

具有输入饱和特性的中型足球机器人运动控制研究

何泽宇 付庄 曹其新 陈卫东

(上海交通大学机器人研究所和自动化研究所,上海 200030)

E-mail: zeyuhe@sjtu.edu.cn

摘要 研究了具有输入饱和特性的全自主中型足球机器人的运动控制问题,建立了足球机器人的运动学模型,基于 Lyapunov 稳定性条件研究了足球机器人对足球跟踪的自主控制算法,实现了足球机器人在赛场上的高精度运动控制,实验进一步证明了算法的鲁棒性。

关键词 足球机器人 运动控制 输入饱和 运动学模型 Lyapunov

文章编号 1002-8331- (2003)18-0105-03 文献标识码 A 中图分类号 TP24

Study on the Motion Control for the Middle Size Soccer Robot with the Property of Input-saturation

He Zeyu Fu Zhuang Cao Qixin Chen Weidong

(Research Inst.of Robotics, Research Inst.of Automation,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: The paper studies the motion control of the middle size autonomous soccer robot. The property of input-saturation of the controller is considered. An autonomous algorithm for football tracking is put forward based on the kinematics model of the robot and the Lyapunov stabilization condition so as to realize the precise motion control for the soccer robot. The robustness of algorithm is verified by the experiment.

Keywords: soccer robot motion control input-saturation kinematics model Lyapunov

1 前言

从 1992 年加拿大的 Alan Mackworth 教授提出机器人足球的最初设想,到机器人足球赛事的蓬勃发展,机器人足球研究已经成为机器人学和人工智能领域的一个研究热点^[1]。国外从 96 年就开始了相关问题的研究,与国外相比,我国在这一方向上起步较晚,还存在一定的差距。例如四腿组、小型组和中型组比赛,到目前为止我国几乎都采用国外的硬件平台,真正自主研制的足球机器人还不成熟。为了准备 2002 年 6 月在上海交通大学举办的全国性的足球机器人竞赛,我校自主研制了国内首台中型组全自主足球机器人。

机器人足球赛场的形势瞬息万变,因此对机器人的运动控制系统提出了非常严格的要求。不但要求机器人运动控制系统能实时采集信息,而且能进行快速响应与控制^[2],从而达到准确跟踪“速度与位置轨迹”的目的。

在实际系统中,受驱动系统功率的限制,机器人的速度、角速度必然会有上限,从而使控制器具有饱和特性。为此,该文研究了中型足球机器人目标跟踪过程中的运动控制问题,建立了足球机器人的运动学模型,探讨了在驱动系统具有输入饱和和限制条件下,运用 Lyapunov 稳定性条件研究了足球机器人对足球跟踪的自主控制算法,实现了足球机器人在赛场上的高精度运动控制,与文献[3]所提的算法相比,该算法简便、易

于实现。仿真和实验证明了算法的有效性,达到了快速性、稳定性的要求。

2 控制系统结构

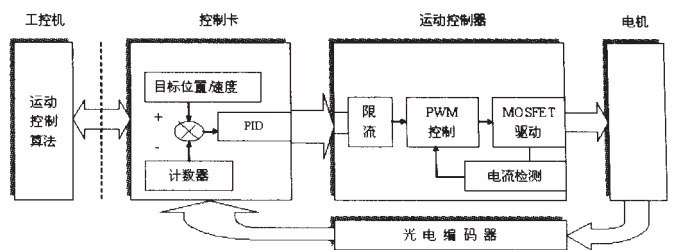


图 1 运动控制系统原理框图

国外中型组足球机器人以 ActivMedia 公司的 Pioneer 机器人为代表,它具有动作灵活的特点,但其底层控制不开放,对于踢球等应用,还需在硬件上进行改造,造价偏高。我们设计的足球机器人采用多环控制策略,从系统的底层物理层到最高决策层分别包含有电流环、速度环、位置环、视觉环和决策环。在运动控制方面,该足球机器人采用了双轮差速驱动加随动轮的三轮结构,控制上包括电流环、速度环和位置环。双轮差速驱动有

