路径简化为线性模型, 并通过分割视野等方法提高导航精度<sup>[1,3]</sup>.

AGV 具有非完整约束、非线性和时滞等特性, 其路径跟踪控制较为困难. 预测控制根据系统模型通过多步预测来估计未来状态, 从全局角度滚动优化整个控制过程, 具有良好的可控性和鲁棒性, 在机器人的运动控制中得到广泛应用<sup>[4~9]</sup>. 其控制效

果主要取决于以下因素:

(1) 系统模型: 其准确性决定了未来状态预测的有效性. 在路径跟踪中, 运动学模型得到广泛应用<sup>[4~7]</sup>. 考虑到实际系统的非线性, 神经网络也被应用于路径跟踪<sup>[8]</sup>和速度控制<sup>[9]</sup>的模型辨识器设计中. 面向实验研究的系统建模还受到传感器的限制—在车载摄像机的局部视觉导航下<sup>[4]</sup>, 只能获取 AGV 与路径的相对偏差, 建立相对偏差模型. 在编码器的航迹推算<sup>[5]</sup>和外部摄像机的全局视觉导航<sup>[7]</sup>下, 可得到 AGV 绝对位置的坐标和航向, 建立绝对坐标模型.

(2) 优化方法: 通常采用二次型函数为指标函数, 各项权重反映了相应指标努力接近期望值的程

度,如何在不同指标间进行平衡是一个难题.文[6]认为权重选择应该与不同的运动相关,但没给出具体方法.文[5]认为应该根据目标点的距离或跟踪精度选择权重,然而由于难以建立权重的显式计算公式,所以试图通过模糊控制调节权重.在权重选定后,既可直接通过求解指标函数对各控制变量的偏导数方程组进行最优化<sup>[5]</sup>,也可间接通过梯度下降法使指标函数向最小值收敛<sup>[6,8,9]</sup>.无论是求解方程组还是梯度下降法都需要较大计算量.文[8]通过研究梯度下降的自适应学习率提高指标的优化速度.

(3) 预测步数:多步预测是预测控制实现全局优化的关键,但预测步数的选择也是个难题.单步预测计算量小,控制实时性好,但有限的预测时域可能导致跟踪控制的动态不稳定<sup>[5]</sup>.预测步数的增加虽然能提高整体性能,但计算量也急剧上升.文[6]将预测步数增加1倍,消耗的计算时间随之增加了5倍,不利于系统的实时控制.

针对预测控制存在的一些不足,本文提出一种基于视野状态分析的智能预测控制模型,用最优偏差状态转化策略取代二次型指标函数对预测控制目标的描述,避免了纯代数优化方法面临的参数选择难题,将状态分析和运筹全局的人类智能融入预测控制,并结合协调消除两种路径偏差的同步控制算法,优化AGV逼近并追踪目标路径的整个过程.

## 2 AGV 运动学模型 (Kinematics model of AGV)

本文的研究平台采用自主研发的差速式视觉导航AGV,其结构和运动学模型如图1所示.车载摄像机只能提供AGV与路径的相对偏差即距离偏差 $e_d$ 和角度偏差 $e_\theta$ .路径与 $x$ 轴交点的横坐标为 $e_d$ , $y$ 轴到路径切线方向的夹角为 $e_\theta$ ,逆时针为正,顺时针为负.左、右驱动轮的线速度大小为 $v_l$ 和 $v_r$ ,两驱动轮间距为 $W$ ,AGV中心的线速度大小为 $v$ ,角速度为 $\omega$ .

AGV路径跟踪的实质就是消除图1所示的两种偏差.当偏差出现时,在两驱动轮之间产生一个速度差 $\Delta v$ ,则AGV绕车体瞬心 $A$ 作半径为 $R$ 的瞬时转动以调整其位姿,两驱动轮的线速度大小为

$$v_l = v + \Delta v \quad (1)$$

$$v_r = v - \Delta v$$

位姿调整的角速度为

$$\omega = \frac{v_l - v_r}{W} = \frac{2\Delta v}{W} \quad (2)$$

状态 $k$ 经过时间 $T_s$ 到状态 $k+1$ 时的角度偏差为

$$e_\theta(k+1) = e_\theta(k) + \frac{2\Delta v(k)T_s}{W} \quad (3)$$

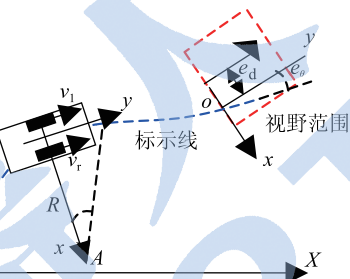
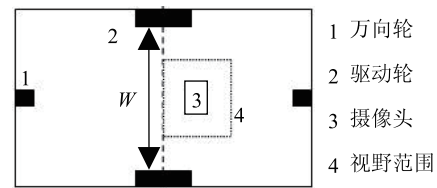


