

文章编号: 1002-0446(2004)01-0040-05

两轮移动机器人运动控制系统的设计与实现*

黄永志, 陈卫东

(上海交通大学自动化研究所, 上海 200030)

摘要: 通过对两轮驱动机器人小车的运动模型的分析, 提出一种非完整性两轮机器人小车运动控制器的设计方法. 在将运动参量角速度和线速度进行解耦的基础上, 引入速度控制器, 通过反馈抑制了左右轮的扰动及参数差异对控制性能的影响, 并且以数字信号处理器芯片 TMS320LF2407A 为控制器核心, 具体实现了非完整性两轮机器人小车运动控制. 实验结果证明了上述方法的有效性.

关键词: 移动机器人; 运动控制; DSP; 非完整性

中图分类号: TP24 文献标识码: B

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MOTION CONTROLLER OF TWO-WHEELED MOBILE ROBOT

HUANG Yong-zhi, CHEN Wei-dong

(Research Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: After the analysis of the motion model of two-wheeled mobile robot, the design method of a new non-holonomic motion controller is presented in this paper. With the decoupling of the key motion control parameters, i.e. line speed and angular speed, a Speed-Compensated Controller (SCC) is designed, and the effect on control performance caused by the uncertain disturbance and parameter differences of the two wheels is greatly reduced by feedback. A special Digital Signal Processor (DSP) TMS320LF2407A is employed as the kernel of the robot motion controller. The effectiveness of the new design is testified by the experiment.

Keywords: mobile robot; motion control; DSP; non-holonomic

1 引言 (Introduction)

两轮移动机器人的运动控制对于机器人的性能有很大的影响. 在前人的研究中, 对于移动两轮机器人的运动控制在理论上做了许多开创性的工作. 研究主要集中于运动学和动力学的分析^[1, 2], 但这样的算法依赖于精确的模型和完整的信息, 实际应用中并不多见. 大部分实际应用的移动机器人左右轮的运动控制都是基于双闭环的电机控制, 内环是电流环, 外环是速度环, 每个电机单独控制.

机器人在地面的运动可归结为平面刚体运动. 而其运动可分解为直线运动、旋转运动. 这两种运动完全靠两个驱动轮速度来实现.

在闭环控制之前, 先对线速度 v 、角速度 ω 的信息进行融合, 分别求出加在闭环驱动器上左右轮的期望速度. 求出左右轮速度后, 再对两轮的速度进行闭环控制. 典型的例子如 ActivMedia 公司研制的 Pioneer II 两轮移动机器人控制方案^[3].

控制方案在 Pioneer II 实践中证明是可行的, 达到相当好的控制效果. 但是, 在有扰动的环境下 (摩擦系数不同的地面), 或者系统进行了调整 (机构上的更换), 引起的左右轮速度的偏差将得不到补偿, 实际运行的效果就是即使在直线指令下, 机器人也会偏向一侧, 并且这样的偏差会随着时间而累积.

本文针对两轮移动机器人在实际应用中存在的问题, 对两轮移动机器人的运动控制提出一种新的控制策略. 在左右轮双闭环电机控制的基础上, 加入左右轮电机速度差的补偿, 以补偿扰动和左右轮系统模型差异的影响. 同时将转角速度控制也引入控制结构中, 避免了根据转角速度指令分别算出左右轮速度进行间接的转角速度控制.

2 两轮移动机器人小车的运动模型 (Motion

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2001 AA422140, 2001 AA422200); 国家自然科学基金 (60105005) 资助.
收稿日期: 2003-06-20

model of the two-wheeled mobile robot)

小车的机械结构由车体和两个驱动轮、一个随动轮组成。随动轮仅在运动失衡时起支撑作用，在运动学方程中我们忽略不计，如图 1 所示。

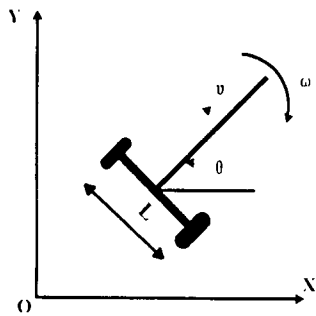


图 1 机器人小车运动模型
Fig.1 Motion model of the robot

它是一个具有非完整性约束的两轮驱动小车，满足方程： $\frac{y}{x} = \tan \theta$ 。在笛卡尔坐标系下，机器人的位姿、速度、角速度用 $((x, y, \theta), v, \omega)$ 来表示^[4]。

