

# 一种全方位移动机器人的运动分析与控制实现

张 翮,熊 蓉,褚 健,丁冠英

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 为达到在动态环境下,对机器人进行实时控制的目的,提出一种全方位移动机器人运动控制器的设计方法. 以足球机器人 Robocup 作为实验平台,全方位移动机器人作为研究对象,通过研究具有四组正交轮组成的移动机构运动机理,在将机器人运动进行分析的基础上,以数字信号处理器(DSP)为核心,引入专家比例-积分-微分(PID)速度控制器,实现了对机器人的控制. 实验结果表明,该设计方法有很好的实时性和一定的鲁棒性,在实际比赛中,实现了对全方位移动机器人的快速、实时、准确控制.

**关键词:** 全方位移动机器人;控制实现;DSP

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-973X(2004)12-1650-04

## Motion analysis and control realization of omni-directional robot

ZHANG He, XIONG Rong, CHU Jian, DING Guan-ying

(National Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** To real-time control omni-directional robot in dynamic environment, the designation of robot's motion controller was provided. The experiment was tested in Robocup platform and used omni-directional robot as research object. After analyzing the robot motion and the kinematics characteristics of the omni-directional robot with four orthogonal-wheels, the proportional-integral-derivative (PID) speed controller and feedback control were introduced. The motion control of the four-wheel omni-directional robot was implemented by using digital signal processing (DSP) as the kernel of controller, so that the robot motion was ensured. Experiments indicate that the controller is superior in real-time and robustness. In annual Robocup competition, the robot has satisfactory performance in this computationally intensive, dynamic environments.

**Key words:** omni-directional mobile robot; motion control; DSP

移动机器人已经成为机器人研究领域的一个重要分支. 在军事、危险操作和服务业等许多应用场合,需要机器人实时通过无线通讯接受控制命令,以期望的速度、方向和轨迹灵活自如地移动. 其中,运动控制系统直接影响机器人系统的整体性能. 因此对机器人的运动控制研究一直是研究热点之一. 本文所述机器人基于 Robocup 足球机器人平台这个动态环境,采用日立公司生产的蓝牙模块进行无线通讯,TMS3202407A 作为机器人微处理器,采用专

家比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制算法控制脉冲宽度调制(pulse width modulator, PWM)的占空比,对电机进行调速,以实现在动态环境下快速准确到达目标点的功能.

移动机器人按照移动方式可分为轮式、履带式、腿式等,其中轮式机器人由于具有机构简单、活动灵活等特点尤为受到青睐. 按照移动特性又可将移动机器人分为非全方位和全方位两种. 物体在平面上的移动存在前后、左右和自转 3 个自由度的运动,

若所具有的自由度少于 3 个,则为非全方位移动机器人,典型应用如汽车等,如文献[1]介绍的四轮移动机器人,可以前进、拐弯而不能横向移动;若具有完全的 3 个自由度,则称为全方位移动机器人,有独轮、三轮、四轮等. 它非常适合工作在空间狭窄、有限、对机器人的机动性要求高的场合中<sup>[2]</sup>. 全方位轮有效避免了普通轮子不能侧滑带来的非完整性约束,使机器人具有平面运动的全部 3 个自由度,机动性增强. 理论上可在机器人所处平面上以任何角度和速度运动. 基于以上分析,全方位移动的轮式移动机器人成为足球机器人 Robocup 平台的最佳选择. 对移动机器人的点动控制,前人多集中于对两轮控制的研究,如 ActivMedia 公司研制的 PioneerII 两轮移动机器人控制方案<sup>[3]</sup>. 本文所述全方位移动机器人从机构上解决了约束问题,每个电机由数字信号处理器(digital signal processing, DSP)芯片单独控制.

1 机器人的运动模型

机器人和机器人配备的全方位轮如图 1、2 所示,下面分别从机器人的运动模型和运动控制的实现等方面进行介绍.

