

文章编号 : 1002-0446(2004)05-0444-04

一种球形机器人运动轨迹规划与控制*

肖爱平¹, 孙汉旭¹, 谭月胜², 马国伟¹, 赵勇¹

(1. 北京邮电大学自动化学院, 北京 100876; 2. 北京航空航天大学机器人所, 北京 100083)

摘要: 阐述一种非完整欠驱动系统的控制设计和运动规划策略, 研制出一种全新的全方位行走机器人, 由于其具有特殊的灵活性, 可应用于各种不同的场合。

关键词: 球形机器人; 非完整系统; 轨迹规划

中图分类号: TP114 **文献标识码:** B

Movement Trajectory Planning and Control for a Spherical Robot

XIAO Ai ping¹, SUN Han xu¹, TAN Yue sheng², MA Guo wei¹, ZHAO Yong¹

(1. School of Automation, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Institute of Robotics, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Movement planning strategy and control design for a nonholonomic and underactuated system is introduced in this paper, and a firenew omnidirectional mobile robot, which can be used in various fields with its excellent flexibility, has been developed.

Keywords: spherical robot; nonholonomic system; trajectory planning

1 引言 (Introduction)

球形机器人具有运动全向性的特点, 使用两个电机进行驱动. 它既能像轮式机器人一样, 具有快速行走的性能和大的承载能力, 又能像步行机器人一样, 适应崎岖不平的地面; 同时结构相对简单, 减小系统的重量和成本, 增加系统可靠性. 球形机器人的研究目前开展得并不广泛, 只有少数论述涉及到这方面的设计和研究.

文[1]首次设计了一种球形机器人, 设置一个单轮在球内滚动, 采用电机内驱动单轮装置, 这种设计实现了球壳的运动, 但由于单轮驱动的固有局限性, 它无法实现系统的全方位运动. 文[2]等设计的球形车使用一辆小车代替单轮作为内驱动装置. 这两个机构中, 内驱动部分是非完整系统, 球壳的运动又是一个非完整系统, 使得整个机构控制比较复杂. 文[3]使用通用轮驱动球体从而实现系统的运动. 文[4]在球体内设计了两个互相垂直的转子. 文[5]设计了一种球形机器人, 它在球内与球固联了成正四面体分布的 4 根支柱杆, 通过改变支柱杆上配重的

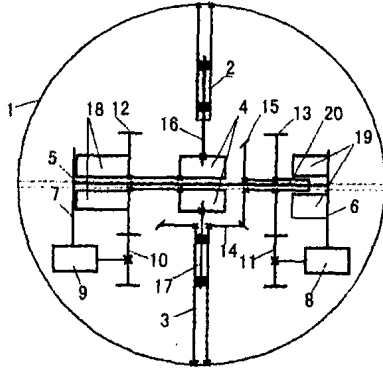
位置来驱动系统的运动, 基本实现了系统的全方位运动.

本文所述的机器人采用两个伺服电机作为动力输入, 真正实现了系统的全向性运动, 而且在特定的位置还可以实现机器人的原地自转运动. 这种设计使得机器人的机构简单, 重量减轻, 运动学、动力学的分析和控制相对简单, 增加了系统运行的可靠性.

2 理论分析 (Theoretical analysis)

球形机器人机构与实物如图 1、2 所示. 球形机器人的主要工作原理就是通过不断地调节和改变内部配重的重心位置, 使其重心始终处在球形机器人期望运动的前方的一段距离, 因而产生驱动力矩, 用来克服机器人运动时的摩擦力矩和其他阻力矩, 使球形机器人滚动. 适当地控制其重心偏移方向, 就能控制球体的运动方向. 其运动的具体实现是通过两个电机分别驱动两组齿轮传动机构, 从而带动相应的配重块向期望的方向偏转, 以改变其重心位置, 最终使得整个球体向期望的方向移动. 同样的方法, 也可以通过调节其重心向两边偏斜, 以产生转弯所需

要的力矩,从而实现转向的功能.



注:其中有 X 的地方表示固联

1 球壳; 2 3 支撑联接套筒; 4 中心联接块; 5 空心轴; 6 7 联接板; 8 9 电机; 10~13 圆柱齿轮; 14 15 圆锥齿轮; 16 17 联接轴; 18 19 制动器; 20 小套筒;

图 1 球形机器人平面结构原理示意图

Fig.1 Illustrative diagram of planar structure of the spherical robot



图 2 球形机器人实物图

Fig.2 Spherical robot

设球形机器人沿粗糙水平面作纯滚动,取与水平面固联的参考坐标系 $OXYZ$,球心 O 的坐标 (x, y, z) 以及圆球滚动角速度矢量 ω 在与参考坐标系相平行的坐标系 $Cx_1y_1z_1$ 上的投影 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$, 3 个 Euler 角 $(\phi, \omega, \varphi)^{[6]}$.

