

文章编号: 1002-0446(2005)03-0273-05

## 可重构星球探测机器人控制系统的设计与实现\*

王明辉<sup>1,3</sup>, 马书根<sup>1,2</sup>, 李斌<sup>1</sup>, 王越超<sup>1</sup>, 贺鑫元<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化所机器人学重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;  
2. 日本茨城大学工程系, 茨城 316-8511, 日本; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 介绍了一种新型可重构星球探测机器人系统. 基于这种机器人功能和结构的分解特点, 设计了模块化控制系统, 使用 CAN 总线技术作为模块间主要通讯方式. 提出了控制原理和集中式控制算法, 有效地实现了一台子机器人在不同模式状态下自主运动和操作的控制, 并通过原理样机实验验证了这套控制系统的可行性.

**关键词:** 可重构星球探测机器人系统; 控制系统; CAN 总线; 系统模块化; 集中式控制

中图分类号: TP24 文献标识码: B

## Design and Implementation of a Reconfigurable Planetary Robot Control System

WANG Ming-hui<sup>1,3</sup>, MA Shu-gen<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, WANG Yue-chao<sup>1</sup>, HE Xin-yuan<sup>1,3</sup>

(1. Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;  
2. Department of Systems Engineering, Ibaraki University, Ibaraki 316-8511, Japan;  
3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A novel reconfigurable planetary robot system is presented. Based on the decomposition of functions and configuration, a modularized control system is designed, using CAN as a main communication method among the modules. With the control principle and the centralized control algorithm proposed, the locomotion and manipulation of the robot at different modes is efficiently controlled. The experiment with the prototype proves the feasibility of the control system.

**Keywords:** reconfigurable planetary robot system; control system; CAN bus; system modularization; centralized control

### 1 引言 (Introduction)

星球探测机器人是在星球表面未知环境执行探测任务的机器人. 为了提高任务执行的成功率和效率, 出现了多探测机器人协作系统, 比较典型的是东京工业大学 Hirose 提出的 SMC Rover 系统<sup>[1-3]</sup>. 多探测机器人协作系统一般要具有多种能力 (在恶劣地形下的移动能力、位置识别能力、采样能力等), 通常探测机器人在机构、控制等方面是相互独立的, 虽然可以协作完成一些任务 (如采样、测绘地形等), 但对于某些特殊任务 (如需要相互协助越过沟壑、陡坡等特殊地形), 它却无法完成. 为此, 我们提出了一种新型多探测机器人协作系统——可重构星球探测机器人系统 (Reconfigurable Planetary Robot System - RPRS).

可重构星球探测机器人系统由母体及轮体子机器人组成, 轮体可以从母体上分离开作为相对独立

的子机器人<sup>[4]</sup>. 每个子机器人由用于移动的轮子和带有抓手的操作臂组成, 它具有两种状态模式: 工作模式和移动模式 (图 1). 星球探测机器人母体本身不能运动, 但通过多个子机器人和母体连接, 充当母体的车轮, 完成整个机器人系统的运动; 子机器人可以从母体脱离开, 单独移动并完成任务<sup>[5]</sup>; 多个子机器人能以不同方式连接形成多种构型<sup>[6]</sup>, 协作完成要求更高的任务.

图 1 子机器人工作模式 (左) 和移动模式 (右)  
Fig. 1 Manipulation mode and locomotion mode of child-robot

\* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA422130).

收稿日期: 2004-09-19

## 2 控制系统的模块化结构 (Modularized configuration of control system)

### 2.1 系统结构

可重构星球探测机器人系统包含多个具有相同机构的子机器人,子机器人轮子和操作臂关节的驱动使用不同类型的电机,每个电机拥有单独的控制,各个部分可以完成同步或异步的运动.根据这些特点,我们对机器人系统的结构和功能进行模块化分解,并采用 CAN总线通讯技术设计了可重构星球探测机器人控制系统,如图 2所示.整体控制系统分为两大部分:监控平台和子机器人控制系统.作为人机交互系统,监控平台通过无线方式与子机器人控制系统通讯,可以发送控制子机器人的指令,例如,移动模式下运动的方向和速度,工作模式下抓手运动和位姿变换,机器人基本任务动作,还有不同状态模式的转换等.子机器人控制系统主要由主控规划模块和执行模块两部分组成,它们通过 CAN总线连接完成数据传送.

