

# 基于 CANopen 协议的轮式机器人控制系统实现

周 旭,严玉龙,王珊珊,李 军

(南京理工大学 自动化学院,江苏 南京 210094)

**摘 要:** 针对当前以 DSP 为机器人控制器中的串口数量有限、通信抗干扰能力差等问题,提出了基于 CANopen 协议的轮式机器人运动控制系统,并给出其在 DSP 上的应用实现。首先介绍了机器人运动控制方法,然后介绍了 CANopen 协议在 DSP 上的具体实现,最后在实际机器人系统中进行测试。实验结果表明,基于 CANopen 协议的轮式机器人控制系统可以满足机器人控制的实时性和稳定性。

**关键词:** 轮式机器人;运动控制系统;DSP;CANopen

中图分类号:TP242

文献标识码:A

文章编号:1674-7720(2013)23-0020-04

## Implement of motion control system for wheeled robot based on CANopen protocol

Zhou Xu, Yan Yulong, Wang Shanshan, Li Jun

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to solve the problems about limited number of serial ports, poor capacity of resisting disturbance, asynchronous control and the like in robot controller using DSP, a new motion control system for wheeled robot based on CANopen protocol and its implement in DSP is introduced in this paper. After an introduction of the method of robot control, the implement of CANopen protocol in DSP is discussed in detail. At last, it is tested in robot system. The real-time and stability of the designed system are verified with experiments.

**Key words:** wheeled robot; motion control system; DSP; CANopen

CAN 总线是一种串行通信协议,具有较高的通信速率和较强的抗干扰能力,现已被广泛地应用于工业自动化、交通工具、医疗器械、机械制造、楼宇控制、自动化仪表等众多领域。CANopen 协议是由 CiA (CAN in Automation) 组织在 CAN 标准协议 CAN 2.0 协议、国际标准 ISO 11898 定义物理层和数据链路层的基础上监督开发出的一种高层协议,是一个开放的、标准化的应用层协议,在各种控制系统中均有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。

当前,基于 DSP 的机器人控制系统中仍存在许多使用串口实现机器人执行机构(如电机)的驱动。这种方法存在一些缺点,如当机器人执行机构(即电机)数量较多时,DSP 串口数量会不足,需要扩展串口。而串口通信速率较慢且抗干扰性不强,且串口通信无法实现多电机的同步控制。针对这些问题,本文主要提出了基于 CANopen 协议的轮式机器人控制系

统,并给出其在 TMS320F2812 DSP 上的具体实现。本文首先介绍了两轮差动式移动机器人的动力学模型、基于双码盘的机器人运动控制方法,然后介绍了 CANopen 协议在机器人运动控制系统的应用及实现,并在实际机器人系统中验证了该控制系统的可行性、实时性和稳定性。

### 1 机器人导航

#### 1.1 机器人动力学模型

图 1 是典型的两轮差动式机器人简化模型。其后轮是两个同轴的驱动轮,每个轮子由单独的电机驱动;前轮是一个起支撑作用的万向轮,保持车体稳定。设机器人的质心为底盘中轴线上的点  $M$ ,两驱动轮之间间距为  $L$ ,驱动轮半径为  $r$ ,左右驱动轮电机角速度分别为  $\omega_1$  和  $\omega_2$ ,机器人自身角速度为  $\omega$ ,机器人线速度为  $v$ ,则其运动学方程为<sup>[2]</sup>:

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

$$v = \frac{\omega r + \omega r}{2} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{\omega r - \omega r}{L} \quad (3)$$

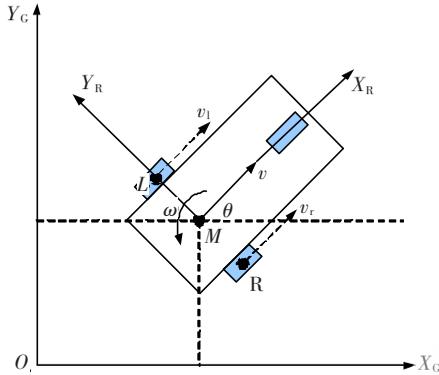


图1 差动机器人运动模型

1.2 机器人控制方案

在竞赛机器人的运动控制中,被控制的机器人具有任意的位置和方向  $A(x_1, y_1, \theta_1)$  和预定目标位置  $B(x_2, y_2, \theta_2)$ , 机器人运动控制的任务就是控制机器人从 A 点平稳准确地运动到 B 点, 并且机器人最终的姿态应当符合给定的要求<sup>[3]</sup>。

