

基于速度交叉耦合的三轮全方位 移动机器人多轴协调运动

Multi-axis Coordinated Motion of Three-wheel Omni-directional Mobile Robot Based on Speed Cross-coupling Control

沈冬燕 曹其新

(上海交通大学,上海 200240)

摘要: 由于全方位移动机器人运动轨迹通过直线拟和得以实现,依据此特性,在底层运动控制中,针对机器人速度误差进行反向交叉耦合补偿,通过设计合理的耦合误差反馈补偿器,来提高机器人的直线运动能力,充分发挥机器人全方位移动的运动优势,并通过实验验证了该方法的有效性。

关键词: 全方位移动机器人 交叉耦合 多轴协调运动

doi: 10.3969/j.issn.1007-080X.2010.01.012

Abstract: Multi-axis Coordinated Motion Control of Three-wheel Omni-directional Mobile Robot is studied in this article. As the motion trace of the robot can be achieved by Straight-line-fitting, it is an effective way to make full use of the robot's motion advantage through improving its straight line motion ability. According to this point, Cross-coupling Control based on robot's speed is added to bottom motion control system. The motion control method is proved effective in the experiment with the Three-wheel Omni-directional Mobile Robot.

Key words: omni-directional mobile robot cross-coupling multi-axis coordinated motion

0 引言

全方位移动机器人具有全方位移动的功能,可以在不改变位姿的情况下向任意方向运动,凭借此独特的运动优势,在国内外 RoboCup 中型组机器人比赛中,得到了大力推广和发展。在运动过程中,全方位移动机器人运动轨迹通过直线拟和实现,直线运动能力是充分发挥机器人全方位移动功能的关键,但其复杂的轮系分布给机器人控制带来了难度。在 RoboCup 中型组比赛中,机器人受到堵转、摩擦、打滑及各种扰动因素的影响,导致机器人直线运动能力较差而偏离目标点,这是一个在各支队伍中普遍存在的问题。目前,国内关于全方位移动机器人底层控制方法研究相关的文献资料大部分都是针对单轴控制的,而在实际比赛中,对机器人的控制主要通过上位机采集的视觉信息进行调整,但这种方法加重了上层策略软件的负担,减低了决策执行的效率,反馈的实时性也不高。针对此

问题,本文在底层运动控制中对机器人运动时的速度误差进行交叉耦合反馈补偿,通过设计合理的耦合误差反馈补偿方式,来提高机器人的直线运动能力,并通过实验验证了该方法的有效性。

1 全方位移动足球机器人运动学模型的建立

目前,在全方位移动机器人轮系分布系统设计中,主要有三轮 120° 均衡分布^[1]及四轮 90° 均衡分布^[2]两种类型。本文通过构建机器人的运动学模型和针对速度误差的交叉耦合反馈补偿器来建立适当的运动控制协调机制,对机器人在动态运动过程中产生的系统偏差进行实时有效补偿,以提高机器人的直线运动能力。

如图 1 所示,机器人采用 3 个麦卡那姆轮(Mecanum wheel)作为驱动轮, 120° 均衡分布,采用的这种全方位轮能够有效避免普通轮子不能侧滑带来的非完整性约束,全方位轮中心与机器