图 2 可重构星球探测机器人控制系统结构

Fig. 2 Control system configuration of reconfigurable planetary robot

### 2.2 主控规划模块结构

子机器人控制系统的主控规划模块由控制子模块、计算子模块、无线通讯子模块组成.控制子模块和计算子模块使用具有不同功能的 16位单片机控制器,它们之间通过 CAN总线进行数据传送.无线通讯子模块接收上层监控平台发送的控制指令,再将其转化为子机器人控制系统内部可以识别的指令信息;控制子模块根据指令信息对子机器人运动进行规划、控制,将处理后的运动数据发送给各执行模块;当规划中需要操作臂运动学反解时,使用计算子模块运算并将结果返回控制子模块.

### 2.3 执行模块结构

在子机器人控制系统中,有三类执行模块:操作

臂关节执行模块、抓手执行模块和轮子执行模块.单片机控制器通过 CAN总线可以从主控规划模块获得控制指令和运动数据,输出 PWM(Pulse Width Modulation, 脉宽调制)信号控制伺服电机,驱动操作臂关节或抓手的运动.轮子执行模块和控制子模块物理上共享了一个单片机控制器,控制器输出的控制信号,经电机驱动器处理后控制直流电机,从而控制轮子机构的运动.

## 3 控制系统的硬件实现和 CAN总线 (Hardware implementation of control system and CAN bus)

### 3.1 控制系统硬件的选型和设计

可重构星球探测机器人控制系统有一些特殊的硬件要求,例如,微处理器有足够的控制、计算能力和能产生控制电机的控制信号、支持 CAN总线通讯和无线通信串行接口等.具体硬件的选型和设计如下:

#### 3.1.1 微控制器 MB90F549

FUJITSU微控制器 MB90F549采用 16位单片机 FPMC-16LX CPU;嵌入 256k FLASH, 6k RAM;有 2个 CAN总线接口;支持 C语言与多任务处理;具有 4路 8/16位的 PPG(可编程脉冲产生器),可以输出直接控制伺服电机的脉冲信号;串口有异步和同步通信方式;集成 8/10位 A/D转换器和 16位计数器.

#### 3.1.2 CAN收发器 82C250

82C250是 CAN控制器和物理总线之间的接口,它的 TXD端和 RXD端分别接微控制器的 CAN总线控制器 TX端和 RX端, CAN\_H和 CAN\_L接到总线上,完成与总线间的通信.

#### 3.1.3 无线收发模块 PTR2000

采用无线收发模块 PTR2000实现监控平台和子机器人间的通讯. PC机串口通过 232电平转换器与 PTR2000连接,同子机器人控制系统中的无线通讯子模块进行无线通讯,控制子模块中的微处理器串口直接同无线通讯子模块中的 PTR2000连接进行串口通讯.

#### 3.1.4 直流电机 S5801

选用 FUTABA的 S5801电机驱动操作臂关节和抓手机构. S5801是在内部提供闭环位置控制的直流电机,使用脉冲信号作为控制信号.电机的控制信号接口与微控制器 PPG引脚相连,通过微控制器输出的脉冲来控制电机的转角.当调整到最大回转圈数时,电机转一周对应 143个脉冲值,因为脉冲值只能

为整数,所以控制精度为:  $360^\circ / 143 = 2.517^\circ$  (电机最小转角)。

### 3.2 CAN总线的介绍

CAN(Control Area Network)总线是一种有效支持分布式控制和实时控制的串行通讯网络,最大通讯距离为 10km,最大通讯波特率为 1Mbps<sup>[7]</sup>。由于具有以下特点,所以选择 CAN总线作为可重构星球探测机器人控制系统中主要的通讯方式:

- ⑧ 多主方式工作,网络上任意节点均可向其它节点发送信息,而不分主从;
- ⑧ 具有点对点、一对多点及全局广播等通讯方式;
- ⑧ 网络扩充方便,新节点可直接接入总线。

## 4 控制原理和集中式控制算法 (Control principle and centralized control algorithm)

图 3 为可重构星球探测机器人系统子机器人控制原理坐标系图。其中  $L_1$  至  $L_5$  为操作臂长度,  $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 、 $\theta_5$  是 4 个关节角度,  $\theta_1$  是操作臂相对于轮子的转角,即  $X_0$  轴与  $X_1$  轴的夹角(在图中未标出)。

