

# 一种具有稳定平台可全向滚动的球形机器人设计与分析

李团结, 朱超

(西安电子科技大学机电工程学院, 陕西西安 710071)

**摘要:**提出了一种具有稳定平台的全向滚动球形机器人装置. 该球形机器人由装在球体内部、相互垂直布置的两台伺服电机驱动,可在平面上全向滚动. 在球形机器人内部有一个稳定的仪器、设备搭载平台,这个平台在球体全向滚动过程中始终保持稳定的姿态而不随球体一起滚动. 介绍了该球形机器人的结构原理,基于其运动的非完整约束,利用广义欧拉角给出了其运动微分方程,建立了该球形机器人的运动学模型. 结合实例对该球形机器人进行了运动分析和仿真.

**关键词:**球形机器人;全向滚动;稳定平台;非完整约束;运动分析和仿真

**中图分类号:** TP24    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-2400(2006)01-0053-04

## Design and analysis of a spherical omnidirectional rolling robot with a stable platform

LI Tuan-jie, ZHU Chao

(School of Mechano-electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A spherical omnidirectional rolling robot with a stable platform is presented, which is driven by two mutually perpendicular servo motors placed within the spherical shell that induce the ball to roll in all directions at all times on a flat surface. A stable platform exists inside the spherical robot to carry sensing devices or actuators, but it does not rotate and keeps a stable stance when the spherical shell is rolling in any direction. The mechanical construction of the spherical robot is introduced. Then the kinematic differential equations are derived from the nonholonomic constraints on its motion using the generalized Euler angles, and a mathematical model of the robot's motion is established. Finally, the kinematic analysis and simulation of the spherical robot are developed using numerical examples.

**Key Words:** spherical robot; omnidirectional rolling; stable platform; nonholonomic constraints; kinematic analysis and simulation

球形机器人是一种新型的机器人,其运动依靠球壳在平面上的滚动来实现,不怕翻倒,行动迅速,可全向滚动,机动性好,易于穿越崎岖的地形,无论在工业上还是在民用和军事上都具有广泛的应用前景. 因而,倍受世界各国科技人员关注,是目前智能机器人研究领域的热点问题之一.

在国外,第一台真正的球形机器人是由 Halme 等<sup>[1]</sup>研制的,由一个电机驱动的驱动轮在球壳内滚动,通过改变系统的重心来实现球体的滚动. Bicchi 等<sup>[2]</sup>将驱动轮换成了小车, Ferriere 等<sup>[3]</sup>又将驱动装置改为了一种万向轮. 这3种设计均实现了球体的运动,但由于驱动装置固有的局限性,它们都无法实现球形机器人的全向滚动.

Bhattacharya 等<sup>[4]</sup>的设计是在球壳内部相互垂直的方向上安装两个电机,每个电机的外壳和球壳固联,电机轴上分别安装一个圆盘,电机转子驱动圆盘转动,进而带动球体在平面上滚动. Javadi 等<sup>[5]</sup>在球壳内与

球壳固联了4根成正四面体空间均布的轮幅,每个轮幅上都有一套独立的驱动系统:由一台步进电机通过丝杠驱动一个配重块沿轮幅方向来回移动,通过改变轮幅上配重的位置来驱动系统的运动.肖爱平等<sup>[6]</sup>提出了一种球形机器人的设计方案,这种方案采用两个伺服电机作为动力输入,同时又作为配重体,这两个电机通过一些齿轮轮系的传动来驱动球体绕竖直轴和一个水平轴转动,通过两个电机的相互配合实现了系统的全向运动.这些球形机器人方案采用了不同的驱动方式,各有特色,实现了球体的全向滚动.但是这些方案中没有在球体内提供一个相对稳定的平台,球壳内的所有部件随着球体一起滚动,无法作为移动式机器的搭载平台.这个缺陷使得球形机器人目前仍处于实验室阶段,无法应用到实际的工作和生活中.

笔者设计了一种具有稳定平台可全向滚动的球形机器人装置.该设计第一次在球形机器人内部为各种仪器或设备提供了一个稳定搭载平台,这个平台在球体做全向滚动的过程中始终保持稳定的姿态,而不是随球体一起滚动.另外,该设计简化了球形机器人的驱动装置,结构简单,易于系列化,其制造和装配简单,成本低廉.并且,这种装置容易实现连续性控制且控制简单.该设计装置已申请了国家专利.