机器人的运动方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

因此，只要控制线速度和角速度就可以得到当前小车的位姿。

3 控制系统设计 (Design of the control system)

3.1 控制系统结构图

一般而言，通过给定电机不同的速度参数实现机器人直线、转弯或原地旋转等不同行走方式，从而控制小车的位姿，而旋转速度依赖于两轮的直线速度差。

由运动位姿方程(1)知，小车在原始直角坐标系

中的位姿完全由其所经历的线速度和角速度决定。因此我们可以根据它来设计我们的控制器。整个机器人运动控制变成了一个多输入多输出的系统，如图 2 所示。

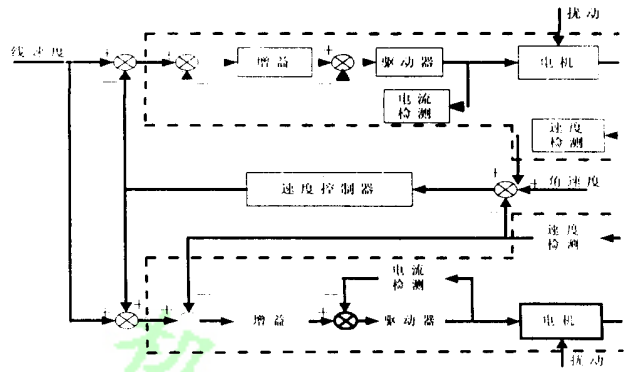


图 2 机器人运动控制系统原理图
Fig.2 Principle diagram of robot motion control system

虚线框部分由电机驱动器的性能决定。电机驱动器本身可以工作在速度模式下，可以分别调节每一个轮子的速度控制参数，并且尽可能保持左右轮速度阶跃响应的一致。

3.2 控制系统分析

控制系统分析如图 3 所示。

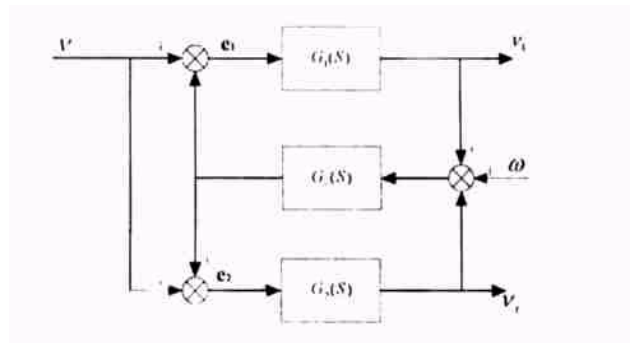


图 3 机器人速度控制图
Fig.3 Block diagram of robot speed control

图 3 控制系统的传递函数为：

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_1(S)(1 + G_2(S)G_c(S)) + G_1(S)G_2(S)G_c(S)}{1 + G_1(S)G_c(S) + G_2(S)G_c(S)} & \frac{-G_1(S)G_c(S)}{1 + G_1(S)G_c(S) + G_2(S)G_c(S)} \\ \frac{G_2(S)(1 + G_1(S)G_c(S)) + G_1(S)G_2(S)G_c(S)}{1 + G_1(S)G_c(S) + G_2(S)G_c(S)} & \frac{G_2(S)G_c(S)}{1 + G_1(S)G_c(S) + G_2(S)G_c(S)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

忽略过渡过程,我们认为当前得到的两轮速度就对应着小车给定速度 v 、 ω ,并且每一个时间周期可以由当前的给定速度 v 、 ω 及在这一时间前所有时刻的累计和得到当前小车的位置。

由左右轮速度模式下的系统阶跃响应可以构建出相应的数学模型,用 Matlab 模拟出传递函数,系统可以近似看作二阶响应。

其传递函数表示为:

$$G(s) = \frac{k_p \times \omega_n^2}{s^2 + 2 \times k_x \times \omega_n \times s + \omega_n^2}$$