结构简单的优点,只要分别控制两个驱动轮的速度和转矩,就可实现运动规划和目标跟踪等控制任务^[4]。驱动轮电机采用Maxon直流伺服电机,伺服放大器可以进行速度、电流闭环控制,电流闭环具有限流、适应较大负载的作用。

光电编码器可以得到电机的位置、速度反馈,以便于伺服电机的速度闭环、位置闭环和足球机器人的状态估计。运动控制系统由伺服放大器、运动控制卡和一台工控机组成,控制系统原理框图如图1所示。

3 运动学模型

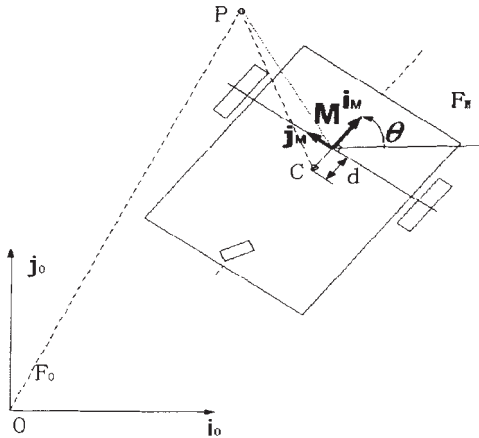


图2 机器人运动控制坐标系

设图2中 F_0 为固定坐标系、 F_M 为小车的移动坐标系、 C 为小车的控制点、 M 为两驱动轮连线的中心,则有

$$\vec{MC} = -d \cdot i_M$$

(x, y) 是矢量 \vec{CO} 的坐标(F_M 参考系),状态 $X_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} B_1(x)$

$$= \begin{bmatrix} -1 & y \\ 0 & -(d+x) \end{bmatrix} \mu \text{ 同上。}$$

向量 X 表示为 $[x, y, \theta]^T$,控制向量 u 表示为 $[v, \dot{\theta}]$ 或 $[v, \omega]^T$,其中 v 和 ω 是小车前进的直线速度和旋转速度,于是由文献

[5]有 $\dot{X} = B(X) \cdot u$ 。

$$\text{其中 } B(X) = \begin{bmatrix} -1 & y \\ 0 & -(d+x) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 小车受到非完整约束。}$$

4 状态反馈控制

由于小车的状态不是完全可控,因此先研究子系统:

$$\dot{X}_1 = B_1(X_1) \cdot u \quad (1)$$

于是,可将机器人跟踪足球的运动描述如下:

寻找控制量 u ,使系统状态满足

$$X_1 \xrightarrow{t \rightarrow \infty} (0, 0)^T$$

即要求该系统在原点处渐近稳定,为此需要设计其控制律(其中 t_r 为可接受的有限时间)。

4.1 考虑线性反馈

$$\text{设 } u = [v, \omega]^T = KX_1 \quad (2)$$

考虑Lyapunov方法,有 $V(X_1) > 0, \dot{V}(X_1) < 0$ 。

构造 $V = \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}y^2$,显然有 $V > 0$,由(2)式可知,存在线性

反馈

$$v = k_1 x, \omega = k_2 y \quad (3)$$

对 V 求导有:

$$\dot{V} = x\dot{x} + y\dot{y} = -vx - \omega y d \quad (4)$$

(3)式代入(4)式有 $\dot{V} = -k_1 x^2 - k_2 d y^2$,于是只要满足

$$k_1 > 0, k_2 = \text{sgn}(d) \quad (5)$$

就符合Lyapunov稳定性条件,使系统渐近稳定。因此,存在控制量(3)使式(1)得解。

系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = -k_1 + k_2 y^2 \\ \dot{y} = -k_2 y (d+x) \end{cases}$$

其中 $k_1 > 0, k_2 = \text{sgn}(d)$ 。

其仿真结果图3,系统很快收敛到原点($t < 0.3s$)。但控制器输出会很大,使这一算法的实际应用存在困难,因此实际系统应考虑系统的饱和特性,即:

$$-v_{\max} \leq v \leq v_{\max}, -\omega_{\max} \leq \omega \leq \omega_{\max} \quad (6)$$