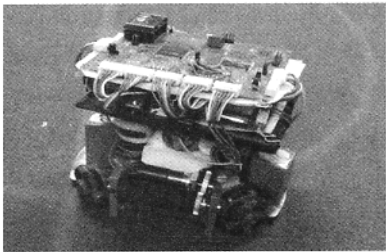


图 1 万向移动机器人成品图

Fig. 1 Omni-directional wheeled robot

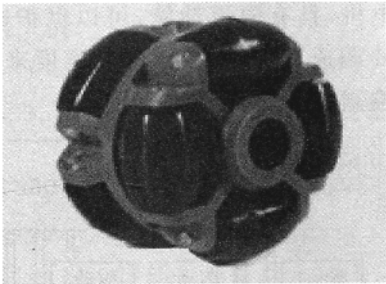


图 2 万向轮

Fig. 2 Omni-directional wheel

在建立机器人系统模型之前,根据实际应用可作如下假设:

1) 小车是在一个平坦的表面上运动,可以忽略地面的不规则情况;

2) 轮子和地面之间点对点的滚动摩擦小到可以使车轮滚动;

3) 机器人小车是刚体,不考虑形变的情况.

本文所述全方位移动机器人的整体速度可分解为轴向可控的电机速度和径向不可控的从动轮的速度. 每个全方位轮由直流无刷电机驱动. 因此各个电机的电压是控制全方位轮运动的控制量.  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_\theta$  是机器人在二维平面上运动的状态矢量.

定义机器人小车的轮子排布如图 3 所示,4 个轮子记作  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ ,其中  $W_1$ 、 $W_4$  在前,  $W_2$ 、 $W_3$  在后. 取小车的质心为原点建立起坐标系  $\Sigma_R$ ,取小车的对称轴为  $x$  轴. 各轮的轴心在  $\Sigma_R$  下的位置向量为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ ,记  $P_i$  的长度为  $L_i$ ,取逆时针方向为正方向,各轮的运动方向在  $\Sigma_R$  下的向量为  $D_i$ ,各轮与  $P_i$  垂直方向的向量为  $T_i$ . 设  $D_i$  与  $x$  轴的夹角为  $\varphi_i$ , $T_i$  与  $x$  轴的夹角为  $\gamma_i$ .

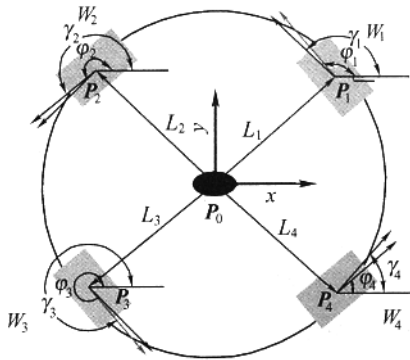


图 3 机器人小车排布定义

Fig. 3 Definition to placement of robot

$D_i$ 、 $T_i$  可以表示为

$$\begin{aligned} D_i &= (\cos(\varphi_i) \quad \sin(\varphi_i))^T, \\ T_i &= (\cos(\gamma_i) \quad \sin(\gamma_i))^T. \end{aligned} \tag{1}$$

以上所定义的角度均在  $[0, 2\pi]$ ,根据对称性,有

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 + \varphi_4 &= \pi; \varphi_2 + \varphi_3 = \pi; \\ \gamma_1 + \gamma_4 &= \pi; \gamma_2 + \gamma_3 = \pi; \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

机器人每个轮子的切向速度是可控的,记为  $[W_1 \ W_2 \ W_3 \ W_4]^T$ . 机器人几何中心在二维平面上的运动可用  $[V_x \ V_y \ V_\theta]^T$  表示. 通过建立运动学模型,可获得机器人各轮轮速和机器人质心位姿的关系.

机器人整体速度是平动和转动的合成. 由于机器人是刚体,在其任何一点都有相同的平动速度和角速度. 下面分析各轮中心平动和转动的情况.

1.1 平动情况

如图 4,以轮 1 为例. 机器人整体的速度为  $V$ ,在绝对坐标系  $\Sigma_A$  下  $V$  在  $x$ 、 $y$  轴上的分速度为  $V_x$ 、 $V_y$ . 机器人轮子的速度可分解为可控的切向速度  $V_q$

和不可控的法向从动轮速度  $V_f$ . 其中  $V_x \perp V_y$ ,  $V_q \perp V_f$ . 有

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_x + \mathbf{V}_y = \mathbf{V}_q + \mathbf{V}_f. \tag{3}$$

对于各个轮子有

$$\begin{aligned} V_{q_i} &= V_x \cos (\pi - \varphi_i) + V_y \cos (\varphi_i - \pi / 2) = \\ &V_x \cos \varphi_i + V_y \sin \varphi_i = \\ &(\cos \varphi_i \quad \sin \varphi_i)\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{4}$$