以下分析设计的控制系统和没有速度控制器 $G_c(s)$ 的控制系统。假设没有旋转速度,分析速度控制器对系统模型差异的影响,简化起见,不妨设系统的 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 仍为上述二阶系统,只是 k_p 增益不同,控制器为 $G_c(s)$ 。其式为:

$$v_r = \frac{G_2(s)(1 + G_1(s)G_c(s)) + G_1(s)G_2(s)G_c(s)}{1 + G_1(s)G_c(s) + G_2(s)G_c(s)} \cdot v \quad (3)$$

$$v_l = G_1(s)v \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_r - v_l}{v_l} &= \frac{(1 + G_1(s)G_c(s))(G_2(s) - G_1(s))}{G_1(s)(1 + G_1(s)G_c(s) + G_2(s)G_c(s))} \\ &= \frac{k_{p2} - k_{p1}}{k_{p1} \left(1 + \frac{G_2(s)G_c(s)}{1 + G_1(s)G_c(s)}\right)} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\frac{v_r - v_l}{v_l} = \frac{G_2(s) - G_1(s)}{G_1(s)} = \frac{k_{p2} - k_{p1}}{k_{p1}} \quad (6)$$

可以看出,在系统模型存在差异的情况下,速度控制器 $G_c(s)$ 能够减小模型差异对右轮速度的影响。同样的,可以分析出速度控制器 $G_c(s)$ 也能够减小模型差异对左轮速度的影响。因此,速度控制器 $G_c(s)$ 能够稳定左右轮速度,提高了直线行走的性能,在这样的系统模型下,我们可以提出一些控制指标,在机器人足球这样的竞赛场景中,如果机器人角色作为“前锋”,快速性要求没有稳定性要求高;而如果角色为“守门员”,则对快速性的要求比对最后的稳定速度要求更高。因此,我们可以根据不同的控制要求设计控制器。

如果我们根据电机的模型设计一个最容易实现的离散的 PID 控制器,由系统结构看出,当指令是直线运动,但两轮实际速度不同时,不妨设 $v_l > v_r$,通过 PID 速度控制器运算后,使得加在左轮电机上的 e_1 减小,同时右轮电机上的 e_2 增加,使 v_l 、 v_r 的差趋向于零。若 PID 参数恰当,则响应速度和稳态误差都

可以达到满意的程度。由图 3 中的结构,由于驱动器电机都包含在外面左右轮闭环内,所以左右轮系统模型差异和外界扰动都可以得到补偿。而 ω 的给定就引入了两轮速度差,这样就可以实现移动机器人的旋转。

4 控制器实现 (Implementation of the controller)

基于上述设计,考虑到控制系统的实时性和高精度的要求,本文中的控制器核心芯片采用 TI 公司的运动控制专用 DSP 芯片 TMS320LF2407A 作为控制器。它集 DSP 的信号高速处理能力和适用于电机控制的外围电路于一体,大大减少了控制系统的体积,提高了系统的性价比。

4.1 TMS320LF2407A 简介

TMS320LF2407A 是 TI 公司针对控制领域开发的一块高性能 DSP 芯片。静态 CMOS 工艺,低电压 3.3V 设计,工作频率 40MHz,执行每条指令 25ns。高达 32K 16 位 Flash,544 字的双向 RAM,2K 字的单口 RAM (SARAM)。外扩可达 192K 字空间,其中 64K 程序空间,64K 数据空间,64K I/O 空间。2 个 16 位的通用计时器,8 个 16 位的 PWM 输出模块。16 通路可编程 10-Bit 模数转换。控制器局域网络 CAN 2.0 模块,串行通信接口 (SCI),16 位的串行外设接口模块 (SPI),基于锁相环的时钟发生器,高达 40 个可单独编程或复用的通用输入/通用输出引脚 (GPIO),5 个外部中断,特别适合在控制领域使用^[5]。在我们的应用中为了编程方便,外扩了 128K 的 SDRAM,其中 64K 程序空间,64K 数据空间。为了给出电机速度设定值,外扩了 4 路 D/A。