图1 AGV 结构与运动学模型

Fig.1 Configuration and kinematics model of AGV

AGV是具有非完整约束的速度不可积系统,其距离偏差的计算通过几何方法完成.根据速度差控制量是否为零分为两种情况:

(1) 当速度差控制量不为0时,两驱动轮的线速度不同,AGV绕圆心 $C$ 作瞬时转动,运动轨迹如图2(a)所示.

AGV沿圆弧 $O_k O_{k+1}$ 运动的半径为 $|R|$ ,其中

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{vW}{2\Delta v}, \quad \Delta v \neq 0 \quad (4)$$

在 $\triangle ABC$ 中,由正弦定理得:

$$\frac{|R| - |e_d(k+1)|}{\cos e_\theta(k)} = \frac{|R| + |e_d(k)|}{\cos e_\theta(k+1)} \quad (5)$$

根据图2(a)中的几何关系,式(5)可化简为

$$\frac{R - e_d(k+1)}{\cos e_\theta(k)} = \frac{R - e_d(k)}{\cos e_\theta(k+1)} \quad (6)$$

(2) 当速度差控制量为0时,两驱动轮的线速度相同,AGV沿原速度方向直线运动,运动轨迹如图2(b)所示.

在 $Rt\triangle ABC$ 中可得:

$$|\Delta e_d(k)| = vT_s \tan |e_\theta(k)| \quad (7)$$

根据图2(b)中的几何关系,由式(7)可得:

$$e_d(k+1) = e_d(k) - vT_s \tan e_\theta(k) \quad (8)$$

综上,在图2所示的偏差状态下,对任意速度差控制量,距离偏差的计算公式为

$$e_d(k+1) = \begin{cases} \frac{vW}{2\Delta v} - \frac{\cos e_\theta(k)}{\cos e_\theta(k+1)} \left( \frac{vW}{2\Delta v} - e_d(k) \right) & \Delta v(k) \neq 0 \\ e_d(k) - vT_s \tan e_\theta(k) & \Delta v(k) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

经过进一步分析与计算，式 (9) 同样适用于其它状态的距离偏差计算。

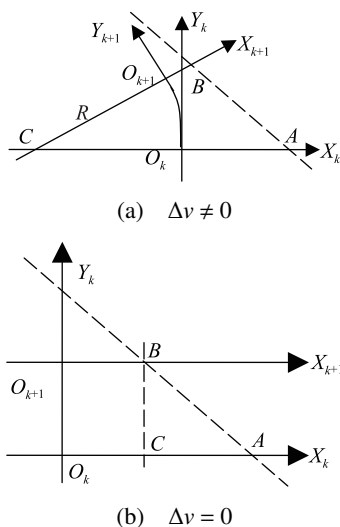


图 2 距离偏差计算

Fig.2 Calculation of distance error

### 3 基于视野状态分析的智能预测控制 Intelligent predictive control based on state analysis of visual field

文 [3] 的拟人转向控制模型划分了 9 种偏差状态以决定转向控制的方向，根据神经元转移函数计算转向角大小，但该模型没能分析为纠正某一偏差而产生的控制量对另一偏差的影响，因此难以获得具有良好纠偏协调性的控制量。

本文根据角度偏差与距离偏差的关系将视野中的偏差状态划分为 4 类，如表 1 所示。其中，第 3 类状态为理想纠偏状态，可采用同步控制算法协调消除两种偏差并维持无偏差跟踪状态。其它状态需要向理想纠偏状态转化，根据多步运动预测思想，提出全局最优的偏差状态转化策略。在每一步控制中采用假设—预测—调整的迭代过程以保证相邻状态转化符合该策略，此时使用单步运动预测来提高控制的实时性。本文的智能预测控制模型将理想纠偏状态的同步控制和非理想状态的最优化转化相结合，兼顾了多步预测的全局性与单步预测的实时性，如图 3 所示。

#### 3.1 理想纠偏状态的同步控制算法

在理想纠偏状态下可用同步控制算法协调消除两种路径偏差，如图 4(a) 所示。当 AGV 沿以点 C 为圆心、以 |R| 为半径的圆弧 OB 运动时，其速度方向从视觉坐标系的 Y 轴相切过渡到标识线 l，角度偏差和距离偏差能同步而平稳地减小到 0。

