

# 四轮驱动全向底盘的控制方法研究

滕鑫淼<sup>1</sup>, 李昆瑜<sup>2</sup>, 曾 琼<sup>3</sup>

(1. 中国石油集团钻井工程技术研究院井下控制工程所, 北京 100083;  
2. 中国石油物资公司, 北京 100029; 3. 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** 为提高机器人移动的灵活性和机动性, 使机器人到任意位置均沿直线行走并改变姿态, 需在传统的两轮驱动底盘上增加驱动轮, 文章主要针对四轮驱动全向底盘的控制方法进行研究; 文章对四轮驱动全向底盘进行运动学分析并建模, 得到了控制系统传递函数, 并进行仿真验证; 对四轮驱动全向底盘进行了动力学建模, 分析了如何避免出现“打滑”现象; 导航方式采用了经济、精度较高的全向码盘导航方式; 控制上采用闭环控制, 加入前置探测点和超前校正环节, 并且考虑了实际过程中机体的加减速问题; 实验结果表明, 提出的控制方法可以使四轮驱动全向底盘实现预设功能, 并且具有较高的控制精度, 研究内容对机器人的灵活移动有着十分重要的意义。

**关键词:** 四轮驱动; 全向底盘; 全向码盘导航; 闭环控制

## Research on the Control Method of Four-wheel Driving Omnidirectional Chassis

Teng Xinmiao<sup>1</sup>, Li Kunyu<sup>2</sup>, Zeng Qiong<sup>3</sup>

(1. Downhole Control Engineering Department, CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100083, China;  
2. China Oil Resource Supply Co., Beijing 100029, China; 3. Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to improve the flexibility and mobility of the robots, enabling them to walk along a straight line to any location and change the attitude at the same time, more driving omnidirectional wheels needed to be fixed on the chassis of robots. This paper mainly studied the control method of four-wheel driving omnidirectional chassis. By modeling and simulating on the kinematics of the four-wheel driving omnidirectional chassis, the transfer function of the control system was achieved. The navigation of the system was omnidirectional encoder navigation. The control system was the close-loop control system and the detecting points, leading correction links and the actual acceleration or deceleration had been considered. The experiments showed that the control method proposed by this paper could realize the function of reservation and had a high control precision. It's meaningful for the flexible movement of robots.

**Keywords:** four-wheel drive; omnidirectional chassis; omnidirectional encoder navigation; close-loop

## 0 引言

目前机器人技术得到了飞速的发展, 机器人行走移动控制已经成为机器人领域中的一个重要分支, 得到了人们越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。如何提高机器人移动时的灵活性、机动性, 是机器人领域中研究的热点。

当前, 地面机器人的移动方式主要分为腿足式、履带式、轮式等几种。对于轮式机器人, 大部分采用两轮驱动底盘, 即底盘上安装两个主动轮, 其余的均为从动轮, 然而两轮驱动底盘不能直接进行横向平移, 只能进行纵向平移以及自身旋转, 这种驱动方式大大地限制了机器人的灵活性。因而, 为提高机器人的灵活性, 需增加驱动轮, 采用全向底盘。

本文主要研究了一种基于四轮驱动全向底盘的控制方法, 本文提出的控制方法可以使装有四轮驱动全向底盘的机器人沿任意方向直线行进, 并且在行进过程中可以随意调节自身的姿态角, 这种驱动方式较两轮驱动有着更强的灵活性和机动性<sup>[3-4]</sup>。

## 1 四轮驱动全向底盘建模与仿真

### 1.1 四轮驱动全向底盘运动方式

四轮驱动全向底盘其主要由 4 个全向轮组成, 分别位于 4 条边的垂直中心线处。四个全向轮均为主动轮, 由直流电机

驱动。

相比传统的两轮驱动底盘, 四轮驱动全向底盘的优点是灵活性高, 自由度更多, 但对于控制上要求也更高, 对于四轮运动的协调控制是一大难点。

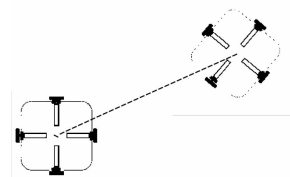


图 1 四轮驱动全向底盘运动方式

如图 1 所示, 沿任意方向直线运动, 并且在运动过程中, 可以同时改变机体姿态, 这是四轮驱动全向底盘最突出的特点, 也是控制上的难点。这种行走的方式的优点在于在执行复杂任务(即要求机体质心沿直线方向运动, 同时要求机体转动某个角度)时可以极大地缩短了机器人的行走距离, 在机器人机体速度确定的情况下可以缩短到达目的地的时间, 并可以使机器人在狭小的空间内运动, 而这是两轮驱动底盘无法完成的。上述问题是本文的研究重点, 具体需要通过数学建模、仿真、编程调试等一系列工作来解决。