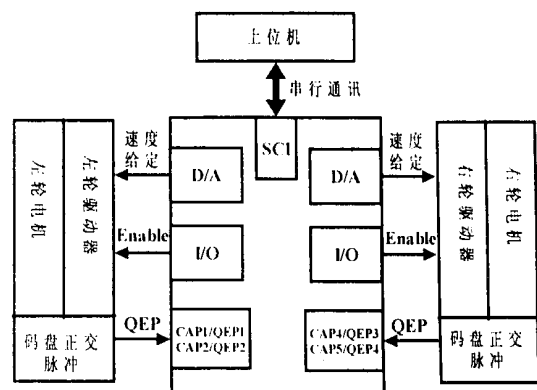


图 4 运动控制系统的硬件结构

Fig. 4 Hardware structure of the motion control system

4.2 控制器和硬件结构

在 DSP2407 中,每个 EV 模块 (Event-Manager Module) 都有一个正交编码脉冲电路.该电路使用后,可以在编码和计数引脚 CAPI/QEP1 和 CAP2/QEP2 (对于 EVA 模块)或 CAP4/QEP3 和 CAP5/QEP4 (对于 EVB 模块)上输入正交编码脉冲.每个 EV 模块中的正交编码脉冲电路的方向检测逻辑决定了两个序列中的哪一个是先导序列,然后产生方向信号作为通用定时器 2 或 4 的计数方向输入.两列正交输入脉冲两个边沿都被正交编码脉冲电路计数,因此,产生的时钟频率是每个输入序列的 4 倍^[6].

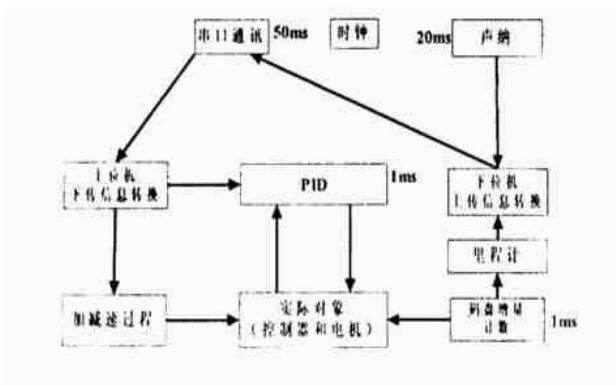


图 5 机器人运动控制软件结构图

Fig.5 Software structure of the motion control system

4.3 运动控制软件设计

机器人小车的控制器以 TMS320LF2407A 为核心,包括加速/减速过程、电机控制、速度检测、串口通讯等单元.TMS320LF2407A 主要完成以下功能:

- 根据一定的协议接收上位机的指令.
- 进行速度检测.
- 根据速度给定和实测值并按预定控制算法得到控制量,在两台电机调速系统之间增加 PID 补偿环节来消除两轮的速度偏差,达到线速度的一致性.
- 按给定的指令进行转角控制.
- 控制声纳点火.
- 里程计.

为了增加线速度和角速度控制的平稳性,在每次速度调整时,增加加、减速功能,使加速度控制在一定范围之内.系统的 PID 控制周期为 1 ms,声纳的控制周期为 20 ms,串口通讯的周期为 50 ms.

4.4 位置和方向——里程计

由方程(1),采用增量式算法,通过两驱动轮的位移推算机器人小车的位姿状态增量,求算每一时刻机器人小车的位置状态 (x, y, θ) .

设采样周期为 Δt ,在采样周期的左右轮位移为: $\Delta S_l = v_l \times \Delta t, \Delta S_r = v_r \times \Delta t$.

$$\Delta x = v \times \Delta t \times \cos \theta = \frac{\Delta S_l + \Delta S_r}{2} \times \cos \theta \quad (7)$$

$$\Delta y = v \times \Delta t \times \sin \theta = \frac{\Delta S_l + \Delta S_r}{2} \times \sin \theta \quad (8)$$

$$\Delta \theta = \omega \times \Delta t = \frac{\Delta S_r - \Delta S_l}{L} \quad (9)$$

5 实验研究 (Experiment research)

5.1 试验平台

试验平台是上海交通大学自行开发的用于中型组机器人足球比赛的“交龙 2 代”两轮移动机器人,见图 6.



图 6 交龙 2 代机器人

Fig.6 Jiaolong II robot

在比赛结束后,“交龙 2 代”也可以作为一个通用的两轮移动机器人平台.本文的运动控制设计在硬件和软件接口上都保持了通用性.调试时,当 PID 控制器参数全部为零时,速度控制器不起作用,就相当于传统的设计.这时我们可以分别调节左右轮的速度闭环控制,当左右轮的速度控制分别达到我们满意的结果时,然后再调节左右轮闭环速度调节器.