机器人参考坐标系的横轴  $X_R$  总是与机器人的运动方向保持相同, 起始点与目标点间的连线设为向量, 方向由起始点指向目标点。不失一般性, 假定目标位置处于惯性框架的原点, 如图 2 所示。图中,  $\rho$  表示机器人初始位置与目标位置之间的距离,  $\theta_1$  表示当前角度,  $\alpha$  表示当前运动方向和向量之间的角度,  $\theta_2$  表示目标点期望角度,  $\beta$  表示目标点机器人运动方向和向量  $\hat{x}$  之间的角度,  $\gamma$  为  $X_C$  与向量  $\hat{x}$  之间的角度, 所有角度均以逆时针方向为正。

在全局坐标系下, 直角坐标转化为极坐标形式为:

$$\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} - \theta_1 \quad (5)$$

$$\beta = \theta_1 - \theta_2 + \alpha \quad (6)$$

因此, 在新的极坐标中得到的非完整性系统描述为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\alpha & 0 \\ \frac{\sin\alpha}{\rho} & -1 \\ \frac{\sin\alpha}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 。

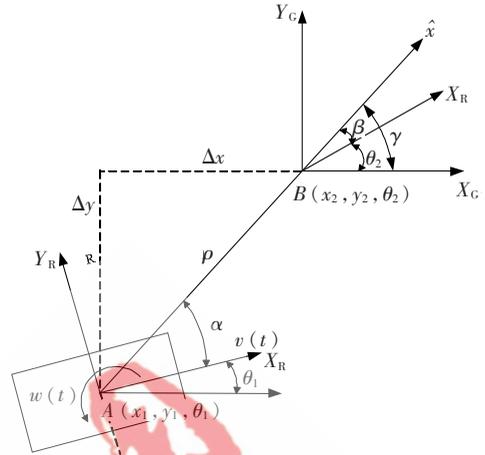


图2 机器人运动图

或

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 \\ -\frac{\sin\alpha}{\rho} & -1 \\ -\frac{\sin\alpha}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $\alpha \in \left(-\pi, \frac{\pi}{2}\right] \cup \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ 。

对于  $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ , 机器人运动正方向为指定目标点, 而对于  $\alpha \in \left(-\pi, \frac{\pi}{2}\right] \cup \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ , 定义的正方向背离目标点。在控制模型的初始化时, 通常有可能在  $t=0$  时, 有  $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 。但是这并不表示在所有时间  $\alpha$  都在  $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$  的范围内。因此, 为了避免机器人到达目标时改变方向, 在设计控制器模型时, 应保证  $\alpha(0) \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ , 并且对任何时间  $t$ , 保证  $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 。

在差速驱动的机器人控制中, 可以通过调节左右电机的转速差值改变机器人线速度  $v$  和角速度  $\omega$ , 使机器人按照规划的路径运动到目标位置。即机器人的线速度  $v$  和角速度  $\omega$  是轨迹导航的控制信号, 控制算法需要设计对于  $v$  和  $\omega$  的控制规律, 把机器人从当前实际位置驱动到目标位置。为了控制更方便、简单, 考虑线性控制算法:

$$v = k_\rho \rho \quad (9)$$

$$\omega = k_\alpha \alpha + k_\beta \beta = k_\alpha \alpha + k_\beta \gamma - k_\beta \theta_2 \quad (10)$$

由上式可以得出:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_\rho \rho \cos\alpha \\ k_\rho \sin\alpha - k_\alpha \alpha - k_\beta \beta \\ k_\rho \sin\alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

控制系统在  $\rho=0$  时没有奇异,在  $(\rho, \alpha, \beta)=(0, 0, 0)$  有唯一的平衡点,所以它可以驱动机器人运动到目标点。由式(9)、式(11)知,机器人速度  $v$  的符号是恒定的,只要  $\alpha(0) \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ ,  $v$  就一直为正向;反之,  $\alpha \in \left[-\pi, \frac{\pi}{2}\right] \cup \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ , 则一直反方向运动,即机器人从启动到停止总是自单个方向,无逆向运动。

在实际应用中,  $k_\rho, k_\alpha, k_\beta$  的参数组合需要满足控制系统的局部稳定性条件。将式(11)线性化,得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_\rho & 0 & 0 \\ 0 & -(k_\alpha - k_\rho) & -k_\beta \\ 0 & -k_\rho & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

要使局部指数稳定,则矩阵特征值如式(13)所示,应全部有负实部:

$$A = \begin{bmatrix} -k_\rho & 0 & 0 \\ 0 & -(k_\alpha - k_\rho) & -k_\beta \\ 0 & -k_\rho & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