由正切定理得：

$$|R| = CO = \frac{|e_d(k)|}{\left| \tan e_\theta(k) \tan \frac{e_\theta(k)}{2} \right|} \quad (10)$$

根据线速度与角速度的关系可得：

$$|\Delta v(k)| = v \frac{W \left| \tan e_\theta(k) \tan \frac{e_\theta(k)}{2} \right|}{2|e_d(k)|} \quad (11)$$

表 1 导引标线的 4 类偏差状态

Tab.1 Four categories of error states for the navigation guideline

分类	第 1 类情况	第 2 类情况	第 3 类情况	第 4 类情况
标识线与视野的关系				
路径偏差之间的关系	$e_\theta = 0$	$e_d = 0$	$e_\theta e_d > 0$	$e_\theta e_d < 0$

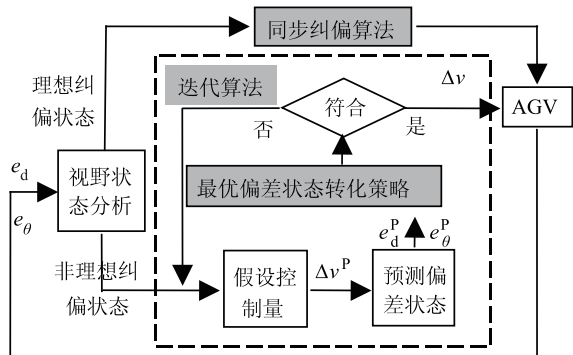


图3 智能预测控制模型  
Fig.3 Intelligent predictive control model

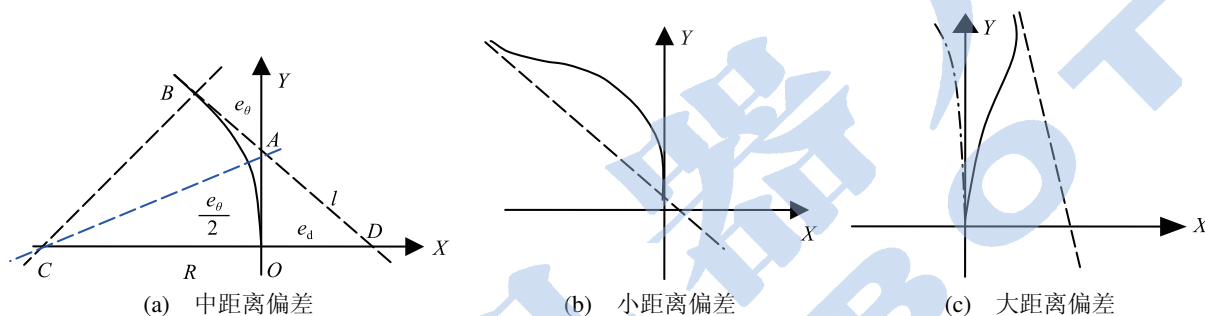


图4 理想纠偏状态的同步控制  
Fig.4 Synchronous control for the ideal rectification state

$$\Delta e_\theta(k) = \frac{2\Delta v(k)T_s}{W} \quad (13)$$

由于  $\Delta v(k)e_\theta(k) < 0$ ，则  $\Delta e_\theta(k)e_\theta(k) < 0$ ，角度偏差的改变量与其异号，偏差绝对值大小在减小，即  $|e_\theta(k+1)| < |e_\theta(k)|$ ，角度偏差收敛。

当  $\Delta v(k) \neq 0$  时，由式(9)和(12)可知：

$$\Delta e_d(k) = -\left(1 - \frac{\cos e_\theta(k)}{\cos e_\theta(k+1)}\right) \left(1 + \frac{1}{\tan e_\theta(k) \tan \frac{e_\theta(k)}{2}}\right) e_d(k) \quad (14)$$

由于  $|e_\theta(k+1)| < |e_\theta(k)|$ ，则  $1 - \frac{\cos e_\theta(k)}{\cos e_\theta(k+1)} > 0$ ，因此， $\Delta e_d(k)e_d(k) < 0$ ，距离偏差的改变量与其异号，则  $|e_d(k+1)| < |e_d(k)|$ ，距离偏差收敛。