Fig. 3 Control principle coordinate of child-robot

基本控制思想是:在工作模式时,通过改变操作

臂各个关节角值使子机器人达到相应的位姿状态;在移动模式时,除了调整操作臂位姿,还通过设定的值和变化速度相应地控制子机器人的移动距离和速度。下面为抓手位姿表达式,其中  $c$  为  $\cos$ ,  $s$  为  $\sin$ :

$${}^0_6 T = \begin{bmatrix} NX & OX & AX & PX \\ NY & OY & AY & PY \\ NZ & OZ & AZ & PZ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$NX = -c\theta_1 s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$NY = -s\theta_1 s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$NZ = -c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$OX = -c\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) s\theta_5 - s\theta_1 c\theta_5$$

$$OY = -s\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) s\theta_5 + c\theta_1 c\theta_5$$

$$OZ = s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) s\theta_5$$

$$AX = c\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) c\theta_5 - s\theta_1 s\theta_5$$

$$AY = s\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) c\theta_5 + c\theta_1 s\theta_5$$

$$AZ = -s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) c\theta_5$$

$$PX = c\theta_1 (c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) c\theta_5 L_5 + c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) L_4 + c(\theta_2 + \theta_3) L_3 + c\theta_2 L_2) - s\theta_1 s\theta_5 L_5$$

$$PY = s\theta_1 (c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) c\theta_5 L_5 + c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) L_4 + c(\theta_2 + \theta_3) L_3 + c\theta_2 L_2) + c\theta_1 s\theta_5 L_5$$

$$PZ = -s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) (c\theta_5 L_5 + L_4) - s(\theta_2 + \theta_3) L_3 - s\theta_2 L_2 + L_1$$

为了达到整体运动规划、系统资源合理分配、各关节和轮子同步控制等要求,使用了集中式控制方法,图 4 为子机器人控制流程图。主控规划模块作为控制系统的核心部分对子机器人系统进行统一安排和调度,它通过分析监控平台传送的控制指令、系统状态和全局环境信息,规划子机器人的运动轨迹并完成相应的运动数据运算及控制。

子机器人控制系统结构设计和软件实现是相互关联的,在系统结构设计过程中充分考虑到了软件能否实现的影响。例如,由于单片机运算内存空间的

图 4 子机器人控制流程

Fig. 4 Control flow chart of child-robot

限制,我们把运算量较大的子机器人操作臂运动学反解函数分解成多个子函数,将它们封装并使用单独的微处理器作为计算子模块,独立于控制子模块进行运动学反解运算。

可重构星球探测机器人控制系统的软件部分主要由以下函数模块组成:

⑧ `Global_Monitor()` 系统监控函数,位于上层PC机监控平台,可以发送控制指令。

⑨ `Uartl_Rx()` 子机器人无线信息接收处理函数,是通讯子模块主要部分,完成监控平台控制指令的接收及转化。

⑩ `WorkMode_Layout()` 模式选择及运动规划函数,通过分析处理监控指令、系统状态和环境信息,选择子机器人的运动模式并做出轨迹规划,将运动轨迹离散为一系列由关节角度组表示的目标位置点。

⑪ `Locomotion_Control()` 运动控制函数,根据预设电机转速在当前关节角到目标关节角之间进行等分插值,求出插值点和插值区间,规划出最终的运动数据序列。

⑫ `Inverse_Kinematics()` 运动学反解运算函数,是计算子模块的核心部分,将欧拉角和位置向量表示的位姿转化为关节角度值。

⑬ `Can_Read()` 执行模块函数,位于各执行模块,通过对运动数据序列进一步解析,使用PPG信号和闭环反馈比例P控制两种方式分别控制S5801电机和Maxon DC电机,完成操作臂关节和轮子机构的驱动。

除以上函数,还建立了机器人基础动作函数库,将基础动作的规划和控制封装成函数形式并设置数据接口供系统调用。例如子机器人在移动模式下前进 `Dir Ahead()`, 后退 `Dir Behind()`;子机器人移动模式和工作模式之间的转换:站立 `Act Up()`, 倒下 `Act Down()` 等。

下面是子机器人控制系统集中式控制算法:

- (1) 控制器设置初始化,包括串口、I/O、PPG、CAN总线等;
- (2) 初始化子机器人位姿,  $\theta_1$  至  $\theta_5$  设为初始关节角序列;
- (3) 等待监控平台发送控制指令, `Uartl_Rx()` 接收并解析控制指令, `WorkMode_Layout()` 进行模式选择和运动规划,将运动轨迹离散为一组位姿点;
- (4) 依次提取位姿点作为目标点,如果是欧拉角和位置向量表示则进入(5),如果是关节角表示则转

(6);

(5)通过CAN总线向计算子模块发送欧拉角和位置向量,等待接收 `Inverse_Kinematics()` 返回结果;

(6) `Locomotion_Control()` 完成插值点设置和插值区间的划分,其中电机转速可以预先设定或从监控平台获得,取各关节和轮子到达目标位置点所需时间最长的作为公共执行响应时间  $T_{com}$ ,插值区间的执行周期  $T_{exe}$ ,即:

$$\text{插值点的个数} = T_{com} / T_{exe} - 1$$

$$\text{插值区间的个数} = T_{com} / T_{exe}$$

(7)依次提取插值点作为子目标值,将其转化为控制信号,向关节执行模块发送PPG脉冲信号, `Can_Read()` 同时控制操作臂关节和轮子电机;如已执行完所有插值点,则执行目标点控制,然后进入(8),否则返回(7);