## 1 球形机器人的结构

如图1所示,该装置包括外球壳1、内球壳10、位于内球壳内的稳定平台11和位于外球壳和内球壳之间的行走传动机构.该行走传动机构包括有:两个伺服电机,这两个电机位于过球心的平面上,相互垂直布置.每个电机的外壳通过螺钉5和外球壳1固联.每根电机轴通过紧定螺钉(或销)3与转盘7固联.在每个圆盘上安装一个滚球轴承4,稳定平台11位于内球壳内部.在和每个电关于球心对称的地方分别有一个配重体13、15和外球壳1通过螺钉固联,该配重体是蓄电池.短轴8的圆柱面端与滚球轴承的内圈相配合,另一端的内球面与内球壳的外表面相配合,形成球面副接触.该装置的运动原理在计算机上利用虚拟样机技术已经进行了验证.

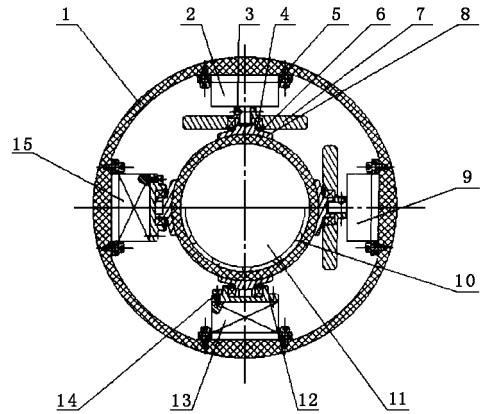


图1 结构图

## 2 球形机器人的运动学模型

当球体在平面上滚动时,一个惯性坐标系  $OXYZ$  固结于该平面上,体坐标系  $xyz$  固结于球体上,球心  $G$  为原点.两个电机分别位于过球心平面的  $x$  轴和  $y$  轴上,如图2所示.用一组广义欧拉角  $(\alpha, \beta, \gamma)$  表示球体相对于惯性坐标系转过的角度,转动顺序为  $x$ - $y$ - $z$ .这样,在任意时刻球体的位置由球体与平面的接触点  $I$  的坐标  $(x, z)$  表示,球体相对于惯性坐标系的姿态由广义欧拉角  $(\alpha, \beta, \gamma)$  表示.

即5个变量  $(x, z, \alpha, \beta, \gamma)$  完全确定了球体在任意时刻的位置和姿态.

由于球形机器人在平面上作纯滚动,且满足角动量守恒,因此这是一个具有非完整约束的非完整系统,需要5个微分方程来描述此非完整系统.

设动坐标系  $xyz$  的3个坐标轴的单位向量为  $i, j, k$ ,则球体的角速度在动系  $xyz$  中可表示为

$$\omega' = \omega_x i + \omega_y j + \omega_z k = (\dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma + \dot{\beta} \sin \gamma) i + (-\dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma + \dot{\beta} \cos \gamma) j + (\dot{\alpha} \sin \beta + \dot{\gamma}) k \quad (1)$$

设惯性坐标系  $OXYZ$  3个坐标轴的单位向量为  $\xi, \eta, \zeta$ ,球体的角速度在定系  $XYZ$  中可表示为

$$\omega = \omega_\xi \xi + \omega_\eta \eta + \omega_\zeta \zeta = (\dot{\alpha} + \dot{\gamma} \sin \beta) \xi + (\dot{\beta} \cos \alpha - \dot{\gamma} \sin \alpha \cos \beta) \eta + (\dot{\beta} \sin \alpha + \dot{\gamma} \cos \alpha \cos \beta) \zeta \quad (2)$$

球体在平面上作纯滚动,因此在惯性坐标系中接触点  $I$  的速度为0,即  $v_I = 0$ .因此有

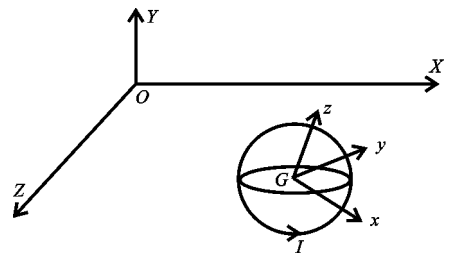


图2 坐标描述

$$v_1^x = \dot{x} + \omega_\xi r = \dot{x} + (\dot{\beta} \sin \alpha + \dot{\gamma} \cos \alpha \cos \beta) r = 0 \quad , \quad (3)$$

$$v_1^z = \dot{z} - \omega_\xi r = \dot{z} - (\dot{\alpha} + \dot{\gamma} \sin \beta) r = 0. \quad (4)$$