4.2 基于输入有界的反馈控制

考虑实际输入的饱和特性(见式(6)),

设:

$$\begin{aligned} v &= v_r \cdot \Phi_1(x), \omega = \text{sgn}(d) \cdot \omega_r \cdot \Phi_2(y) \\ v_r &\leq v_{\max}, \omega_r \leq \omega_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

且 $\Phi_i(x) (i=1, 2)$ 满足:

$$\begin{cases} -1 \leq \Phi_i(x) \leq 1 \\ x \cdot \Phi_i(x) > 0 \end{cases} \quad (8)$$

则由(4)式,

$\dot{V} = -(x \cdot \Phi_1(x) \cdot v_r + \text{sgn}(d) \cdot d \cdot \omega_r \cdot y \cdot \Phi_2(y)) < 0$ 使系统(见式1)满足Lyapunov大范围稳定性条件, (x, y) 收敛于 $(0, 0)$ 。

满足条件(8)的函数有很多,例如 $\Phi_1(x) = \frac{2}{\pi} \arctan(x), \Phi_2(y) = \frac{2x}{1+x^2}$ 等。由式(1),(7)构成的状态反馈控制,考虑了输入

有界(式(6))的限制条件,则有:

$$\dot{X}_1 = \begin{bmatrix} -1 & y \\ 0 & d+x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & y \\ 0 & -(d+x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_r \cdot \Phi_1(x) \\ \text{sgn}(d) \cdot \omega_r \cdot \Phi_2(y) \end{bmatrix}$$

为了证明该算法的有效性,笔者进行了一系列的实验。

5 实验

实验中,球放在固定坐标系的原点,机器人的初始坐标 (x_0, y_0) 为 $(-1000, -800)$ (单位为mm),机器人控制点 C 与驱动轮轴线的距离 d 为30mm,控制器饱和度设为 $(0.2m/s, 0.5rad/s)$,采样周期5ms,控制函数为反正切。经过时间6.7秒(见图4)机器人运动到足球的位置 $(0, 0)$ 。图4~图6为考虑饱和和限制的实验结果。其中速度 v 的单位为 m/s ,旋转速度 ω 的单位为 rad/s 。

图3是未考虑输出饱和的控制器输出仿真结果,此时输出直线速度最高达到 $10m/s$,而受机器人驱动系统的限制,实际最高速度为 $2m/s$,因此不便于实际应用。图4考虑了输出饱和和限制的控制器输出,旋转速度曲线的波动与函数 Φ 的选择有