现在证明该算法的同步性，即两种偏差同时消除到0。不妨设  $e_\theta(k+1) = 0$ ，计算此时的距离偏差。

当  $\cos e_\theta(k+1) = 1$  且  $\Delta v(k) \neq 0$  时，由式(9)和(12)可知：

$$e_d(k+1) = \left(\frac{1 - \cos e_\theta(k)}{\tan e_\theta(k) \tan \frac{e_\theta(k)}{2}} - \cos e_\theta(k)\right) e_d(k) \quad (15)$$

由于  $\frac{1 - \cos e_\theta(k)}{\tan e_\theta(k) \tan \frac{e_\theta(k)}{2}} - \cos e_\theta(k) = 0$ ，则  $e_d(k+1) = 0$ ，即两种偏差同时消除到0。

根据图4(a)中的几何关系，式(11)可简化为：

$$\Delta v(k) = -v \frac{W \tan e_\theta(k) \tan \frac{e_\theta(k)}{2}}{2e_d(k)} \quad (12)$$

式(12)同样适用于  $e_d(k) < 0$ 、 $e_\theta(k) < 0$  的状态。首先证明同步纠偏算法的收敛性。

由式(12)可知： $\Delta v(k)e_d(k) < 0$ ，由于理想纠偏状态下  $e_d(k)e_\theta(k) > 0$ ，则  $\Delta v(k)e_\theta(k) < 0$ 。

由式(3)可知：

1) = 0，两种路径偏差同步减小到0，AGV达到无偏差跟踪状态，即  $\begin{cases} e_\theta(k+1) = 0 \\ e_d(k+1) = 0 \end{cases}$ 。此时令速度差控制量为  $\Delta v(i) = 0, i > k$ ，由式(3)和(9)迭代计算可知：

$$\begin{cases} e_\theta(i) = 0 \\ e_d(i) = 0 \end{cases} \quad i > k+1$$

可见，当两种路径偏差同步减小到0时，如果能将速度差控制量及时调整到0，则可维持该无偏差跟踪状态。

### 3.2 最优偏差状态转化策略

同步控制算法为理想纠偏状态提供了一种实时性强和协调性好的收敛算法，其它状态可根据最优转化策略快速有序地过渡到理想纠偏状态。由式(12)，定义所需速度差控制量与AGV速度的比值为同步纠偏系数，即

$$\rho(k)^S = \frac{W \tan e_\theta(k) \tan \frac{e_\theta(k)}{2}}{2e_d(k)} \quad (16)$$

该系数反映了当前偏差状态所需的理想控制量。考虑到控制的快速性、平稳性和实际执行能力，定义纠偏系数的极限值  $\rho_{max}$ 、上边界  $\rho_U$ 、下边界  $\rho_D$ 。据此将第三类偏差状态划分为三种子情况：

(1) 当  $0 < |\rho(k)^S| < \rho_D$  时为大距离偏差情况. AGV 沿近似于直线的圆弧运动, 如图 4(c) 中的左侧轨迹所示. 为了提高偏差纠正的快速性, 增大角度偏差以尽快消除距离偏差.

(2) 当  $\rho_D \leq |\rho(k)^S| \leq \rho_U$  时为中距离偏差情况, 如图 4(a) 所示. 此时所需的纠偏控制量既能获得实际系统的支持, 也能快速和同步地消除两种路径偏差, 是路径跟踪的理想纠偏状态.

(3) 当  $|\rho(k)^S| > \rho_U$  时为小距离偏差情况. 如果纠偏速度差控制量超出实际系统的能力, 可能出现图 4(b) 的情况, 此时必须尽快消除角度偏差.

通过分析非理想状态向理想纠偏状态转化的各种可能过程, 本文提出了协调性最优的偏差状态转化策略, 将表 1 中的偏差状态重新分类整理, 从全局角度考虑了改变一种偏差对其它偏差变化的影响, 规划了各个状态之间的最优转化顺序及相应纠偏策略, 如图 5 所示.

纠偏策略 I: 角度偏差减小但无法阻止距离偏差增大, 应用于第二类和第四类偏差状态, 此时需尽快消除角度偏差, 扭转 AGV 背离标示线的前进方向.

纠偏策略 II: 角度偏差增大以使距离偏差快速减小, 应用于第一类偏差状态和第三类状态的大距离偏差情况, 此时需改变两种偏差的相对大小, 使偏差状态向理想纠偏状态转化.

纠偏策略 III: 角度偏差和距离偏差同时减小, 应用于第三类状态的小距离和中距离偏差情况. 对于中距离偏差情况, 两种偏差可同步减小到 0; 对于小距离偏差情况, 可能距离偏差先减小到 0, 此时转化为第二类或第四类偏差状态.