式中  $r$  表示外球壳的外径。

球形机器人在平面的滚动过程中,整个系统的重力通过球心和接触点  $I$  地面反作用力和摩擦力也通过接触点  $I$ 。因此相对于  $I$  点的角动量守恒。假定球体从静止启动,则在任何时刻系统相对于  $I$  点的角动量恒为零。即在动坐标系中满足下列方程:

$$I_x \omega_x + [m(\dot{M}v)]_x + I'_x \omega_1 = 0 \quad , \quad (5)$$

$$I_y \omega_y + [m(\dot{M}v)]_y + I'_y \omega_2 = 0 \quad , \quad (6)$$

$$I_z \omega_z + [m(\dot{M}v)]_z = 0 \quad , \quad (7)$$

式中  $I_x, I_y, I_z$  分别表示不包括内球壳和稳定平台的整个系统对  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的转动惯量,  $M$  为整个系统的质量,  $v$  为系统平动的速度,  $I'_x$  表示  $x$  轴上电机转子和与其固联的转盘、滚珠轴承对  $x$  轴的转动惯量,  $I'_y$  表示  $y$  轴上电机转子和与其固联的转盘、滚珠轴承对  $y$  轴的转动惯量,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别表示  $x$  轴电机、 $y$  轴电机的转速,  $[m(\dot{M}v)]_x, [m(\dot{M}v)]_y, [m(\dot{M}v)]_z$  表示系统的平动运动对  $I$  点的动量矩在  $x, y, z$  轴上的分量。

将方程(3)~(7)整理后,就得到了如下描述该非完整系统状态的微分方程组:

$$\begin{cases} \dot{x} + (\dot{\beta} \sin \alpha + \dot{\gamma} \cos \alpha \cos \beta) r = 0 \quad , \\ \dot{z} - (\dot{\alpha} + \dot{\gamma} \sin \beta) r = 0 \quad , \\ I_x(\dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma + \dot{\beta} \sin \gamma) + M[\dot{z} \cos \beta \cos \gamma - \dot{x}(\sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma)] + I'_x \omega_1 = 0 \quad , \\ I_y(-\dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma + \dot{\beta} \cos \gamma) + M[-\dot{z} \cos \beta \sin \gamma - \dot{x}(\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma)] + I'_y \omega_2 = 0 \quad , \\ I_z(\dot{\alpha} \sin \beta + \dot{\gamma}) + M(\dot{z} \sin \beta - \dot{x} \cos \alpha \cos \beta) = 0 \quad . \end{cases} \quad (8)$$

为了求解该隐式一阶微分方程组,可将其写成如下的矩阵形式:

$$\dot{q} = Q^{-1} f_1 \omega_1 + Q^{-1} f_2 \omega_2 \quad , \quad (9)$$

其中  $q = [x \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$ ,  $f_1 = [-I'_x \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $f_2 = [0 \ -I'_y \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ,

$$Q = \begin{bmatrix} -M(\sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma) & Mr \cos \beta \cos \gamma & I_x \cos \beta \cos \gamma & I_x \sin \gamma & 0 \\ -M(\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma) & -Mr \cos \beta \sin \gamma & -I_y \cos \beta \sin \gamma & I_y \cos \gamma & 0 \\ -Mr \cos \alpha \cos \beta & Mr \sin \beta & I_z \sin \beta & 0 & I_z \\ 1 & 0 & 0 & r \sin \alpha & r \cos \alpha \cos \beta \\ 0 & 1 & -r & 0 & -r \sin \beta \end{bmatrix}$$

从式(9)可知,这是一个两输入、5个状态变量的一阶控制系统。要保证该隐式一阶微分方程组有解,矩阵  $Q$  必须是可逆的。利用 MATLAB 软件的符号工具箱分析矩阵  $Q$ ,可知在任何情况下,矩阵  $Q$  的逆矩阵都是存在的,因此该微分方程组的解也总是存在的。

### 3 球形机器人的运动分析和仿真

式(9)为一阶微分方程组,只能采用数值方法求解。利用 MATLAB 软件<sup>[7]</sup>,采用四阶龙格-库塔法编制了求解该微分方程组的应用程序。下面主要利用该应用程序对球形机器人的运动情况结合实例进行分析和仿真。在下面的图中,  $W_x, W_y, W_z$  分别表示外球壳在惯性坐标系中绕 3 个坐标轴的转速。