### 1.2 运动学建模与仿真<sup>[5-7]</sup>

四轮驱动全向底盘工作空间为一平面, 建立如图 2 所示的绝对坐标系  $x_a - y_a$  和底盘的机体坐标系  $x_r - y_r$ 。其中, 底盘的机体坐标系原点与底盘中心重合,  $a$  为底盘中心到 4 个轮间的距离, 底盘中心从  $A$  点运动到  $B$  点距离为  $L$ ,  $\theta$  为底盘中心

收稿日期: 2014-09-05; 修回日期: 2014-10-13。

作者简介: 滕鑫淼(1988-), 男, 初级工程师, 主要从事井下控制方向的研究。

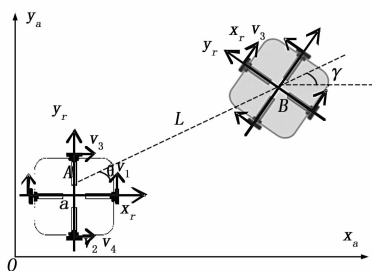


图 2 四轮驱动全向底盘运动学分析图

从 A 点至 B 点运动过程中偏离绝对坐标系横轴  $x_a$  的角度,  $\gamma$  为运动过程中机体坐标系  $x_r$  轴与绝对坐标系  $x_a$  轴的夹角。 $\bar{x}_a$ 、 $\bar{y}_a$ 、 $\bar{\gamma}$  分别为底盘相对绝对坐标系  $x_a$  轴、 $y_a$  轴方向运动的速度, 以及自转角速度,  $v_i$  分别为 4 个轮子的切向速度, 即直流电机驱动方向上的速度。

通过运动学分析, 可得如下运动学方程:

$$\begin{cases} v_1 = -\bar{x}_a \sin\gamma + \bar{y}_a \cos\gamma + a\bar{\gamma} \\ v_2 = -\bar{x}_a \sin\gamma + \bar{y}_a \cos\gamma - a\bar{\gamma} \\ v_3 = \bar{x}_a \cos\gamma + \bar{y}_a \sin\gamma - a\bar{\gamma} \\ v_4 = \bar{x}_a \cos\gamma + \bar{y}_a \sin\gamma + a\bar{\gamma} \end{cases} \quad (1)$$

将上式 (1) 写成矩阵形式, 可得四轮驱动全向底盘运动学模型:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\gamma & \cos\gamma & a \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & -a \\ \cos\gamma & \sin\gamma & -a \\ \cos\gamma & \sin\gamma & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_a \\ \bar{y}_a \\ \bar{\gamma} \end{bmatrix} \quad (2)$$

令

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \sin\gamma & \cos\gamma & a \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & -a \\ \cos\gamma & \sin\gamma & -a \\ \cos\gamma & \sin\gamma & a \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = [\bar{x}_a \quad \bar{y}_a \quad \bar{\gamma}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{V} = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4]^T \quad (5)$$

由式 (3)、式 (4)、式 (5), 则可得到控制系统的传递函数矩阵为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{GS} \quad (6)$$

式 (6) 中  $\mathbf{V}$  为全向轮线速度矢量,  $\mathbf{G}$  为传递矩阵,  $\mathbf{S}$  为机器人相对绝对坐标系的速度矢量。