作者简介:沈冬燕 1980 年生,硕士研究生。研究方向为机器人、智能控制。

曹其新 1960 年生,博士,教授。研究方向为智能机器人、机器视觉。

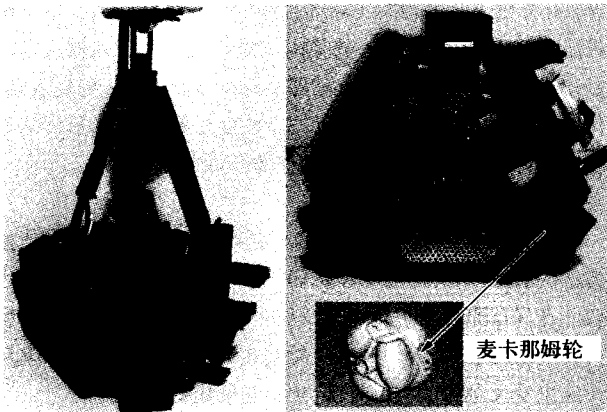


图1 三轮全方位移动机器人及其轮系分布

人中心的连线与车轮径向垂直。机器人简化的运动学模型如图2所示。

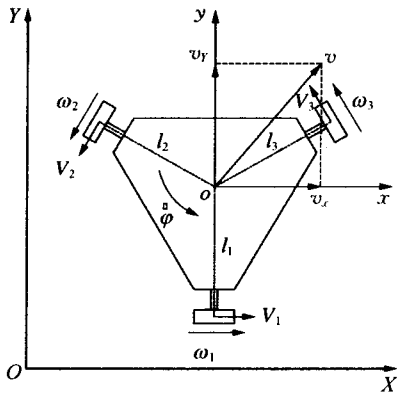


图2 简化运动学模型

xoy 为世界坐标系, XOY 为以机器人中心为原点的局部坐标系, 机器人任一时刻位姿为 $\zeta = [x, y, \varphi]^T$, 速度 $V = [V_x, V_y, \dot{\varphi}]^T$, 依据全方位移动机器人运动特性, 分析车体中心点 O 的速度及三个车轮中心的速度, 按照平面运动速度分解合成关系, 可建立如下数学公式:

$$\begin{aligned} V_1 &= R \cdot \omega_1 = V \cdot \cos(270 - \theta) + l_1 \dot{\varphi} \\ V_2 &= R \cdot \omega_2 = V \cdot \cos(150 - \theta) + l_2 \dot{\varphi} \\ V_3 &= R \cdot \omega_3 = V \cdot \cos(30 - \theta) + l_3 \dot{\varphi} \end{aligned} \quad (1)$$

公式(1)中:

θ 为机器人的运动方向;

R 为麦卡那姆轮半径;

V 为机器人中心的速度;

V_1, V_2, V_3 分别是三个车轮中心的线速度;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为轮子转速, 逆时针方向为正;

$\dot{\varphi}$ 为机器人的角速度, 逆时针方向为正;

l_1, l_2, l_3 分别为车体中心到某一时刻各轮子与地面接触点之间距离。

由图1可以看出, 麦卡那姆轮轮结构特殊, 运动时与地面的接触点是非连续性的, 运动过程中各时刻 l_1, l_2, l_3 大小并不确定, 但为了方便计算, 此处均取一近似平均值 l , 实验证明该近似是可行的。

2 速度误差耦合补偿系统设计

交叉耦合控制技术^[3]是一种解决多轴协调问题的系统化设计方法, 基本思想是基于每个轴的跟踪误差来直接反映轮廓误差^[4], 通过交叉耦合控制器进行运算得到每个轴的位置补偿值, 从而确保每个轴都能够反映其他轴的动态特性变化, 最终消除每个轴对其他轴的影响。为提高全方位移动机器人的直线运动能力, 由于单轴跟踪误差的补偿效果并不理想, 考虑到全方位移动机器人运动控制系统的复杂性, 并且机器人的轮廓变化可以从机器人的速度变化中来预测, 依据交叉耦合的思想, 将机器人的速度误差作为耦合因素引入到全方位移动机器人的动态多轴协调运动控制系统中。同时, 采用速度控制也简化了控制的模型。

本文中, 通过对比机器人系统输出与输入的偏差, 通过设计一个合理的速度误差耦合补偿器将机器人系统的速度偏差反馈到每个轴的输入端, 进行协调补偿控制, 从而确保每个轴都能够对其他轴的动态特性变化做出调整, 最终消除各轴间的动态影响, 提高控制性能, 改进机器人的直线运动能力。速度误差耦合补偿系统如图3所示。