实例 1  $\omega_1 = 100 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_2 = 0$ ,  $q_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。水平方向布置的电机以  $100 \text{ rad/s}$  的角速度转动,竖直方向布置的电机不启动,初始条件为:  $x_0 = 0$ ,  $z_0 = 0$ ,  $\alpha_0 = 0$ ,  $\beta_0 = 0$ ,  $\gamma_0 = 0$ 。仿真时间区间取  $0 \sim 34 \text{ s}$ 。运动分析和仿真的部分结果如图 3 所示。

由图 3 可看出,在这种条件下,球体沿  $Z$  轴负方向直线滚动,球体绕  $X$  轴的转动方向与水平电机轴的转

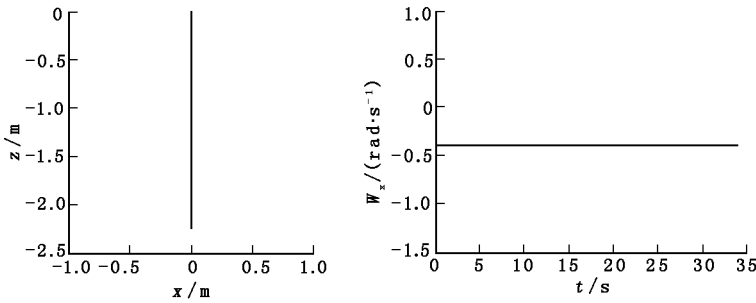


图3 运动分析和仿真结果

向相反。

实例2  $\omega_1 = 65 \text{ rad/s}$   $\omega_2 = 65 \text{ rad/s}$   $q_0 = [1 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。即竖直方向布置的电机和水平方向布置的电机均以  $65 \text{ rad/s}$  的角速度转动,初始条件为  $\dot{x}_0 = 1$   $z_0 = 3$   $\alpha_0 = 0$   $\beta_0 = 0$   $\gamma_0 = 0$ 。仿真时间区间取  $0 \sim 10 \text{ s}$ 。机器人在平面上的运动轨迹迹如图4所示。

由图4可看出,在这种条件下,球体一边沿  $Z$  轴向前滚动,同时绕  $Y$  轴转动,在  $XOZ$  平面上的运动轨迹为一个圆。

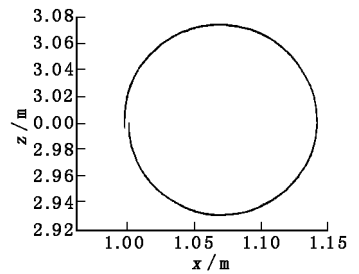


图4 运动轨迹

## 4 结束语

通过上面的分析可看出,笔者提出的这种球形机器人可很好地实现球体在平面上的全向滚动,通过控制两个电机的输入转速来实现球形机器人不同的运动轨迹。该设计第一次在球形机器人内部为各种仪器或设备提供了一个稳定搭载平台,这个平台在球体做全向滚动的过程中始终保持稳定的姿态,而不是随球体一起滚动。该球形机器人可在陆地上或水面上全向滚动,通过在其稳定平台上搭载各种仪器设备,可作为侦察或探测装置,结构简单,易于控制,因此该球形机器人在军事、工业和民用方面具有广阔的发展前途和应用前景。

参考文献:

- [1] Halme A, Schonberg T, Wang Y. Motion Control of a Spherical Mobile Robot[A]. 4th International Workshop on Advanced Motion Control[AMC'96] [C]. Japan: Mie University, 1996. 259-264.
- [2] Bicchi A, Balluchi A, Prattichizzo D, et al. Introducing the Sphericle: an Experimental Testbed for Research and Teaching in Nonholonomy[A]. Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation[C]. Albuquerque, New Mexico: IEEE, 1997. 2620-2625.
- [3] Ferriere L, Raucant B. RollMOBS, a New Universal Wheel Concept[A]. Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation[C]. Leuven, Belgium: IEEE, 1998. 1877-1882.
- [4] Bhattacharya S, Agrawal S K. Design, Experiments and Motion Planning of a Spherical Rolling Robot[A]. Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation[C]. San Francisco: IEEE, 2000. 1207-1212.
- [5] Javadi A, Mojabi P. Introducing August: a Novel Strategy for an Omnidirectional Spherical Rolling Robot[A]. Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation[C]. Washington: IEEE, 2002. 3527-3533.
- [6] 肖爱平, 孙汉旭, 聊启征, 等. 一种球形机器人的设计与原理分析[J]. 机电产品开发与创新, 2004, (1): 14-16.
- [7] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(编辑: 齐淑娟)