又由:

$$\tan\theta = \frac{\bar{y}_a}{\bar{x}_a} = \frac{Y_a}{X_a} \quad (7)$$

$$\gamma = \bar{\gamma}\Delta t \quad (8)$$

根据实际机体的情况, 已知各轮到机体中心的距离  $a = 0.25 \text{ m}$ , 考虑到实际运动中有加减速过程, 令机体沿绝对坐标系  $x_a$ 、 $y_a$  轴方向的加速度  $\bar{x}_a = \bar{y}_a = 3 \text{ m/s}^2$ , 最大速度  $\bar{x}_a = \bar{y}_a = 3 \text{ m/s}$ , 且匀速过程时间为 1 s, 则通过简单计算可知加减速区时间分别为 1 s, 总共机体运行时间为 3 s, 再令自转角速度为  $\bar{\gamma} = \pi/3 \text{ (rad/s)}$ 。

利用上述给定条件, 代入式 (6)、(7)、(8) 中, 得到仿真结果如图 3 所示。

通过图 3 (a)、3 (b)、3 (c) 可以看出, 在上述给定的条件下, 整个机体的运动轨迹符合要求, 即沿着某一特定方向, 质心运动轨迹为一直线, 在绝对坐标系下沿 X、Y 轴方向行走

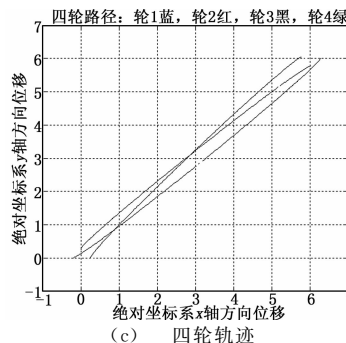
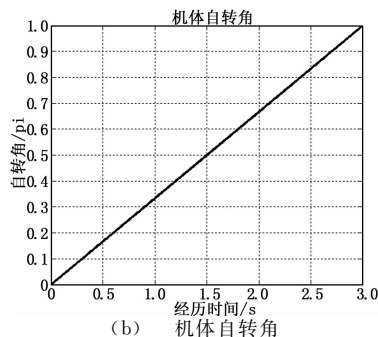
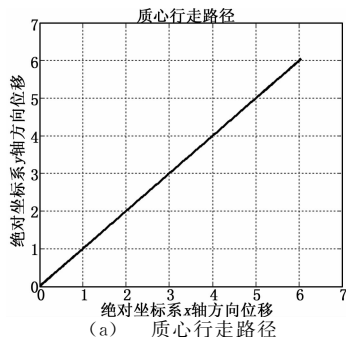


图 3 仿真结果

的距离分别为 6 m, 但机体自转角达到  $180^\circ$ , 达到了沿直线行走, 并改变姿态角的目的。

### 1.3 动力学建模与分析

当地面提供的摩擦力不足以满足轮子所需的驱动力时, 轮子将与地面发生相对滑动, 导致轮子出现空转现象, 造成当前机器人运动状态不可控, 这种现象称为“打滑”, 其原因主要是由于机器人加速度过大引起的, 造成驱动力大于地面所提供的最大摩擦力。因此还应对四轮全向底盘进行动力学分析, 分析各轮的驱动力情况, 避免“打滑”现象的发生<sup>[8-9]</sup>。

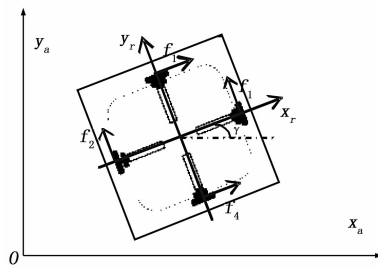


图 4 四轮驱动全向底盘动力学分析图

如图 4 所示,  $f_i$  为第  $i$  个电机提供给机器人的驱动力, 在

不出现“打滑”现象时, 其与地面所给轮子的摩擦力大小相等, 方向相反。在  $x_a - y_a$  坐标系下, 设绕机器人中心的转动惯量为  $I$ , 根据牛顿第二运动定律有:

$$F_{x_a} = m\ddot{x}_a \quad (9)$$

$$F_{y_a} = m\ddot{y}_a \quad (10)$$

$$M_I = \ddot{\theta} \quad (11)$$

根据各驱动力方向及机器人的姿态, 可写出具体的动力学方程如下:

$$m\ddot{x}_a = -f_1 \sin\gamma - f_2 \sin\gamma + f_3 \cos\gamma + f_4 \cos\gamma \quad (12)$$

$$m\ddot{y}_a = f_1 \cos\gamma + f_2 \cos\gamma + f_3 \sin\gamma + f_4 \sin\gamma \quad (13)$$