即矩阵  $A$  的特征多项式  $(\lambda + k_\rho)(\lambda^2 + \lambda(k_\alpha + k_\rho) - k_\rho k_\beta)$  所有的根有负的实部。因此,  $k_\rho, k_\alpha, k_\beta$  3个参数应满足:  $k_\rho > 0, k_\beta k_\alpha > 0, k_\alpha - k_\rho > 0$ 。

## 2 基于 CANopen 协议通信的实现

### 2.1 CANopen 协议

CANopen 的核心概念是设备对象字典以及通信机制<sup>[4,5]</sup>。

#### 2.1.1 对象字典 OD (Object Dictionary)

OD 是 CANopen 协议的核心概念,定义了设备参数、通信参数以及设备的全部应用对象。每个对象通过一个 16 位的索引进行寻址,同时为了允许访问数据结构中的单个元素,定义了一个 8 位的子索引。OD 的结构如表 1 所示。

表 1 CANopen 对象字典结构

索引	对象
0	未使用
0001~001F	静态数据类型
0020~003F	复杂数据类型
0040~005F	制造商规定的复杂数据类型
0060~0FFF	保留
1000~1FFF	通信子协议区
2000~2FFF	制造商特定自协议区
6000~6FFF	标准设备子协议区
A000~FFFF	保留

#### 2.1.2 CANopen 通信机制

CANopen 通信模型定义了 4 种报文(通信对象):管理报文 NMT、服务数据对象 SDO、过程数据对象 PDO 以及特殊功能对象。

NMT 用来传递主节点对整个网络系统的管理信息。每个 CANopen 从节点都有初始化、预操作、操作和停止 4 个状态。NMT 负责由组节点控制从节点在各个状态间的转换,如图 3 所示。SDO 用来传递网络系统中的配置信息。PDO 用来实施传送过程数据信息。特殊功能对象用于同步、应急指示和时间标记对象。

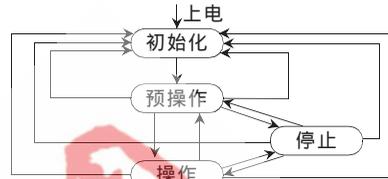


图 3 节点状态转换图

### 2.2 硬件设计

本文主要研究基于 CANopen 协议的轮式机器人控制系统在 DSP 上的实现,系统结构如图 4 所示。该系统使用 TMS320F2812 DSP 作为主控芯片,使用 3 个 ELMO 公司生产的 Harmonica 型伺服电机驱动器以及 3 个 MAXON 公司生产的伺服电机作为机器人运动的动力系统,其中两个用于底盘运动控制,一个用于提升机构运动控制。DSP 与 ELMO 电机驱动器之间通过 CAN 总线及 CANopen 协议进行通信,主要交换控制命令以及码盘读回的信息。

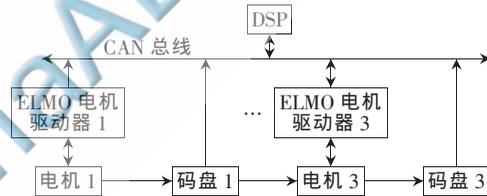


图 4 硬件系统结构图

CAN 总线上的信号使用差分电路进行传送,两条信号线被称为 CAN\_H 和 CAN\_L,静态时均为 2.5 V 左右,这时的状态表示逻辑 1,用 CAN\_H 的电平比 CAN\_L 的电平高的状态表示逻辑 0。此时,CAN\_H 的电平为 3.5 V,CAN\_L 的电平为 1.5 V。

由于 TMS320F2812 芯片内已集成了 CAN 总线控制器 eCAN 模块,所以外部 CAN 总线的电路设计较简单,只需将 TMS320F2812 的 CANTX、CANRX 引脚连入 CAN 总线中的 CAN\_H 和 CAN\_L 即可。但是 eCAN 模块的引脚电平为 3.3 V,为了使其电平符合高速 CAN 总线的电平特性,在 eCAN 模块和 CAN 总线之间增加 CAN 的电平转换器件 SN65HVD230,同时,总线高低电平之间需要跨接 120  $\Omega$  的终端匹配电阻。硬件电路图如图 5 所示。