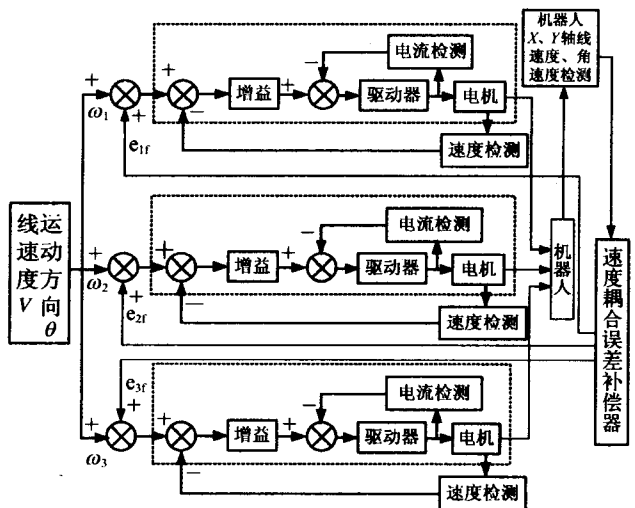


图3 速度误差耦合补偿系统

由数学公式(1)可以推导出 $\dot{\varphi} = f(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \frac{R}{3l}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$, 为使机器人达到直线运动状态时, 则输入端应有 $\dot{\varphi} =$

0, 由此可得 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 三者之间应满足: $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 0$, 记由角速度传感器测得的实际角速度为 $\dot{\varphi}'$, 记 $e = \dot{\varphi}' - \dot{\varphi}$, 当机器人达到预设的稳定直线运动状态时, $\dot{\varphi}' = 0$, 因此 $e = 0$, 在机器人的运动过程中, 对机器人角速度 $\dot{\varphi}$ 的控制转化为对机器人角速度偏差 e 的控制, 因此, 为让全方位移动机器人得到稳定的直线运动状态, 设计一个合理的误差反馈补偿是关键。针对本文中研究的三轮全方位移动机器人, 当机器人保持直线运动状态时, $\dot{\varphi} = 0$, 则数学公式(1)可化简得数学公式(2)

$$\begin{aligned} V_1 &= l \cdot \omega_1 = V \cdot \cos(270 - \theta) \\ V_2 &= l \cdot \omega_2 = V \cdot \cos(150 - \theta) \\ V_3 &= l \cdot \omega_3 = V \cdot \cos(30 - \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

显然, 由公式(2)可知, 当机器人运动方向不一致, 即 θ 取不同角度时, 三个轴之间的速度输入应满足如上关系, 速度分布如图4所示。图中, 纵轴为电机的速度分布(以 V/l 作为数量单位), 横轴为全方位移动机器人运动方向 θ (以度为单位)。

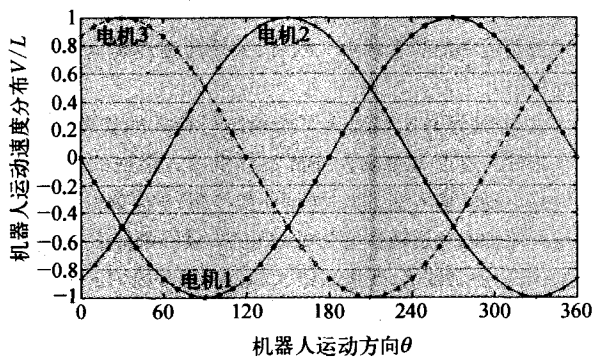


图4 直线运动状态各轴输入分布

如图4所示, 当机器人朝不同方向时(即 θ 发生改变), 全方位移动机器人三个轴的初始输入应有图示的分布关系。在速度误差耦合反馈系统的设计中, 考虑到打滑、堵转等因素, 通过各轴电机码盘的信号计算的机器人速度可能存在较大偏差, 因此, 在机器人上面添加了角速度传感器和双轴加速度传感器, 以便获取机器人任意时刻的真实速度 V' , 设 $V' = [V'_x, V'_y, \dot{\varphi}']^T$, 其中, V'_x, V'_y 可以由双轴加速度传感器测得的加速度推导得出:

$$\begin{bmatrix} x(\dot{n}) \\ y(\dot{n}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(\dot{n}-1) \\ y(\dot{n}-1) \end{bmatrix} + \tau \begin{bmatrix} a_x(\dot{n}-1) \\ a_y(\dot{n}-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, τ 为采样周期, 角速度 $\dot{\varphi}'$ 则直接由角速度传感器测得, 由公式(1)求逆解分别得出三个车轮真实的角速度 $\omega'_1, \omega'_2, \omega'_3$, 记机器人系统的误差为 δ :

$$\delta = (\omega'_1 - \omega_1) + (\omega'_2 - \omega_2) + (\omega'_3 - \omega_3) = e_{1f} + e_{2f} + e_{3f}$$

e_{1f}, e_{2f}, e_{3f} 分别为对各轴的实际耦合补偿量。耦合反馈补偿系统在机器人运动过程中, 任意一轴输出动态变化产生的机器人运动偏差都能通过速度误差耦合补偿器及时反馈到机器人的输入端, 确保每个轴都能够对其他轴的动态特性变化做出调整, 最终消除各轴间的动态影响, 改进机器人的直线运动能力。

3 实验结果与分析

为进一步验证以上提出的基于速度交叉耦合协调运动控制方法的有效性, 利用图1所示的三轮全方位移动机器人进行实验。在保留原视觉系统进行反馈的基础上, 实验分两种情况进行, 即在传统非耦合的针对单轴速度跟踪的控制方法和采用基于速度交叉耦合的控制方法, 实验场景如图5所示。

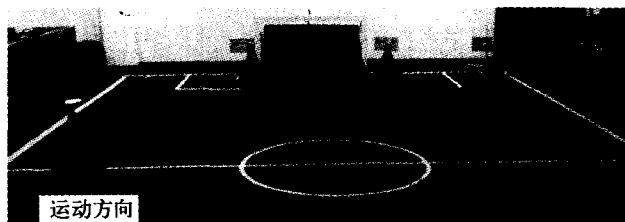


图5 实验场景

图5中, 以白线圆心为坐标原点 O , 机器人运动方向为 X 轴建立直角坐标系 XOY 。为凸显实验对比的差别, 机器人将从图中起点位置以 1.5 m/s 速度沿着图中的白线作直线运动, 运动方向角 $\theta = 0$ 。在实验中, 机器人的位姿 $\zeta = [x, y, \varphi]^T$ 通过机器人上的视觉系统进行实时数据采集并通过笔记本电脑自动保存记录, 取出机器人坐标 x, y , 利用 Matlab 对数据进行处理, 绘制出 $x-y$ 对比图, 如图6所示。

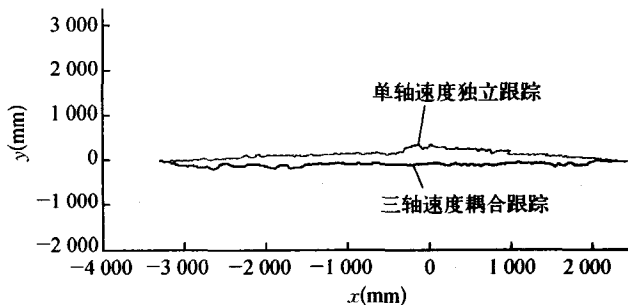


图6 $x-y$ 对比图

在两个对比实验中, PID 参数是相同的, 从图5中可以看出, 在沿白线作直线运动的过程中, 当采用单轴速度独立跟踪的情况下, 虽然最终也能运动到预设的目标点, 但是从曲线中可以看出, 由于视觉系统反馈不及时, 实时性差, 机器人运动过程中出现速度偏差时未能及时得到纠正, 表现出直线运动能力较差。而在机器人底层运动控制中引入速度交叉耦合控制后, 由于运

(下转第73页)