为简化模糊控制规则, 文 [7] 曾简单地认为可先消除角度偏差再消除距离偏差. 事实上这种控制方法对于非完整约束的机器人是难以奏效的, 必须协调两种偏差的消除过程. 从这个角度看, 预测控制中难以选择指标函数的权重, 也是因为难以协调两种偏差的纠正过程. 在本文所提出的最优偏差状态转化策略中, 针对不同状态产生偏差的主要原因及时调整纠偏重点, 使其有时在角度偏差, 有时在距离偏差, 有时可兼顾两者. 该策略可视为多步预测控制目标的定性描述, 避免了纯代数优化方法中预测步数和权重选择的难题, 且克服了固定参数对优化目标改变的局限.

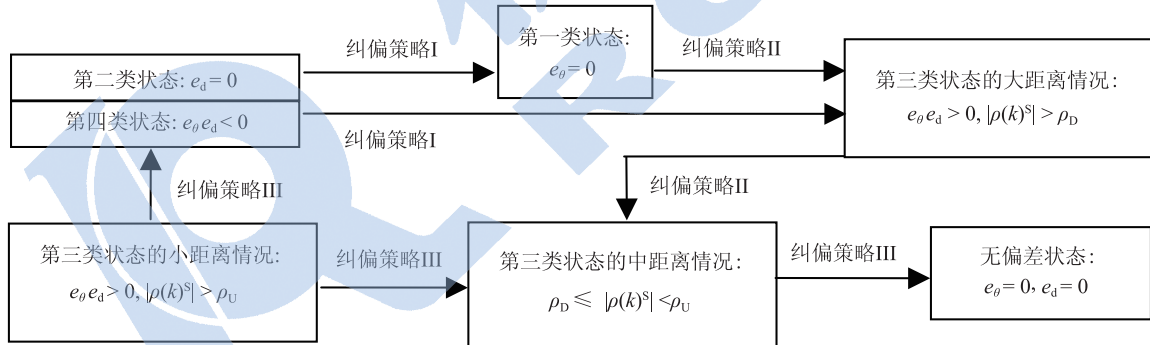


图 5 最优偏差状态转化策略  
Fig.5 The optimal conversion strategy of error states

### 3.3 基于运动预测的迭代优化模型

根据式 (16) 可知, 由距离偏差  $e_d(k)$  和最佳纠偏系数  $\rho_o$  决定的同步角度偏差绝对值为:

$$|e_\theta(k)^S| = 2 \arctan \sqrt{\frac{\rho_o |e_d(k)|}{\rho_o |e_d(k)| + W}} \quad (17)$$

定义符号函数为

$$\text{sgn}x = \begin{cases} -1 & x < 0 \\ 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (18)$$

理想纠偏状态下两偏差同号, 则由式 (17) 可得:

$$e_\theta(k)^S = 2 \text{sgn}(e_d(k)) \arctan \sqrt{\frac{\rho_o |e_d(k)|}{\rho_o |e_d(k)| + W}} \quad (19)$$

以该角度偏差为纠偏目标, 由式 (3) 可得一个周期内转化为理想纠偏状态所需的速度差控制量为:

$$\Delta v(k)^S = \frac{W(e_\theta(k)^S - e_\theta(k))}{2T_s} \quad (20)$$

考虑到实际系统的速度/加速度约束, 定义速度

差控制量的变化量极限  $\Delta^2 v_U$  及其系数  $\eta_U$ , 则存在:

$$|\Delta^2 v(k)| = |\Delta v(k) - \Delta v(k-1)| \leq \Delta^2 v_U \quad (21)$$

如果不满足条件 (21), 则速度差控制量调整为:

$$\Delta v(k)^P = \Delta v(k-1) + \text{sgn}(\Delta v(k)^S - \Delta v(k-1))\Delta^2 v_U \quad (22)$$

为了确保实现最优偏差状态转化策略的每一步控制, 本文利用同步角度偏差的概念, 提出一种假设—预测—调整的迭代优化模型, 如图 6 所示. 先

根据偏差状态特点由式 (20) 或 (22) 假设一个控制量初值, 再利用运动学模型预测下期的偏差状态. 如果已转化为理想纠偏状态, 则控制量假设合适. 如果还是第二类或第四类状态, 或是第三类状态的大距离偏差情况, 则纠偏控制量不足. 如果转化到第三类状态的小距离偏差情况, 则纠偏控制量过量. 对于这两种纠偏不当的情况, 在条件 (21) 的约束下重新调整控制量假设值, 继续迭代优化直至状态转化符合最优策略或控制量超出条件 (21).