因球沿水平面无滑动地做纯滚动,所以它与平面的接触点 P 的速度必须为零. 则:

$$\begin{cases} \dot{x} + a(\dot{\phi}\cos\varphi\sin\theta - \dot{\theta}\sin\phi) = 0 \\ \dot{y} + a(\dot{\phi}\sin\varphi\sin\theta + \dot{\theta}\cos\phi) = 0 \end{cases}$$

这是两个一阶线性齐次稳定的非完整约束方程^[6],系统有 3 个自由度,由于球形机器人只用两个电机,两路驱动,所以该系统是一个非完整欠驱动系统.

非完整系统所具有的一大优势为,可以用较少的驱动机构控制较多的自由度,这实际上有利于降

低系统的重量和成本,同时还可提高系统的可靠性^[7].但非完整约束同时也会导致轨迹规划以及该运动系统反馈稳定性的控制算法设计变得复杂,为了控制非完整系统,要求我们所作的轨迹规划能够满足上述约束条件.

3 球形机器人的运动轨迹规划 (Movement trajectory planning for spherical robot)

3.1 直线行走

选取 3 个不同的初始姿态说明球形机器人的行走特性,初始姿态为轴 2 竖直,轴 5 水平.



图 3 机器人姿态图

Fig.3 Robot pose

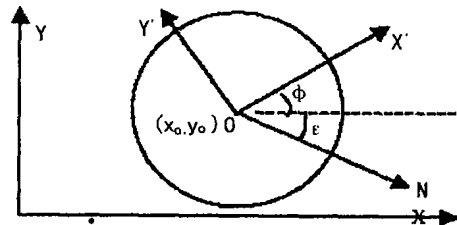


图 4 运动分析

Fig.4 Kinematics analysis

1) 如图 3 所示,电机 8(见图 1)转动,电机 9 不动时,配重绕轴 2 旋转,球心将原地不动,球壳将因反作用力矩而反方向绕轴 2 旋转,因而从外部看来,电机 8 的转动使球形机器人原地自转,自转速度的大小除了电机转速外,还与地面与球壳的摩擦系数相关.

2) 电机 9 转动,电机 8 不动时(不考虑连带运动)^[8],轴 5 方向如图 4 Y' 所示,配重绕轴 5 转动,球心沿与轴 5 垂直的方向直线运动,球壳与轴 2 转动角速度方向与轴 5 平行.

初始姿态为轴 2 水平,轴 5 竖直.

1) 电机 8 转动,电机 9 不动时,配重绕轴 2 旋转,球心沿与轴 2 垂直并平行平面的直线运动.

2) 电机 9 转动、电机 8 不动时(不考虑连带运动),轴 5 方向如下图 Y' 所示;配重绕轴 5 转动,球心沿与轴 5 垂直并平行平面的直线运动.

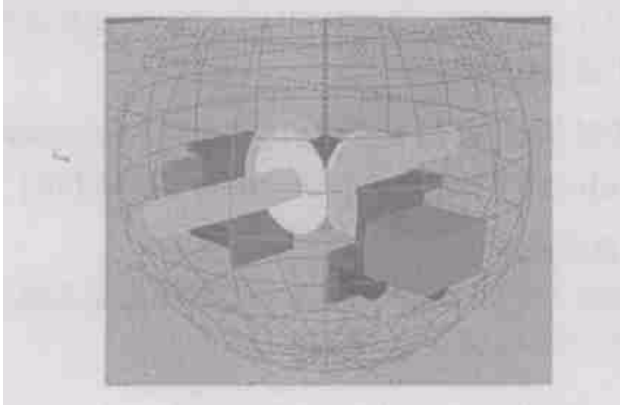


图 5 机器人姿态图
Fig.5 Robot pose

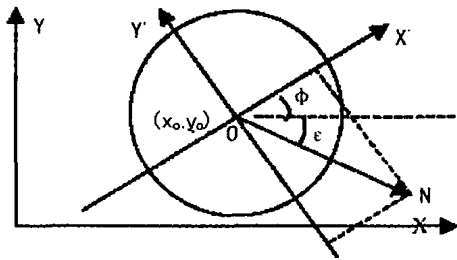


图 6 机器人姿态图
Fig.6 Robot pose

初始姿态为轴 2 处于任意位置.