$$\ddot{\theta} = a * (f_1 + f_4 - f_2 - f_3) \quad (14)$$

第  $i$  个轮子的动力学模型可描述为:

$$ku_i - \ddot{\varphi}_i = I_w \ddot{\varphi}_i + f_i r \quad (15)$$

式中,  $k, l$  为常数,  $I_w$  为轮子绕其轴线的转动惯量,  $r$  为轮子半径,  $\ddot{\varphi}_i, \dot{\varphi}_i$  为第  $i$  个轮子的角速度和角加速度,  $u_i$  为第  $i$  个电机的驱动电压。

式 (15) 中轮子转动惯量  $I_w$  很小,  $I_w \ddot{\varphi}_i$  相对于  $f_i r$  所消耗的扭矩很小, 在实际问题中为简化计算, 式 (15) 可近似写为:

$$ku_i - \ddot{\varphi}_i = f_i r \quad (16)$$

系统动力学模型方程为:

$$\begin{bmatrix} m\ddot{x}_a \\ m\ddot{y}_a \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\sin\gamma & -\sin\gamma & \cos\gamma & \cos\gamma \\ \cos\gamma & \cos\gamma & \sin\gamma & \sin\gamma \\ a & -a & -a & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} ku_1 - \ddot{\varphi}_1 \\ ku_2 - \ddot{\varphi}_2 \\ ku_3 - \ddot{\varphi}_3 \\ ku_4 - \ddot{\varphi}_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由式 (17), 可得到四轮全向底盘的加速度, 将机体的绝对加速度控制在一定范围内, 即可避免“打滑”现象的产生, 防止驱动轮发生空转。

## 2 四轮驱动全向底盘控制方法

### 2.1 全向码盘导航及坐标解算

对于自动行走的机器人来说, 机器人的导航定位技术是十分关键的, 机器人的定位精度直接决定了其能否完成预定任务。

本文介绍的四轮驱动全向底盘采用全向码盘导航方式, 导航器件为计数码盘, 与传统的码盘轮不同, 为防止码盘轮发生侧滑, 采用的码盘轮为全向码盘轮。

全向码盘轮安装位置与驱动轮同轴, 编码器与码盘轮相连, 将计得的数反馈给上位机, 上位机计算出每个码盘轮对应驱动轮所走过的距离, 根据每个驱动轮沿切线方向走过的距离就可以解算出机体在绝对坐标系下的横坐标  $X$ 、纵坐标  $Y$ , 以及机体自转角  $\theta$ 。

按一定周期对底盘的轨迹微分。如图 10 所示, 本周期初始时刻, 底盘的位姿为  $A(x_1, y_1, \theta_1)$  (已知), 结束时车的位姿为  $B(x_2, y_2, \theta_2)$  (未知)。由于四轮全向运动时, 各轮会发生侧滑, 码盘记的位移只沿着各个轮的切线方向, 不会记录各轮侧滑而产生的位移, 左码盘轮记录的位移  $dl$ , 右码盘轮记录的位移  $dr$ , 前码盘轮记录的位移  $dh$ , 后码盘轮记录的位移  $db$ , 根据实验结果, 按以下公式解算出车的质心的位姿较为精确:

$$d = \sqrt{\left(\frac{dl+dr}{2}\right)^2 + \left(\frac{dh+db}{2}\right)^2} \quad (17)$$

车转过的角度为:

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \left( \frac{dr-dl}{L_{lr}} + \frac{dh-db}{L_{lh}} \right) \quad (18)$$

式 (18) 中,  $L_{lr}$  为车左右轮的码盘间距,  $L_{lh}$  为车前后轮的码盘间距。

由式 (17) 和式 (18) 即可实时解算出底盘在绝对坐标系下的位置信息。

则 B 点坐标为:

$$\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta \quad (19)$$

$$\gamma = \theta_1 + \arctan((dl+dr)/(dh+db)) \quad (20)$$

$$x_2 = y_1 + d * \cos\gamma \quad (21)$$

$$y_2 = y_1 + d * \sin\gamma \quad (22)$$

由式 (17) ~ (21) 可知, 在平面运动中, 知道了机体的初始位姿, 并记录了机体的各轮在切线方向上的位移, 则可解算出机体在下一个周期的位移, 再进行累加运算, 即可得到机体在任意时刻的位置和姿态信息, 为后续的闭环控制系统提供了基础。

