

摘要：欠驱动机器人是指独立控制输入量少于系统自由度的一类机器人，具有重量轻、成本低、能耗低等众多优点，目前已引起学者们的广泛关注。介绍了欠驱动机器人控制器设计的六类策略，分析了各类策略的应用及效果。如何将鲁棒控制与其它控制策略相结合，开发出更实用、性能更优越的控制策略，有待于进一步研究。

关键词：欠驱动机器人；非线性控制；非完整约束。

中图分类号：TP242 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2012)12-0007-04

收稿日期：2012.10.12

欠驱动机器人控制策略综述

董云云¹ 刘治品² 张兰兰¹ 于征华¹

1. 烟台南山学院 山东烟台 265713 2. 龙口市第一中学 山东烟台 265701

一、前言

欠驱动机器人是指独立控制输入量少于系统自由度的一类机器人。对欠驱动机械臂而言，则是指某个或某些关节不含驱动装置，即关节是被动的。欠驱动机械臂是一种平面两连杆机械臂，根据被动关节的不同可以分成两种类型：一种类型为在肩部关节处没有驱动器，在肘部关节处有驱动器的平面机械臂，称为 Acrobot 机器人^[1]；另一种类型为在肩部关节处有驱动器，而在肘部关节处没有驱动器的平面机械臂，称为 Pendubot 机器人^[2]。这两类系统是具有被动关节的非完整约束机器人，其非完整约束是由二阶微分方程表示，已被证明一般情况下是不可积的，因此是二阶非完整系统。

实现欠驱动机械臂的灵活控制具有一定难度，曾一度被认为是不可控的，但是根据最近的研究结果看，欠驱动机械臂的被动关节位置不仅是可控的，而且在一定条件下还可能实现操作空间的连续轨迹跟踪。目前，这两类欠驱动机械臂的动力学与控制问题得到广泛研究。

二、欠驱动机器人的特性

1、动力学模型

基于拉格朗日方程建立欠驱动机器人的动力学模型为：

$$\begin{bmatrix} D_{aa} & D_{ap} \\ D_{pa} & D_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_a \\ \ddot{q}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_a(q, \dot{q}) \\ C_p(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_a \\ \dot{q}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_a(q) \\ G_p(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， $D(q)$ —惯性矩阵；

$C(q, \dot{q})$ —科氏力、离心力项；

$G(q)$ —重力和其它力；

q —关节变量；

τ_a —控制输入；

a —表示驱动关节；

p —表示欠驱动关节。

把惯性矩阵 $D(q)$ 分块，可得如下形式：

$$D_{aa}\ddot{q}_a + D_{ap}\ddot{q}_p + h_a(q, \dot{q}) = \tau_a \quad (1a)$$

$$D_{pa}\ddot{q}_a + D_{pp}\ddot{q}_p + h_p(q, \dot{q}) = 0 \quad (1b)$$

其中， h_a, h_p 包含科氏力、离心力和重力项。

式(1a)为驱动子系统，式(1b)为欠驱动子系统，其特点为欠驱动关节上的主动力始终为零。式(1b)

还可以表示为一个二次动力学方程:

$$\psi(q, \dot{q}, \ddot{q}) = 0 \quad (2)$$

如果不存在函数 h 使 $\ddot{h} = \psi(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 成立, 则称式 (2) 为一个二次非完整约束。

上述动力学模型具有三个结构特性: 其一是惯性矩阵 $D(q)$ 是正定对称的; 其二是 $\dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q})$ 对于任意的 q 和 \dot{q} 均为反对称矩阵; 其三是大多数欠驱动机械臂都要受非完整约束。

2、动力学特性分析

欠驱动机器人要完成预定的操作, 控制环节起着至关重要的作用。设计控制方案时, 详细分析系统动力学特性是规划控制策略的前提。Bergerman^[3] 据欠驱动机械臂的主动和被动关节的动力学耦合特性, 提出耦合指数、全局耦合指数等的量化指标。Shin^[4] 分析了欠驱动机器人的动力学, 在一定假设基础上提出笛卡儿空间反馈线性化解耦动力控制器, 解决了动力学奇异问题。Nakamura^[5] 首次从非线性动力学角度分析了平面欠驱动 2R 第二被动关节机器人的非线性特性。