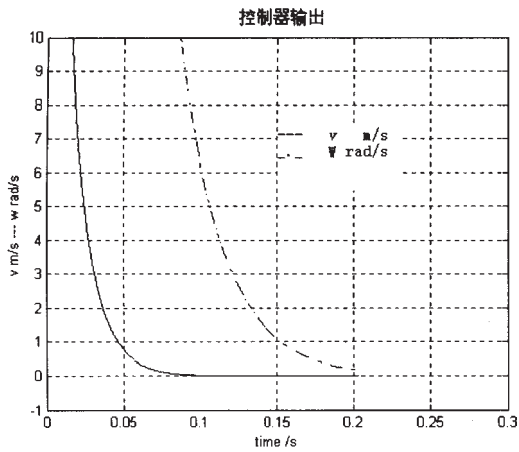


图3 无饱和和限制的控制器输出

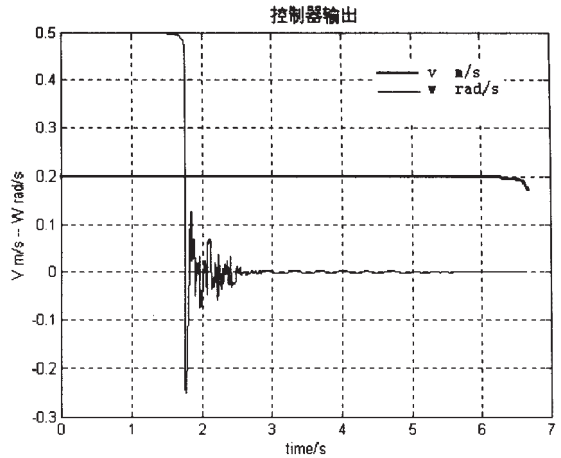


图4 考虑饱和和限制的控制器输出

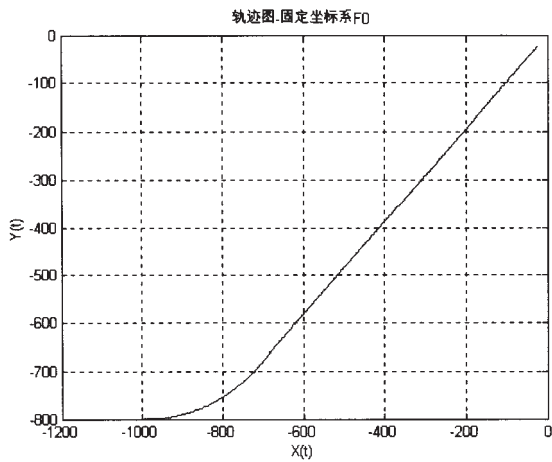


图5 轨迹图

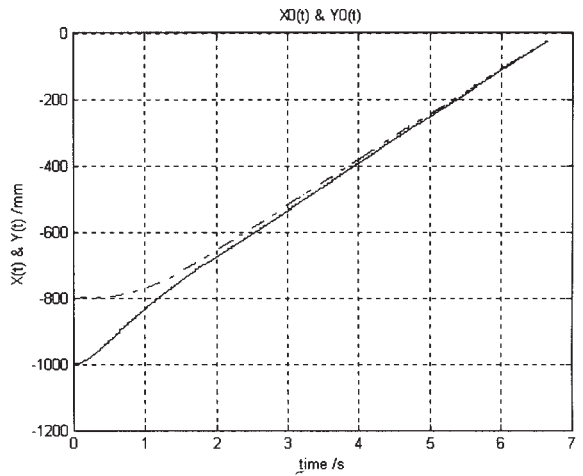


图6 $x(t)$ $y(t)$

关,如果选择适当可使系统在更少的调整周期内达到稳定。在实验中应用新的反馈控制策略,使控制器的直线速度输入小于 0.2m/s ,旋转速度的绝对值小于 0.5rad/s ,因此非常容易实现。图5给出了机器人运动的轨迹图。实验表明足球机器人对球的跟踪响应时间较短,行走路线较合理。实验结合了视觉和里程计输出信息,可以在控制周期内实时地计算出足球的位置,根据上文输入饱和反馈控制算法求出控制器的输出,无论从效率上还是从精度上都可满足足球跟踪的要求。实际上,还可通过进一步调整相应的参数,使其响应速度更快。

6 结论

在全自主中型组机器人足球赛中,如何使机器人快速运动到足球,从而实现进一步的规划策略,是一个很重要的问题。该文研究了具有输入饱和特性的全自主中型足球机器人的运动控制问题,建立了足球机器人的运动学模型,基于Lyapunov稳定性条件研究了足球机器人对足球跟踪的自主控制算法,该算

法较为简便。在刚刚闭幕的2002中国机器人竞赛中,该机器人获得全自主项目两项冠军。(收稿日期:2002年8月)

参考文献

- 1.徐旭,李实,叶榛等.A Survey RoboCup and the Research[C].In Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation 2000 ;1 :207~211
- 2.池瑞楠等.基于解耦控制的非完整移动机器人实时轨迹跟踪[J].机器人,2001,23(3)
- 3.M Bowling M Veloso.Motion control in dynamic multi-robot environments[C].In Proceedings IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation CIRA'99,1999 :168~173
- 4.葛文运等.转速、电流环并联结构直流调速系统的研究[J].电气传动自动化,1994 ;1136~1141
- 5.C Samson ,K Ait-Abderrahim.Feedback control of a nonholonomic wheeled cart in Cartesian space[C].In Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics Automation ,Sacramento ,1991