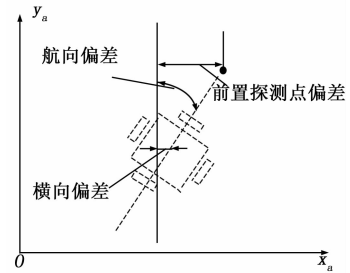


图 5 机体运动偏差示意图

### 2.2 运动路径的偏差修正

如图 5 所示, 机体的理想轨迹是沿纵轴方向直线运行, 当机体与理想轨迹发生偏差时, 必然存在图中所示的横向偏差和航向偏差。在机器人轨迹的修正过程中, 需要对这两个偏差量进行调节。然而, 如果想同时对这两个变量进行调节, 则情况会比较复杂。

为了同时调节机器人行走的横向偏差和航向偏差, 提高机器人直线行走收敛的快速性、减小超调, 可引入一个前置探测点。在机器人行进方向的前方某一位置上, 放置一个虚拟点, 计算此点与目标直线的偏差, 并根据这个偏差设置合适的反馈增益来计算修正的四个轮的差速值, 修正机器人行进的直线轨迹。前置探测点长短的选择和反馈增益系数需要根据机器人实际行走的调试效果来整定。

假设机器人的横向偏差为  $\Delta Distance$ , 机器人的航行偏差为  $\Delta \theta$ , 前置探测点前置距离为  $L$ , 则前置探测点偏差  $PID \Delta Distance$  为:

$$PID \Delta Distance = \Delta Distance + \sin(\Delta \theta) \times L \quad (23)$$

通过加入前置探测点, 可以将横向偏差和航向偏差整合在了一起, 同时相当于引入超前校正环节, 可以提高行走精度。

对于在运动过程中改变姿态角的控制, 只要在这个基础上加入姿态角的偏差修正即可。

### 2.3 控制系统及控制算法设计

本文提到的四轮全向驱动底盘的控制系统为一个闭环控制

系统，如图 6 所示。

控制系统的测量装置是安装在 4 个驱动轮下的编码器。编码器将记录的数据发送给上位机，用来实时解算出机体在绝对坐标系下的横、纵坐标值和姿态角。

控制系统的比较、计算装置主要任务是用以计算实际轨迹和预设轨迹的偏差值，即机体的横、纵坐标的偏差值和姿态角的偏差值。同时，在此基础上，还要再考虑前置探测点的偏差，引入这个超前校正环节。

控制系统的控制装置为上位机控制器，将本文小节 1.2 中提到的控制系统传递函数矩阵代入，同时加入 PID 控制算法，对系统建立的负反馈的偏差量进行实时修正。

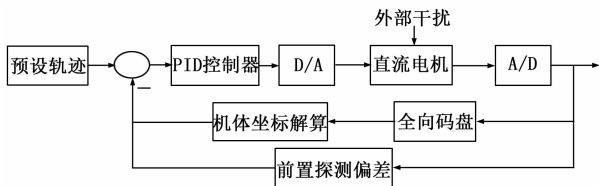


图 6 四轮全向驱动底盘闭环控制系统

图 6 即为本文提到的四轮全向驱动底盘闭环控制系统原理图。

在机体实际运动过程中，会存在加速区、减速区和匀速区，因此在控制算法的编写中要考虑到该问题。在控制算法流程设计时，先预设一个加速度值，保证在机体不存在“打滑”现象的前提下，可以尽快以最大速度运动。同时，为防止机体速度减为零时，由于惯性原因冲出预定目标点位置，因此在算法初始阶段，预设一个减速区，实时判断是否进入减速区，具体算法流程见下图 7。