3、系统可控性分析

在欠驱动机器人系统的控制中, 首先涉及到的是可控性问题。控制系统的可控性是输入影响系统内部状态的问题, 它表明控制输入驾驭状态运动的能力, 可分为线性可控性、非线性可控性和结构可控性。Sussmann^[6]、Bianchini^[7]、Hermann^[8] 等人的早期研究从数学角度为欠驱动机器人的可控性分析提供了理论基础。Sussmann^[9] 提出了系统在平衡点处局部可控的充分条件, 即著名的少时间局部可控性, 此条件意味着仅需要局部操作就可完成系统在两个充分接近的状态之间的转换, 但这个条件还是比较严格的。Lewis 和 Murray^[10] 在 Sussmann 工作的基础上提出局部形可控性条件。

三、控制策略分析

欠驱动机器人在动力学的形式上与一般机器人系统是一致的, 但控制上却有很大不同, 这也是欠驱动机器人系统控制策略设计的主要难点。由于不能满足 Brockett 条件, 欠驱动系统不可能存在有效的定常光滑的状态反馈控制。目前国内外关于欠驱动机器人的

控制策略很多, 主要可以归为六类:

1、能量方法

能量方法是基于能量守恒的原理来设计控制器。根据系统的动力学方程, 可得到系统的能量函数 E , 为了保证系统在摆起过程中能量不断增加, 必须使选择的控制力矩与摆的角速度同符号, 同时为了保证能量持续且平稳地增加, \dot{E} 的增长趋势是越来越缓慢的。通过整理, 我们可以得到关系式:

$$\frac{1}{2} \theta_2 \dot{q}_2^2 = \theta_2 g [1 - \cos(q_2)] \quad (3)$$

当一个关节到达竖立位置后, 另一个关节将沿顺时针或逆时针方向不停摆动直至到平衡点位置为止。

2、部分反馈线性化

部分反馈线性化是针对系统不能完全反馈线性化但可以通过一个可逆变换控制实现部分线性化的过程。全驱动机器人系统的反馈线性化的控制策略不再适用于欠驱动机器人, 但由于惯性矩阵 $D(q)$ 的正定特性, 保留了部分反馈线性化特性。

3、无源性方法

无源性方法是欠驱动系统所具有的无源性角度来设计控制器。基于物理系统的动力学, 不管是线性的或者是非线性的, 都满足下面形式的能量守恒方程:

$$\frac{d}{dt} [\text{储存的能量}] = [\text{外部功率输入}] + [\text{内部功率产生}] \quad (4)$$

可以用输入 U 与输出 y 的标量积表示外部输入能量。满足: $\dot{v}_1(t) = y_1^T u - g_1(t)$ 且 v_1 有下界, $g_1 \geq 0$ 的系统称为无源系统。

4、混杂控制方法

混杂控制方法是一种开关式控制方法, 其主要应用于平衡控制器的设计。针对非线性和欠驱动机械系统设计的混合切换控制策略, 给出所建立混合控制律的充分条件和稳定判据, 并检测了应用系统的鲁棒性。

5、平均值法

平均值法是通过解非线性方程来实现补偿控制的有效方法。通过平均值法对模型进行简化处理, 得到平均值系统, 通过分析系统的动力学机构, 设计控制器来实现对欠驱动关节的控制。此方法已成功应用于

具有非驱动关节的水平两自由度机械手。

6、智能控制方法

智能控制是一类无人干预即能驱动智能装置而实现自动控制目标的新技术。滑模变结构和自适应相结合的控制策略在欠驱动机器人控制中的应用，结合点有两个：

其一是应用滑模变结构实现系统的降维，在此基础上设计自适应律。此策略使不确定约束仅取决于系统的惯量参数，在李亚普诺夫意义上建立了全局渐近稳定性；

其二是基于聚合式变结构控制实现两级滑模面的控制器设计，针对第二层滑模面设计了自适应律。模糊控制、变结构控制和最优控制相结合的策略已有成功应用于欠驱动机器人。另外针对欠驱动机器人设计的基于神经网络的位置开环控制方法，实现了非驱动关节的位置闭环控制。