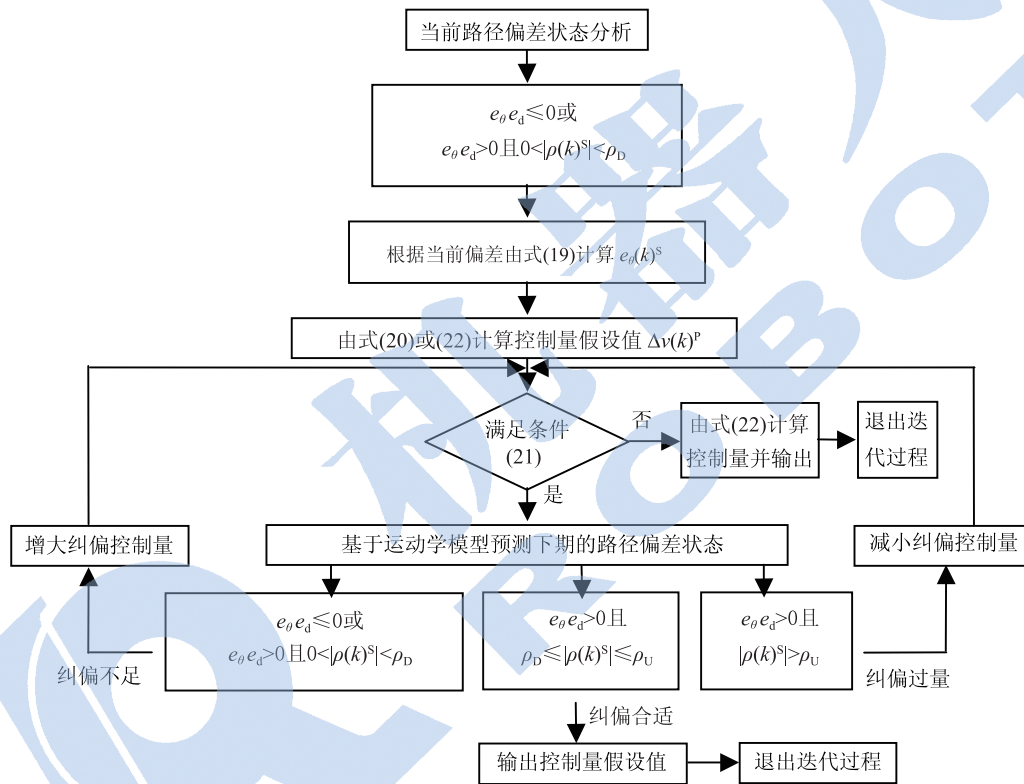


图 6 假设—预测—调整的迭代优化模型

Fig.6 Iterative optimization model of assumption-prediction-adjustment

#### 4 数值仿真与分析 (Numerical simulation and analysis)

为验证该智能预测控制模型, 本文对不同偏差状态和速度进行大量数值仿真. 根据 AGV 的结构, 系统参数设置如下:  $W = 400 \text{ mm}$ ,  $T_s = 0.1 \text{ s}$ ,  $\rho_U = 0.3$ ,  $\rho_{\max} = 0.8$ ,  $\eta_U = 0.2$ .

(1) 当 AGV 速度为  $v = 200 \text{ mm/s}$  时, 跟踪精度设置为:  $e_\theta < 1^\circ$ ,  $e_d < 1 \text{ mm}$ , 各种偏差状态的路径跟踪均取得满意结果, 如图 7(a) 和 7(b) 所示. 其中, 速度差绝对值不大于  $160 \text{ mm/s}$ , 不同步之间的变化量不大于  $40 \text{ mm/s}$ , 满足仿真设定的速度/加速度

约束. 下面从偏差转化角度说明这两幅图的仿真结果. 对图 7(a) 的第二类状态, 为了扭转 AGV 背离路径的前进方向, 先全力减小角度偏差, 但还是进入第四类状态. 角度偏差在第 6 步消除到 0 并反向增大, 此时进入第三类状态的大距离偏差情况, 到第 12 步增大到反向最大值, 此时进入理想纠偏状态. 对图 7(b) 的第三类状态, 先增大控制量以降低同步纠偏系数, 再以较小值同步消除两种偏差. 对各种偏差状态, 控制量变化过程的最后若干步相同, 此时即为理想纠偏状态, 两种路径偏差协调减小, 控制量的绝对值已减小到  $40 \text{ mm/s}$  之内且保持不变. 当偏差减小到 0 附近时, 在速度/加速度约束下该控