5.2 实验

在一个用地毯铺成的场地上,我们设计了两组试验,这两组试验都是移动机器人在平地上走直线.第一组试验我们将左右轮的闭环增益调出小小的偏差,人为地引入系统模型偏差,比较在不引入速度控制器(曲线 1)和引入速度控制器(曲线 2)情况下的行走轨迹,见图 7.第二组试验我们将左右轮的闭环系统尽可能调节到一致,在机器人行走路线上左轮边每隔 0.2 m 放上一截直径为 5 mm 的导线,人为引入扰动,比较在不引入速度控制器(曲线 1)和引入速度控制器(曲线 2)情况下的行走轨迹,见图 8.

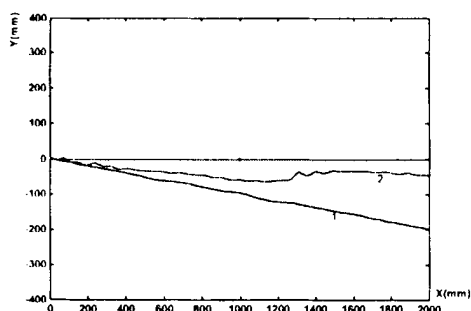


图7 系统模型差异情况下运动性能
Fig.7 Motion performance with model differences

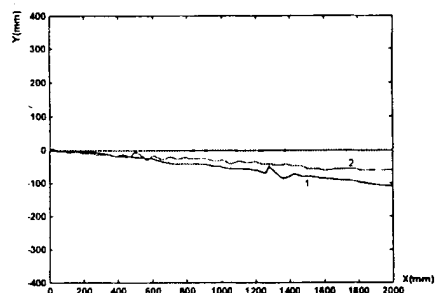


图8 有扰动情况下运动性能
Fig.8 Motion performance with disturbances

5.3 结果分析

在有系统模型差异和有扰动的情况下,分别采用当前的设计和传统设计,比较机器人小车的直线行走的性能来说明当前设计的合理性.

在系统模型差异的情况下,不采取速度补偿环节,可以看出在纵向直线行走 2m 的时候,横向偏移达到 197mm;采取速度补偿环节,在纵向直线行走 2m 的时候,横向偏移只有 45mm,大大减少了系统模型差异引起的静态误差.

将模型差异尽可能调到一致,然后在运行中人为引入一个阶跃扰动冲击,不采取速度补偿环节,可以看出在纵向直线行走 2m 的时候,横向偏移达到 109mm;采取速度补偿环节,在纵向直线行走 2m 的时候,横向偏移只有 60mm.并且可以看出,在不采取速度补偿环节时,偏差是单向增加的;而在采取速度补偿环节时,偏差是在一定的稳态偏差上上下下波动的,因此,在本文的设计中,偏差不会随着时间的延续而累计,这样的设计对于机器人的稳态运行尤为重要.

6 结论 (Conclusion)

非完整性两轮小车运动控制是移动机器人最基本的一种控制问题.本文提出一种新的完全的多变量控制的设计,控制目标由给定的直线速度和旋转速度来完全控制.存在干扰和考虑实际物理器件差异的情况下,这样的设计能够实现相当好的性能.

实际上,机器人小车运行的环境中,干扰总是存

在的(不光滑的地面、障碍物的阻挡、轮轴之间的间隙等),由于在输出速度之间增加了耦合,消除了干扰,控制性能得以提高.在下一步的研究中,将对不同的控制性能要求,利用先进控制方法,设计更好的鲁棒性控制器;甚至可以让它在环境中学习,得出适应不同环境的自适应控制器.

参考文献 (References)

- [1] DeLuca A, Oriolo G, Samson C. Robot motion planning and control [A]. Laumond J-P. Feedback Control of a Nonholonomic Car-like Robot[M]. <http://www.laas.fr/~jpl/book-toc.html>, Springer Verlag, 1998.
- [2] Z Y K. Controllability and stabilization of the programmed motions of a transport robot[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 64(6): 871 - 890.
- [3] ActivMEDIA ROBOTICS. Pioneer 2 Mobile Robot Operating Manual [EB/OL]. <http://robots.activmedia.com/archives/pioneer-users/p2opman2.pdf>, 1999.10.
- [4] 吴卫国. 非完整性系统(移动机器人)反馈控制研究[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [5] Texas Instruments. TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide(System and Peripherals) TI公司资料[Z]. 2001.
- [6] 刘和平. TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.

作者简介:

黄永志 (1975-), 男, 硕士研究生. 研究领域: 机器人足球, 运动控制.

陈卫东 (1968-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 智能机器人控制, 多机器人协作.