根据各个轮子  $V_q$  相对于绝对坐标角度不同,引入旋转矩阵

$$\mathbf{R}(\theta)=\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}.$$

式中:  $\theta$  为机器人在绝对坐标下的姿态. 得到

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_q &= V_{q_i} \mathbf{R}(\theta) = \\ &(\cos (\varphi_i+\theta) \quad \sin (\varphi_i+\theta))\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{5}$$

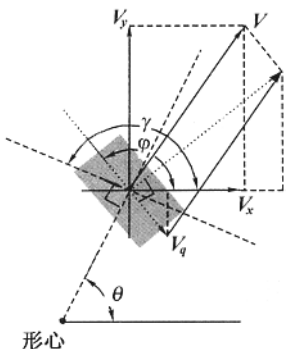


图 4 万向轮运动学分析

Fig. 4 Analysis of omni-directional wheel motion

1.2 转动情况

由于机器人轮轴的切线方向不垂直于机器人形心与轮子的连线,因此有

$$\mathbf{V}_q = \mathbf{V}_\theta L \cos (\gamma - \varphi). \tag{6}$$

1.3 综合平动和转动情况

四个轮子都满足式(5)、(6),将平动和转动结合,建立机器人运动学模型如下:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos (\varphi_1+\theta) & \sin (\varphi_1+\theta) & l_1 \cos (\varphi_1-\gamma_1) \\ \cos (\varphi_2+\theta) & \sin (\varphi_2+\theta) & l_2 \cos (\varphi_2-\gamma_2) \\ \cos (\varphi_3+\theta) & \sin (\varphi_3+\theta) & l_3 \cos (\varphi_3-\gamma_3) \\ \cos (\varphi_4+\theta) & \sin (\varphi_4+\theta) & l_4 \cos (\varphi_4-\gamma_4) \end{pmatrix} \cdot \\ &\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_\theta \end{pmatrix} = \mathbf{J}(\theta)(\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta})^T, \end{aligned} \tag{7}$$

这样,已知机器人整体的速度就可以求出 4 个轮子的速度. 已知机器人在二维平面上的速度,上位机就可以得到四个轮子的轮速,将数据发送给 DSP,达到控制的目的.

2 运动控制器设计

机器人小车以 TMS320LF2407A 为控制芯片. 该芯片指令执行时间短,运算速度快,并集成了功能强大的外设模块<sup>[4,5]</sup>. LF2407A 集 DSP 高速信号处理运算能力和适于电机控制的外围电路于一体,减小了电子元件数目,简化了电路设计,提高了硬件稳定性,适用于足球机器人的动态环境.

控制系统包括电机驱动、速度检测、无线接收等单元. 图 5 为整体运动控制系统硬件架构. 硬件系统应用双 DSP,工作频率为 40 MHz,每个 DSP 发出两路独立的 PWM 信号对电机进行控制,DSP 之间通过控制器局域网(controller area network, CAN)总线进行通讯,传输上位机指令、反馈速度信号及传感器数据. 有关电机控制,DSP 主要完成以下功能:

- 1) 根据一定的协议接收上位机的指令;
- 2) 进行速度检测;
- 3) 根据上位机速度给定和实测值并按预定控制算法得到控制量,实现 PWM 方式调速,完成单轮的速度闭环控制.

LF2407 的事件管理器(event-manager module, EMM)产生独立的 2 路频率为 20 kHz 高分辨率的 PWM 信号控制两个电机的速度,2 个计数器进行电机转速的测量,串行通信接口(serial communication interface, SCI)可以及时通过无线通讯接收模块接收速度指令信息. 编码器发出的两路正交脉冲通过直接送入 DSP 的正交编码脉冲(quadrature encode pulse, QEP)单元,进行可逆计数,获得电机的转速和方向.

驱动环节由双 H 桥 L298 电路构成. L298 不仅可以驱动电机,且有限流功能,可以保护电机. DSP 采用 PWM 调速,通过改变脉冲的宽度来实现对电机的调速控制.

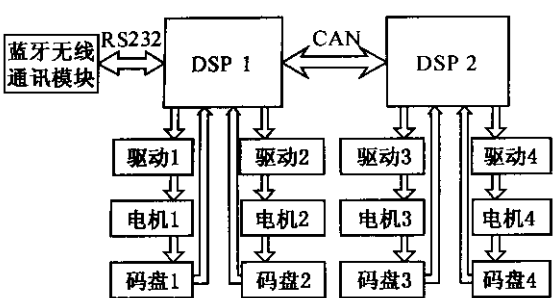


图 5 机器人硬件系统整体结构

Fig. 5 Overall structure of robot

3 软件设计

DSP 可用汇编语言也可用 C 语言开发. 由于汇编的快速性,同时代码不是很长,因此采用汇编开发. 主程序流程如图 6 所示,其中定时器中断程序运行 PID 子程序.