(8)如运动轨迹中所有的位姿点都已执行,则返回(3),否则返回(4)。

## 5 仿真及实验结果 (Simulation and experiment results)

图5为运动学反解运算时间仿真图,取8组不同的使用欧拉角和位置向量表示的位姿数据作为输入,仿真输出为通过运动学反解运算计算出关节角所需的计算时间。从仿真结果发现运动反解运算时间在200ms和650ms之间,运动学反解函数执行周期包括运动学反解运算时间、等待发送时间和CAN总线发送关节角数据时间,所以为了保证时序正确和系统有效运行,运动学反解函数执行周期应该大于650ms。

图5 运动学反解运算时间仿真图

Fig. 5 Simulation of calculating time of inverse kinematics

为了验证控制系统的有效性,我们在可重构星球探测机器人样机上使用了这套控制系统并做了相关实验。表1中列出了实验中控制系统的参数的设

置。

通过实验发现,使用 PC 监控平台的遥操作,实现了对子机器人的实时控制,子机器人准确地完成了移动模式下的前进和后退、工作模式下操作臂位姿变换、模式转换等动作(图 6 为移动模式到工作模式转换即站立的过程);并且控制系统在操作臂关节角度、子机器人移动距离和速度等方面都达到了较精确的控制,各关节和轮子的转动精度为电机最小转角除以相应转动机构的减速比。

表 1 控制系统参数表

Table 1 List of parameters of control system

监控平台指令发送周期	5 次 3 3s
SS801 初始位置脉冲值	1500
插值区间执行周期 $T_{\text{exe}}$	800ms
轮子闭环控制反馈周期	2ms
轮子 P 控制比例系数 $K_p$	2
运动学反解函数执行周期	800ms
各执行模块发送驱动信号周期	10ms

图 6 子机器人自主站立实验

Fig. 6 Autonomous standing-up of child-robot

## 6 结论 (Conclusion)

可重构星球探测机器人系统 RPRS 具有行星轮式履带机构、手爪操作和多体组合等机构特性,具有较好的移动和越障能力,并能协作完成一些超出单个机器人能力的任务。在控制系统设计过程中使用

模块化分解结构和功能的方法,核心控制模块采用集中式规划,各模块具有不同的结构特点,实现不同的功能,使用易扩充、实时性和可靠性较强的 CAN 总线作为控制系统模块之间的主要通讯方式,并使用无线通讯方式通过监控平台对机器人系统遥操作进行监控。我们设计的控制系统使机器人完成多种动作,最终实现了对可重构星球探测机器人的有效控制,具有重要的理论意义和实用价值。

致谢:感谢日本东京工业大学 Shigeo Hirose, Atsushi Kawakami, Kazuhiro Motomura 等对我们研究工作的帮助。

## 参考文献 (References)

- [1] Hirose S. Super-Mechano-Colony and SMC rover with detachable wheel unite[A]. Proceedings of COE workshop99[C]. 1999. 67 - 72.
- [2] Hirose S, Damoto R, Kawakami A. Study of super-mechano-colony (Design of Experimental Model and Its Fundamental Experiments) [A]. Proceedings of COE workshop 2000[C]. 2000. 83 - 89.
- [3] Kawakami A, Torii A, Hirose A. Design of SMC rover: development and basic experiments of a m equipped single wheel rover[A]. Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Maui, Hawaii: IEEE, 2001. 96 - 101.
- [4] He X Y, Ma S G, Li B, et al. Mechanical design and dynamic analysis of planetary rover[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics[C]. Shenyang, China: IEEE, 2004. 626 - 630.
- [5] He X Y, Ma S G, Li B, et al. Analysis of locomotion of a planetary rover on a slope[A]. Proceedings of the IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics[C]. Singapore: IEEE, 2004. 1130 - 1134.
- [6] Zhang L P, Ma S G, Li B, et al. Position-sensing based a new docking system of RPRS[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision[C]. Kunming, China: IEEE, 2004. 278 - 282.
- [7] 汪洋, 李斌, 等. 蛇形机器人控制系统的设计与实现[J]. 机器人, 2003, 25(6): 491 - 494.

## 作者简介:

- 王明辉 (1980-),男,博士研究生.研究领域:机器人控制,多机器人协作与智能控制。
- 马书根 (1963-),男,博士,研究员.研究领域:仿生机器人,移动机器人,多机器人的协作与群智能。
- 李斌 (1963-),男,博士,研究员.研究领域:仿生机器人,移动机器人。