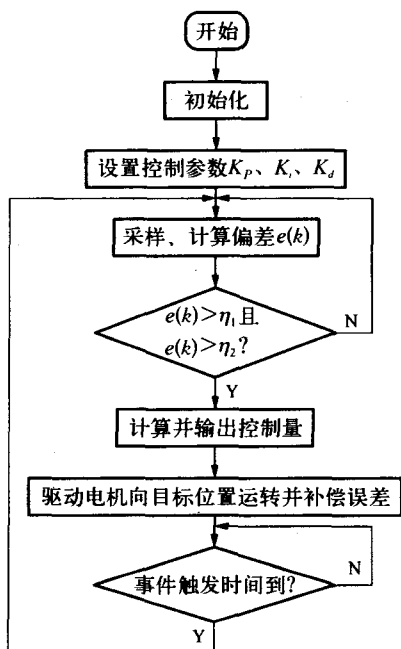


图3 系统PID程序流程图

重定位命令后,伺服电机的驱动命令则主要由 PCI-8132 发出,且要留出一定的时间用于采集反馈信号,同时考虑到传动机构的机械惯性,试验中采样时间间隔取为 10 ms。若采样时间间隔大于 10 ms,则误差补偿能力变差,甚至导致运动振动现象;太小,则由于机械惯性,出现频繁补偿现象,甚至浪费 PC 机资源,出现运动控制卡或 PC 机卡死现象,而取为 10 ms,完全能够满足要求。

(上接第 52 页)

动过程中的速度偏差通过实时反馈得到了及时的纠正,机器人运动轨迹偏差减小了很多,在运动过程中直线运动能力得到了明显提高,由此,通过实验验证了本方法的有效性。

4 结语

本文依据全方位移动机器人特殊的运动性能,为提高全方位移动机器人的灵活性,设计一个合理的交叉耦合控制器,在机器人运动过程中,及时将机器人系统的运行情况反馈到输入端,在机器人加减速阶段及发生打滑现象等受到外界扰动情况下发生的非直线运动时,通过对输入端的反馈控制,在底层控制上有效地改善了全方位移动机器人的直线行走能力,对充分发挥全方位移动机器人的运动优越性,减轻上层软件的负担,

3 试验结果

通过试验,得出试验数据如表 1、2、3 所示。

表 1 各种转速下误差补偿结果

电机转速 (pps)	1 000	10 000	50 000	100 000	500 000
补偿后误差值 (脉冲数)	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1

表 2 各种转动角度下误差值

电极转动角度(度)	1	5	30	180	720
补偿后误差值 (脉冲数)	0	0	≤1	≤1	≤1

表 3 刚性、存在间隙及滑动传动时误差值

传动性质	刚性传动	存在间隙的传动	滑动传动
无补偿时运动结果误差值 (脉冲数)	0	不确定*	不确定**
有补偿运动结果误差值 (脉冲数)	0	≤1	≤1

* 不确定值与间隙尺寸及旋转角度有关,试验中最大误差可达 ±82;

** 与运动旋转角度、速度及滑动摩擦系数有关,为完全不确定值。当系统为刚性传动系统时,无论有无补偿,传动误差都较小;而当系统存在间隙或为柔性传动系统时,若无补偿,则无论何种情况,传动误差均为不确定值;若有误差补偿,则在可能情况下,不论传动速度和位置大小为何值,均能达到较好的传动补偿效果(控制在 1 个脉冲之内)。

3 结语

采用基于 PCI-8132 的死区兼带阻滤波 PID 控制算法系统补偿策略,能有效解决传动系统中存在的传动间隙或非刚性传动问题,已经得到试验验证,误差补偿效果较好(控制在 1 个脉冲之内);对误差的补偿,采用时间触发方式,触发时间间隔取 10 ms。

提高了决策的效率。

参考文献

- [1] 牟学刚,朱劲,蒋平. 三轮全向足球机器人结构与系统模型研究[J]. 智能控制,2006(5): 38-41.
- [2] 熊蓉,张翻,褚健,等. 四轮全方位移动机器人的建模和最优控制[J]. 控制理论与应用,2006,23(6): 93-98.
- [3] 丛爽,刘宜. 多轴协调运动中的交叉耦合控制. 机械设计与制造[J]. 2006(10): 166-168.
- [4] 曹洋,徐心和. 一种基于交叉耦合的速度控制器[J]. 东北大学学报: 自然科学版,2003,24(5): 421-424.