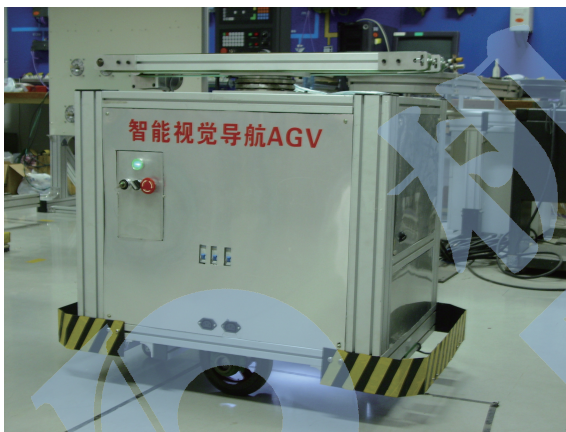
制量能及时减小到 0, 因此可维持这种无偏差跟踪状态.

(2) 当 AGV 速度为  $v = 800 \text{ mm/s}$  时, 跟踪精度设置为:  $e_\theta < 2^\circ$ ,  $e_d < 2 \text{ mm}$ , 各种偏差状态的路径跟踪也取得满意结果, 如图 7(c) 和 7(d) 所示. 与图 7(a) 和 7(b) 相比, 高速时的纠偏步数大为减小. 以第二类状态为例, 纠偏过程从 20 步减小到 9 步, 但偏差的超调也更大, 角度偏差的反向最大值从  $-7^\circ$  增加到  $-9^\circ$ , 距离偏差的最大值从  $-25 \text{ mm}$  增加到  $-45 \text{ mm}$ . 再看第三类状态, 由于速度/加速度约束系统只能提供有限的纠偏能力, 原来在低速时还有可能维持该偏差状态, 但在高速时却难以避免该偏差状态发生改变. 可见, 高速时的纠偏一定要及时和协调, 否则将产生更大的偏差, 甚至使路径跟踪失败. 本文的智能预测控制器具有偏差状态转化的协调性和跟踪轨迹预测的前瞻性, 在不同偏差状态

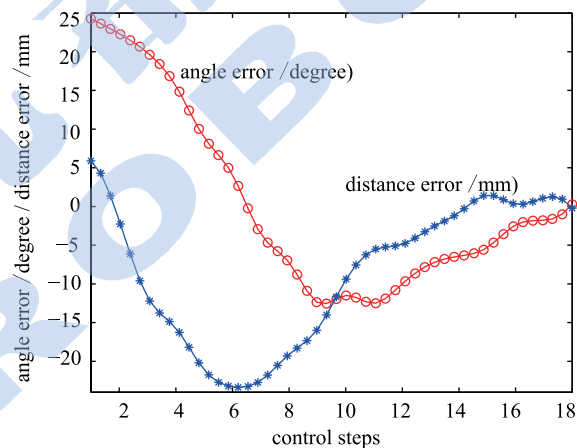
和速度下, 均能产生可实现的速度差控制量, 以使 AGV 沿光滑轨迹快速逼近并跟踪导航路径.

## 5 AGV 系统与试验 (AGV system and tests)

为验证该智能预测控制器在 AGV 路径跟踪中的实际效果, 采用嵌入式技术, 自主研发了基于视觉导航的 AGV, 并在实验室环境进行大量路径跟踪试验, 如图 8(a) 所示. 车载控制器是基于 ARM 和 DSP 的多处理器嵌入式控制系统. DSP 通过图像处理, 从地面标示线图像中获取两种路径偏差. ARM 在嵌入式实时操作系统 uC/OS-II 的支持下, 实现本文提出的智能预测控制算法, 路径跟踪任务的执行时间小于  $10 \text{ ms}$ , 表现了良好的实时性. 上位机监控软件以  $10 \text{ Hz}$  的频率, 通过无线方式实时采集 AGV 的路径偏差并存入数据库, 以此数据绘制实际的偏差纠正过程, 如图 8(b) 所示.