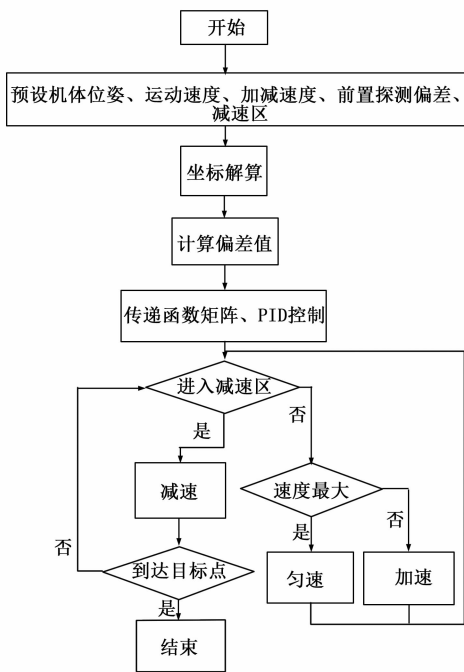


图 7 控制算法流程图

图 7 为控制算法流程图。如图 7 所示，在机体运动的每个阶段中都要实时计算与目标点的距离。在加速段中，可采用匀加速的控制方式，但首先需设定好一个最大速度，当速度达到最大速度时，则进入匀速区，在此期间，需不断检测是否进入

减速区，为了避免由于突然减速带来的电机振动问题，减速区的减速度取值为当前位置离目标点的距离与预设减速区的长度之比，得到一个平滑的减速过程，直到到达目标点停止。

### 3 实验结果

本文设计的控制系统及控制算法通过大量的室内实验得到了较好的控制效果，可以实现机体沿任意方向直线行走且同时改变姿态角的功能，并且控制精度较高。

以下述 2 种情况为例：

1) 机体在沿正前方以最大速度为 1 m/s，沿直线方向运动 3 m 并且机体姿态自转 90°时，机体姿态角误差在 ±1°以内，横向偏差不超过 ±5 cm，纵向偏差也不超过 ±5 cm。

2) 机体在沿 45°斜线方向上以最大速度为 1 m/s，沿直线方向运动 3 m 并且机体姿态自转 90°时，机体姿态角误差在 1°以内，横向偏差不超过 ±5 cm，纵向偏差也不超过 ±5 cm。

### 4 结束语

本文对四轮驱动全向底盘的控制方法进行了系统地研究。首先，本文对四轮驱动全向底盘进行了运动学建模和仿真，得到了四轮的运动学模型，同时，也对四轮驱动全向底盘进行了动力学建模，分析了如何避免出现“打滑”现象，避免底盘出现不可控的情况。导航方式采用了经济、精度较高的四全向码盘导航方式，控制上采用了闭环控制，加入了前置探测点，加入了超前校正环节，并且在控制过程中考虑了实际过程中机体的加减速问题。

最终，通过大量的实验进行了验证，并得到了较好的实验结果，可以实现沿任意方向直线行走且同时改变姿态角的功能，并且控制精度较高。

总之，本文提出的控制方法很好地完成了让装有四轮驱动全向底盘的机器人始终沿直线行走，同时可以改变机体姿态的目的，大大缩短机器人的行走距离，对提高机器人的灵活性和机动性具有重要的指导意义。

#### 参考文献：

[1] 黄永安, 熊蔡华, 熊有伦. 智能机器人与应用的现状与发展趋势 [J]. 国际学术动态, 2009 (4): 38-39.

[2] 王亚辉, 何耀民. 机器人的应用现状及发展趋势 [J]. 经济师, 2005, (8).

[3] Leow Y P, Low K H, Loh W K. Kinematic modelling and analysis of mobile robots with omnidirectional wheels [A]. 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision [C]. Singapore, 2002.

[4] Wada M, Asada H H. Design and control of a Four-Wheeled omnidirectional mobile robot with steerable omnidirectional wheels [J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21 (4): 193-208.

[5] Jung M J, Kim J H. Mobility augmentation of conventional wheeled bases for omnidirectional motion [J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 2002, 18 (1): 81-87.

[6] 蒋海林, 张国梁, 宋海涛. 基于 ARM9 的嵌入式足球机器人运动控制系统 [J]. 微计算机信息, 2009, (23): 97-99.

[7] 彭 曦. 基于多传感器信息融合的机器人行走控制 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2008.

[8] 牟学刚, 朱 劲, 蒋 平. 三轮全向足球机器人结构设计与系统模型研究 [J]. 机械与电子, 2006 (5) 38-41.

[9] 谭 明, 徐 德. 先进机器人控制 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.