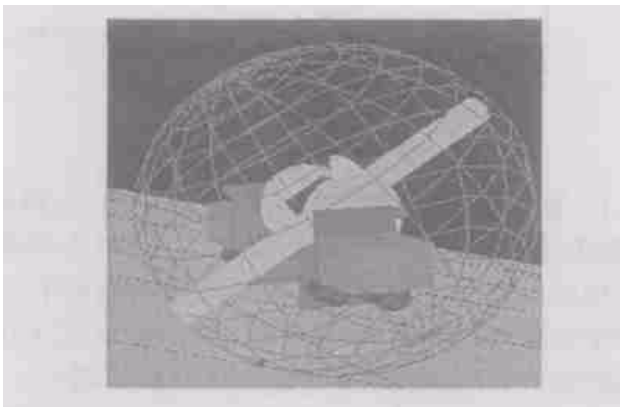


图 7 机器人姿态图
Fig.7 Robot pose

1) 电机 9 转动、电机 8 不动时(不考虑连带运动),轴 5 方向如下图 Y' 所示,配重绕轴 5 转动,球心沿与轴 5 垂直并平行平面的直线运动.

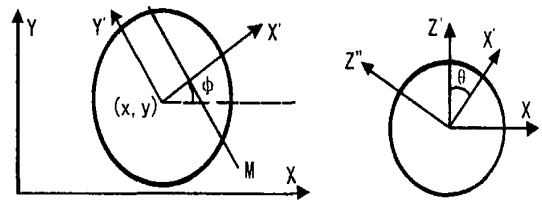


图 8 机器人姿态图
Fig.8 Robot pose

3.2 绕圆形轨迹行走

如图 7 所示,球形机器人平行水平面运动,当轴 2 与竖直线之间的夹角大于 0°小于 90°时,电机 8 转动,电机 9 不动,配重绕轴 2 旋转,角速度 ω_2 方向平行于轴 2,将 ω_2 分解为 ω_{2z} 、 ω'_{2x} 两个分量,可得,球体既有自转,又有沿轴 5 方向的滚动,运动过程中 θ 保持不变,球心运动轨迹为圆.

4 控制实现 (Control implementation)

DSP 已经广泛应用于电机控制及运动控制方面.TMS320C2000 系列是应用高性能的微处理器提高电机控制精度的一类芯片.其中 LF2407A 是该系列中集成度最高、性能最强的芯片,集成了内存、PWM、串行通信模块、高速 A/D 转换器、高性能的 CAN 模块等.

本项目的无线运动控制系统,针对移动式机器人的无线控制,控制端通过无线通信模块发送运动控制指令,DSP 采集接收端收到的信息并翻译成指令控制电机.

运动控制采用了开环控制方式,系统原理图如图 9.

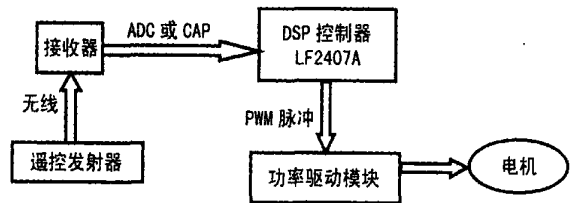


图 9 控制系统图
Fig.9 Control system

我们采用 TMS320LF2407A 的捕获单元来捕捉航模遥控器的脉宽变化.2407A 的事件管理器总共有 6 个捕获单元.我们利用 EVA 的 CAP1、CAP2 分别捕获通道 1 的上升沿和下降沿,EVB 的 CAP4、CAP5 捕捉通道 4 的上升沿和下降沿.捕获单元在捕获输入引脚 CAPx 上出现跳变时被触发,所选的 GP 定时器的计数值被捕获并存入到一个 2 级深的 FI-

FO 栈中, 然后从 FIFO 栈中读取捕获到的计数值, 利用下表中公式值控制电机转动.