由于 SCI 和 CAN 数据量较大,采用中断式程序设计将频繁进入中断,因此采用轮寻式结构.

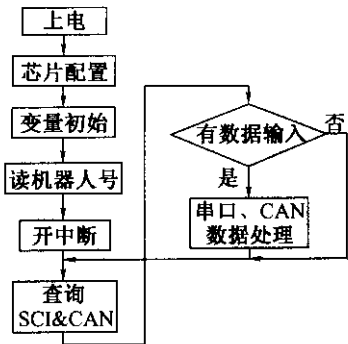


图 6 主程序流程图  
Fig. 6 Flowchart of primary program

4 控制算法

速度控制有很多种控制算法,比较典型的是文献[5]所应用的比例积分控制和专家控制. 由于研究平台是基于对实时性要求很高的足球机器人,因此采用专家 PID 控制. 设

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1).$$

式中： $e(k)$ 为实际轮速与指令轮速的偏差.

根据误差及其变化,设计专家 PID 控制器. 分下面五种情况.

1) 当  $|e(k)| \geq M_1$  时,偏差绝对值很大. 控制器应输出最大值.

2) 当  $e(k)\Delta e(k) > 0$  时,如果  $|e(k)| \geq M_2$ ,说明偏差也较大. 控制器要实施较强的控制作用,输出为

$$u(k) = u(k-1) + k_1 \{k_p[e(k) - e(k-1)] + k_1 e(k) + k_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]\}.$$

如果  $|e(k)| < M_2$ ,说明偏差虽然在增大,但绝对值不大,控制应实施一般的控制作用,输出为

$$u(k) = u(k-1) + k_p[e(k) - e(k-1)] + k_1 e(k) + k_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)].$$

3) 当  $e(k)\Delta e(k) < 0, \Delta e(k)\Delta e(k-1) > 0$  时,偏差绝对值朝减小的方向变化,系统趋于稳定. 控制器输出应不变.

4) 当  $e(k)\Delta e(k) < 0, \Delta e(k)\Delta e(k-1) < 0$  时,偏差处于极值. 如果  $|e(k)| \geq M_2$ ,应实施较强控制作用

$$u(k) = u(k-1) + k_1 k_p e_m(k);$$

如果  $|e(k)| < M_2$ ,输出为

$$u(k) = u(k-1) + k_2 k_p e_m(k).$$

5) 当  $|e(k)| \leq \epsilon$  时,偏差很小,此时加入积分,减小稳态偏差. 式(9)~(12)中, $e_m(k)$ 为偏差的第  $k$  个极值;  $k_p, k_2, k_d$  为 PID 控制的比例、积分、微分系数  $k_1$  为增益放大系数,  $k_1 > 1$ ;  $k_2$  为抑制系数,  $0 < k_2 < 1$ ;  $M_1, M_2$  为设定的偏差阈值;  $\epsilon$  为较小的正实数. 以上参数均由专家经验取得.

5 实际应用

本文研制的移动机器人,行走机构采用 4 组全方位正交轮. 采用德国 Faulhaber 公司生产的直流无刷电机进行驱动,它具有体积小、转矩大等优点; 电源采用 15 V 锂电池; 轮子通过减速比为 14 : 1 的减速箱与电机进行连接. 电机配备 512 线光电码盘产生反馈信号. 如图 7 所示,将上位机的指令与 DSP 采样取得的实际速度进行比较,可以清楚地看出该系统实时快速地完成了上位机的指令,满足了系统要求. 在实际应用中,该设计还体现了对噪声的抗干扰能力,体现了一定的鲁棒性. 机器人具体参数如下:

- 最大速度: 1 400 mm/s
- 最大瞬时加速度: 3 600 mm/s<sup>2</sup>
- 加速时间:  $V_{\max} < 400$  ms, 典型值 389 ms.