(a) 路径跟踪实验



(b) 纠偏实验数据

图 8 AGV 路径跟踪实验及结果

Fig.8 Tests and results of path tracking for AGV

与仿真结果相比, 跟踪实验的纠偏趋势是相同的, 只是在纠偏过程中存在一些波动. 这一方面是由于路径偏差的图像识别存在一定时延, 另一方面是由于电机驱动系统的响应存在一定滞后, 此外, 路径曲率的变化也对跟踪效果产生影响. 一般地, AGV 低速行驶的跟踪误差为:  $e_\theta \leq 1^\circ$ ,  $e_d \leq 1 \text{ mm}$ ; 高速行驶的跟踪误差为:  $e_\theta \leq 5^\circ$ ,  $e_d \leq 5 \text{ mm}$ . 可见, 本文提出的智能预测控制算法在 AGV 实际路径跟踪中具有很高的控制精度.

## 6 结论 (Conclusion)

针对预测控制中的参数选择难题, 本文提出一种基于视野状态分析的智能预测控制模型. 对理想纠偏状态采用同步控制算法协调消除两种路径偏

差, 并证明了该算法的收敛性和同步性. 对其它状态采用基于多步运动预测的最优偏差状态转化策略, 通过假设—预测—调整的迭代优化保证每一步状态的转化都符合该策略, 兼顾了多步预测的全局性和单步预测的实时性. 在纠偏过程中还充分考虑了速度/加速度约束, 速度差控制量可随两种路径偏差及时调整到零, 以维持无偏差跟踪状态. 在不同偏差状态和速度下, 数值仿真和跟踪实验的结果均表明了与理论分析的一致性, 可同步、快速和平稳地消除两种路径偏差, 且算法计算量小, 可满足嵌入式控制系统实时处理的需求. 虽然该算法的仿真和实验是针对线性路径的, 但是其思想和方法对其它类型的路径都有借鉴意义. 局部路径规划可将复杂的曲线路径转化为简单的线性路径<sup>[10]</sup>, 这将为本

文的路径跟踪算法应用于更多类型的路径奠定了基础, 而将路径规划与跟踪控制相结合正是下一步的研究方向.

### 参考文献 (References)

- [1] Zhang H B, Yuan K, Mei S Q, *et al.* Visual navigation of an automated guided vehicle based on path recognition[A]. Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004. 3877~3881.
- [2] Fang Q, Xie C X. A study on intelligent path following and control for vision-based automated guided vehicle[A]. Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004. 4811~4815.
- [3] 徐友春, 王荣本, 李兵, 等. 一种机器视觉导航的智能车辆转向控制模型设计 [J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 96~100.  
Xu You-chun, Wang Rong-ben, Li Bing, *et al.* Steering control algorithm design for machine vision guided intelligent vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(3): 96~100.
- [4] 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 Chang-ying. Lateral optimal control for wheeled mobile robot navigated by machine vision[J]. Robot, 2002, 24(3): 209~212.
- [5] Shi E X, Guo J J, He C L, *et al.* Experiment study of multi-step predictive control in AGV path tracking[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. 531~535.
- [6] Vougioukas S G. Reactive trajectory tracking for mobile robots based on non linear model predictive control[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. 3074~3079.
- [7] Jiang X H, Motai Y, Zhu X. Predictive fuzzy logic controller for trajectory tracking of a mobile robot[A]. Proceedings of the IEEE Mid-Summer Workshop on Soft Computing in Industrial Applications[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005. 29~32.
- [8] Yoo S J, Choi Y H, Park J B. Generalized predictive control based on self-recurrent wavelet neural network for stable path tracking of mobile robots: adaptive learning rates approach[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2006, 53(6): 1381~1394.
- [9] 张铭钧, 高萍, 徐建安. 基于神经网络的自治水下机器人广义预测控制 [J]. 机器人, 2008, 30(1): 91~96.  
Zhang Ming-jun, Gao Ping, Xu Jian-an. Neural-network-based generalized predictive control for autonomous underwater vehicles[J]. Robot, 2008, 30(1): 91~96.
- [10] 上官望义, 黄玉美, 要小朋, 等. 操舵构型移动机器人局部路径规划与跟踪 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(15): 1795~1800.  
Shangguan Wang-yi, Huang Yu-mei, Yao Xiao-peng, *et al.* Local path planning and tracking of mobile robot with steering configuration[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(15): 1795~1800.

### 作者简介:

武 星 (1982-), 男, 博士生. 研究领域: 智能机器人, 运动控制, 嵌入式系统等.

楼佩煌 (1962-), 男, 硕士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 智能机器人, 高精度数控, 柔性制造系统等.

杨 雷 (1969-), 男, 学士, 高级工程师. 研究领域: 工厂自动化, 智能物流系统等.