表 1 指令参数表

Table 1 Command parameters

捕获值 ($k_3 = k_2 - k_1$; $k_6 = k_5 - k_4$)	设置 PWM 比较值	电机操作
$k_3 \geq 235 \ \&\& \ k_3 \leq 240$		禁止电机 9 转
$k_6 \geq 230 \ \&\& \ k_6 \leq 240$		禁止电机 8 转
$k_3 > 240 \ \&\& \ k_3 < 310$	$k = (\text{int})(250 + 250 * (k_3 - 238.0) / 68.0)$	pwm1(k) 电机 9 正转
$k_3 > 160 \ \&\& \ k_3 < 235$	$k = (\text{int})(250 - 250 * (238.0 - k_3) / 69.0)$	pwm1(k) 电机 9 反转
$k_6 > 240 \ \&\& \ k_6 < 310$	$k = (\text{int})(250 + 250 * (k_6 - 238.0) / 68.0)$	pwm7(k) 电机 8 正转
$k_6 > 160 \ \&\& \ k_6 < 230$	$k = (\text{int})(250 - 250 * (238.0 - k_6) / 69.0)$	pwm7(k) 电机 8 反转

软件设计

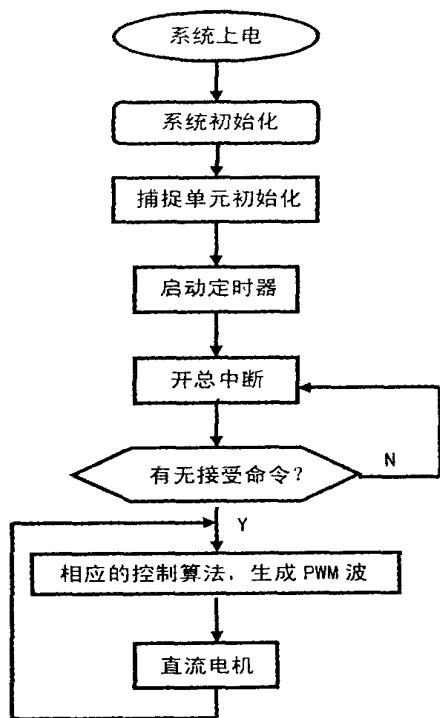


图 10 软件流程图

Fig.10 Software flow chart

TMS320LF2407A 软件由三部分组成: 系统主程序、PWM 程序和捕捉中断服务程序. 主程序完成系统初始化, 然后根据系统需要调用相应处理程序; PWM 程序根据接受的控制命令, 生成 PWM 波; 捕捉中断服务程序主要用于通信数据采样和设置相应

的标志位. 主程序框图如图 10 所示.

PWM 程序完成 PWM 输出初始化, 产生周期 20kHz 的 PWM 脉冲, 提供 PWM 函数由主程序根据控制指令调用.

捕捉中断服务程序获取捕捉值(即航模遥控发射信号脉宽值)并存入指定存储空间, 供主程序判断.

5 实验 (Experimentation)

球形机器人研制完成后, 我们按照轨迹规划与分析, 分别进行了多种情况下球形机器人完成直线行走、圆形路线行走、原地自转和爬坡能力实验, 技术指标如表 2 所示.

表 2 技术指标

Table 2 Technology parameters

项目	技术指标
直径	300
运动速度	加速阶段 $V_{max} \geq 1.1 \text{ m/s}$, 匀速运动时 $V_{max} = 0.45 \text{ m/s}$
爬坡能力	加速阶段爬坡能力 20°
运动规划	实现沿规划直线行走、沿圆形轨迹行走、原地自转等运动
遥控	无线遥控, 距离 600 m
供电	电池供电, 充电一次可连续工作时间 ≥ 1 小时

实验中我们验证了球形机器人的运动全方位特点, 成功地按照规划的路径运动. 球形机器人将是对传统运输工具的一种拓宽与补充, 它和地面的单一点的接触, 阻力小, 运动灵活; 球形行走机器人能便利地穿过口径略大于其直径的曲折的通道, 具有一定的爬坡和越障能力, 在复杂环境中滚动的时候, 如果和障碍物或者其他机器人发生碰撞, 球形机器人将可以自动恢复原状, 所以它适应环境能力强. 配载防撞、测距、视觉等传感器后, 球形机器人将在民用运输、野外开发和军事侦察、排雷等方面有其重要的实用价值.

参考文献 (References)

[1] Halme A, Suomela J, Schönberg T, et al. Motion control of a spherical mobile robot[A]. 4th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control AMC'96[C]. Japan: IEEE, 1996. 259 - 274.

[2] Bicchi A, Balluchi A, Prattichizzo D, et al. Introducing the "SPHERICAL": an experimental testbed for research and teaching in nonholonomy[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Albuquerque, NM: IEEE, 1997. 2620 - 2625. (下转第 460 页)