基于能量的方法设计的摇起器和 LQR 方法设计的平衡器在 80s 左右能使 Pendubot 稳定在其向上的不稳定的平衡点，但此方法存在切换力矩大、调节时间长的缺点；基于部分反馈线性化设计的摇起器和 LQR 方法设计的平衡器在 25s 左右使其稳定，但此方法虽然切换力矩较小，但 LQR 方法存在线性范围窄的缺点；基于模糊技术设计的控制器在 3s 左右使其摇起、12.5s 左右使其平衡，但模糊技术是基于经验的，难于实现；应用变结构控制设计的控制器在 6s 左右就可使其稳定，但变结构控制固有的抖振问题难于克服；滑模和自适应相结合设计的控制器，这种方法在 6s 使其稳定，随着研究的深入，把鲁棒控制和其他控制策略相结合，开发出更实用、性能更优越的控制策略，有待于进一步研究。

四、展望

各种控制方法的快速发展及广泛应用，使非线性系统的控制领域的研究取得了一定的成果，但仍存在许多问题需要解决：

1、目前大部分文献都是针对欠驱动机器人的个例展开研究，还没有开发出适用于一类欠驱动机器人的通用方法，因此，有待于继续寻找和摸索适合欠驱动

机器人自身特点的控制策略；

2、单个机器人应付复杂工作环境的能力毕竟有限，多机器人协调操作将是未来发展趋势；

3、结合多种控制技术，开发适于欠驱动机器人的控制策略，实现系统运动规划和轨迹跟踪，是欠驱动机器人研究的未来趋势。

参考文献

- [1] Spong M. W. The swing up control problem for the acrobat[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1995,15(1):49 ~ 55
- [2] 傅雪东, 裴海龙, 吴国钊. Pendubot 的基于能量的非线性控制[J]. 机器人, 2000,22(6):451 ~ 456.
- [3] Bergerman M, Lee C and Yangsheng Xu. Dynamic Coupling of Under-actuated Manipulators[A]. Proc.of the IEEE Conference on Control Applications[C].1995.500 ~ 505.
- [4] Jin-Ho Shin and Ju-Jang Lee. Dynamic Control of Underactuated Manipulators with Free-Swinging Passive Joints in Cartesian Space[A], Proc.of IEEE international Conference on R & A[C], Albuquerque, New Mexico, 1997.3294 ~ 3299.
- [5] Nakamura Y.Suzuki T and Koinuma M. Nonlinear Behavior and Control of A Nonholonomic Free-Joint Manipulator[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13(6): 853 ~ 862.
- [6] Sussmann H J. Lie Brackets and Local Controllability: A Sufficient Condition for Scalar-input System[J].Control and Optimization SIAM J.1983, 21(5):686 ~ 713.
- [7] Bianchini R M and Stefani G. Controllability Along a Trajectory: A Variational Approach[J].SIAM J contr Optimiz, 1993, 31(4):900 ~ 927.
- [8] Robert Hennann and Arthur J, Krener Nonlinear controllability and Observability[J].IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, AC.22(5).
- [9] Sussmann H. A General Theorem on Local Controllability[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 1987, 25(1):158 ~ 194.
- [10] A D Lewis, R Murray. Configuration controllability of simple mechanical control systems[J]. SIAMJ. Contr Optimiz, 1997, 35(3):766 ~ 790.

Survey of control schemes for underactuated robots

DONG Yun-yun¹, LIU Zhi-pin², ZHANG Lan-lan¹, YU Zheng-hua¹

(1.Yantai NanShan University, Yantai 265713, China; 2.

Longkou First High School, Yantai 265701, China)

Abstract: Underactuated robots are referred to as a kind of mechanical systems with fewer control inputs than degrees of freedom, which have many advantages such as light weight, low cost and low power consumption. More and more researchers have paid their attention to this new field recently. Six kinds of schemes for underactuated robots in the controller design are introduced in this paper, and the applications and the effects of these schemes are analyzed. How to combine robust control with these schemes to employ novel schemes which can improve the utility and the performance for further study needs to be studied furtherly.

Keywords: under-actuated robots; nonlinear control; non-holonomic

作者简介

董云云, 烟台南山学院, 讲师, 研究方向: 欠驱动机械系统

通信地址: 山东省烟台龙口市烟台南山学院东海校区
计算机与电气自动化学院 邮编: 265713

电邮: dyyun82860948@163.com

刘治品, 龙口市第一中学, 中学二级, 研究方向: 教育教学

张兰兰, 烟台南山学院, 助教, 研究方向: UPS 监控

于征华, 烟台南山学院, 助教, 研究方向: UPS 监控