### 2.3 软件设计

电机控制的通信流程如图 6 所示。首先,通过 ELMO 自带的配置软件将各个电机驱动器的节点配置

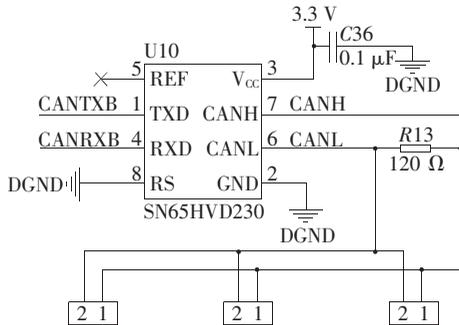


图5 CAN总线硬件电路图

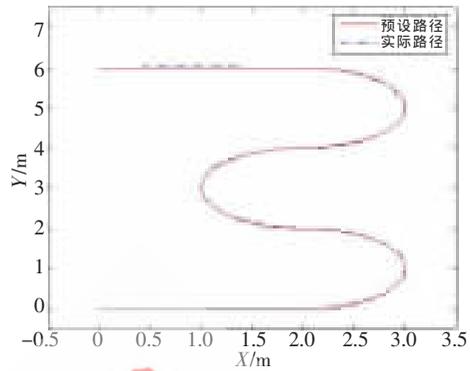


图7 跟踪轨迹图

完成并检查电路无误后上电, DSP 经过相关初始化后等待各个节点返回的 boot-up 信息, 等待完毕后通过 SDO 写入各个节点参数配置并将各节点的状态转变为操作状态, 之后通过 PDO 获取相应信息或者发送控制命令。

#### 2.4 实验验证

首先验证电机的同步启动问题。为了能更加清晰地观察多电机控制效果, 在给每个电机发送控制命令之间引入较大的时间间隔, 如 5 s。当用串口控制时, 可以清楚地观察到一个电机是在另一个电机启动后 5 s 才启动的, 而用 CAN 总线和 CANopen 协议控制时, 虽然每个电机接收到启动命令具有 5 s 的间隔, 但是在 SYNC 同步命令发送到总线之前, 各个电机均不会启动, 只会保存接收到的信息, 等待 DSP (即主站) 发送统一的同步命令或其他更新信息。当每个电机的驱动器接收到 SYNC 同步命令后, 所有电机同时启动。从这点上可以看出, 基于 CAN 总线和 CANopen 协议的电机控制系统具有串口控制无法比拟的同步优势, 这在机器人控制中是十分重要的, 虽然在实际情况中, 每个电机控制命令之间的间隔较短, 但是具有同步控制的电机控制系统显然将会具有更高的控制精度。

再验证控制算法以及整个系统的可行性。将机器人置于坐标零点, 角度偏差为  $0^\circ$ , 然后启动它追踪一条预定义的路径, 该路径由两条直线和 3 个半圆构成, 如图 7 所示。该图中设定路径以实线表示, 实际运动路径以点线表示, 在最大速度为 1 m/s 的实验中, 机器人对路径的跟踪效果良好, 只是在路径的曲率变化处有一定的偏移, 全局过程中偏移最大量仅 12 cm, 且最终的定位精度可以达到 1 cm 以内。

本文首先介绍了两轮差动式移动机器人的动力学模型以及基于双码盘的机器人运动控制方法; 然后介绍了 CANopen 协议在以 DSP 为主控芯片的机器人运动

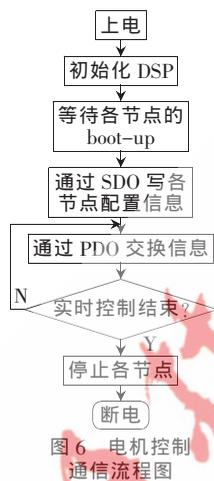


图6 电机控制通信流程图

控制系统中的应用及实现, 其中详细介绍了部分软硬件设计; 最后通过实际效果验证了该控制系统的可行性、实时性和稳定性, 为机器人的实时同步运动控制提供参考。

#### 参考文献

- [1] 林茂, 贾凯, 王金涛, 等. CANopen 协议在机器人控制器中的应用[J]. 微计算机信息, 2010, 26(3-2): 152-154.
- [2] 王金. 双码盘定位机器人的位姿辨识算法[J]. 硅谷, 2010, 12: 53.
- [3] 李纪文. 基于陀螺仪的竞赛机器人嵌入式控制系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [4] Elmo Motion Control. Elmo motion control CANopen DS 301 implementation guide[Z]. 2003.
- [5] Elmo Motion Control. Elmo motion control CANopen DSP 402 implementation guide[Z]. 2003.

(收稿日期: 2013-08-01)

#### 作者简介:

周旭, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器人。