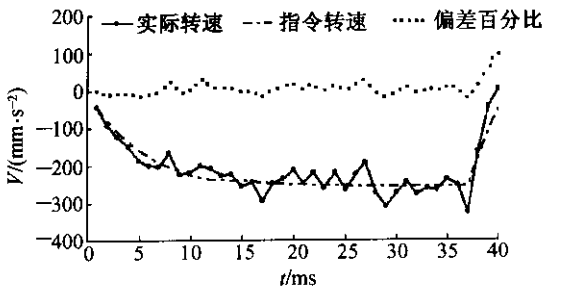


图 7 轮 1 实际轮速与指令轮速比较  
Fig. 7 Comparison of real wheel speed and sent speed of No. 1 wheel

waveguide experiment to characterize left-handed properties of metamaterials [J]. **Journal of Applied Physics**, 2003, 94(6): 3712 – 3716.

[6] PACHECO JJR, GRZEGORCZYK T M, WV B, *et al.* Power propagation in homogeneous isotropic frequency-dispersive left-handed media [J]. **Physical Review Letters**, 2002, 89(25): 257401.

[7] PENDRY J B, SMITH D R. Comment on “Wave refraction in negative-index media: Always positive and very inhomogeneous” [J]. **Physical Review Letters**, 2003, 90(2): 029303.

[8] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. **Science**, 2001, 292(6): 77 – 79.

[9] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, *et al.* Extremely low frequency plasmons in metallic meso-structures [J]. **Physical Review Letters**, 1996, 76(25): 4773 – 4776.

[10] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, *et al.* Magnetism from conductors and enhanced nonlinear

phenomena [J]. **IEEE Transactions Microwave Theory Technology**, 1999, 47(11): 2075 – 2084.

[11] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. **Journal of Computational Physics**, 1994, 114(1): 185 – 200.

[12] TAFLOVE A. **Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method** [M]. Boston: Artech House, 1995.

[13] MOSS C, GRZEGORCZYK T M, ZHANG Y, *et al.* Numerical studies of left-handed metamaterials [J]. **Progress in Electromagnetics Research**, 2002, 35: 315 – 334.

[14] 陈红胜, 冉立新, 皇甫江涛, 等. 异向介质平板对高斯波传播的影响[J]. 浙江大学学报: 工学版. 2004, 38(10): 1380 – 1382.

CHEN Hong-sheng, RAN Li-xin, HUANGFU Jiang-tao, *et al.* Impact of the metamaterial slab on the propagation of a Gaussian beam[J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2004, 38 (10): 1380 – 1382.

(上接第 1653 页)

6 结 语

机器人运动控制系统是整个 Robocup 机器人系统的执行机构,在场上的表现直接影响了整个足球机器人系统. 机器人小车的性能优劣对整个系统起着举足轻重的作用. 本文基于合理的理论假设,分析了机器人的运动模型,介绍了基于 DSP 控制器的足球机器人运动控制的实现,并通过实际应用证明了设计的有效性和实用性. 这种机器人运动控制的实现方法对全方位移动机器人有一定的普适性. 该设计足球机器人已经参加了在葡萄牙里斯本举行的 Robocup2004 足球机器人世界杯,在实际比赛中发挥了良好的水平. 但是为了满足 Robocup 平台对实时性的高要求,简化了计算和理论假设,没有考虑车轮打滑和地面不平导致的抖动情况,这还需要今后继续研究.

参考文献 (References):

[1] LUCA Caracciolo, ALESSANDRO De Luca, STEFANO

Iannitti. Trajectory tracking control of a four-wheel differentially driven mobile robot [J]. **International Conference on Robotics and Automation**, 1999: 2632 – 2638.

[2] 赵冬斌, 易建强, 邓旭玥. 全方位移动机器人结构和运动分析[J]. 机器人, 2003, 25(5): 394 – 398.

ZHAO Dong-bin, YI Jian-qiang, DENG Xu-yue. Structure and kinematic analysis of omni-directional mobile robots[J]. **Robot**, 2003, 25(5): 394 – 398.

[3] 黄永志, 陈卫东. 两轮移动机器人运动控制系统的设计与实现[J]. 机器人, 2004, 26(1): 40 – 44.

HUANG Yong-zhi, CHEN Wei-dong. Design and implementation of motion controller of two-wheeled mobile robot[J]. **Robot**, 2004, 26(1): 40 – 44.

[4] 张雄伟, 曹铁勇. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.

[5] 刘永利, 徐兵, 杨华勇. 液压电梯控制系统的两极控制器设计[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(2): 222 – 225.

LIU Yong-li, XU bing, YANG Hua-yong. Two level hierarchical controller for hydraulic elecator[J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2004, 38(2): 222 – 225.